

# 第一章 概 述

火炮是人类兵器发展历史上出现最早的热兵器。在火炮技术发展的几个世纪的漫长岁月中，始终贯串着威力与机动性矛盾的斗争和发展。反后坐装置就是为了解决火炮威力与机动性的矛盾而出现在火炮上的。火炮上有无反后坐装置是区别它是刚性炮架还是弹性炮架的主要标志。火炮技术发展过程中，由刚性炮架过渡到弹性炮架是带有划时代意义的转变。

现代的各种火炮（地面的、舰上的、坦克上的）大多都是弹性炮架的火炮，它们都有结构合理，性能良好的反后坐装置，保证了火炮总体上的优良的战术技术性能。反后坐装置在火炮上有着十分重要的作用，它的结构和工作特性的好坏，对火炮总体的结构和性能有着十分巨大的影响。每一个从事火炮研究设计的人员，都应该对反后坐装置的设计给予高度的重视，不仅要从事火炮装置的内部结构上认真细致地分析计算，达到尽善尽美，还要从外部与火炮总体和其它各部件的关系上在性能指标和主要参数上求得协调一致。这就要求十分熟悉火炮反后坐装置的设计理论，对反后坐装置在火炮总体中所处的地位和作用有较深刻的理性认识。

## 第一节 炮架的发展及反后坐装置在火炮上的出现

早在十三世纪就有了关于火炮使用的历史记载。它在以后的各种战争中的使用和发展，经历了几百年的历史，可以说是比较古老的一种兵器。人类科学技术的发展不断更新火炮的技术，使它不断以新的面貌和新的性能在战场上发挥它的作用与优势，以致于在导弹、核武器大量装备的今天，仍为必不可少的基本装备。火炮技术长足进步和发展是在十九世纪下半叶才开始的。这一时期火炮技术发展有两个明显的分界标志：一个是火炮的发射药由无烟火药取代了有烟火药，另一个是火炮的炮架结构由弹性炮架取代了刚性炮架。

十七世纪以前，尽管各国的匠师们创造出了形形色色大大小小的火炮，有的甚至是闻名于世的，但就火炮技术的基础来说仍然是十分落后的。例如：炮管是滑膛的，由铁或青铜铸造而成，只能发射石制或铁制的球形弹丸；发射药是黑火药由炮口前装；弹丸里以黑药为炸药；火炮的炮架则主要是框架式或架座式的，只能用来支持或安装炮身。这时以前，火炮虽然已在战争中较普遍的使用，但就性能来说，射程仅数百米，弹丸杀伤威力不大，火炮射速很慢、精度不高。十八世纪以后，欧洲的资本主义开始了发展，从1768年瓦特发明蒸汽机开始，在科学技术不断发展的同时，为了极力向外扩张其势力，资本主义国家都非常重视火炮技术的发展。因此，火炮的威力开始有了较大的提高。例如：1866年前后硝化棉火药达到了实用水平，不久硝化甘油火药也研究成功，无烟火药逐渐取代了黑火药；冶金技术的发展，使火炮采用了钢质炮身，从而大大提高了初速和射程；硝化甘油最早（1863年）曾被诺贝尔用作炸药，但随后不久就有了苦味酸、胶质代拿买、阿马图及梯恩梯等猛炸药出现，加上身管上早已出现了膛线，球形弹变成了

长形弹，弹丸的爆炸杀伤威力也得到了极大的提高；由于机械加工工业的发展，火炮的结构也日趋复杂，后装螺式或楔式闭锁炮门的采用，提高了火炮的发射速度；高低机、方向机的安装，扩大了火炮的射界，提高了瞄准的精度。这些都标志着火炮威力的提高。

但是直到十九世纪末以前，火炮的炮架都是刚性的，图 1-1 至图 1-4 是各种刚性炮架的典型结构。

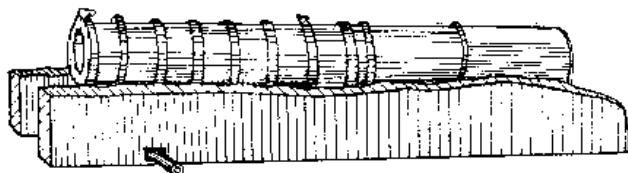


图1-1 14世纪的框形炮架

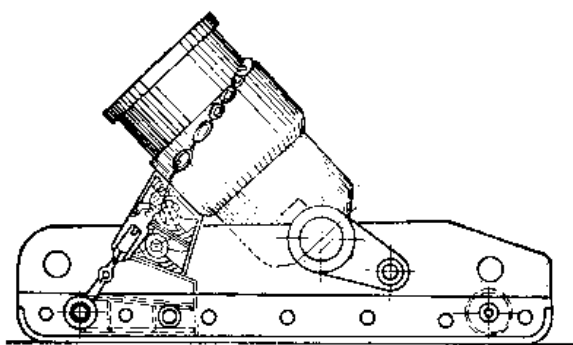


图1-2 臼炮的架座式炮架

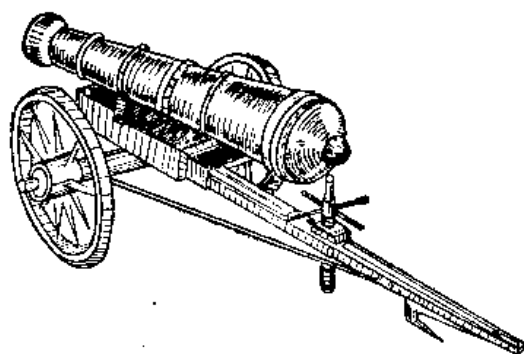


图1-3 1689年明武成永固大将军炮

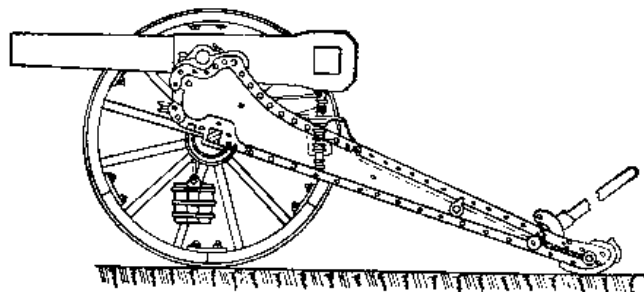


图1-4 1877年俄轮式炮架

这些炮架主要是用来在射击时支持炮身和便于野战时搬移或运动火炮。它们的共同特点是炮身直接刚性的固定在架座上或通过耳轴（以便使炮身俯仰）刚性地连接在炮架上。这种炮架在射击时将承受全部的火药气体对炮身的作用力。在这样大的力的作用下，全炮将向后移动相当的一段距离，只有借助地面的摩擦力才能使火炮停止后坐，然后由人再把火炮推回到原来的发射位置，准备下一发的发射。显然炮架的这种受力方式是很不理想的，因为炮身在轴向上受力  $P_{pr}$  的大小接近于炮膛断面积与火药气体压力的乘积。火药气体压力在射击时的变化是十分剧烈的，它的作用时间短，变化幅度大，最大值极高。在这样的受力条件下，为了保证火炮的强度，势必使炮架尺寸加大和变得十分笨重。但是火炮在战场上较广泛地使用改变了地面部队作战的方式，并要求火炮适应不同的作战需要。团和师属的炮兵要求野战火炮较轻便和机动性好，以便跟上部队的作战行动并且及时地提供强大的火力支援。这样一来，火炮的威力与机动性的矛盾开始突出了起来。

随着机械加工和热处理工艺的发展, 以及水力学和水力机械的进步, 人们采取了各种办法和措施来缓冲火炮在射击时的受力。在经过一定的演变以后, 采用液压式驻退机和弹簧式复进机这一典型反后坐装置结构的弹性炮架火炮最终出现了。根据文献资料介绍最早出现于世界上的第一门火炮是1889年在巴黎展览会上展出的法国设计的弹性炮架火炮。据说俄国在1877年以后就已经设计和制造了这种型式的弹性炮架火炮。总之, 在这以后世界各国都相继发展并且装备了这种炮身沿炮身轴线后坐的火炮。图1-6.

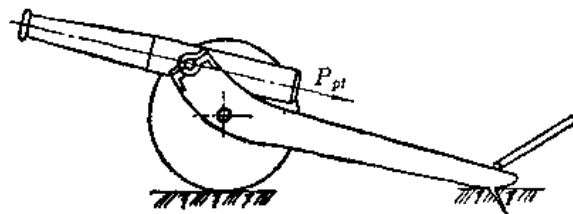


图1-5 刚性炮架火炮的受力图

就是当时这种弹性炮架火炮的典型结构。由于火炮采用了弹性炮架的结构, 极大的减小了火炮在射击时的受力, 因而在解决火炮威力与机动性矛盾上实现了一次质的飞跃。直到今天, 除了某些特殊用途的火炮如迫击炮、无后坐炮和小口径航炮以外, 其它所有的世界上各种口径和用途的火炮都是弹性炮架的火炮。

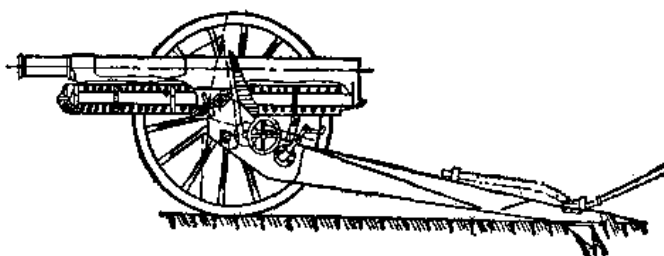


图1-6 俄1902年3英寸速射野炮

弹性炮架的出现使火炮在射击时的受力减小到原来的十几分之一至几十分之一, 为火炮技术的进一步发展, 火炮威力的进一步提高创造了条件。经过第一次和第二次世界大战, 火炮的口径、初速、射程、弹丸威力、射速和精度都得到了大幅度的提高。现代的地面火炮、高射火炮、反坦克火炮、坦克炮、铁道炮、岸炮、舰炮都已经形成了各种类型和用途的火炮系列。图1-7, 1-8是现代地面火炮的简图。

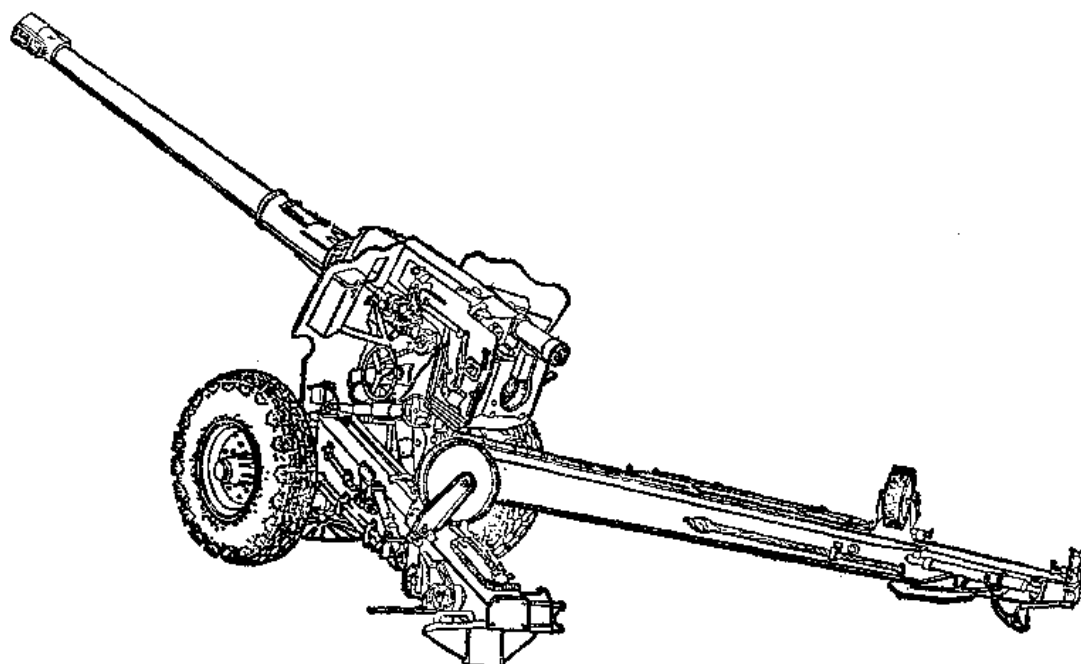


图1-7 我国60式122加农炮

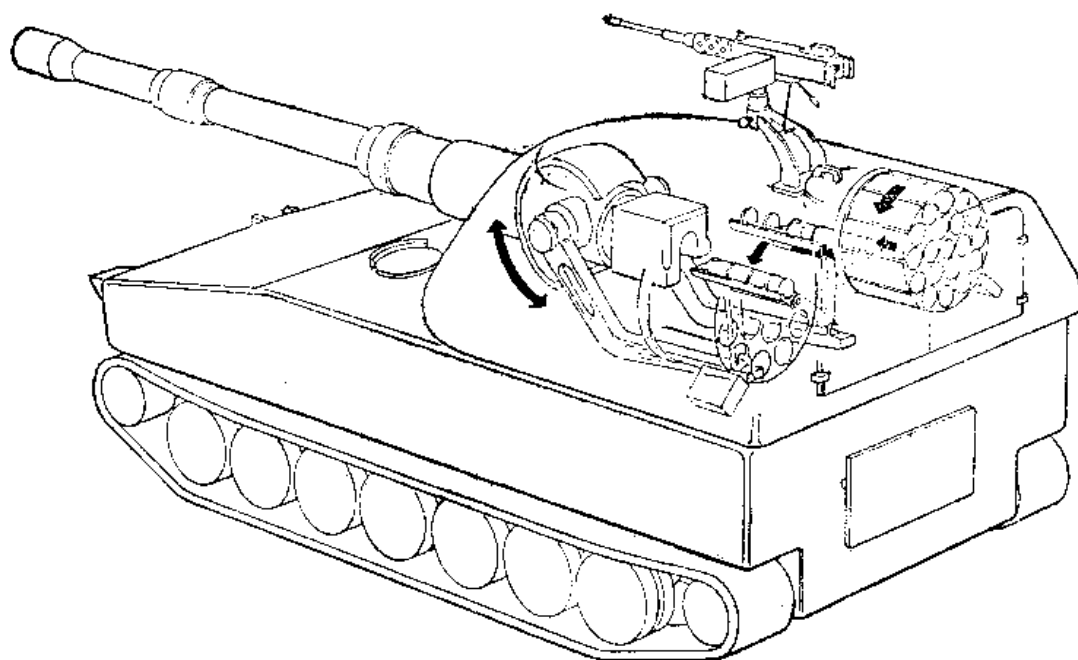


图1-8 美国155自行榴弹炮

总之，无烟火药取代有烟火药，弹性炮架取代刚性炮架，是火炮技术发展史中具有划时代意义的质的飞跃。反后坐装置是实现炮身与炮架弹性连接，保证射击时炮身沿其轴线后坐的基本部件，它是火炮基本矛盾——威力与机动性矛盾斗争的产物。现在，反后坐装置已经是各种火炮上必不可少，并且极大影响其战术技术性能的主要部件。

## 第二节 反后坐装置在火炮上的地位和作用

反后坐装置在火炮上出现已有近一百年的历史，火炮技术的发展越来越证明它在火炮上的重要作用，它不仅影响火炮受力的大小和规律，还影响火炮的射速和精度。和刚性炮架相比较，弹性炮架上反后坐装置的作用概括起来主要有三个方面：1. 可以极大地减小火炮在射击时的受力；2. 把射击时全炮的后坐运动限制为炮身沿炮身轴线的后坐运动，并且在射击后自动使其恢复到射前位置；3. 把无法控制的全炮后坐变成可以控制的炮身后坐。反后坐装置的这些作用是本书阐述内容的核心，因而只能在掌握了全书的内容以后才能更深刻地理解反后坐装置的作用。现在仅对这些作用作些概要的说明：

采用了反后坐装置以后，炮身通过驻退机和复进机与炮架弹性地连接，因而允许炮身与炮架之间有相对的运动。发射时，火药气体作用于炮身的向后方向的力  $P_{pr}$  使炮身产生后坐的加速度，并通过驻退机和复进机进行缓冲，把力传到炮架上。因此，弹性炮架所受的力已经不再是炮膛合力  $P_{pr}$ ，而只是驻退机和复进机等提供的总阻力——后坐阻力  $R$ 。反后坐装置可以使炮架的受力减小到炮膛合力最大值  $P_{pr_m}$  的十几分之一到几十分之一，如表 1-1 所示。

反后坐装置实质上是一个缓冲装置。它把  $P_{pr}$  在很短的时间内所造成的炮身后坐运动，在  $P_{pr}$  的作用结束以后的较长时间内，由驻退机和复进机所提供的阻力逐渐制动下来，最终停止在一定的后坐长度上。也就是说通过反后坐装置的缓冲作用，把本来作用



表 1-1

火 炮	$S$ (分米 <sup>2</sup> )	$P_m$ (公斤力/厘米 <sup>2</sup> )	$P_{ptm}$ (吨力)	$R_m$ (吨力)	$R_m/P_{ptm}$
63-37G	0.110	2800	~30.8	~2	1/15
59-57G	0.266	3100	~82.5	~5.1	1/16
56-85 J	0.582	2550	~148.5	~7.5	1/20
59-130 J	1.394	3150	~132.5	~23.0	1/19

于炮身的变化剧烈而作用时间很短的力  $P_{pt}$  变换成了作用时间较长, 幅度变化不大, 最大值很小的力  $R$  传给了炮架。只要合理地设计反后坐装置, 后坐阻力的变化规律  $R-t$ ,  $R-x$  以及后坐长度都是可以根据要求确定的。也就是说射击时火炮的受力和运动是可以控制的。

由于炮身在射击时只是沿摇架在其轴线方向上后坐, 而且在后坐终了时复进机又能使其迅速回复到射前位置; 又由于传给整个火炮的力不大, 在火炮配用了一定大小的驻锄条件下, 射击时火炮可以保持其静止性或最多有少许跳动。这就使得火炮的瞄准不会有较大的破坏, 从而为提高射速创造了条件。如果火炮配有一定的半自动或自动的装填机构, 射速可以达到每分钟十几发到数百发的水平。

总之, 反后坐装置给人们提供了射击时控制火炮受力的手段。这是因为弹性炮架的火炮射击时受力的大小与后坐阻力  $R$  相同, 而后坐阻力主要是由反后坐装置提供的。只要设计好反后坐装置, 控制了后坐阻力  $R$  的变化规律, 也就有效地控制了火炮的受力和运动, 并且可以满足总体设计对火炮静止性和稳定性的要求, 为提高发射速度和解决炮架的强度与刚度问题创造条件。

### 第三节 反后坐装置设计研究的内容和任务

反后坐装置设计的理论就是运用基础理论和实验技术对火炮发射时反后坐装置工作的全过程作定量的、规律性的分析研究, 找出它的便于应用又符合实际的设计计算方法。在内容上它包括力学分析, 结构分析和设计计算, 以及实验研究等方面。

力学分析主要是研究在各种情况下后坐和复进中全炮和后坐部分的受力规律和运动规律, 从而合理地提出对反后坐装置设计应满足的力学要求, 或者对于各种反后坐装置的具体结构, 得出准确地计算全炮和后坐部分受力和运动的方法。

对反后坐装置进行结构分析和设计计算, 主要是研究现有各种反后坐装置和炮口制退器在结构上和工作上的特点, 找出具体结构尺寸与后坐复进中受力与运动的关系, 从而合理地选择反后坐装置和炮口制退器的结构型式, 尽可能适宜地确定各部分的尺寸, 使它满足不同火炮总体设计的要求。

火炮反后坐装置的实验研究, 主要是利用各种测试手段, 直接对反后坐装置各部件在工作时的各种动态参量进行测定, 揭示实际的各物理量的变化规律, 用于检验反后坐装置设计理论的正确性, 找出不足, 推进设计理论的发展, 也可以用于检验设计出的反后坐装置工作性能的好坏, 便于完善和修改设计。

在一门新火炮的设计过程中, 反后坐装置的设计通常是在外弹道、内弹道和炮身设计完成以后进行的, 它应完成的任务是:

1) 正确处理火炮总体上威力与机动性的矛盾, 在火炮总体设计中, 合理地选择反后坐装置和炮口装置的类型和结构, 确定主要外形尺寸和基本技术参数;

2) 根据所确定的反后坐装置和炮口装置的主要技术参数, 制定合理的后坐与复进的受力和运动规律, 在此基础上详细地设计驻退机、复进机和炮口制退器, 完成产品图纸和其它技术文件;

3) 为全炮的动力学分析, 为炮架各零、部件的受力分析及其强度、刚度的计算提供数据。

从事火炮研究与设计的工作者不应停留在原有理论与实践的水平上。由于历史的原因, 原有的反后坐装置设计的理论是比较陈旧的, 试验的水平也不高。在测试技术迅速发展和电子计算机普及应用的今天, 进一步探求反后坐装置和炮口装置工作的内在规律, 应用数学和力学的基本理论, 进一步从本质上阐明这些规律并且在此基础上发展和完善反后坐装置的设计理论, 找到更好的反后坐装置设计方法, 已是当今迫切需要解决的任务。本书在内容上略有更新只是朝这一方向迈出的第一步。

此外, 进行反后坐装置新原理、新结构、新元件的研究, 探求更好地解决火炮威力与机动性矛盾的办法, 也是火炮技术工作者的一个长期的任务。本书对这些内容也作了一些介绍。

## 第二章 反后坐装置的结构分析

### 第一节 概 述

反后坐装置是为解决火炮的威力与机动性矛盾而专门设置的一个重要部件。它与摇架结合构成了起落部分的基体,因此它的结构,不仅直接影响炮架的受力,而且直接影响火炮总体布置和摇架的结构。如何根据火炮总体及战术技术要求,合理地选择反后坐装置结构是设计者首先面临的问题。为此,不仅要熟悉各种类型反后坐装置的结构,而且要熟悉它们在总体上,受力上,工作上和计算上的特点。这就要对现有反后坐装置的结构进行深入地分析研究,以求掌握反后坐装置结构设计的普遍规律。本章将对已有的一些典型的反后坐装置的结构作简要的介绍,供设计反后坐装置时参考。

反后坐装置要完成三项任务,这些任务通常是由反后坐装置相应的三个部分结构来完成的。

1. 控制火炮后坐部分按预定的受力规律和运动规律后坐,保证射击时火炮的稳定性和静止性。并且在后坐运动中不可逆地将后坐能量的大部分消耗掉,把后坐限制在规定的长度上。这项任务通常是由驻退机来完成的。液压式驻退机以液体为介质,后坐时靠活塞挤压工作腔内的液体使其流过小孔来提供后坐阻力并将后坐部分的后坐动能转化为液体高速流动的动能,最后以热的形式散失掉。

2. 在后坐过程中贮存一部分后坐能量,以备后坐终了将后坐部分推回到发射前的位置。这个任务是由复进机完成的。复进机利用弹簧或气体来贮存能量。

3. 控制火炮的后坐部分按预定的受力规律和运动规律复进。这个任务主要是由复进缓冲器或复进节制器来完成的。大多数情况下驻退机也参与复进的节制作用。

图 2-1 所示为在理想的后坐和复进状态下,反后坐装置各部分力的变化规律和后坐部分运动的规律。后坐阻力与路程关系曲线下方的面积等于后坐时炮膛合力对后坐部分所做的功(它近似等于自由后坐所获得的最大动能)。在后坐时只有复进机力  $P$  曲线相对应的那一部分能量被储存起来,其余能量绝大部分被驻退机液压阻力  $\phi_0$  的功所消耗,还有一部分被摩擦力的功所消耗。在复进时,复进机储存的能量一部分用于克服后坐部分重量分量  $Q_0 \sin \varphi$  和摩擦力  $F + T$  的功,而复进剩余能量,则在整个复进过程中被驻退机和复进节制器液压阻力  $\phi_f = \phi_{0f} + \phi_{ff}$  的功所消耗掉。综观后坐和复进的全过程,可见火炮发射时的全部后坐能量最终全部被反后坐装置液压阻力及摩擦力的功所消耗掉。其中大部分变成热,从而使反后坐装置的液体和其他各部分的温度升高,最后散失在大气中。

反后坐装置三方面的作用是有机的联系在一起,缺一不可。它的相应的三部分结构(驻退机、复进机、复进节制器)也构成了火炮反后坐装置部件的整体。但是它们可以用不同的方式组合起来。一种常见的方式是驻退机和复进节制器构成一个部件,而复进机成为单独的一个部件。另一种方式是驻退机和复进机联合为一体构成一个部件(通

常称为有机联合式反后坐装置), 另外再设复进制动器以便在复进末期缓冲后坐部分对摇架的冲击。设计中具体采用哪种方式需根据总体布置的要求来决定。

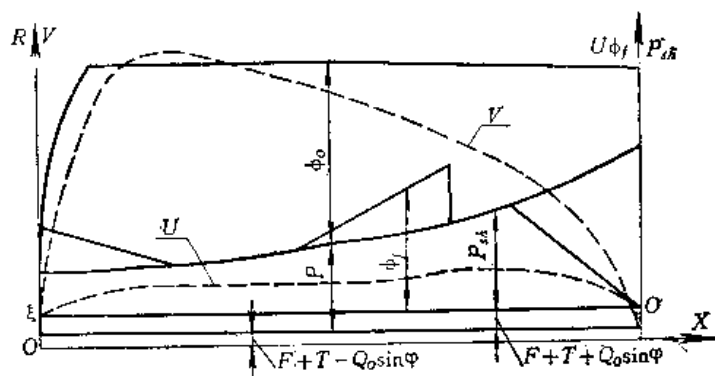


图2-1 后坐与复进中力及运动的规律

从火炮的工作特点及反后坐装置要完成的任务来看, 反后坐装置的工作条件是十分恶劣的。首先, 每一射击循环工作时间十分短暂, 后坐运动时间约为  $0.1 \sim 0.3$  秒, 复进运动时间约为  $1 \sim 3$  秒, 作用力和气体、液体压力变化剧烈; 在后坐复进中要吸收大量的热, 使反后坐装置的温度不断升高。它必须能适应各种作战环境保证可靠稳定的工作。它必须在空气湿度大于  $60\%$  的环境里能长期保管和随时可供使用。综上所述它必须满足以下三个基本要求:

1. 作用确实可靠和稳定。
2. 具有身好的适应性。
3. 能长期保管, 并且便于使用、生产和维修。

要完成上述各项任务, 满足基本要求, 反后坐装置还必须有以下辅助装置: 紧塞具、液量调节器、液量气压检查和补充装置以及后坐长度变换器等。下一节将开始具体介绍各种反后坐装置的结构。

## 第二节 复进机的类型和结构

按储存能量的方式的不同, 常见的复进机有弹簧式和液体气压式两种类型 (有的航空炮采用火药气体复进机, 有的舰炮采用气压式复进机)。

### 一、弹簧式复进机

小口径自动武器及小口径高炮多采用弹簧式复进机, 如 65-37G 和 59-57G。图 2-2 就是 59-57G 的复进机解剖图。复进簧套在身管的外面, 其前端顶在与身管连接的螺环上, 后端顶在摇架的环形肩部上。螺环外面镶有铜套, 可在摇架颈筒内滑动。

弹簧式复进机还可以与同心式反后坐装置配合使用, 它的驻退机和复进机全部套在身管外部。其结构见图 2-3。

复进簧多为矩形断面的圆柱螺旋弹簧, 这是为了在有限的外廓尺寸范围内能提供较大的抗力。通常矩形断面的边长比  $\frac{a}{b}$  在  $1 \sim 2$  之间 ( $a$  指垂直于弹簧轴线的边)。

65-37G 复进簧的  $\frac{a}{b} = 1.45$ , 59-57G 复进簧的  $\frac{a}{b} = 1.042$ 。复进簧的材料一般选用 60Si2A, 70Si2A 或 65Si2WA 等, 其许用应力  $[\tau] = 100$  公斤力/毫米<sup>2</sup> 左右。

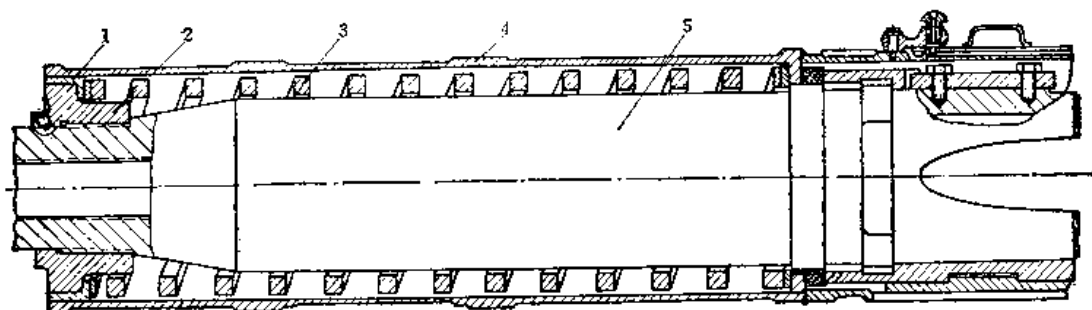


图2-2 59-57G的弹簧式复进机

1—铜套；2—螺环；3—复进簧；4—摇架；5—身管。

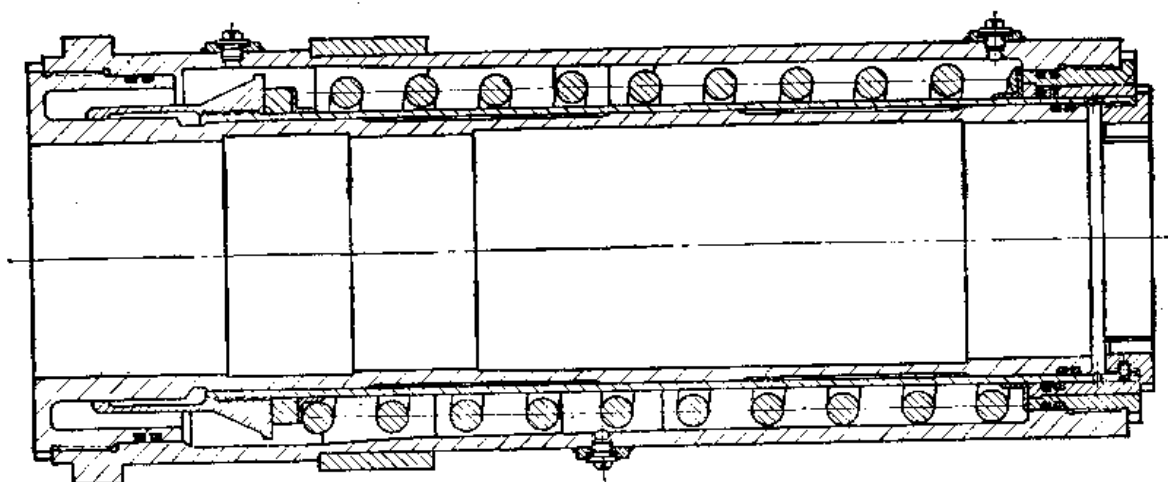


图2-3 带弹簧式复进机的同心式反后坐装置

弹簧式复进机的主要优点是结构简单, 工作可靠, 性能不受温度的影响, 受轻微的损伤后仍可暂时使用, 维修简单; 缺点是重量大, 不便于调整复进速度, 长期使用易疲劳。

## 二、液体气压式复进机

液体气压式复进机是目前各种火炮普遍采用的一种类型, 它以气体作为储存能量的介质, 而以液体作为传递力和密封气体的介质。由于在各种火炮上工作条件的差异, 液体气压式复进机的结构也各不相同。

### 1. 杆后坐复进机

图 2-4(I) 是 60-122L 的复进机结构图, 因为它是杆后坐的, 所以只用了两个筒。为减少密封液体的用量和外廓尺寸, 将内外筒偏心配置, 并把内外筒的流液通孔开于内筒后端的下方或侧方。为便于更换活塞头上易磨损的紧塞元件, 内筒可以从复进机上分解下来。因此内筒以螺纹拧在前盖上, 而内筒后端以动配合套在后盖的凸缘部上。前后盖

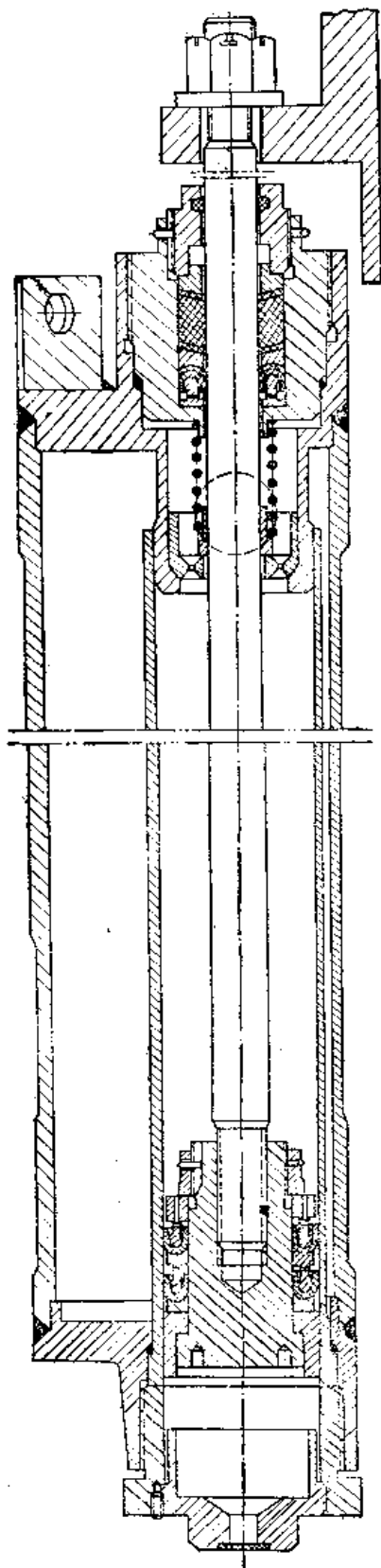


图2-4(I) 杆后坐复进机

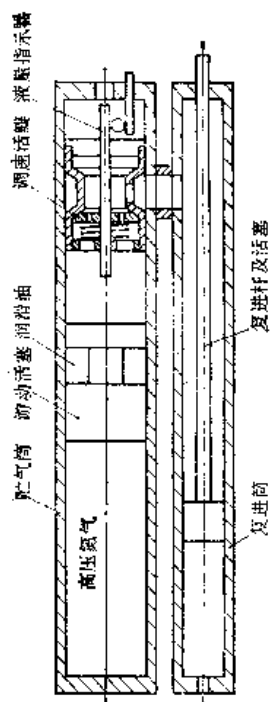


图2-4(I) GC-45 的杆后坐复进机

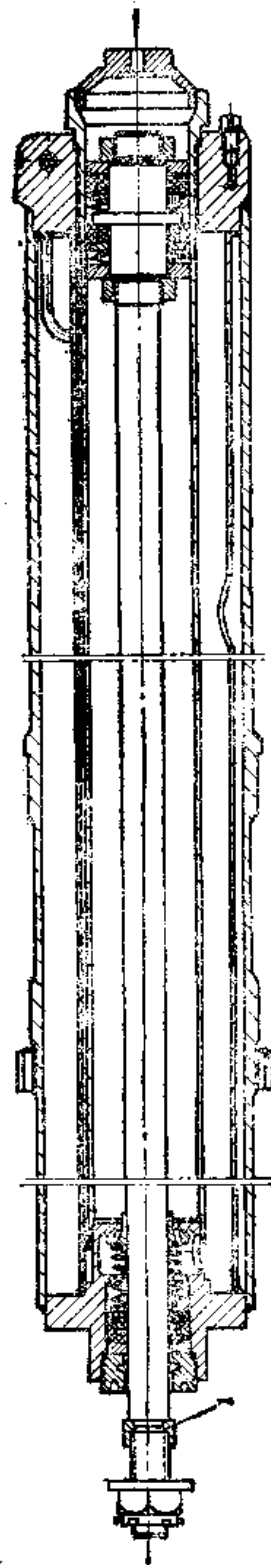


图2-5 56-85 J 复进机结构图  
1—保险螺帽。

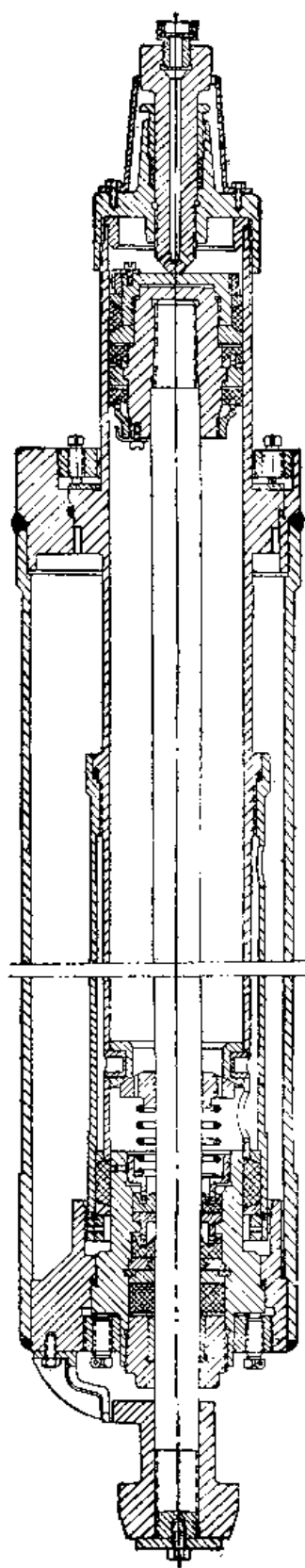


图2-6 59-130 J 复进机结构图

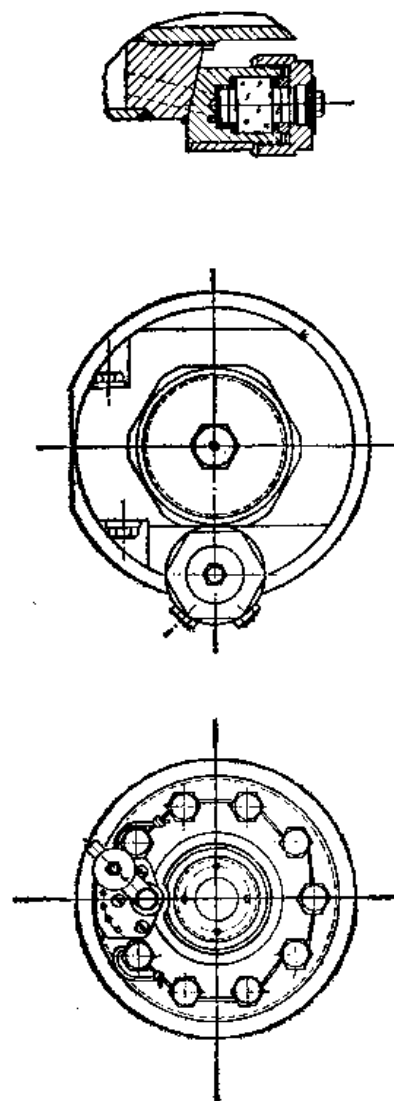
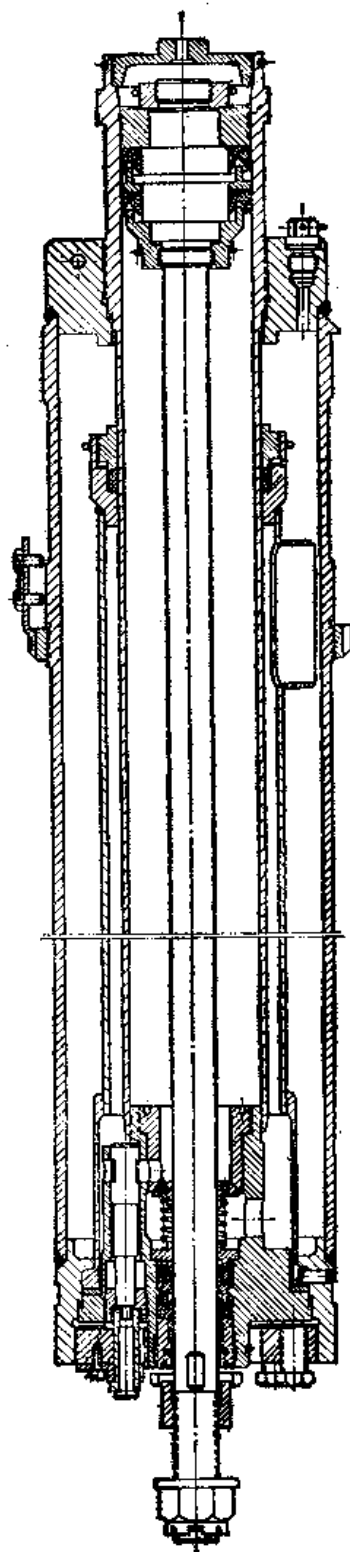


图2-7 60-122 J 复进机结构图

焊于外筒上。平时复进机中的气体储于外筒的上方，为了不使气体进入内筒而从紧塞具处逸出，在  $0^\circ$  射角时外筒液面应略高于内筒外径的上缘。

为保证液体气压式复进机的正常工作，必须使气体的初体积及初压保持在一定的范围内，为此，在复进机后盖上设有检查和调整液量、气压的通道——开闭器。

在有的火炮上（如 GC-45）还有把贮气筒与复进筒分开配置的，如图 2-4(Ⅰ) 所示，它用游动活塞将液体和气体隔开，这样的布置可使结构更紧凑，更好地利用起落部分的空间。

## 2. 筒后坐复进机

筒后坐复进机，可以增加后坐部分重量。但为保证液体在高低射界内都能密封高压的气体，只采用两个筒就不行了，必须采用三个筒，即在内外筒中间再加一个后方开有通孔的中筒。56-85 J，60-122 J，59-130 J 等炮的复进机都采用了三筒结构。

图 2-5 是 56-85 J 的复进机，它的特点是内外筒同心而中筒偏心配置。中筒，前盖，后盖及外筒焊接成一体，内筒拧在后盖上可以分解。由于中筒焊接在前后盖上，外筒的液面可以降低到靠近中筒中心线附近，只要中筒上的通孔在大射角及负射角时都在液面之下即可。

在复进杆前端附有保险螺帽，它的作用是当复进机仍有气压，而要从摇架上分解下来时限制活塞杆的移动，防止它向后弹出而造成事故。此外，在前紧塞具处设有复进节制活瓣，用来在复进时提供附加的阻力，减小复进剩余力。

图 2-6 所示为 59-130 J 的复进机。为了减轻重量把中筒做得比内筒和外筒略短些。中筒前端套在紧塞具本体上，后端拧在内筒上。前后设置紧塞装置和紫铜紧塞环密闭液体。中筒和内筒与外筒偏心配置，以降低外筒中液面，减少复进机的体积和重量。内筒前方也设有复进节制活瓣。复进机后盖上设有可利用液压进行人工后坐的注液器。

图 2-7 所示是 60-122 J 的复进机。它的三个筒是同心配置的。为了防止气体进入中筒和内筒，在中筒的流液孔上焊了一段导管。同样为了减轻重量也把中筒做得比内、外筒短，配置方法类似 59-130 J 复进机。它除了设置了复进节制活瓣外，还有可调节的复进流液通道，用转把进行调整（由右至左转动转把时流液孔由大到小）。该炮以坐盘着地射击时，转把放在最右边的第一个孔上，此时，复进速度最高；以车轮着地射击时，转把放在最左边的第六个孔上，此时，复进速度最低。射击时视复进的情况还可以适当调整转把的位置来获得最适宜的复进速度。

液体气压式复进机的优点是在中、大口径火炮上比弹簧式复进机的重量轻，易于控制流液通道调节复进速度；它的缺点是气体的工作性质随温度等条件变化较大，必须经常检查液量和气压，需配备专门的检查、注气和注液的工具。

## 三、气压式复进机

在口径较大的火炮上，为了不使复进机的尺寸和重量过大，有时采用气压式复进机。如能解决气体密封问题就可以取消或大大减少液体，从而大大减小复进机的结构尺寸和重量。一般是采用液体增压器来密封气体的，它可以使紧塞元件处的压力始终大于气体压力。

图 2-8 所示是海-130 的复进机。这种复进机只有一个外筒。为增加贮气的空间，减



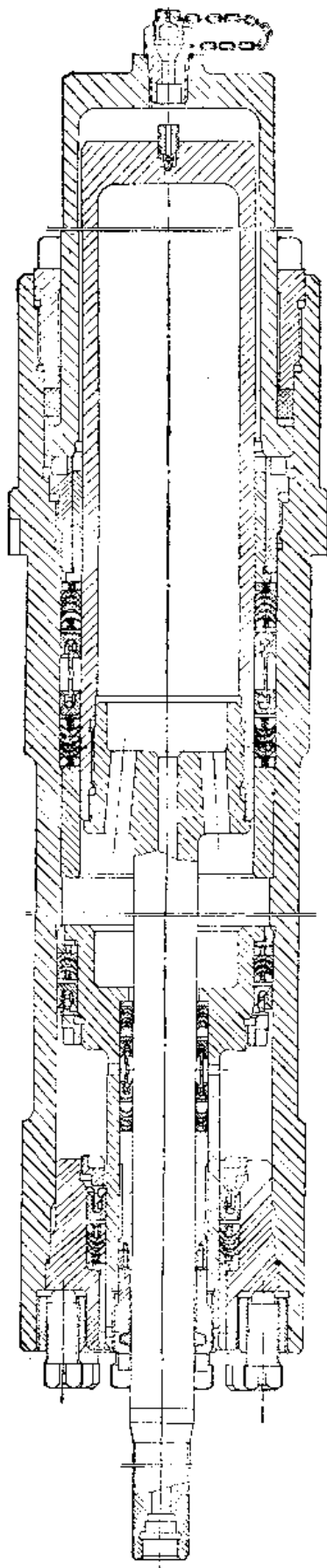


图2-8 气压式复进机

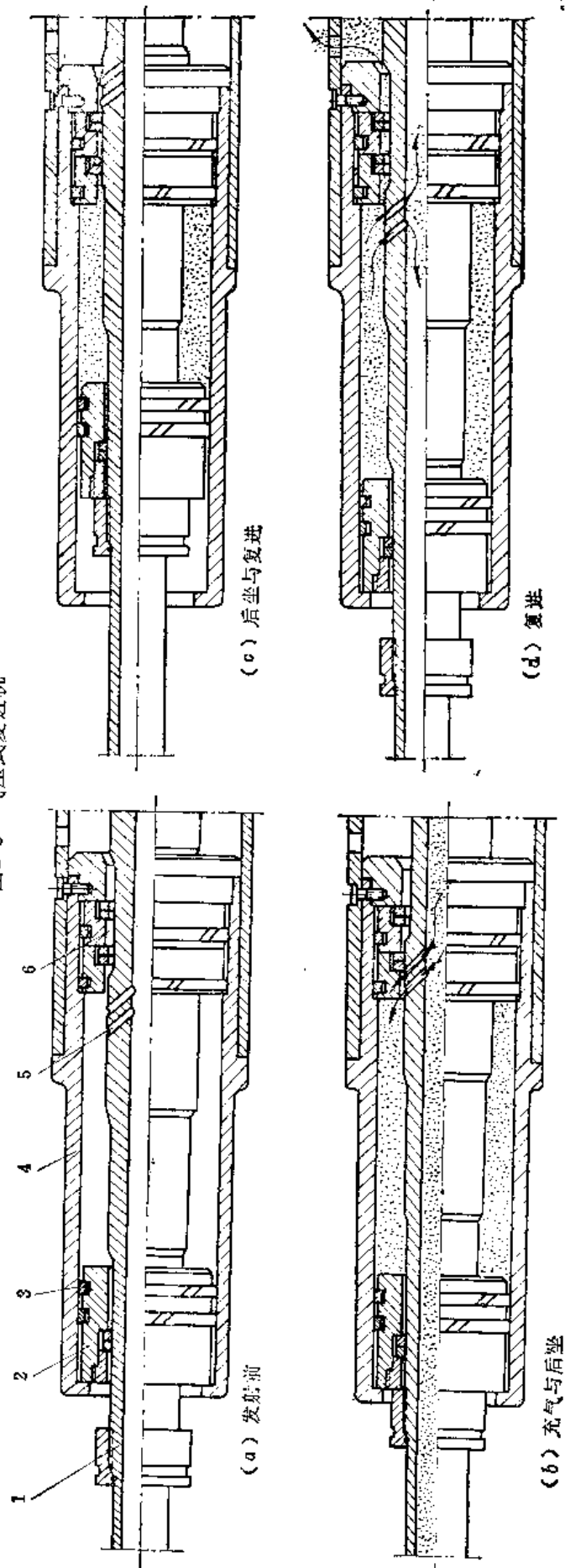


图2-9 火药气体复进机及其动作原理

1—身管；2—游动活塞；3—胀圈；4—复进机筒；5—导气孔；6—排气槽。

小压缩比，活塞头通常做成空心的。复进杆紧塞具就是一个增压器。在增压器活塞与复进机后盖之间充满液体。由于增压器活塞两侧工作面积不同，在任何时候都能保持液体压力高于气体压力，液体经过通孔和管路（图中未画出）与活塞杆和活塞头的紧塞具连通，使紧塞皮碗获得较高的压力，从而提高对气体密封的能力。

有的气压式复进机配有单独的增压器，因为不直接放在复进机中，所以增压器的体积可以减小。

随着火炮口径的增大，按相似原理，火炮后坐部分重量随口径的立方成正比增加，要求复进机力有相应的增加，而复进机活塞工作面积（决定复进机力的大小）只能随口径平方成正比增加。也就是说，随着火炮口径的增大，复进机要能完成其工作任务，就必须提高其中的气压或者进一步加大它的结构尺寸。在大口径火炮上采用气压式复进机是一种解决这个矛盾的途径。它的缺点是紧塞装置的可靠性差，结构也较复杂。

#### 四、火药气体复进机

有些小口径自动武器为了提高射击频率，采用了火药气体复进机。它的工作原理是：在弹丸沿膛内运动时期直接把膛内的火药气体引进复进机工作腔，以高压火药气体作为储能介质，获得极高的复进速度，在复进末期将工作腔的排气孔打开放出其内的残余火药气体。

图2-9所示是航-30的火药气体复进机。复进机的前方有一个活塞，后方有一个定塞。发射时，弹丸在膛内运动，身管后坐。当弹丸越过进气孔时，火药气体由进气孔进入复进机的气室，同时，复进机上的排气孔通道被定塞关闭。由于前后塞的密封，气体一直处于高压状态。身管继续后坐时，以其螺环推动活塞开始压缩火药气体继续储存能量。后坐结束后，火药气体膨胀通过活塞推动炮身复进，活塞到位后，身管以惯性继续复进并打开排气孔，高压的火药气体由进气孔及排气孔逸出（见图2-9）。

火药气体复进机的突出优点是结构简单，重量轻，适用于射速高的自动炮。但由于工作介质是高温高压的火药气体，因此进气孔的烧蚀、活塞的磨损、身管的温升都比较严重，有关部件寿命低，维护擦拭困难。特别是进气孔迅速地被烧蚀，严重地改变了正常的工作条件，使自动机工作不稳定，甚至不能工作。此外，由于平时没有支持炮身的复进机力，还需专门的机构保证炮身平时处于前方位置。因为航炮射速要求高，而且炮的使用寿命较低，持续工作时间较短，所以，采用这种结构还是可行的。

#### 五、复进机构的新的设想

由前面的介绍和分析可见，目前的大多数火炮为了使后坐部分在后坐終了后能及时的复进到原位，都设置了专门的复进机。复进机的储能介质通常又都是弹簧或气体。弹簧储能的复进机虽然结构较简单，但不易调整复进速度，弹簧较笨重且易疲劳，并要配备笨重的分解结合工具。气体储能的复进机虽然重量较轻，尺寸小，但结构复杂，需要专门一整套专用的维护保养工具。总之无论上述哪一类复进机都作为一个专门的部件而增加火炮重量，使结构复杂尺寸增大，随炮工具增多。为了彻底改变这种状态，人们设计了不需专设复进机的“可压缩液体反后坐装置”。它利用液体的可压缩性及机筒筒壁的弹性变形来储存复进的能量。图2-10、图2-11是它的原理图。

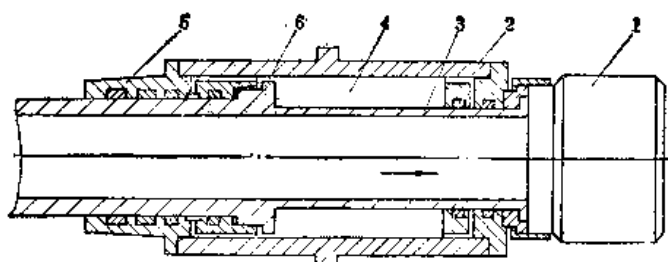


图2-10 可压缩液体反后坐装置原理图

1—炮身；2—摇架筒；3—带活塞的套筒；4—充满可压缩液体的工作腔；5—缓冲密封装置；6—活塞头。

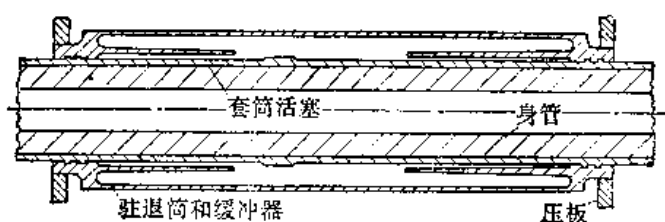


图2-11 可压缩液体及弹性筒壁的反后坐装置原理图

图2-10所示是利用液体可压缩性来储存复进能量的结构。

发射时，炮身带动套筒活塞后坐（图中箭头所示方向），活塞头在后坐时压缩其后腔内的液体并迫使它经过活塞头与摇架筒内壁形成的环形流液孔高速流入前腔，从而消耗后坐动能和节制后坐运动。与此同时，由于向后抽出的套筒的体积小于由前面进入的套筒的体积而使内腔的整个容积变小从而使液体受到压缩，压缩的液体储存了复进能量。

当后坐部分后坐停止时，内腔中的液体处于压缩状态，最大压力可达400公斤力/厘米<sup>2</sup>以上。由于活塞头后面的环形工作面积大于前面的环形工作面积，作用在活塞后面的向前的力大于作用在活塞前面向后的力，形成了推动活塞向前运动并带动炮身复进的力。复进时，活塞迫使前腔的液体经过环形漏口流入后腔，从而消耗复进能量、节制复进运动，使后坐部分最终停止在发射前的位置。在复进过程中，内腔的压力随时间减小，到复进終了基本上等于后坐开始时的压力初值。

为了防止复进到位时后坐部分猛烈撞击摇架，设置了缓冲装置。它包括活塞头的锥形部及前端面和缓冲密封装置里的环形槽。

当后坐部分复进到离到位几十毫米时，活塞头前部的锥形部进入缓冲器密封装置的环形槽内，并把槽内的液体通过锥形部与槽壁形成的环形通道挤出，从而产生阻尼作用，使后坐部分无冲击的复进到位。

为防止在后坐和复进时空气进入内腔而产生空穴现象，还使用了防止产生空穴现象的迷宫式密封装置。

图2-11是利用液体的可压缩性和驻退筒壁的弹性变形来储存复进能量的反后坐装置。

上述两种结构为取消复进机使反后坐装置简化提供了一个很有希望的思路。

### 第三节 驻退机的类型和结构

火炮上的驻退机，通常包括液压驻退机和复进节制器两部分，它通常多按流液孔形成的方式进行分类。最常见的有带沟槽式复进节制器的节制杆式驻退机；带针式复进节制器的节制杆式驻退机以及可变后坐长度的节制杆式驻退机等。

#### 一、带沟槽式复进节制器的节制杆式驻退机

中小口径火炮多采用这种结构的驻退机。如54-76 J，56-85 J，60-122 J，66-152 J的驻退机。这种结构的驻退机的突出优点是作用确实，动作可靠，容易满足后坐复进过程中对力和运动规律的要求。

图 2-12 所示是54-76 J 的驻退机。后坐时活塞挤压工作腔内的液体，使一部分液体沿节制环与节制杆形成的流液孔流入非工作腔，另一部分液体沿驻退杆内腔与节制杆的环形间隙冲开活瓣进入并充满复进节制器工作腔。液体对活塞的压力是形成后坐时液压阻力的主要部分。复进时，节制杆上的调速器活瓣关闭，复进节制器工作腔的液体只能沿驻退杆内表面的沟槽与调速器形成的流液孔流过；当驻退机非工作腔的真空消失后，其中的液体沿驻退机流液孔回流。两股液流均流回到驻退工作腔。复进节制器工作腔及驻退机非工作腔中液体压力对活塞的作用，形成了复进的液压阻力。

54-76 J 驻退机在结构上的特点是：驻退杆内腔直径比节制环孔直径大，这样可以容易实现流液孔面积为零，为了使液体能进入复进节制器工作腔并使之充满，需在调速筒上开一定数量的斜孔。由于调速筒外径大于节制环孔径使得这种驻退机在装配和分解结合时较复杂。装配时，需先在驻退杆活塞上预装节制环并打好定位螺钉，再拆开，将节制环套在节制杆上，然后将调速筒和活瓣装在节制杆上，这时才能将节制杆及节制环一起装入驻退杆内。此外，驻退机的后盖不能与驻退机筒焊死，活塞环需用螺纹专门拧在活塞上。因此，这种结构的工艺性较差。

图2-13所示是60-122 J 的驻退机，它在结构特点上与54-76 J 相同。

这两种驻退机都带有液量调节器，用来调整驻退机内的液体因温度变化而造成的体积的变化。火炮连续射击时，驻退机内的液体温升很快，因此体积膨胀，多余的液体进入液量调节器。冷却后，液体体积收缩，调节器中的液体在调节弹簧或气体的作用下又流回到驻退机，保证了驻退机液量充满。

60-122 J 的液量调节器是弹簧活塞式的，它与驻退机连通的导管中部有活门座，内装活动杆控制的钢珠活门。当炮身复进至到位前的13~15毫米时，驻退筒的前盖推动活动杆，活动杆推开钢珠打开活门，使驻退机与液量调节器的液体可以流通。调节器活塞上设有液量指示尺。

图 2-14 所示为56-85 J 驻退机结构。这种驻退机的结构特点是，驻退杆内径略小于节制环的孔径，节制杆全部可以由驻退机后盖的孔直接装入驻退杆内；活塞环不用螺纹而用节制环的凸缘压紧；节制环装上并打好防松螺钉后不需再分解。因此在装配上比54-76 J 驻退机的结构大大简化。由于节制杆最大直径与驻退杆内径相同，故为使液体进入复进节制器工作腔，就必须在节制杆上开孔。驻退杆没有设置专门的液量调节器。为了保证液体因温升而膨胀后不影响驻退机的正常工作，驻退筒内保留了0.25公升的空间。

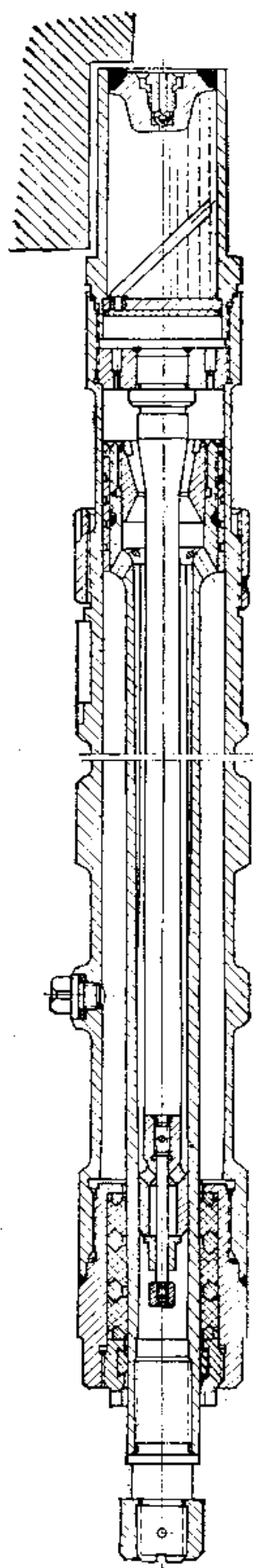


图2-12 54-76 J 驻退机结构图

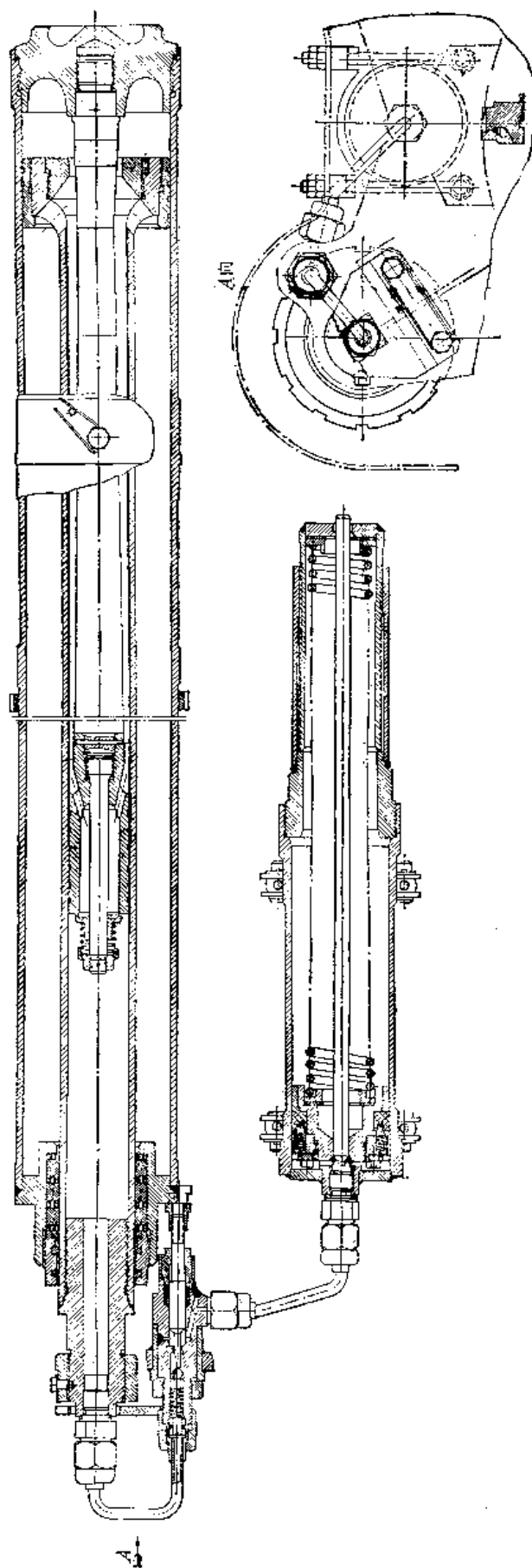


图2-13 60-122 J 驻退机结构图

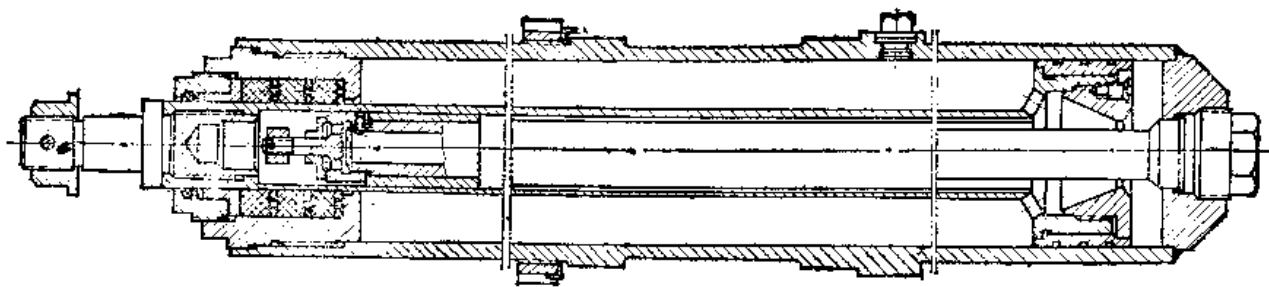


图2-14 56-85 J 驻退机结构图

56-85 J 驻退机的突出优点是结构简单。

上述几种驻退机的复进节制沟槽都开在驻退杆内腔壁上。沟槽式复进节制器的优点是可以在复进全程上控制复进运动，保证火炮复进的稳定性。但这也使复进平均速度降低不利于提高射速，因此，在高炮以及某些火炮上不采用这种复进节制器。

## 二、带针式复进节制器的节制杆式驻退机

图 2-15 所示是59-57 G 的驻退机，它是在复进后期才进行制动的带针式复进节制器的节制杆式驻退机。后坐时，驻退杆活塞头上的游动活塞在液体推动下，将活塞头上的纵向沟槽关闭，工作腔中的液体只能由活塞内腔沿驻退机流液孔进入非工作腔和沿调速筒的四个缺口进入驻退杆内腔。复进时，驻退杆内腔液体由原路流回驻退机工作腔；非工作腔真空消失之后，液体推动游动活塞打开活塞头上的两条纵向沟槽，并经此槽及驻退机流液孔流回工作腔。在这段时间里无论那股液体，由于它们的液流截面较大，因此，产生的复进阻力很小。在距复进到位75毫米处，针式复进节制器的针杆（节制杆）插入驻退杆尾端的复进制动器工作腔，产生很大的液压阻力，从而制动复进。由于高炮重量大，又采用十字炮床，复进稳定性好，可以承受较大的复进合力，因此采用这种结构对减短复进时间提高射速是很适宜的。

## 三、混合式节制杆驻退机

图2-16所示是54-122 L 的驻退机，它的复进节制流液孔（沟槽）不开在驻退杆内腔而开在驻退筒的内壁上，此沟槽在后坐及复进时都构成流液孔的一部分，因而称为混合式节制杆驻退机。后坐时，游动活塞打开活塞头上的斜孔，因此工作腔中的液体可沿节制环与节制杆构成的环形流液孔及筒壁上的沟槽与活塞套形成的流液孔流入非工作腔。非工作腔只通过节制杆后端的两斜孔及节制杆内孔与驻退杆内腔连通，后坐时，非工作腔的部分液体通过此路流入驻退杆内腔。复进初期，由于非工作腔及驻退杆内腔存在一定的真空，因而复进阻力很小。当真空消失后非工作腔的液体推动游动活塞关闭了活塞头上的斜孔，此时驻退机非工作腔变成复进节制器的工作腔，液体只能沿驻退筒内壁上的沟槽与游动活塞上的两纵向小孔流回工作腔，而产生对复进的液压阻力。因此，这种驻退机也不是全长制动的。

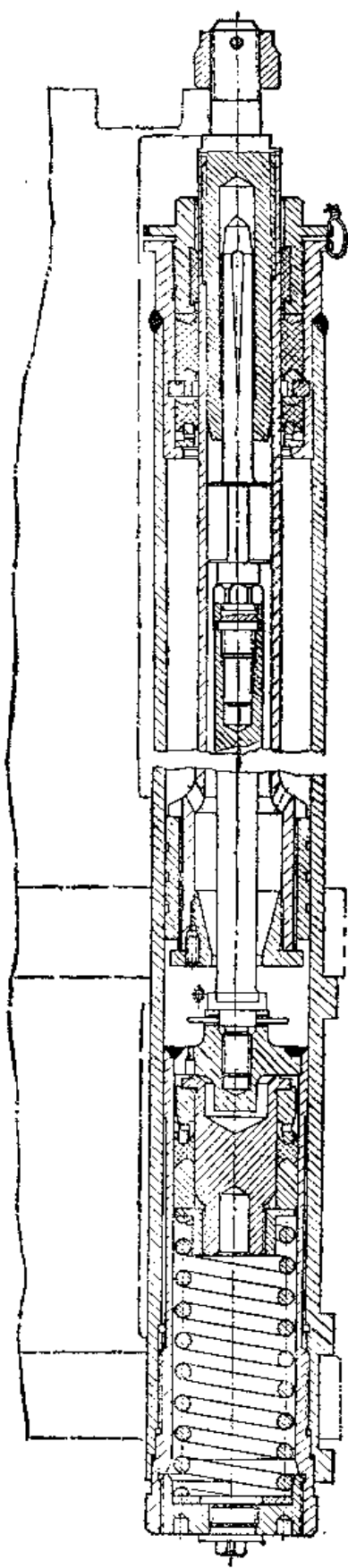


图2-15 59-57 G 驻退机结构图

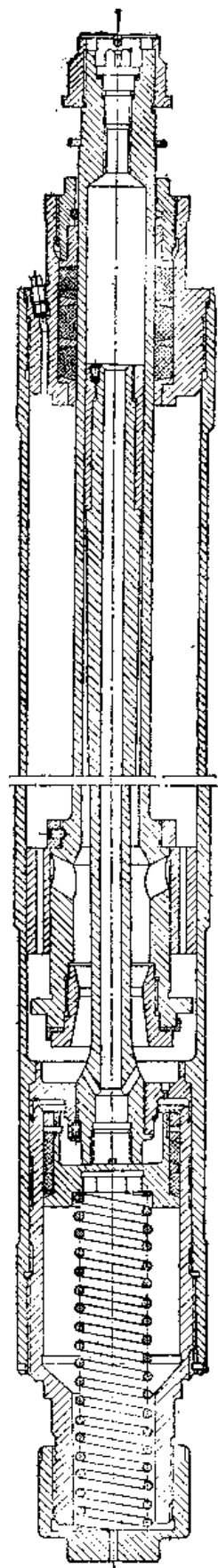


图2-16 54-122 L 驻退机结构图

#### 四、变后坐长的节制杆式驻退机

在一些威力较大或射角变化较大的火炮上,为保证射击时的稳定性和降低火线高,多采用变后坐的措施。59-130 J 等都是采用的变后坐长的节制杆式驻退机,图2-17所示就是59-130 J 驻退机的结构。为了实现变后坐,节制杆做成圆柱形,其上开出长后坐的4条变深度的沟槽,它安装在筒盖上且可从相对筒及驻退杆转动。开有4个窗口的节制环固定在活塞头内腔不能转动。当射角变化时,后坐长度变换器迫使节制杆随射角做相应的转动,从而改变了节制环的窗口与节制杆沟槽形成的流液孔的大小。短后坐沟槽开在驻退筒内壁上,小射角时( $\varphi < 20^\circ$ ),节制杆上的沟槽(长沟槽)与驻退筒的沟槽(较短)同时打开,使后坐阻力最小,获得长后坐。射角在 $20^\circ \sim 34^\circ$ 范围内,后坐长度变换器带动节制杆逐渐将其沟槽与节制环上窗口转离,使总的流液孔面积不断变小,因而在此射角范围内,后坐阻力逐渐变大,后坐长度逐渐变短。在大射角时( $\varphi \geq 34^\circ$ ),节制杆的沟槽完全与节制环上的窗口错开而被关闭。只有驻退筒内壁的六条沟槽起流液孔的作用。这时总的流液孔面积最小,因而可使后坐阻力最大而获得短后坐。59-130 J 长后坐长为  $1250 \pm 10$  毫米,短后坐长为  $775 \pm 40$  毫米。

这种驻退机的另一个特点是,后坐时,流向复进节制器工作腔的液流(称为支流),由活塞上的另一排向后斜的孔进入驻退杆内壁与内筒外表面(六方形)形成的空隙(六个弓形面积),再从内筒后端的活瓣座上的孔流过并推开活瓣进入复进节制器工作腔(内筒内腔)。复进时,活瓣在弹簧作用下关闭了活瓣座的流液孔,使上述液流不能回流。复进节制器工作腔的液体只能沿内筒内表面的沟槽与节制杆活塞形成的复进节制流液孔流回活塞内腔。这一点在37-122 J 则不同,它的长短沟槽均开在节制杆上,后坐时,它的支流直接进入活塞内腔,然后沿长短沟槽流向驻退杆的后方并经长短沟槽中部开的孔进入节制杆内腔,推开节制杆后端调速筒上的活瓣进入复进节制器工作腔。59-130 J 之所以不在节制杆沟槽上开孔来形成支流,是因为节制杆的沟槽只在长后坐时打开,而在短后坐全部关闭。为保证长短后坐都有畅通的支流,使液体充满复进节制器工作腔,在59-130 J 的驻退杆内增加了一个内筒。

图2-18所示是另一种变后坐驻退机的结构。它实现变后坐的原理与59-130 J 的相同,只是为了简化工艺,长短沟槽均开在节制杆上。为了增加后坐部分重量采用了驻退筒后坐,因此实现变后坐就应转动驻退杆。射角在 $\varphi = 30^\circ \sim 50^\circ$ 范围内,驻退杆带活塞和节制环转动逐渐减小流液孔面积,最后长沟槽完全关闭。由于驻退杆紧塞具摩擦阻力较大,转动驻退杆的力矩比转动节制杆的力矩大。这不仅增加了高低机手轮力,且易使后坐长度变换器的传动件(特别是较长的传动杆)变形较大而影响动作的可靠性。这种驻退机的另一个特点是,它在节制杆前端安装了一个大射角自动调速器。它在大射角、装药最少和短后坐的情况下射击时起作用。因为在这种情况下复进机储存的能量较少,为了保证复进到位和半自动开闭,复进制动的液压阻力应当减小。为此,在复进调速器中增加一条从复进节制器工作腔流回到驻退机工作腔的通道。在小射角时( $\varphi < 45^\circ$ ),钢珠堵住了通道。复进时,液体只能沿内筒内表面的沟槽流动,因而复进节制器的液压阻力较大。当射角大于 $45^\circ$ 时,钢珠因自重而自动滚下,打开了调速器的通道。这时复进流液孔面积增大,从而减小了复进节制的液压阻力。



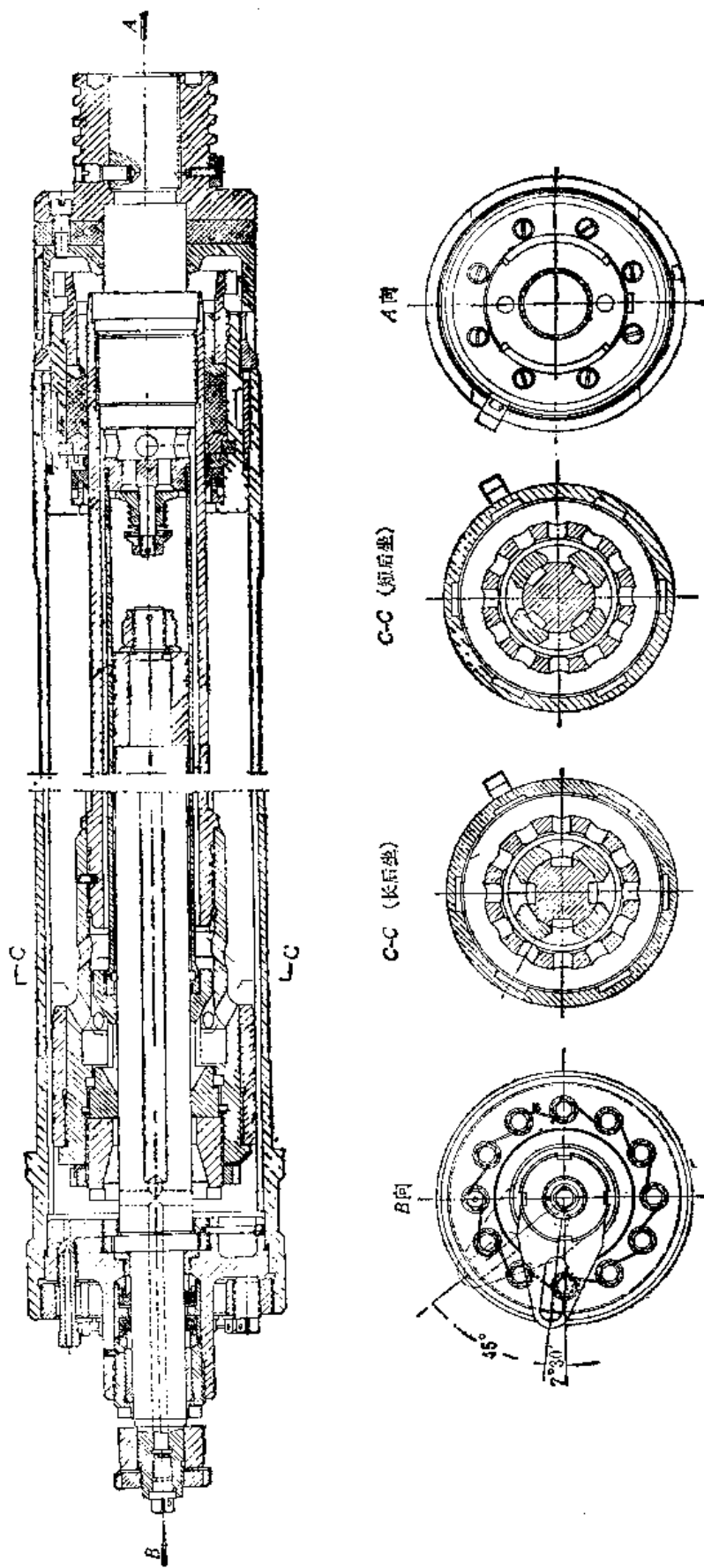


图2-17 59-130 J 驻退机结构图

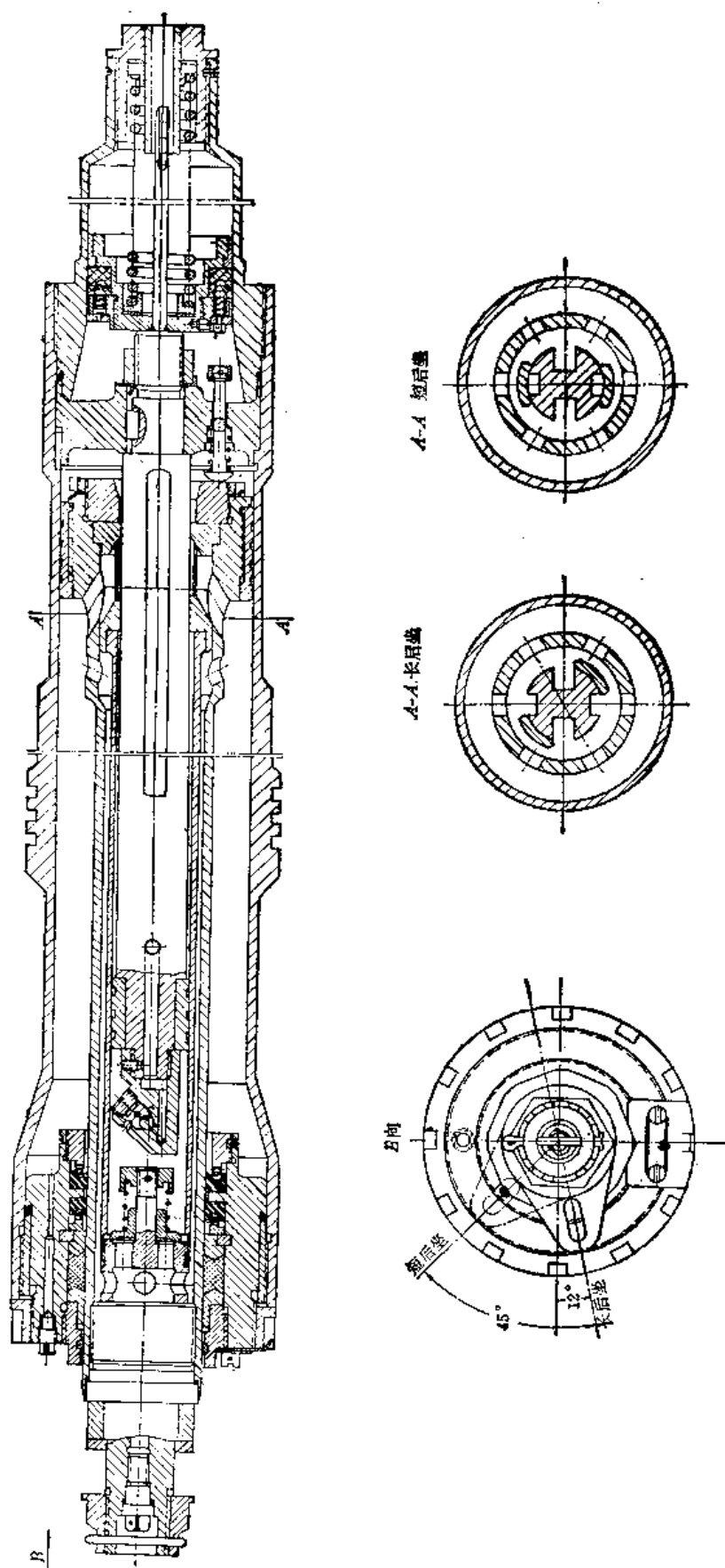


图2-18 筒后座的变后坐驻退机

## 第四节 驻退复进机的类型和结构

有的火炮上采用驻退复进机这类反后坐装置。这类反后坐装置把驻退机、复进机、复进节制器有机地结合为一个部件，所以又称为有机联合式反后坐装置。这类反后坐装置结构简单、紧凑、工艺上减少了加工长细杆和细长管件，而且它的外筒又可用作摇架的基体。因此，在后坐部分重量不变的情况下可较大幅度地减轻起落部分的重量。常见的驻退复进机有两种类型：短节制杆式驻退复进机和活门式驻退复进机。

### 一、短节制杆式驻退复进机

这种驻退复进机多见于美国和西方国家的火炮上。它仍以节制杆直径变化改变流液孔的面积来控制液压阻力，实现预定的力和运动规律。图2-19是美国M2A1-105L采用的短节制杆式驻退复进机结构图。它的整个结构分成两个筒（上面的叫储气筒、下面的叫驻退筒）分别布置在炮身的上、下方，并以前套箍与炮身连结在一起。前套箍内开有液流通道将两筒连通。装于驻退筒内的驻退杆（其上有活塞）用螺帽与摇架前盖连接。后坐时，炮身带动上下筒后坐，固定不动的活塞挤压驻退筒内的液体。其中的液体沿前套箍内的通道流入储气筒前部，然后推开节制器上的4个单向活门，再经固定于节制器上的节制筒孔与短节制杆形成的环形流液孔，进入节制杆定向环与节制筒后端形成的内腔，并推动定向环带动节制杆向后移动。在液体流过节制筒孔与节制杆形成的后坐制动流液孔时产生液压阻力。节制杆向后移动时不断改变流液孔的大小，控制了液压阻力。同时，游动活塞向后压缩储气筒后腔的气体，储存了复进能量。实际上，驻退杆活塞上的阻力既包括了驻退机的液压阻力又包括了复进机的气体抗力。因此它实现了驻退机与复进机作用的一体化。

复进时，储气筒内的气体膨胀，推动游动活塞、节制杆向前并挤压前腔的液体，使其经后坐流液孔流入节制环筒与小活塞头形成的腔内。由于单向活门被弹簧关闭，液体只能经节制杆与节制器内壁的沟槽形成的复进节制流液孔流入前腔，再经节制杆前部的4个孔及前套箍的通道流回到驻退筒并带动后坐部分复进。

游动活塞内充满液体，其上的紧塞元件前后除了受液体和气体压力之外，还受到弹簧力的作用，因此作用在紧塞元件上的径向压力始终高于液体和气体压力，保证对高压气体和液体的紧塞。

为了在液量变化时不致因游动活塞的位置变化而改变节制杆的初始位置，在游动活塞与节制杆定向环之间安置了一个弹簧。这样，不论游动活塞与定向环之间的液量变化有多大，弹簧都可以把节制杆顶到初始位置。在游动活塞前面装有液量指示器的推杆。在储气筒的前后盖分别设置有注液、注气装置。

这种驻退复进机的复进节制器在复进的后期不能提供直接的复进制动力。因此在驻退筒的后盖上设置了一个气门式复进缓冲器（呼吸器），使后坐部分平稳无冲击的复进到位。

美M2A1-105L的驻退复进机结构比较复杂。美国在六十年代初着手进行改进，于六十年代中期研制成M102-105L的驻退复进机，使结构大大简化且较好的实现了变后坐。它主要做了以下的改进（见图2-20）：

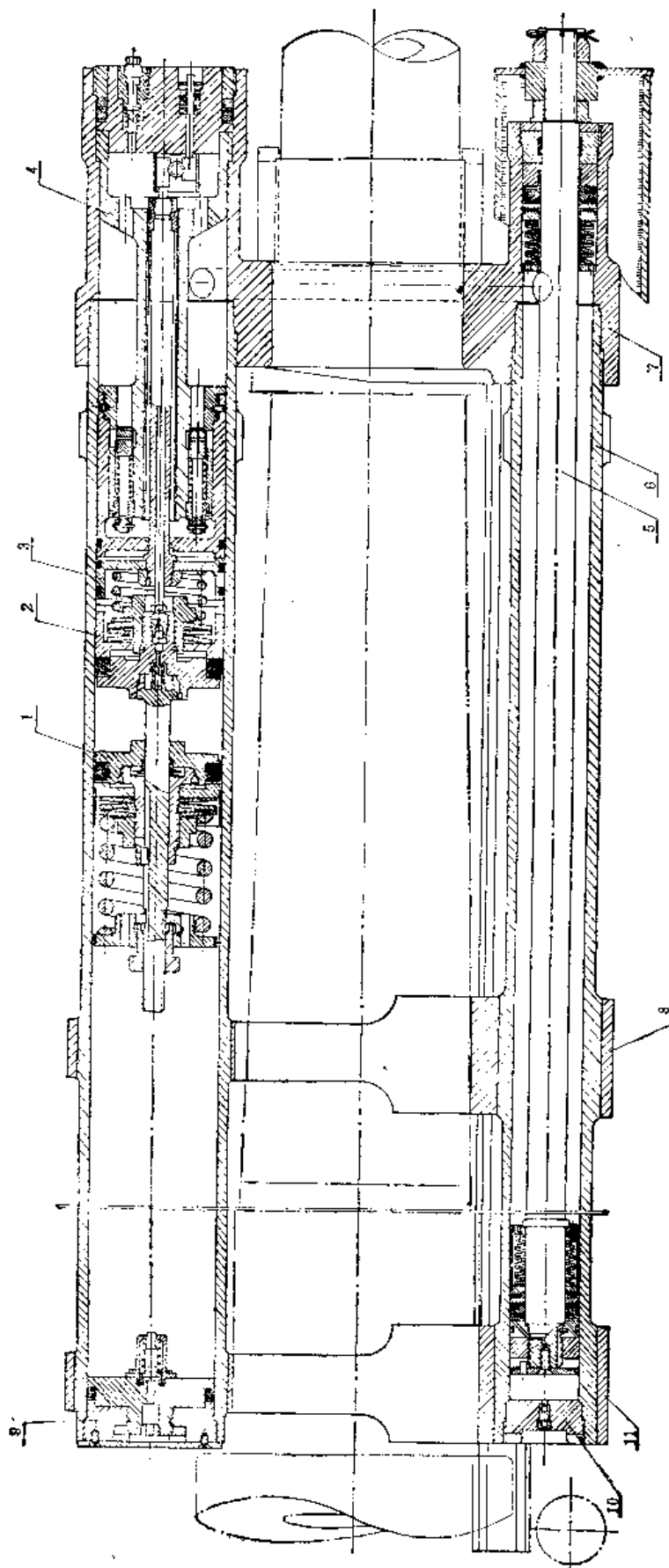


图2-19 美M2A1-105 L 反后坐装置

1—游动活塞游动体，2—游动活塞本体，3—节制杆定向环，4—节制杆，5—驻退杆，6—驻退筒，  
7—前套箍，8—中套箍，9—储气筒后盖及注气装置，10—呼吸器，11—后套箍。

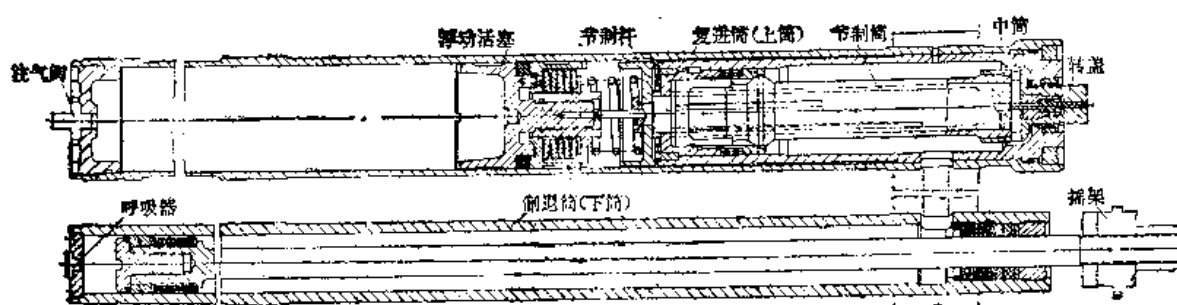


图2-20 美M102-105 L 反后坐装置

1. 后坐与复进制动器部分。M102驻退复进机完全避免了M2A1零件形状复杂，零件繁多及装配维修差的缺点，改由形状较简单、后端开有两个节制窗口内壁开有一条复进节制沟槽的节制筒、圆柱形其上并开有4条长短变深度的后坐制动沟槽的短节制杆、活门、定位筒及转盖等组成。并且可以实现变后坐长。

2. 大大简化了浮动活塞的结构。

3. 采用性能良好的新型紧塞元件。不动部位紧塞元件均采用“O”型橡胶圈或“O”型橡胶圈加塑料挡圈结构；运动部位的紧塞均采用塑料（聚四氟乙烯）密封环并衬有弹性较好的橡胶胀环及金属（铝制）包片构成的紧塞元件。这不仅使结构简单，而且紧塞性能也比M2A1的好得多。

M102式驻退复进机还改进了注气、注液和液量指示器、气体活门式复进缓冲器，使其结构小巧，作用可靠。

M102-105 L的高低射界较大（ $-5^{\circ} \sim 75^{\circ}$ ）、火线高较低（760毫米），有变后坐的要求。当射角增大时，安装于左侧耳轴上的曲线槽带动后坐长度变换器的传动系统使转动筒和节制筒转动，节制筒后端的两窗口与节制杆上的两条长沟槽逐渐错开减小后坐流液孔的面积，从而调整了后坐液压阻力规律。当节制杆上的四条沟槽完全与节制筒的两窗口对正时，流液孔面积最大，火炮长后坐。当节制杆上的两条长沟槽与窗口错开完全关闭时，流液孔面积最小，火炮短后坐。

图2-21所示是把驻退机、复进机及复进缓冲器合成一件的驻退复进机。它的驻退杆是一个空心的圆筒，其中装有气体和浮动活塞及小活塞杆，因此它兼有储气筒的作用。后坐时，它的动作原理与美105 L的驻退复进机相似，而复进时则不同。它的小活塞杆内表面没有复进节制沟槽，只是在节制杆活塞上开有定截面的沟槽，在调节环上开有定截面的小孔，复进时可产生一定的节制作用。它的复进制动主要是其前方带变宽度槽的复进缓冲器来实现的。驻退杆后坐时，缓冲杆在弹簧的作用下伸出于驻退杆活塞头外，活塞前方液体推开缓冲杆上活瓣进入后方。复进到一定距离时，缓冲杆顶在驻退筒盖上，活瓣关闭，后方液体只能沿变宽度沟槽流回前方，从而产生液压阻力，通过驻退杆制动复进运动。在缓冲杆活塞头内还有一个复进自动调速器，它在 $\varphi > 45^{\circ}$ 的情况靠钢珠自重自动打开另一条活塞前后方液体通路，以减小大射角时复进制动阻力。

从结构上看这种驻退机的缺点是，驻退筒和驻退杆纵向、横向尺寸较大。

以上分析表明，短节制杆式驻退复进机的优点是结构紧凑，动作可靠，较易实现理想的后坐及复进规律。它的主要缺点是比活门式驻退复进机的结构复杂。

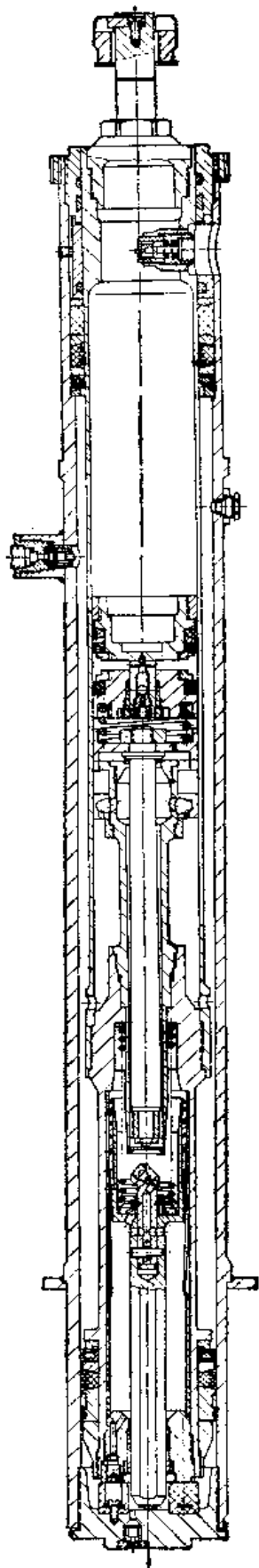


图2-21 带液缓冲器的驻退复进机结构图

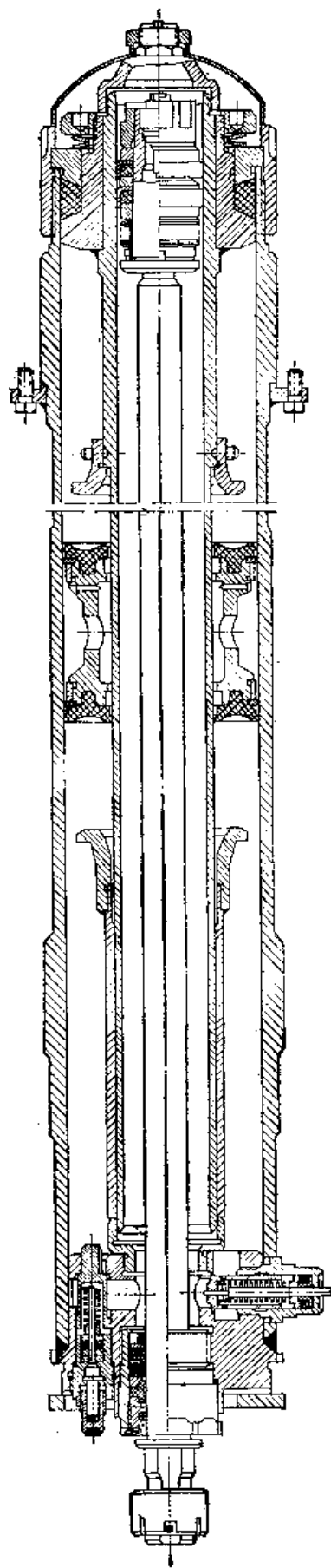


图2-22 59-100 G 驻退复进机结构图

## 二、活门式驻退复进机

活门式驻退复进机是以弹簧控制的活门来改变后坐流液孔的面积，提供后坐液压阻力的。

图2-22所示是59-100 G的活门式驻退复进机。它以外筒作为摇架基体的一部分，它的气体储存在外筒的前腔（游动活塞前面），内筒和外筒的后腔储放液体。它的后盖上装有弹簧控制的后坐活门。为了便于安装和分解游动活塞，前盖是可以拆卸的。后坐时，驻退杆活塞挤压内筒中的液体，关闭复进活门，打开后坐活门，液体经由此活门流入外筒，并推动游动活塞向前运动压缩气体，储存复进能量。后坐活门打开的大小取决于内外筒液体压力差和弹簧力的大小。后坐速度高时，流过活门的液压损失大，因而内外筒液体压力差大，活门打开的大，使流液孔面积增大。流液孔面积增大后，液压损失减小，因而内外筒压力差减小，又使得活门关闭些。这样，由于弹簧的调节，可使后坐总阻力的变化比较均匀。复进时，气体膨胀推动游动活塞挤压液体，关闭后坐活门，推开复进活门，流入内筒使驻退杆活塞和后坐部分一起复进。

59-100 G驻退复进机是变后坐长的，随着射角的变化，通过后坐长度变换器转动驻退复进机侧方的螺筒，调整后坐活门弹簧的初力和末力，即流液孔的开启程度，从而控制后坐长度。

图2-23为同心式驻退复进机的结构。它以摇架筒作为储液筒，以炮身做为活塞杆，驻退机活塞通过套筒装在炮身上，把后坐与复进活门单独装在活门座上。而带游动活塞的贮气筒则配置在炮身的侧上方。同59-100 G驻退复进机一样也以同样的方法实现变后坐。

这种结构提示了一个机构多种用途的思路。它的液压输弹机的加速机也起液压缓冲器的作用；它的驻退复进机的贮气筒也起输弹机贮气筒的作用。图2-24就是它联合工作的原理图。输弹机和驻退复进机共用一个贮气筒。输弹机工作时，驻退复进机不工作，反之亦然，因而使结构简化。此外，它的加速机活塞杆也是液压缓冲器的活塞杆。复进时，开始只是活塞杆挤压液体并推出输弹杆；复进快到位时，活塞杆头上的针状杆插入输弹机液体调节器的孔中，起节制复进的作用。输弹机的液体调节机构在输弹机不工作时，自动调整其中液体量和表示液体的温度。

活门式驻退复进机具有比短节制杆驻退复进机结构简单的优点，由于流液孔靠带弹簧的活门控制，因此在后坐过程中阻力曲线变化较平稳，在后坐中后期一般不出现波峰。调整活门弹簧的初力，可以使火炮变后坐。它的主要缺点是，后坐开始时，活门由于惯性作用滞后打开，后坐初期有时会出现较大的后坐阻力尖峰。此外，它也需要有专门的液压缓冲装置来节制复进末期的复进运动。

上述各类驻退复进机存在一个共同的问题是高压气体的紧塞，即射击时，气体容易漏过游动活塞进入液体内而影响反后坐装置的正常工作。

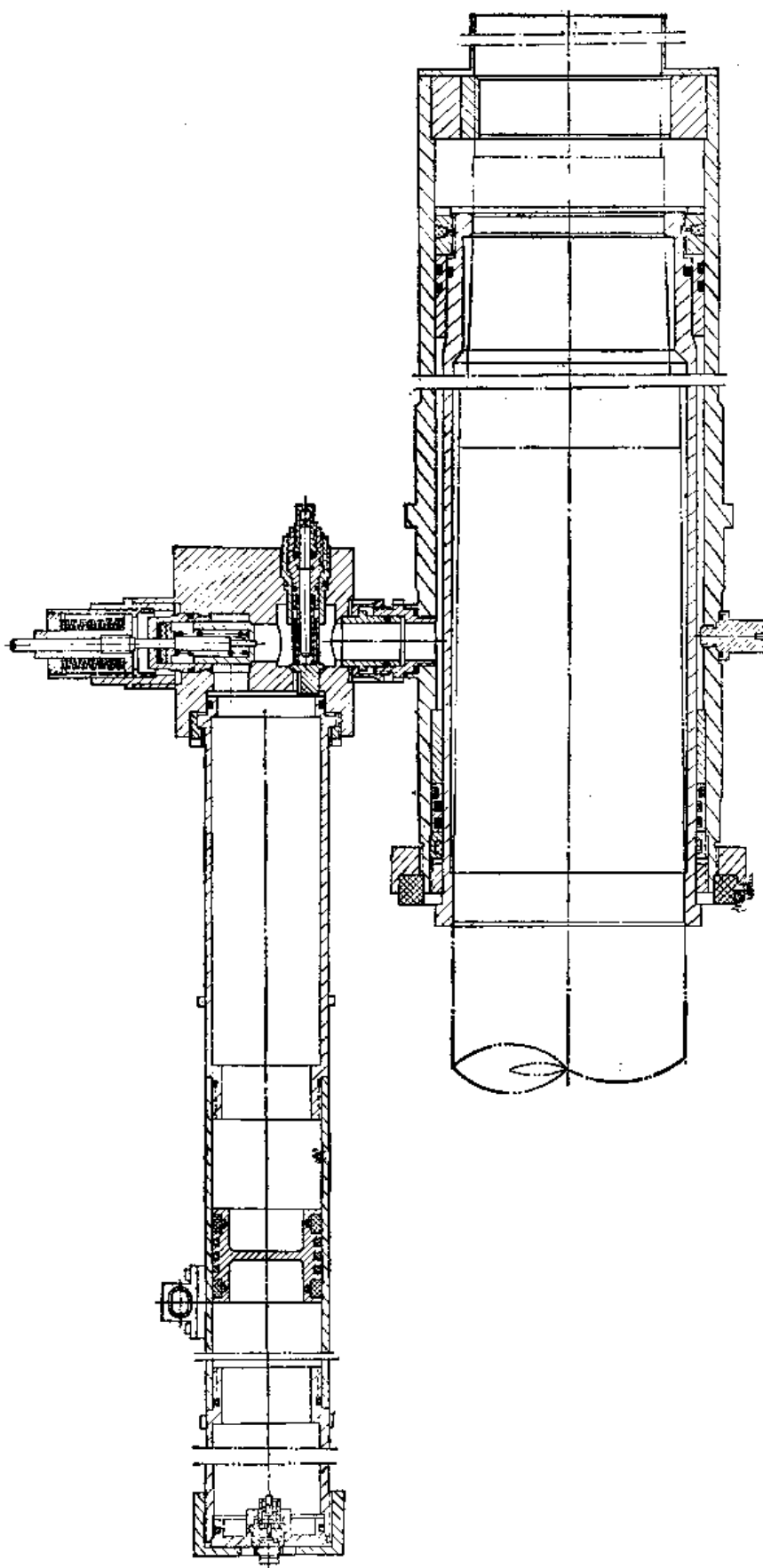


图 2-23 同心式往复式进机结构图



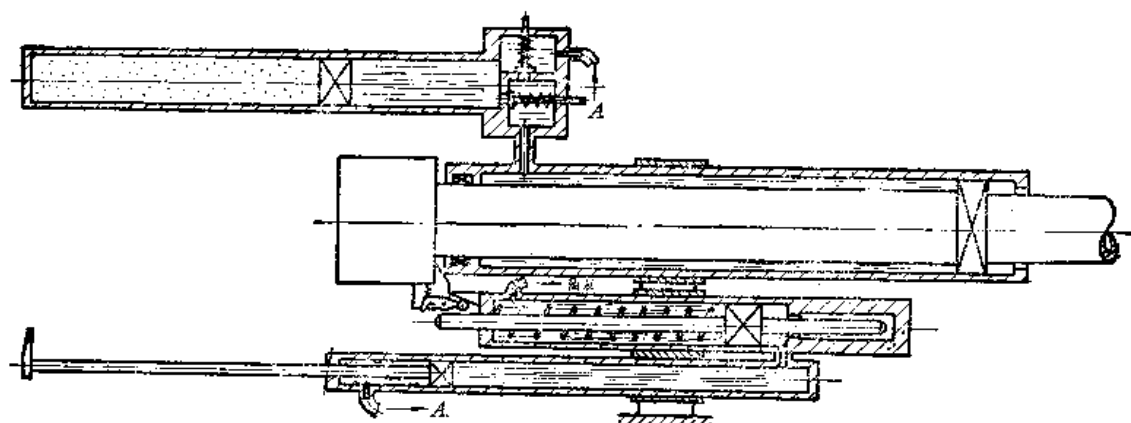


图2-24 三个部件联合工作的原理图

### 第五节 复进缓冲器

有机联合式反后坐装置在复进末期不能提供直接的液压阻力来制动后坐部分使之无冲击的复进到位。所以都设置专门的复进缓冲器，如液压缓冲器、气体活门式复进缓冲器等。

#### 一、液压式复进缓冲器

图2-25所示为59-100G的活门式液压缓冲器结构。当火炮后坐部分复进到离到位前200毫米时，炮尾开始碰缓冲杆并推动它插入缓冲筒内迫使筒内的液体流动来实现缓冲。缓冲器在待工作状态时，弹簧的作用使缓冲杆向后伸出，伸出的那一部分的体积就形成了活塞前方的真空。因此，缓冲器工作的开始一段行程，缓冲杆活塞虽然在缓冲筒内压缩弹簧向前移动，但并不挤压其前腔的液体而只是排除筒前腔的真空。在这一段行程中，缓冲器并不产生液压阻力。当活塞前方的真空排除后，活塞开始挤压筒前腔的液体，这时关闭了活塞头的外活门，同时在液体压力的作用下，推动内活门压缩弹簧打开经导管进入后腔的通道。这时液体有两股由活塞前方进入活塞后方的液流，一股是经外活门上的两小孔流入后腔的液流；另一股是经内活门打开的活塞杆上的两通孔流入后腔的液流。液体流过这两个活门的孔道时产生了阻尼作用。外活门上的两小孔的面积是不变化的，而内活门打开的程度在前腔的液体压力和活门弹簧力的控制下变化。因而活门所打开两通孔的面积是变化的。前腔压力越高，活门弹簧压缩越大，通孔打开面积越大，压力不易升高。反之前腔压力小，通孔开启面积也小，压力不易下降。这样内活门起了调节缓冲器前腔压力的作用，从而保证后坐部分平稳无冲击的复进到位。

#### 二、气体活门式复进缓冲器（呼吸器）

国外采用驻退复进机的中、小口径的火炮上多采用气体活门式复进缓冲器（呼吸器）来控制后坐部分复进末期的运动。图2-26是美M2A1-105L的反后坐装置所采用的气体活门式复进缓冲器。它安装在驻退筒后盖上。当炮身后坐时，驻退杆活塞在驻退筒内向前移动时，活塞后方驻退筒内的空间增大，气压下降，因而筒外的大气压力使开有4个

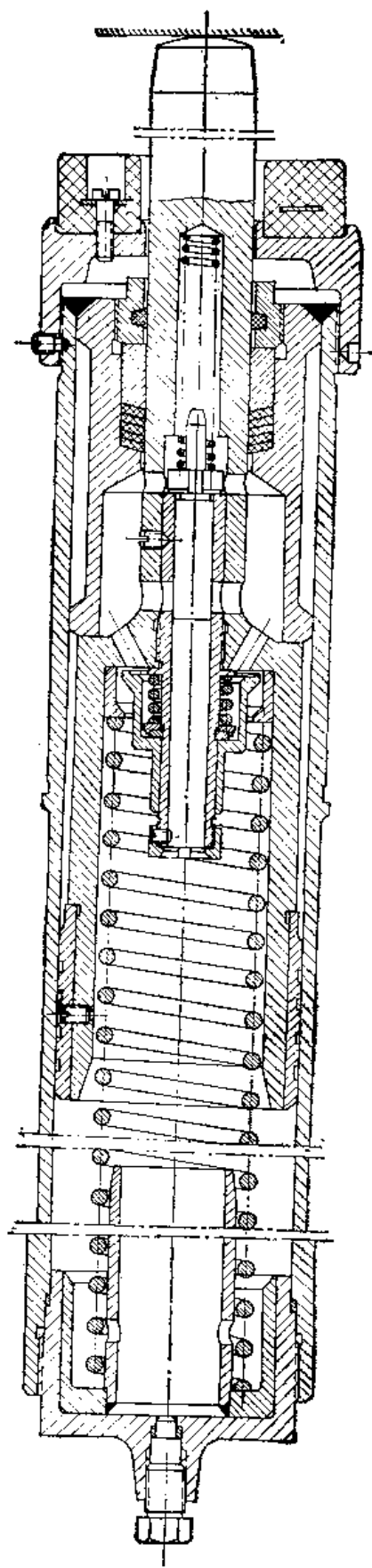


图2-25 59-100 G 液压缓冲器的结构图

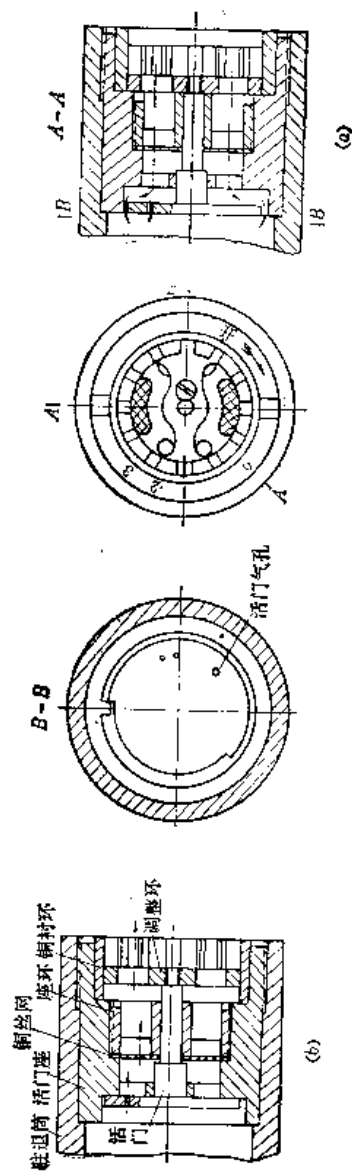


图2-26 美M2A1-105 L的气体活门式复进缓冲器(呼吸器)结构图  
(a) 后退时活门打开, (b) 复进时活门关闭。

不同直径的小孔的活门（见图2-26 a）带动调节环一同前移，打开了活门座上的2个大孔。于是筒外的空气便经调整环两个大孔、座环及活门座上的大孔然后通过活门与活门座之间的空隙通畅地进入驻退筒内补充活塞移动让出的空间。复进开始后，复进速度不断增大，驻退活塞快速挤压其后方的空间的空气推动活门向后关闭了它与活门座之间的间隙（见图2-26 b）。这时，活塞后方空间的空气只能经活门上的与活门座上大孔对正的小孔流出驻退筒。由于活门的通气孔面积很小，空气高速地通过小孔，从而产生阻尼作用，最后使后坐部分无冲击的复进到位。它还可以根据复进的情况通过调整环随时调整活门上小孔的面积。活门座上刻有4个号码：“0”，“1”，“2”，“3”。“3”对应的是最大孔径，“0”对应的是最小孔径。

气体活门式复进缓冲器最突出的优点是，结构简单，调整方便；主要缺点是长时间射击时，空气会由驻退活塞的紧塞元件处漏入驻退机的液体内而影响驻退机的正常工作。

## 第六节 后坐长度变换器

在变后坐长度的火炮上都设置了后坐长度变换器使后坐流液孔的大小随射角作相应的变化。目前常见的有两类结构：一种是传动杆式的，另一种是推杆式的。

### 一、传动杆式后坐长度变换器

图2-27 a 是59-130 J 的后坐长度变换器。曲线槽固定于上架右侧钣内。双臂杠杆以轴固定于摇架上并可绕其轴转动。其后臂的滑轮可在曲线槽内滚动，其后臂通过推杆、后杠杆与传动轴后端连接。传动杆前端以花键连接着前杠杆、前杠杆又以支耳与固定于可转动的节制杆上的叉形杠杆啮合。

曲线滑槽由三段曲线组成（见图2-27 b）：第一段是以耳轴中心为圆心的圆弧；第三段也是以耳轴中心为圆心的圆弧，但第一段与第三段圆弧的半径不同；第二段是由第一段向第三段圆弧过渡的直线段滑槽，其上各点到耳轴的距离是变化的。

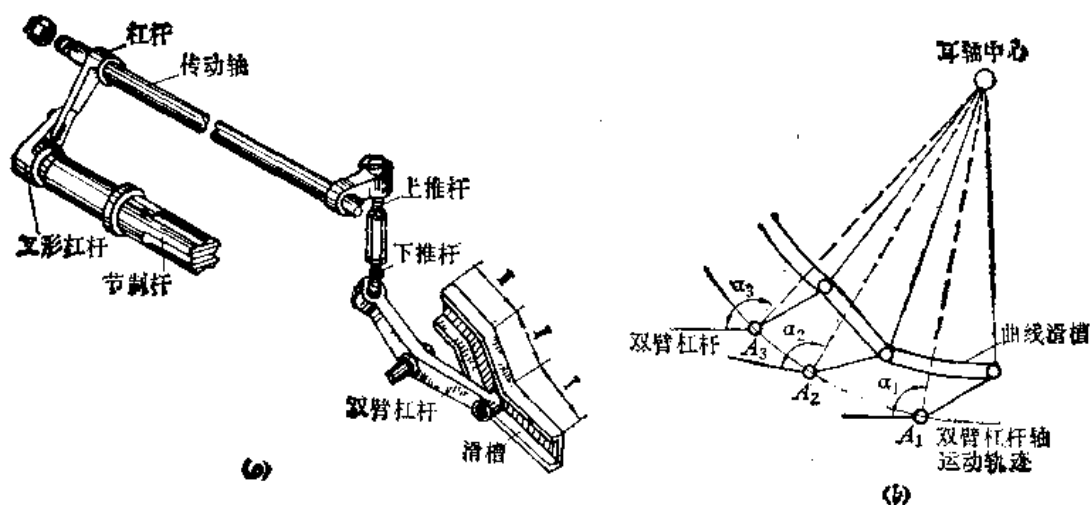


图2-27 59-130 J 后坐长度变换器

高低瞄准时，当射角在小于 $20^\circ$ 内变化时，双臂杠杆后臂上的滑轮在曲线滑槽的第一段圆弧内滚动，双臂杠杆相对摇架不转动，节制杆也不转动，始终保持驻退机流液孔处于最大位置，火炮为长后坐。当射角从 $20^\circ$ 到 $34^\circ$ 变化时，双臂杠杆的后臂滑轮在曲线滑槽的第二段直线段内滚动，由于直线滑槽到耳轴中心的距离处处不同，滑槽的两边便迫使双臂杠杆相对摇架转动，同时通过推杆，后杠杆带动传动杆转动，传动杆则带动前杠杆及叉型杠杆，最后使节制杆转动。由于驻退机内的节制环固定不动，节制杆的长沟槽与节制环窗口形成的后坐流液孔改变，因此火炮实现变后坐。当射角大于 $34^\circ$ 时，双臂杠杆后臂滑轮在曲线滑槽的第三段圆弧内滚动，同在第一段圆弧内滚动一样，双臂杠杆相对摇架不动，因此，节制杆上的长沟槽始终被关闭，驻退机的后坐流液孔始终处于最小面积状态，火炮为短后坐。

## 二、推杆式后坐长度变换器

在一些要传递的力矩很大的火炮上采用推杆式后坐长度变换器。如美175自行加农炮的后坐长度变换器就是这种类型。图2-28是其原理图。这种结构的特点是，不变长度的

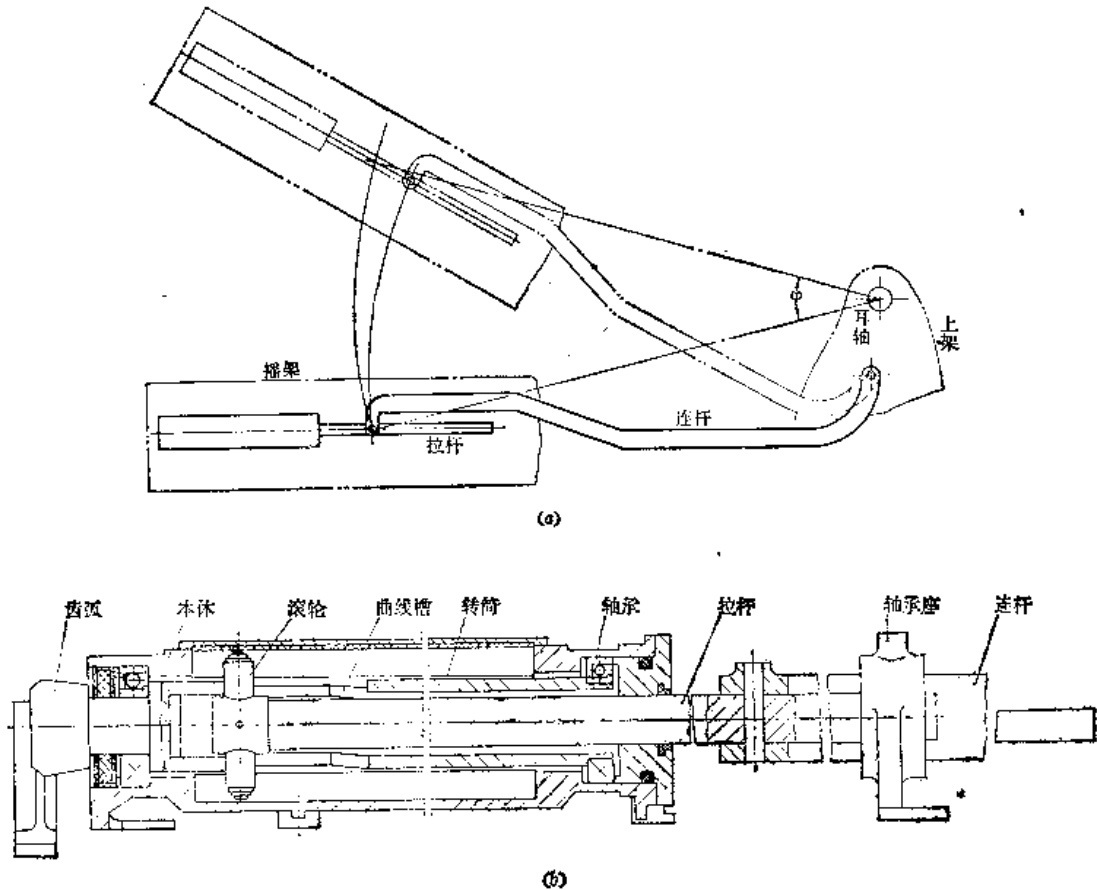


图2-28 美175自行加农炮后坐长度变换器简图

连杆一端固定在上架的某一点上，一端与前端带有两个滚轮的拉杆铰接；开有三段相联通的通槽的转筒前后以滚珠轴承安装在固定在摇架上的本体内，它在本体内只能转动不能轴向移动，其上的三段通槽的前后两段与转筒轴线平行，但互相错开一定的角度，中间段则与轴线成一角度并与前后段连通；拉杆的滚轮就在此通槽里滚动；转筒前端安装

有扇形齿弧,它与节制杆上的齿弧相啮合。

炮身高低瞄准时,连杆拉动拉杆使其沿轴线移动,在中间射角( $5^{\circ}40' \sim 28^{\circ}15'$ )时,拉杆上的滚轮在转筒上的中间段通槽处,拉杆的轴向移动使滚轮带动转筒和扇形齿弧转动,从而转动节制杆实现变后坐。

推杆式后坐长度变换器的优点是:传动的力矩大,结构紧凑,动作可靠。

## 第七节 反后坐装置的紧塞

反后坐装置的大部分部件以液体或气体作为工作介质,完成发射时的能量转换。反后坐装置中的紧塞元件必须在平时和射击时对液体和气体可靠密封,不使它们外逸或渗漏,才能确保反后坐装置可靠地工作。反后坐装置的工作条件比一般民用液压机构的工作条件恶劣得多,它需要在高达 $300 \sim 500$ 公斤力/厘米<sup>2</sup>的压力, $-45 \sim +50^{\circ}\text{C}$ 甚至 $+100^{\circ}\text{C}$ 的温度和相对速度为 $10 \sim 20$ 米/秒的条件下工作。而且某些相对运动表面在野战条件下经常暴露于火药烟雾及灰尘之中。因此,为了保证反后坐装置在各种条件下都能可靠地工作,必须对紧塞装置的结构设计予以充分的重视。

反后坐装置的紧塞大体可分为两大类,一类是不动部位的紧塞,一类是相对运动部位的紧塞。前者有机构中各搭接或连接部位以及注液、注气孔,排液、排气孔,检查孔等的紧塞;后者有活塞,筒盖与运动杆件等部位的紧塞。从原理上说,这些部位的紧塞,都是利用由弹塑性材料制成的元件(如紧塞垫,牛皮碗,橡胶皮碗,塑料密封环等)在被紧塞的液体或气体的压力或外加力的作用下,使其在被紧塞表面的法向产生一定的压力,从而阻止气体或液体沿紧塞表面的渗漏。大多数情况下,利用液体来密封气体,而液体则由紧塞装置来密封。实际上,要使有相对运动的表面实现绝对的紧塞,不带出一点液体是不可能的。这是因为,法向压力若取得过大,则将产生较大的摩擦力,致使复进不到位。因此,只要紧塞装置在持续射击相当发数后液体的漏出量在一个较小的、不影响反后坐装置正常可靠地工作的数量范围以内就可以了。在各种火炮的试验验收技术条件中,一般都规定了复进机的允许漏液范围。例如,59-100 T的资料规定:复进机活塞处每10发漏液不得超过2毫升;驻退杆和复进杆处允许有个别漏滴现象。

下面从结构上介绍现有火炮各种紧塞装置的特点,供选择和设计时参考。

### 一、不动部位的密封

1. 连接部位的密封。为了便于加工,装配,检查和勤务等,反后坐装置的某些部位采用螺纹连接或套接。为避免液体或气体沿螺纹缝隙和套接缝隙渗漏,需要相应的密封措施。用于这些部位的密封元件有紫铜环,橡胶圈或“O”型橡胶圈等。

图2-29 a所示是59-57 G的液量调节器本体与驻退筒连接处的密封结构;图2-29 b所示是56-85 J复进机内筒与后盖连接处的密封结构;图2-29 c所示是59-130 J复进机内筒与后盖连接处的密封结构。它们的紧塞元件均采用紫铜环,材料按YB145-65可取 $T_2$ ,  $T_4$ 。紫铜环的两侧边常作成与轴线成 $45^{\circ} \sim 75^{\circ}$ 的倾角,以保证装配后产生塑性变形实现密封。

图2-30 a所示是59-100 G驻退机前盖的密封结构;图2-30 b所示是60-122 J复进机内筒与中筒连接处的密封结构。这些火炮的反后坐装置由于结构上需要而以橡胶圈作为密封元件。

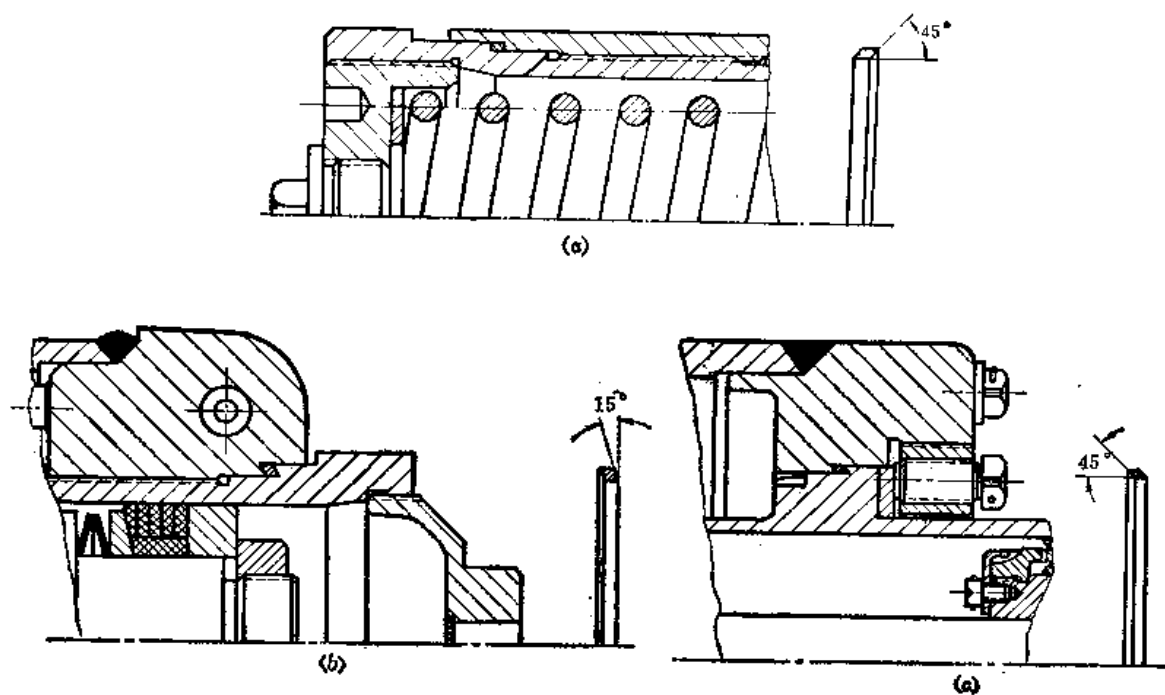


图2-29 筒与盖连接处的密封结构

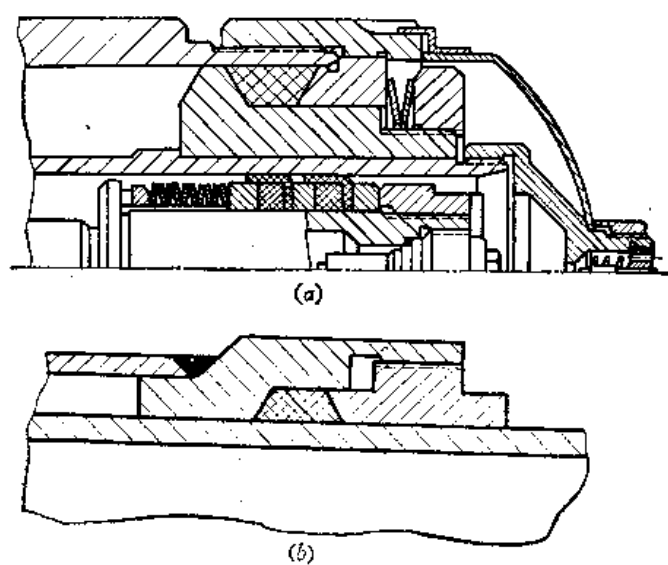


图2-30 橡胶圈的密封结构

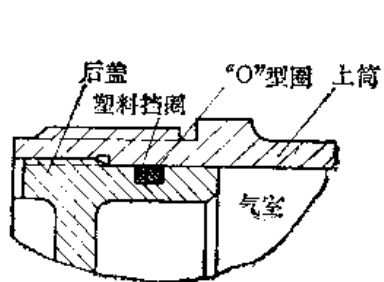


图2-31 美M102-105L后盖与复进筒之间的紧塞结构

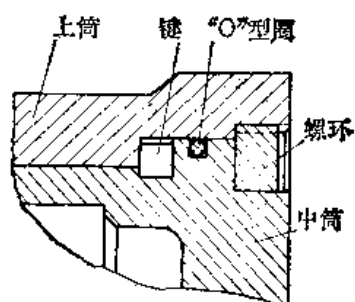


图2-32 "O"型橡胶圈结构

有些火炮的反后座装置不动部位的紧塞采用“O”型橡胶圈或“O”型橡胶圈加塑料挡圈的紧塞结构。图2-31所示为美M102-105 L后盖与复进筒之间的紧塞结构,图2-32所示为“O”型橡胶圈结构。实践证明这种结构紧塞性能良好,结构简单。现代火炮中已广泛采用。

此外,有的驻退杆为了加工方便,其内孔制成通孔,再以尾杆用螺纹旋入将其尾部堵住,并用无酸焊加以密封,装配后不再分解,如图2-33所示。

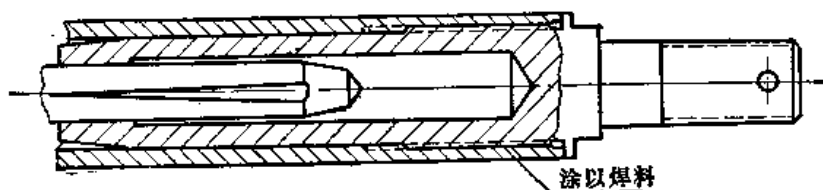


图2-33 装配后不再分解的结构

## 2. 注气注液, 排气排液及检查孔部位的紧塞。

图2-34所示为几种驻退机注液孔的密封结构。其中(a)为54-122 L驻退杆末端注液孔的紧塞结构;(b)为56-85 J驻退机注液孔的密封结构;(c)为60-122 J复进机后盖放油孔的密封结构。它们的紧塞元件均采用紫铜环。

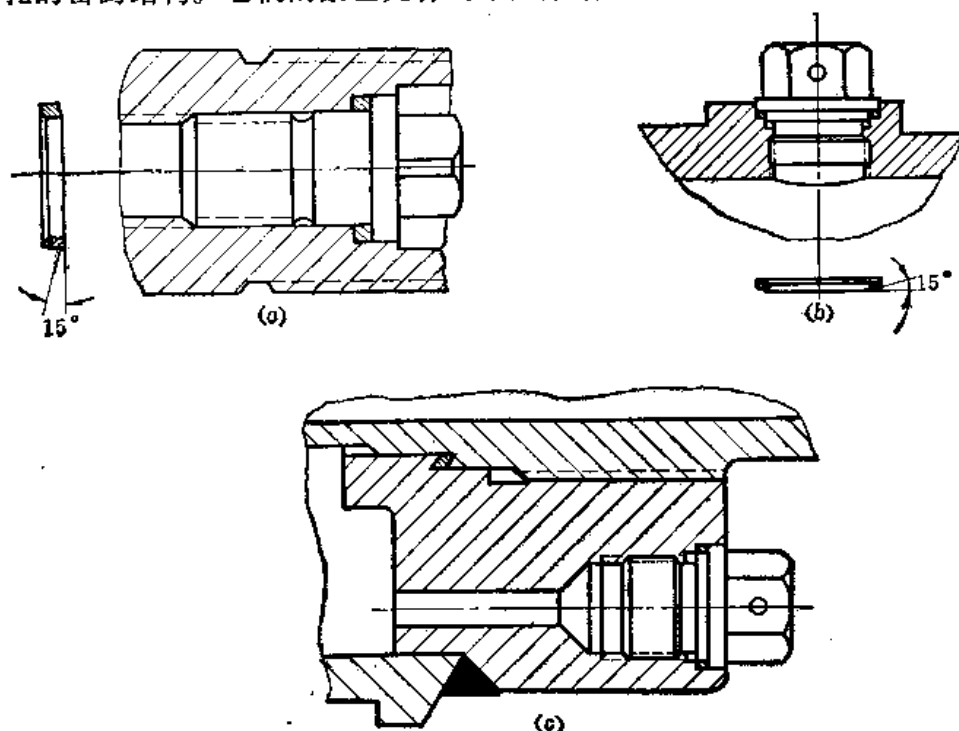


图2-34 注液孔的密封结构

图2-35(a)所示为56-85 J复进机液量、气压检查装置中开闭杆处的密封结构;图中(b)所示为59-100 G复进活塞调整杆处的密封结构。它们的密封元件为牛皮环和紧塞垫(绳)。图2-36所示为59-100 G复进机注气装置的紧塞结构。它有一个可向储气筒内进气的单向活门,它的密封元件为橡皮和皮革。图2-37所示为美M102-105 L驻退复进机注气装置的“O”型橡胶圈密封结构。

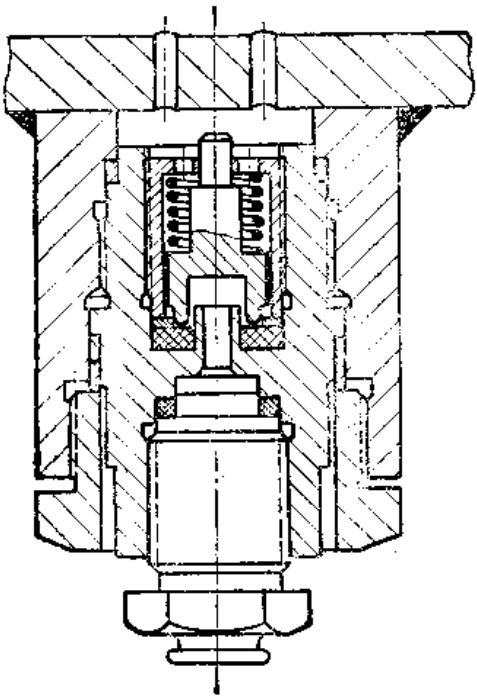


图2-36 驻退复进机的注气装置

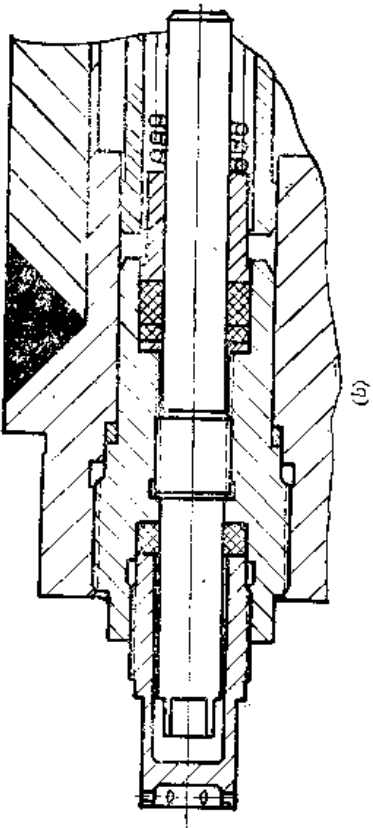
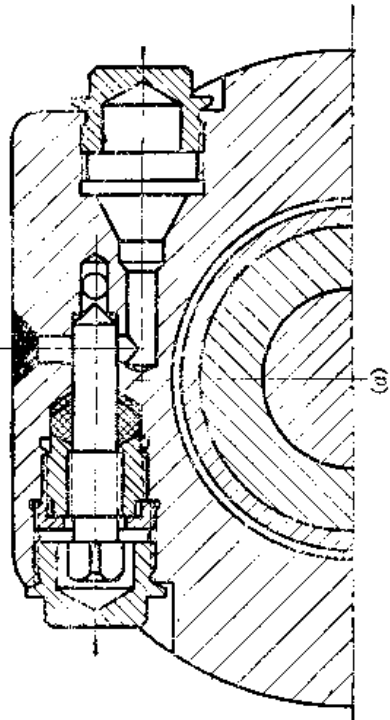


图2-35 开闭杆处的密封结构

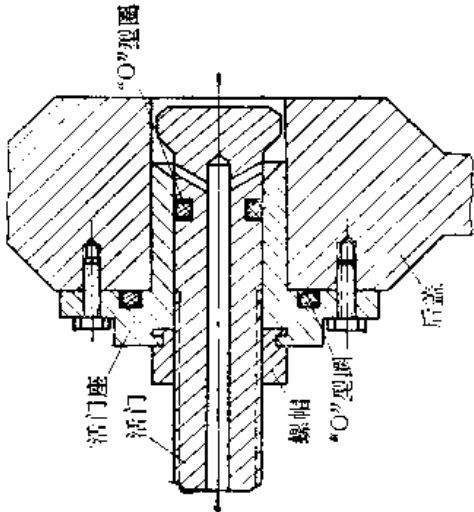


图2-37 “O”型橡胶圈结构



## 二、运动部位的紧塞

反后坐装置运动部位的紧塞可分为三种情况：一种是紧塞的两侧都是液体，如驻退机活塞和复进节制器的调速筒；一种是驻退机的紧塞具；一种是复进机的活塞和紧塞具。

### 1. 驻退机的活塞和复进节制器的调速筒

驻退机的活塞和复进节制器的调速筒用来排挤液体使之由其一侧经规定的小孔流到另一侧。因为两侧都是液体，允许液体沿活塞与筒壁之间的缝隙有少许渗漏。由于活塞及调速筒对驻退杆与节制杆的运动起支撑和导向作用，故要求活塞表面与筒内壁的配合有较高的尺寸精度和表面光洁度。图2-38所示是59-57 G的驻退杆活塞；图2-39所示是100 T复进节制器调速筒的结构。

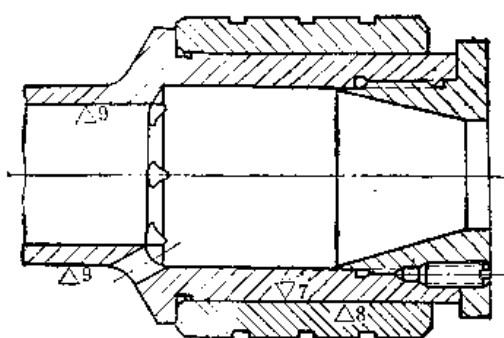


图2-38 59-57 G 驻退杆活塞

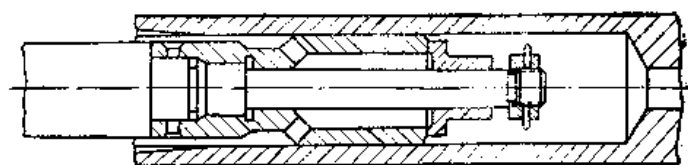


图2-39 100 T 复进节制器调速筒

为了减少摩擦，活塞套及调速筒均用铝青铜或锰黄铜制成（QA110-3-1.5, QA110-4-4, HMn57-3-1, ZQSn6-6-3, 见YB-146-65和YB-147-65）。考虑到钢和铜膨胀系数不同，为不致因温度升高使活塞涨住，又保证没有过大的间隙，所以外径尺寸需要选配，即先测量好实际的驻退筒或驻退杆内径，然后按其实际尺寸加工铜套外径。为保证导向良好，驻退杆活塞配合面宽度应不小于直径的一半，调速筒配合面宽度应为直径的1~2倍。此外，活塞套上还开有宽4~5毫米的深0.5~1毫米的数条沟槽，它的作用是使经间隙漏过的液体产生涡流，增加流动阻力，并且容纳附着于筒壁的污物，减小活塞套的磨损。

### 2. 驻退机的紧塞具

驻退机内的液体平时没有压力，而工作时压力可达到100~300公斤力/厘米<sup>2</sup>，因此，要求驻退机的紧塞具能对具有较高压力的液体进行密封。常见的驻退机紧塞具有三种结构：一种是只用紧塞绳；一种是用皮碗和紧塞绳；一种是塑料密封环（聚四氟乙烯）内衬以橡胶涨环两边设有金属包片（杯状环）结构。

a) 图2-40所示是56-85 J和60-122 J驻退机紧塞具结构。它们均以紧塞绳为紧塞元件。这种紧塞具由紧塞具本体、支环、紧塞绳、隔环、带防尘垫和带巴氏合金的压螺（或铜制压筒）组成。紧塞绳按WJ256-64标准由石棉绳浸以纯地蜡80号（50%或75%），工业凡士林（40%或15%），胶质石墨或胶质石墨油剂（10%）的混合溶液，压制成厚10毫米，宽20~30毫米的圆环。隔环内孔与驻退杆间有约1毫米间隙，其截面为棱形，两侧角度为120°~140°，装配时靠压螺压紧，使紧塞绳向内、外变形，以产生对紧塞表面的压力。支环及压筒用锰黄铜（HMn57-3-1）以离心浇铸后车制而成，对驻退杆起支撑和

导向作用（没有压筒时则依靠压螺上的巴氏合金）。其内孔表面与驻退杆外表面的配合采用6级精度动配合，光洁度为 $\nabla 6$ 。毡圈用来防止驻退杆表面的尘土带进驻退筒内。装配时，常以一定的拉力拉动驻退杆来判断压螺压紧的程度，如59-57G的拉动驻退杆的力为50~60公斤力。若发现驻退机漏液时，则可进一步拧紧压螺。

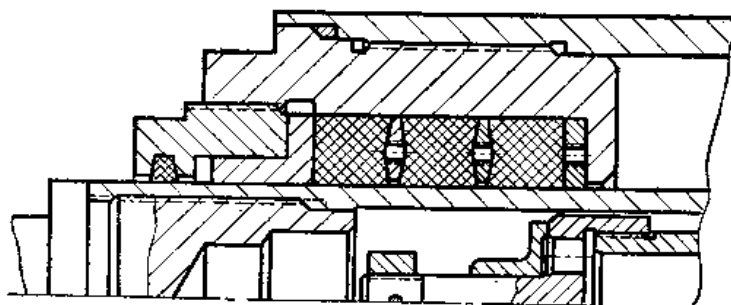
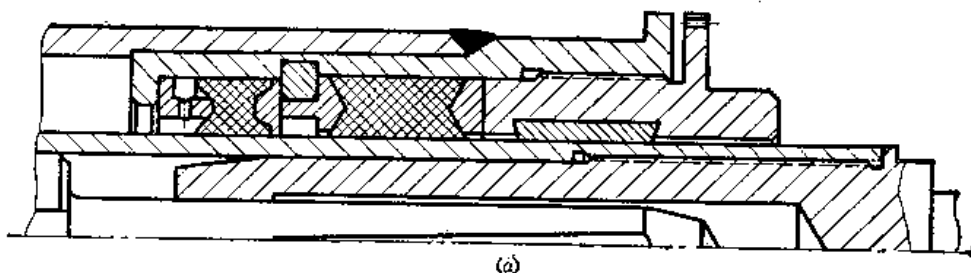
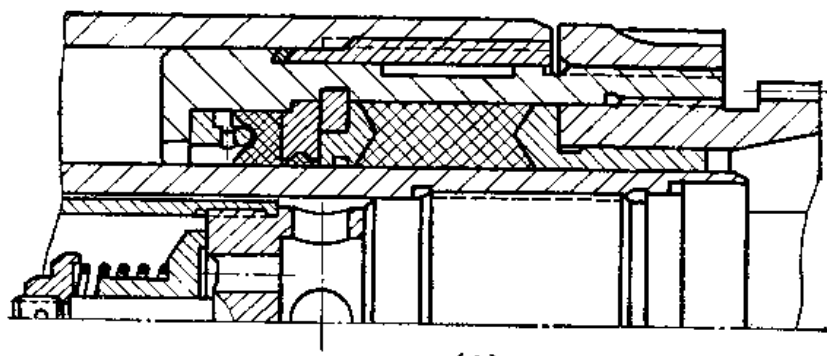


图2-40 用紧塞绳的紧塞具结构



(a)



(b)

图2-41 用皮碗和紧塞绳组成的紧塞具结构

b) 图2-41所示是以皮碗和紧塞绳为紧塞元件的紧塞具。其中a、b所示分别为59-57G和59-130J驻退机紧塞具的结构。平时，液体的紧塞以紧塞绳为主，工作时，则以皮碗为主。实践证明，对于工作压力较高的驻退机采用这种结构的紧塞具比前一种要好。

这种紧塞具的紧塞绳部分的结构与前种的类似，它通常位于紧塞具与空气接触的一侧。皮碗部分则位于紧塞具靠密封的液体一侧，它由衬瓦、皮碗和座环组成。衬瓦为按 $120^\circ$ 分为三段的圆环镶于紧塞具本体的环型槽内，防止紧塞绳所受的轴向力传递给皮碗。装配后，座环顶部与皮碗间须留有约1毫米的间隙。这在设计时由确定的公差保证。例如59-57G的最大间隙为0.895毫米，而59-130J的名义尺寸上即保持了2毫米间隙。此间隙用于保持液体在皮碗表面顺畅流通。工作时，使液体压力均匀作用于皮碗表面，皮

碗紧贴于紧塞表面，以达到可靠的紧塞。如果设计时，使座环之凸起部压紧皮碗（如没有衬瓦或尺寸上没有留出间隙），则会  
使皮碗边缘内收而不能有效地紧塞。

c) 图2-42所示为塑料（聚四氟乙烯）密封环其内衬以橡胶胀圈的紧塞结构。这种结构的紧塞装置具有紧塞性能好、耐磨、摩擦力小以及在长期保存中与其接触的金属表面的锈蚀少等优点，所以目前世界很多国家的火炮反后坐装置中广泛地以它代替旧式结构的紧塞装置。

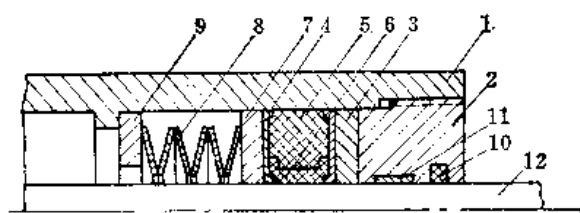


图2-42 美M102-105 L驻退筒紧塞具的紧塞结构  
1—驻退筒；2—前螺盖；3、7—压环；4—包片；5—橡胶胀圈；6—塑料（聚四氟乙烯）密封环；8—弹簧；9—顶环；10—塑料环；11—镶块；12—驻退杆。

这种紧塞结构是以性能良好的聚四氟乙烯密封环内衬橡胶胀圈来紧塞的。装配时，支环被驻退筒内的环形突起顶住，当压螺拧紧后，便通过压环和橡胶圈压缩碟形簧，碟形簧力始终压在橡胶胀圈上，使它产生径向压力，此压力通过塑料密封环紧压在紧塞表面上实现对液体的密封。工作时，驻退机工作压力也作用在橡胶胀圈上，这时其轴向受到两个力的作用，由于可以使弹簧力足够大，因此在这两个力的作用下，使橡胶胀圈对塑料密封环产生的径向压力始终大于液体压力，保证了可靠地密封。据有的实验证明，这种结构的紧塞装置能可靠地密封高于1000公斤力/厘米<sup>2</sup>压力下的液体。同时由于相对运动表面处采用性能良好的聚四氟乙烯作为密封环而减少了摩擦和磨损。

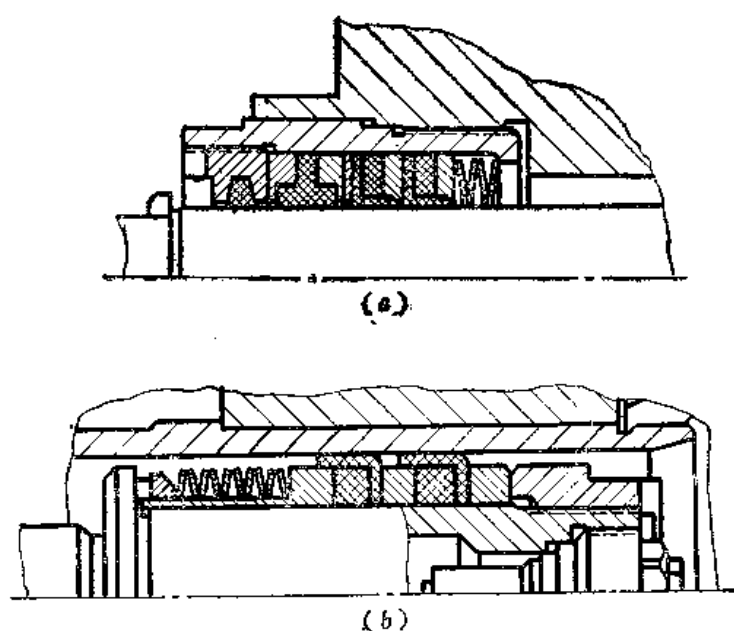


图2-44 59-100 G驻退复进机紧塞结构

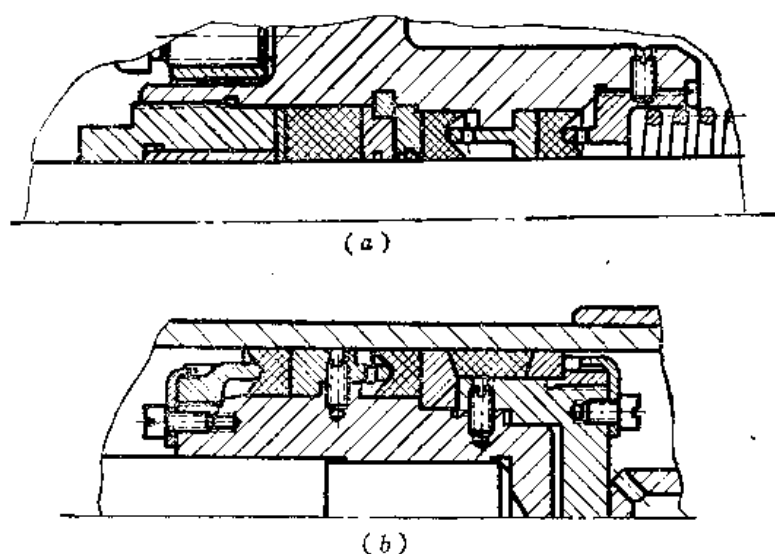


图2-45 59-130 J复进机的紧塞结构

革制成，现已逐渐由塑料（聚四氟乙烯）密封环代替而成为第三种结构（见c）。

b) 图2-45中分别示出了是59-130 J复进机紧塞具和活塞的运动部位紧塞装置的结构；图2-46中分别示出了60-122 J复进机活塞和紧塞具的运动部位紧塞装置结构。它们都是采用双皮碗结构。皮碗由8075橡胶制成。它们结构上共同的特点是，座环在压力下不能轴向移动并确保它与皮碗之间的间隙，使液体能在其中流动畅通；此外，第一个皮碗在液体压力作用下将力沿轴向传递给第二个皮碗的座环，而不挤压第二个皮碗。

60-122 J的上述间隙按名义尺寸计算为3~3.5毫米，59-130 J的此间隙按名义尺寸计算为0.2~0.5毫米。为防腐蚀，在活塞头，紧塞具本体及座环的表面进行镀铬处理，有的座环以锰黄铜制成。实践证明，这种复进机的紧塞结构紧塞性能良好，结构简单，工艺性也好。此外，橡胶皮碗的摩擦系数也较牛皮的小。

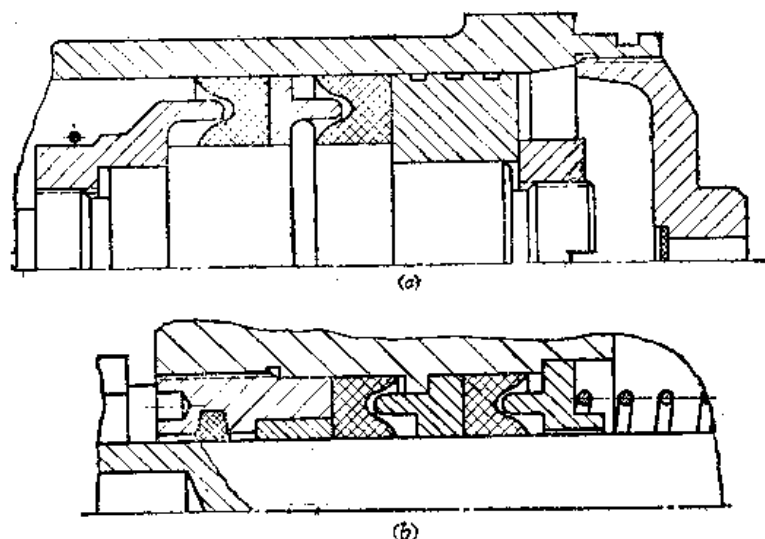


图2-46 60-122 J 复进机的紧塞结构

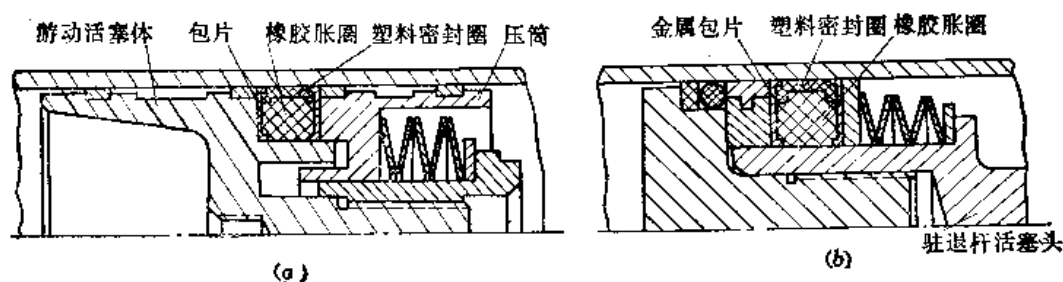


图2-47 美M102-105 L 的活塞的紧塞结构

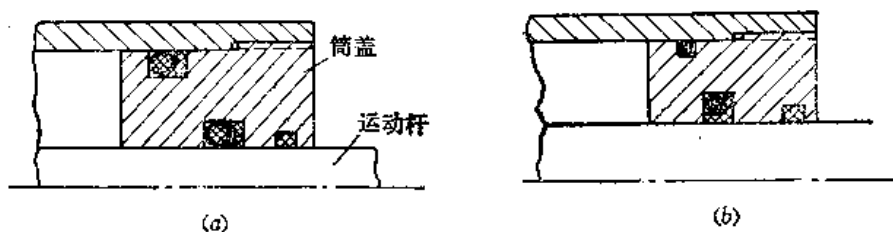


图2-48 有相对运动部位的紧塞

c) 在国外和我国新设计的火炮中，复进机紧塞装置大量采用2中c项所述的结构(参见图2-47)。其中a、b分别为游动活塞、驻退杆活塞的紧塞结构。它们的结构特点及优点前已述及。

另外还有如图2-48所示的用于有相对运动部位的密封的“O”型圈加“C”或“L”型塑料(聚四氟乙烯)挡圈的结构。

总之，紧塞装置的结构关系到火炮长期保存和反后坐装置正常工作。各国都在不断探索各种新的性能良好的密封材料和合理的结构以适应设计新型反后坐装置的需要。

## 第八节 反后坐装置中的液体

火炮反后坐装置中所注之液体通常称为火炮驻退液，它是驻退机和复进机的工作介质。由于需依靠它在发射过程中产生阻力，传递压力和进行能量转化，而且它又长期与

金属, 紧塞元件和气体接触, 所以火炮驻退液需满足以下要求:

(1) 凝固点要低, 沸点要高。因为火炮须在各种气象条件下都能使用。在我国东北的冬季最低温度可到 $-45^{\circ}\text{C}$ , 此时, 驻退液应不凝固而且应保持较好的流动性; 另一方面, 火炮连续射击时, 由于后坐能量的大部分为驻退液所吸收, 所以它的温升极快, 驻退液的沸点越高, 容许持续发射的弹数也就越多。

(2) 热容量要大, 气化热要高。以便降低驻退液每发的温升值, 提高发射速度和持续发射的发数。

(3) 密度和粘度较大而且随温度变化要小。密度和粘度越大, 液体单位体积运动所消耗的能量越大, 从而可以减小驻退机的结构尺寸。温度升高后, 液体的密度和粘度一般会减小, 致使后坐阻力减小, 后坐长度增长。连续发射时, 驻退液温度可达 $100^{\circ}\text{C}$ , 如密度及粘度变化太大将严重偏离设计的火炮受力的规律和运动规律, 甚至不能使反后坐装置正常工作。根据实际使用的经验, 密度变化的影响比粘度影响大。

(4) 化学稳定性要好。保证在长期保管中及在各种温度与压力下不变质, 不改变液体的组分和性质, 不腐蚀金属和紧塞元件。

(5) 来源要丰富, 生产简便, 价格便宜。保证战时能大量及时的供应。

(6) 无毒无害。保证生产和部队勤务人员的安全。

目前我国装备的火炮采用的驻退液主要是斯切奥尔液和斯切奥尔-M液。在一些旧式火炮上也有采用AY-定子油的。表2-1和表2-2列出它们的成分和性能。

表2-1 驻退液成分

成分百分比	斯切奥尔	斯切奥尔-M	691
甘油	57.7	46.3	46.3
酒精	—	19.2	19.2
铬酸钾	2.0	1.6	—
氢氧化钠	0	0.1	加至pH值 $\approx 8.5\sim 9.5$
磷酸二乙胺	—	0.1	—
磷酸氢二钠	—	—	0.5
硼砂	—	—	0.5
蒸馏水	加至100%	加至100%	加至100%

斯切奥尔和斯切奥尔-M液中的铬酸钾 ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) 是良好的阻化剂, 它可以减低驻退液对钢铁的腐蚀。氢氧化钠 ( $\text{NaOH}$ ) 可使液体略带碱性以保持其性能的稳定, 减缓变酸的过程。以甘油为基础的驻退液的优点是比热和比重大, 对紧塞元件不浸润溶胀, 低温粘度小; 它的缺点是成本高, 沸点低, 换油期短, 高压下易被氧化变酸, 以铬酸钾为阻化剂时在光和热作用下会发生氧化还原作用, 使驻退液变酸, 尤其对铜质零件腐蚀严重。近年来曾把驻退液中的铬酸钾改用磷酸氢二钠及硼砂作阻化剂制成691驻退液(见表2-2)。因为在使用中发现它对钢腐蚀严重, 这比腐蚀铜更坏, 所以已停止使用。

另外, 西方各国多采用以石油产品为基础油的驻退液。比较明显的优点是来源丰富和价格便宜, 但比重较小, 粘性随温度变化较大。

我国也正在研制采用以石油产品为基础油的全国统一、冬夏通用的驻退液以代替价格较高的斯切奥尔和斯切奥尔-M液。

表2-2 驻退液的性能

驻退液名称		斯切奥尔	斯切奥尔-M	AY-锭子油
物理特性				
比重(15℃)公斤/分米 <sup>3</sup>		1.161~1.176	1.09~1.11	0.888~0.896
凝固点℃		-35	-57以下	-45
沸点℃		110~112	89~92	350
膨胀系数℃ <sup>-1</sup>		0.00055	0.00065	0.00069
比热		0.76~0.79	0.74	0.45~0.46
体积压缩系数β厘米 <sup>3</sup> /公斤			$50 \times 10^{-6}$	$75 \times 10^{-6}$
绝对粘度(泊)	-30℃	3.5	3.89	48.82
	-20℃	1.24	1.443	11.53
	-10℃	0.553	0.661	3.85
	0℃	0.267	0.297	1.65
	20℃	0.103	0.103	0.40
	50℃	0.037	0.037	0.106
	80℃	0.020	0.019	0.048

### 第三章 后坐时基本方程组的建立

反后坐装置是控制发射时火炮受力和运动规律的部件,这种控制作用是通过反后坐装置内部液体流经液孔后的压力和速度变化实现的。阐明发射时火药气体对火炮的种种作用,以及反后坐装置内部流体各参量的分布和变化规律,是反后坐装置设计的重要基础。

本章从分析后坐运动的主动动力入手,推导出后坐部分驻退后坐运动微分方程和后坐阻力方程。然后以最简单式驻退机为对象,在流动为定常、一维和不可压缩的假设下,运用流动液体的质量和能量守恒规律建立包括上述方程的方程组。这个方程组较深刻地概括了火炮受力和运动规律以及驻退机内部液体流动状况,给反后坐装置设计提供了一个工程设计方法。

#### 第一节 发射时的炮膛合力和驻退后坐运动微分方程的建立

火炮发射时,引起火炮后坐运动的主动动力是炮膛合力。仔细分析发射现象可以知道,火药气体作用时间是短暂的,大约几十毫秒,但它对炮身的作用是复杂的。为了便于处理,一般将火药气体分为三个作用时期:

启动时期——由弹带开始嵌入膛线起至弹带完全嵌入膛线止。

点燃发射药后,弹底所受的力逐渐增大,当足以克服弹带嵌入膛线的阻力时,弹丸才开始运动。在启动时期内,弹丸向前运动一个弹带宽度,后坐部分同时向后运动,但速度很小,位移也很小。对研究后坐运动来说,可以认为弹带嵌入膛线的过程是瞬时完成的,即可以忽略这一时期内弹丸和后坐部分的运动。

弹丸沿膛内运动时期——由弹带完全嵌入膛线起至弹带飞离炮口止。有时简称为膛内时期。

这一时期,弹丸在膛内被火药气体加速向前运动,同时后坐部分加速向后运动。弹丸沿膛内运动时期的时间约为几至十几毫秒,后坐部分的后坐行程约为0.5倍的口径。

火药气体后效期——由弹丸飞离炮口起至膛内火药气体排空止。也可简称为后效期。

当弹丸飞出炮口后,高速高压的火药气体由炮口向前喷出,继续给后坐部分向后的推力,使它继续后坐。

下面我们分别研究弹丸沿膛内运动时期和火药气体后效期炮膛合力的计算。

##### 一、弹丸沿膛内运动时期的炮膛合力

这一时期内,膛内充满火药气体,在炮膛底部和药室锥面上均有火药气体压力作用,使炮身受有轴向力。弹丸运动时对膛线导转侧施加正压力和摩擦力,其沿炮膛轴向分力之和称为弹丸作用在膛线上的力。此外,火药气体向前流动,对膛壁产生一向前的摩擦力,但其值甚小可以忽略。由上面分析可知,弹丸沿膛内运动时期炮膛合力 $P_{pr}$ 主要包



括以下三项：火药气体作用在膛底的力、作用在药室锥面上的力以及弹丸作用在膛线上的力，如图 3-1 所示。

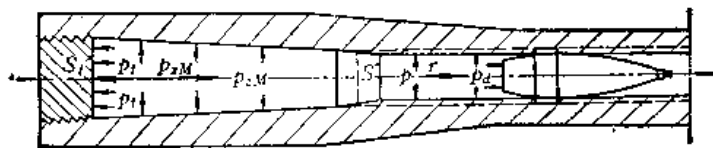


图3-1 膛内时期的炮膛合力

即

$$P_{pr} = P_t - P_{zM} - r \quad (3-1)$$

式中  $P_t$ ——火药气体作用在膛底的力；

$P_{zM}$ ——火药气体作用在药室锥面上的力的轴向分力；

$r$ ——弹丸对膛线作用力的轴向分力。

下面分别分析这三个力：

### 1. 火药气体作用在膛底的力 $P_t$

由内弹道学可知，在一定假设条件下，火药气体的膛底压力  $p_t$  与膛内平均压力  $p$  有如下关系：

$$p_t = \frac{1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{\varphi_1 q}}{1 + \frac{1}{3} \frac{\omega}{\varphi_1 q}} p = \frac{\varphi_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{q}}{\varphi_1 + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q}} p \approx \frac{1}{\varphi} \left( \varphi_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{q} \right) p \quad (3-2)$$

式中  $\varphi_1$ ——仅考虑弹丸旋转和摩擦两种次要功的计算系数， $\varphi_1 \approx 1.02$ ；

$\varphi$ ——次要功计算系数，一般

$$\varphi = K + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q} \approx \varphi_1 + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q}$$

如果用  $S_t$  表示膛底断面积，则作用在膛底的力为

$$P_t = p_t S_t \approx \frac{1}{\varphi} \left( \varphi_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{q} \right) p S_t \quad (3-3)$$

### 2. 作用在药室锥面上的力的轴向分力 $P_{zM}$

由内弹道学已知，膛内压力分布是不均匀的，沿药室长度上火药气体压力分布也是不均匀的。为了计算方便，我们取整个药室锥面上所受火药气体压力的平均值为  $p_{zM}$ 。药室锥面在垂直于炮膛轴线方向的投影面积为  $S_t - S$ 。S 为线膛部分的断面积，因此

$$P_{zM} = (S_t - S) p_{zM}$$

一般讲， $p_{zM}$  与  $p_t$  相差不大，忽略其差别不会带来不允许的误差。故可取

$$P_{zM} = (S_t - S) p_t \quad (3-4)$$

### 3. 弹丸对膛线作用力的轴向分力 $r$

$r$  是由于弹丸运动时弹带沿炮膛轴线方向给炮身的作用力，因此， $r$  力的方向与弹丸运动方向相同。但它应与膛线在炮膛轴线方向上给弹带的力大小相等方向相反。故  $r$  也称为弹丸的膛线阻力。列出弹丸运动方程

$$\frac{q}{g} \frac{dv}{dt} = Sp_a - r \quad (3-5)$$

式中  $q$  ——弹重;

$p_a$  ——火药气体的弹底压力。

如果以弹丸相当质量的形式考虑膛线阻力  $r$  的作用, 弹丸运动方程还可写成下式

$$\varphi_1 \frac{q}{g} \frac{dv}{dt} = Sp_a \quad (3-6)$$

将 (3-5) 式代入 (3-6) 式, 即得膛线阻力  $r$  与  $p_a$  的关系

$$r = \frac{1}{\varphi_1} (\varphi_1 - 1) Sp_a \quad (3-7)$$

由式  $\varphi \frac{q}{g} \frac{dv}{dt} = Sp$ , 可知

$$p_a = \frac{\varphi_1}{\varphi} p \quad (3-8)$$

代入 (3-7) 式, 又得

$$r = \frac{1}{\varphi} (\varphi_1 - 1) Sp \quad (3-9)$$

将 (3-3)、(3-4) 和 (3-9) 式代入 (3-1) 式, 化简得

$$P_{pt} = \frac{1}{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{q} \right) Sp \quad (3-10)$$

式 (3-10) 说明弹丸沿膛内运动时期炮膛合力  $P_{pt}$  的变化正比于膛内平均压力  $p$  的变化。故  $P_{pt}-l$ 、 $P_{pt}-t$  曲线与  $p-l$ 、 $p-t$  曲线完全相似, 只是幅值不同而已。

当弹丸弹带脱离膛线的瞬时, 膛线阻力消失, 炮膛合力突然升高, 即由弹丸沿膛内运动时期终了瞬间的

$$P_{pt,g} = \frac{1}{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{q} \right) Sp_g \quad (3-11)$$

跃升至后效期开始瞬间的

$$P_g = \frac{1}{\varphi} \left( \varphi_1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{q} \right) Sp_g \quad (3-12)$$

式中  $p_g$  为弹丸弹带脱离炮口膛线瞬间的膛内平均压力。一般估算  $P_{pt}$  时可用下式

$$P_{pt} \approx Sp \quad (3-13)$$

即弹丸沿膛内运动时期炮膛合力近似等于炮膛断面积与膛内平均压力的乘积。而正式校核炮身和炮架强度时, 应采用 (3-10) 式计算  $P_{pt}$ 。而用 (3-10) 式和 (3-13) 式计算之  $P_{pt}$  值相差约 2~4%。

## 二、火药气体后效期的炮膛合力

关于后效期火药气体对火炮和弹丸的复杂作用, 长期以来人们对它的认识虽然不断深入, 但为了推导出求后效期  $P_{pt}$  的理论公式, 还不得不作这样或那样的假设。与此同时, 也出现了以试验为依据的各种经验公式。两者各有优点, 又各有不足, 互为补充。这里只介绍指数规律的经验公式, 关于理论公式将在第十二章中介绍。

弹丸一出炮口，火药气体由膛壁迅速排出，膛内气体压力和密度急剧下降，膛壁合力也由弹丸出炮口瞬间的  $P_g$  迅速下降至零，其下降趋势近似于指数规律，用下式表示：

$$P_{pt} = P_g e^{-\frac{t}{b}} \quad (3-14)$$

式中  $b$  ——反映膛壁合力衰减快慢的时间常数；

$t$  ——以后效期开始为起点计算的时间。

由 (3-14) 式不难看出，时间常数  $b$  越大， $P_{pt}$  衰减得越慢。后效期延续时间越长。此外，时间常数  $b$  是一个经验系数，其确定方法，详见第五章。

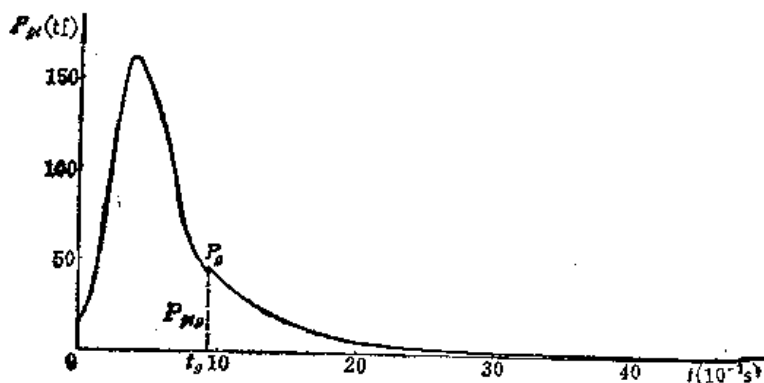


图3-2 56-85 J 膛壁合力随时间变化曲线

图 3-2 是 56-85 J 弹丸沿膛内运动时期（按式 1-10 计算）和后效期（不带炮口制退器按式 3-14 计算）膛壁合力随时间变化的曲线。由曲线可以看出，发射时膛壁合力有作用时间短、变化剧烈、最大值极高等特点。如果火炮采用刚性炮架，就必须按膛壁合力最大值来设计，这时炮架的强度和刚度是难以保证的。如果火炮采用弹性炮架，则炮架受力状况会得到显著改变，因而大大减轻了炮架的重量。

### 三、驻退后坐运动微分方程的建立

掌握了膛壁合力的计算和变化规律，便可建立描述后坐部分后坐运动规律的微分方程。应该指出，它当然也描述了驻退杆（杆后坐时）或驻退筒（筒后坐时）的运动规律。

为了建立驻退后坐运动微分方程，首先取后坐部分为研究对象，对发射时后坐部分进行受力分析。发射时，后坐部分所受的主动力为膛壁合力  $P_{pt}$  和重力  $Q_0$ ，它们分别作用在膛壁轴线和后坐部分重心上。此外还有弹丸作用于膛线导转侧的力矩  $M_{az}$ ，它与弹丸的旋转方向相反。约束反力包括驻退机力  $\phi_0$ 、复进机力  $P_f$  和它们紧塞装置的摩擦力  $F$ ，以及摇架滑板的法向反力  $N_1$ 、 $N_2$  和相应的摩擦力  $T_1$ 、 $T_2$ 。摇架滑板上的总摩擦力（假设前后滑板的摩擦系数相同时）为

$$T = T_1 + T_2 = f(N_1 + N_2) \quad (3-15)$$

式中  $f$  ——摇架滑板的摩擦系数。

应该指出，对弹丸作用于膛线导转侧的力矩  $M_{az}$ ，在结构上必须提供相应的反力矩，槽形摇架，由左右导轨提供；筒形摇架，由摇架上的炮身定向栓室提供。

由上述分析可知，主动力和约束反力组成了一个空间力系。为了讨论方便，我们

假设:

1. 弹丸作用于膛线导转侧的力矩  $M_{az}$ , 只在弹丸沿膛内运动时期起作用, 对后坐方向上的运动影响较小, 故忽略它的作用;
2. 发射时所有力均作用在射面内, 参见图3-3;

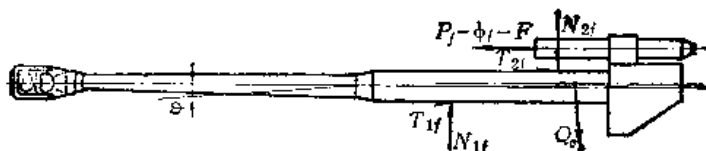


图3-3 后坐部分的受力分析

3. 炮架是刚性的。

这样, 发射时后坐部分的受力状态就简化为刚体在平面力系作用下的动力学问题。

将后坐部分看成是一个质点, 并加入后坐部分的惯性力  $\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2}$ , 根据质点的达朗贝尔原理, 作用于后坐部分上的主动力、约束反力和后坐部分的惯性力, 在形式上组成一平衡力系, 故沿炮膛轴线方向的力的平衡方程为

$$P_{pr} + Q_0 \sin \varphi - \frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} - \phi_0 - P_f - F - T = 0$$

移项得

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pr} - \phi_0 - P_f - F - T + Q_0 \sin \varphi \quad (3-16)$$

此式称为驻退后坐运动微分方程, 简称驻退方程。

式中  $X$ ——后坐行程;

$\varphi$ ——火炮射角。

$$\text{记} \quad R = \phi_0 + P_f + F + T - Q_0 \sin \varphi \quad (3-17)$$

式中,  $R$  为发射时方向与炮膛合力相反的一个合力, 称为后坐阻力。式 (3-17) 称为后坐阻力方程。应该指出, 将  $Q_0 \sin \varphi$  一项计入  $R$  内是一种处理方法。后坐阻力  $R$  的引入, 使驻退方程化为最简练的形式, 即

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pr} - R \quad (3-18)$$

由式 (3-18) 可以看出, 主动力  $P_{pr}$  是火炮发射时产生后坐运动的原因, 而后坐阻力  $R$  是阻止后坐, 使后坐运动停下来的原因。这对矛盾着的力的发生、发展和衰亡, 控制着后坐运动的规律。设计反后坐装置, 就是通过控制后坐阻力  $R$  的变化规律, 进而控制后坐运动规律和火炮受力。

**例题** 求筒形摇架作用在滑轨 (或衬瓦) 上的力。

**解** 沿用本节受力分析时的基本假设。取后坐部分为自由体, 如图 3-4 所示。标出所受的主动力  $P_{pr}$  和约束反力及各力之间的几何尺寸: 作用在衬瓦上的力  $N_1$  和  $N_2$ , 相应的摩擦力  $fN_1$ 、 $fN_2$ , 以及反后坐装置提供的阻力  $\phi_0 + P_f + F_z + F_f$  等。按照达朗贝尔原理计入惯性力  $\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2}$ , 则主动力、惯性力和约束反力在形式上平衡。取坐标系如图,

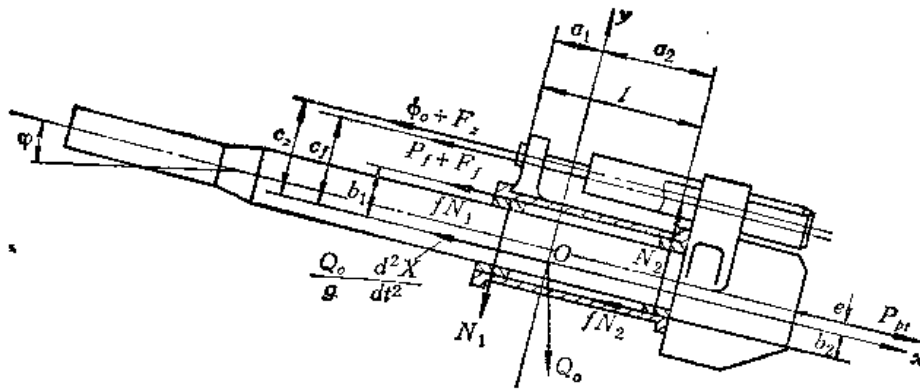


图3-4 求筒形摇架衬瓦上的力

列出平衡方程如下:

$$\Sigma x = 0 \quad P_{pr} - \frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} - K - fN_1 - fN_2 + Q_0 \sin \varphi = 0 \quad (a)$$

$$\Sigma y = 0 \quad N_2 - N_1 - Q_0 \cos \varphi = 0 \quad (b)$$

$$\Sigma M_o = 0 \quad P_{pr}e - Kc - N_1a_1 - N_2a_2 - fN_1b_1 + fN_2b_2 = 0 \quad (c)$$

其中:

$$K = \phi_o + P_f + F_z + F_f$$

$$Kc = (\phi_o + F_z)c_z + (P_f + F_f)c_f$$

式中,  $F_z$  和  $F_f$  分别为驻退机和复进机紧塞装置的摩擦力。

由 (b) 式得

$$N_2 = N_1 + Q_0 \cos \varphi$$

将上式代入 (c) 式, 得

$$P_{pr}e - Kc + (N_1 + Q_0 \cos \varphi)(fb_2 - a_2) - N_1(fb_1 + a_1) = 0$$

即

$$N_1[a_1 + a_2 + f(b_1 - b_2)] = P_{pr}e - Kc + Q_0 \cos \varphi (fb_2 - a_2)$$

由图 3-4 可知,  $l = a_1 + a_2$ , 则

$$N_1 = \frac{P_{pr}e - Kc + Q_0 \cos \varphi (fb_2 - a_2)}{l + f(b_1 - b_2)}$$

$$N_2 = \frac{P_{pr}e - Kc + Q_0 \cos \varphi (a_1 + fb_1)}{l + f(b_1 - b_2)}$$

上两式说明, 在整个后坐过程中,  $N_1$ 、 $N_2$  是随参量  $a_1$ 、 $a_2$  变化的, 而  $a_1$ 、 $a_2$  是后坐行程  $X$  的函数, 故  $N_1$ 、 $N_2$  在后坐过程中是后坐行程  $X$  的函数, 同时又是射角  $\varphi$  的函数。如果较精确的计算衬瓦上的摩擦力, 应用下式

$$T = f(N_1 + N_2) = f \frac{2(P_{pr}e - Kc) + Q_0 \cos \varphi [a_1 - a_2 + f(b_1 + b_2)]}{l + f(b_1 - b_2)}$$

可见, 摩擦力  $T$  在后坐过程中也是变化的。应特别指出, 在反后坐装置设计中的正面计算时, 火炮各部结构尺寸尚未确定, 而且  $T$  与其中的  $Kc$  又互相影响, 没有条件精确计算  $T$ 。由于  $T$  值在后坐阻力  $R$  中所占比例较小, 这时可用

$$T = f Q_0 \cos \varphi$$

作近似计算。这里  $f$  应理解为符合系数，与上面精确计算公式中的实际摩擦系数  $f$  有区别。此时取  $f = 0.16 \sim 0.20$ ，略大于实际的摩擦系数。

## 第二节 反后坐装置设计中关于液体流动的描述

射击中反后坐装置内液体流动是十分复杂的，这给反后坐装置设计和研究带来许多不便。本节从杆后坐的最简单式驻退机内液体流动现象入手，提出某些基本假设，并在此假设下给出液体流动的力学基本规律。

### 一、发射时驻退机内液体流动现象和基本假设

发射时，后坐部分以后坐速度  $V$  沿摇架滑板向后运动。驻退杆活塞同样以速度  $V$  向后运动，先排除 I 腔真空部分，然后压缩 I 腔液体，如图 3-5 所示。被压缩的液体从流液孔高速喷入 II 腔。这股高速射流最后射到驻退筒底部，成为杂乱无章的涡漩。由于驻退液是可压缩的，即一定重量的液体随外界压力的增加其体积逐渐缩小，造成驻退液的重度逐渐增大。这种液体重度的变化直接影响驻退机内液体流速和 I 腔液体压力的变化。而驻退液的粘性，使液体分子之间或者液体与筒壁之间产生摩擦阻力，消耗了一部分后坐能量，并使流液孔附近出现液体收缩和脱离现象。在整个后坐过程中，流经流液孔的液体流速和 I 腔液体压力，经历了从零到最大，再从最大减至为零的过程。

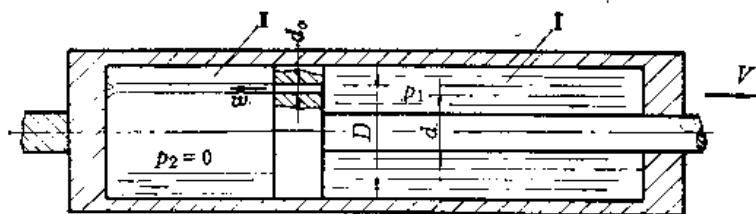


图3-5 最简单式驻退机简图

现在分析一下驻退机内液体的流态，取驻退液质量密度  $\rho = 112 \text{ 千克/米}^3$ ，动力粘性系数  $\mu = 0.0103 \text{ 帕斯卡} \cdot \text{秒}$ ，流经流液孔的液体最大流速  $w_m = 1000 \text{ 米/秒}$ ，流液孔最大面积  $a_s = 4 \text{ 厘米}^2$ ，流液孔相当直径按  $d_0 = 0.0225 \text{ 米}$  计算，则

$$Re_m = \frac{\rho d_0 w_m}{\mu} = \frac{112 \times 0.0225 \times 1000}{0.0103} = 2.45 \times 10^6$$

粗略计算可以看出，驻退机内流体雷诺数最大值可达 20 余万。与液体流速变化规律相似，雷诺数在后坐过程中，同样经历了从零开始，由小到大再降到零的变化过程。按推荐的临界雷诺数  $Re = 2000$  判断，驻退机内流体流动状态在大部分时间内呈紊流状态。由流体力学可知，紊流意味着流动是非定常的，是三锥的。

应该指出，实际应用中的驻退机的流液孔是由变截面的环形间隙构成，其流动现象更为复杂。由于间隙很小，临界雷诺数将降至  $Re = 1200 \sim 1400$ 。

以上是对最简单式驻退机后坐时液体流动现象的描述，可用下面两句话加以概括：液体是可压缩的粘性流体，流动为三维非定常的。

驻退机内的流动是十分复杂的, 如果不抓住主要因素, 略去次要因素, 将其模型化, 则利用流体力学方程组解出其流动参量几乎是不可能的。为了工程上处理简便, 在反后坐装置设计中作如下假设:

1. 驻退液是不可压缩的;
2. 流动是一维的定常流;
3. 驻退液在反后坐装置通道中的流动, 看成是以地球为惯性坐标系的。

值得指出, 液流通道中某点的流速  $w$  和压力  $p$  即为该点所在截面上的平均流速和压力, 并认为该截面上的值处处相等。对于恒定紊流 (即流速和压力的时间平均值不随时间变化的紊流),  $w$  和  $p$  还应是对时间平均的流速和压力。这样, 我们讨论的模型就无需再区分层流和恒定紊流了。今后, 若不加特别说明, 流动参量  $w$  和  $p$  即包含该点所在截面上的平均含义, 又包含对时间平均的含义。

## 二、连续方程

连续方程是流体力学基本方程之一, 是质量守恒定律在流体力学中的应用。在液体流动的空间中, 划出一个固定的体积, 则在某一时间间隔内, 流入和流出此体积的液体质量必然相等。这就是质量守恒在流体力学中的一种表达形式。

在液体通道中, 任取一 体积  $\Omega$ , 如图 3-6 所示。该体积由 1-1 截面、2-2 截面和变直径的液流通道壁面组成的封闭表面所包围。壁面没有液体的流入和流出, 只需考查 1-1、2-2 截面。在时间间隔  $\Delta t$  内, 由 1-1 截面流入  $\Omega$  的液体质量为  $\rho_1 w_1 A_1$ , 从 2-2 截面流出的液体质量为  $\rho_2 w_2 A_2$ , 显然

$$\rho_1 w_1 A_1 - \rho_2 w_2 A_2 = 0$$

式中  $\rho_1$ 、 $w_1$ 、 $A_1$ ——分别为 1-1 截面上的液体密度、流速和截面面积;

$\rho_2$ 、 $w_2$ 、 $A_2$ ——分别为 2-2 截面上的液体密度、流速和截面面积。

由于液体是不可压缩的, 即  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ , 有

$$\rho w_1 A_1 = \rho w_2 A_2 \quad (3-19)$$

或

$$w_1 A_1 = w_2 A_2 = \text{常数} \quad (3-20)$$

(3-19) 和 (3-20) 式即为不可压缩流体的连续方程。方程对于定常流动任何时刻均成立, 对非定常流动只成立于某一瞬时。

(3-20) 式说明在反后坐装置的液体通道中某截面上液体的流速与此截面的面积成反比。在图 3-5 所示的最简单式驻退机中, 若活塞直径为  $D$ , 驻退杆直径为  $d$ , 流液孔直径为  $d_0$ , 后坐速度为  $V$ , 经流液孔的液体流速为  $w$ , 则

$$\text{活塞工作面积} \quad A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) - \frac{\pi}{4} d_0^2$$

$$\text{流液孔面积} \quad a = \frac{\pi}{4} d_0^2$$

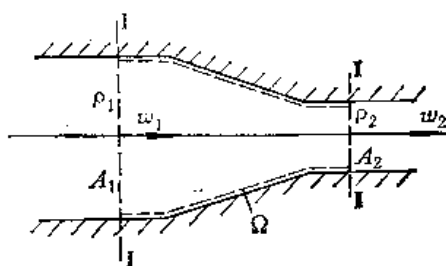


图3-6 连续方程

由连续方程, 有

$$VA = aw$$

解出  $w$ , 得

$$w = \frac{A}{a}V$$

若  $\frac{A}{a} = 100$ ,  $V = 10$  米/秒, 则  $w = 1000$  米/秒。此速度相当于枪弹或炮弹出膛口的速度。

### 三、能量方程

连续方程给出了流速与液流通截面之间的关系, 但在反后坐装置设计中, 常常需要确定流速  $w$ 、压力  $p$  和截面面积之间的关系, 仅仅一个连续方程是不够的, 还须补充一个能量方程。

将驻退液在反后坐装置通道中的流动, 看成是以地球为坐标系的惯性系统。从虚功的观点出发, 即外力和惯性力对某块流动液体所作的功, 等于该块液体在流动过程中因摩擦而损失掉的能量的观点出发, 导出能量方程。

在液流通道中, 考察液体在重力场作用下的流动 (见图 3-7)。作用在流体上的质量力有重力和惯性力。在某一时间  $t$ , 由 1-1 和 2-2 截面所限制的这段液体, 经过微小时间间隔  $dt$  后, 移动到 1'-1' 和 2'-2' 位置。下面列出在流动过程中所有力对此段液体所作之功和能量损失。

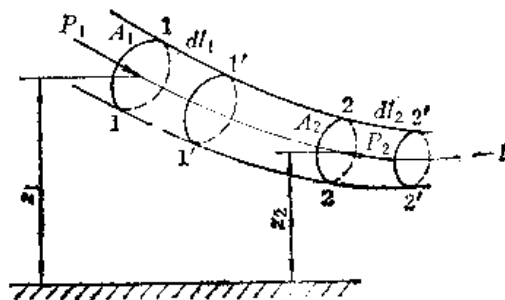


图3-7 能量方程

在流动过程中, 作用于此段液体的外力有作用于  $A_1$  上的总作用力  $P_1$ ; 作用于  $A_2$  上的总作用力  $P_2$ ; 作用于此段液体上的重力  $G$  和由加速度引起的惯性力  $I$ 。它们对此段液体所作之功为:

$$P_1 \text{ 力所作的功为 } p_1 A_1 dl_1 = p_1 A_1 w_1 dt = p_1 Q dt$$

式中,  $Q$  为单位时间内流过  $A_1$  的体积, 称为流过  $A_1$  的体积流量。因为

$$dQ = \frac{dV}{dt} = w dA_1$$

故

$$Q = \int_A w dA_1 = w A_1$$

$P_2$  力所作的功为  $-p_2 Q dt$ , 因  $P_2$  力与流动方向相反, 故取其所作之功为负。

$G$  力所作的功为  $\rho g A_1 dl_1 z_1 - \rho g A_2 dl_2 z_2 = \rho g Q dt (z_1 - z_2)$ , 由于  $dl_1$  和  $dl_2$  极小, 故  $A_1 dl_1$  和  $A_2 dl_2$  段液体的重心可认为与  $A_1$  和  $A_2$  截面的形心重合, 其高度分别为  $z_1$  和  $z_2$ 。

$I$  力所作的功为

$$\int_1^2 (-Ma) dl = \int_1^2 -\rho Q dt \left( \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial l} \right) dl$$

式中  $M$ ——所考察液体段的流体质量,



$$M = \rho Q dt$$

$a$  ——所考察液体段的全加速度, 即

$$\begin{aligned} a &= \frac{d}{dt} w(l, t) = \frac{\partial}{\partial t} w(l, t) \frac{dt}{dt} + \frac{\partial}{\partial l} w(l, t) \frac{dl}{dt} \\ &= \frac{\partial w}{\partial t} + w \frac{\partial w}{\partial l} \end{aligned}$$

对于定常流, 因  $\frac{\partial w}{\partial t} = 0$ , 故  $a = w \frac{dw}{dl}$ ;

$l$  ——一维曲线坐标变量。

因此, 对于定常流,  $I$  力所作之功可写为

$$\int_1^2 (-Ma) dl = -\rho Q dt \int_1^2 \left( w \frac{dw}{dl} \right) dl = \rho Q dt \left( \frac{w_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} \right)$$

设此段液体在由 1-1、2-2 截面流至 1'-1' 和 2'-2' 截面过程中, 单位重量液体因摩擦而损失掉的能量为  $H_r$ , 则整段液体所损失掉的全部能量应为  $\rho g Q dt H_r$ 。由虚功原理可列出下面平衡方程:

$$p_1 Q dt - p_2 Q dt + \rho g Q dt (z_1 - z_2) + \rho Q dt \left( \frac{w_1^2}{2} - \frac{w_2^2}{2} \right) = \rho g Q dt H_r$$

简化并整理, 得

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{w_2^2}{2g} + H_r \quad (3-21)$$

在反后坐装置设计中, 常常采用液体重度  $\gamma$  计算, 而

$$\gamma = \rho g$$

于是 (3-21) 式可写为

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + H_r \quad (3-22)$$

(3-21) 和 (3-22) 式即为重力场作用下的定常流动的能量方程, 或称为伯努利方程。由推导过程可以看到: 能量方程表示单位重量的液体在定常流动过程中,

能量的变化情况。 $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g}$  为单位重量的液体在截面 1-1 位置上的全部机械能,

即比位能  $z_1$ , 比压能  $\frac{p_1}{\gamma}$  和比动能  $\frac{w_1^2}{2g}$  之和, 当此块液体流到 2-2 截面位置时, 它要消

耗掉  $H_r$  能量以克服流动中的各种损失, 最后剩下  $z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g}$  的机械能。

同样, 能量方程也可以这样理解: 在定常流动的同一瞬时, 处于  $A_1$  面上的单位重量液体所具有的全部机械能  $z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g}$  和处于  $A_2$  面上的单位重量液体所具有的全部

机械能  $z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g}$  之差, 等于从  $A_1$  流到  $A_2$  单位重量液体克服各种损失所消耗的能量  $H_r$ 。

上述的比能损失  $H$ , 大致包括两部分。一部分称为沿程损失——液体沿截面尺寸与角度不变的液流通道流动时的能量损失。它反映了液体分子之间以及液体与壁面之间的摩擦损失。另一部分称为局部损失——当液流通道截面尺寸与角度变化时, 液体的能量损失。它反映了当液流通道几何尺寸变化时, 由于液体惯性, 不能完全沿着壁面流动, 产生脱离现象, 造成局部流动紊乱并有涡流产生而损失的一部分能量。两种损失的內因都是由于液体的粘性。

由于液体在反后坐装置中流动是很复杂的, 使得比能损失  $H$ , 的计算只能用经验性的公式。通常设计中认为液体流到某截面的比能损失  $H$ , 与该截面液体比动能  $\frac{w^2}{2g}$  成正比, 即

$$H = \xi \frac{w^2}{2g} \quad (3-23)$$

式中,  $\xi$  为液体的损失系数。显然  $\xi$  与液体通道的几何尺寸、壁面的粗糙程度、流动状态和液体的粘性等有关。具体计算可参考有关液压流体力学教课书。

### 第三节 后坐时基本方程组的建立及其解法

上一节根据流体力学知识, 推导出不可压缩流体的一维定常流动的连续方程和伯努利方程。这两个方程集中反映了液体在驻退机内流动的质量守恒和机械能守恒的规律。这一节将建立描述最简单的沟槽式驻退机受力和运动规律的方程组, 并通过分析引伸出反后坐装置设计中两类问题的求解思路。

#### 一、方程组的建立

以图 3-8 所示杆后坐的最简单的沟槽式驻退机为对象。当后坐时, 由于活塞的挤压, I 腔 (称为工作腔) 内液体压力升高。同时, 随着后坐运动驻退杆不断从驻退筒内拉出, II 腔 (称为非工作腔) 内出现真空。I 腔的液体通过活塞与变深度沟槽组成的流液孔  $a_x$

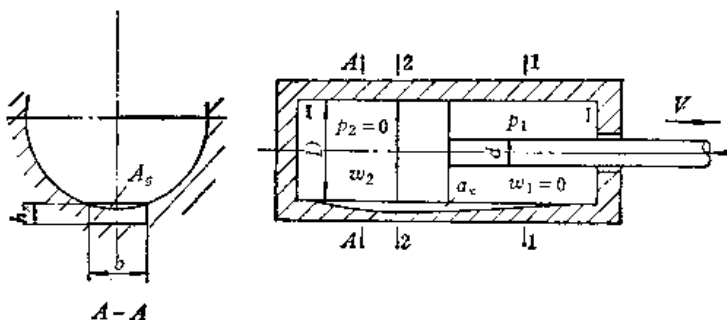


图3-8 杆后坐的最简单的沟槽式驻退机

流入 II 腔。取 1-1 和 2-2 截面, 建立两个截面间的压力和流速之间的关系。规定如下符号:

$p_1, w_1$ ——工作腔内 1-1 截面上的液体的压力和流速;

$p_2, w_2$ ——非工作腔内 2-2 截面上的液体压力和流速;

$a_x$ ——流液孔面积,  $a_x = bh_x - A_g$ ,

其中,  $b$  ——沟槽宽度;

$h_x$  ——沟槽的变深度;

$A_g$  ——弓形面积。

$A_0$  ——后坐时活塞工作面积,  $A_0 = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)$ 。

### 1. 驻退后坐运动微分方程和后坐阻力方程

取火炮后坐部分为自由体, 建立驻退方程和后坐阻力方程, 由 (3-18) 和 (3-17) 式, 有

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_p - R \quad (a)$$

$$R = \phi_0 + P_f + F + T - Q_0 \sin \varphi \quad (b)$$

### 2. 连续方程

驻退杆以  $V$  的速度后坐, 若观察者站在驻退杆上则可看成液体以  $V$  的速度流向流液孔, 并以  $w'_2$  的流速喷向 II 腔。由 (3-20) 式, 得

$$V A_0 = a_x w'_2$$

$$w'_2 = \frac{A_0}{a_x} V$$

上式解出之  $w'_2$  是相对于驻退杆的相对速度。活塞的牵连速度为  $-V$ , 故通过流液孔的绝对流速  $w_2$  为

$$w_2 = -\frac{A_0}{a_x} V - V \quad (c)$$

### 3. 伯努利方程

利用伯努利方程建立 1-1 和 2-2 截面的能量关系。在 1-1 截面上, 压力为  $p_1$ , 流速为  $w_1 = 0$ , 比位能为  $z_1$ ; 在 2-2 截面上, 压力  $p_2 = 0$ , 流速为  $w_2$ , 比位能为  $z_2$ 。因驻退机径向尺寸变化不大, 1-1 和 2-2 截面上液流中心高度相差无几, 可认为  $z_1 = z_2$ 。将上面参量代入 (3-22) 式, 有

$$\frac{p_1}{\gamma} = \frac{w_2^2}{2g} + H, = (1 + \xi) \frac{w_2^2}{2g}$$

应该指出, 利用上式计算之工作腔压力  $p_1$ , 往往与实测之压力值相差较大, 这是由于损失系数  $\xi$  不易取准, 另一方面, 三条基本假设与实际情况有些误差。因此, 反后坐装置设计中令一修正系数  $K$  代替  $1 + \xi$ , 上式可写为

$$\frac{p_1}{\gamma} = K \frac{w_2^2}{2g} \quad (d)$$

我们将  $K$  称为驻退机的液压阻力系数。  $K$  不仅包含了驻退机内液体流动的沿程损失和局部损失, 而且还包含对上述公式不完善部分 (如液体的收缩, 截面流速、压力的不均匀性等) 的修正。因此,  $K$  实质上是一个理论与实际之间的符合系数。在反后坐装置设计中, 对液压阻力系数  $K$  选取合理与否, 是关系设计成功与否的关键。关于  $K$  的详细讨论将在第七章进行。

### 4. 液压阻力方程

在后坐过程中, 工作腔压力始终作用在活塞的工作腔一侧, 这个液体压力作用在驻

退杆活塞上的合力，就是阻止后坐部分后坐的液压阻力  $\phi_o$ 。取驻退杆（包括活塞）为自由体（见图3-9），不难求出

$$\phi_o = p_1 A_o \quad (e)$$



图3-9 液压阻力

方程 (a)、(b)、(c)、(d) 和 (e) 联立，组成了后坐的基本方程组：

$$\begin{cases} \frac{Q_o}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pr} - R & (a) \\ R = \phi_o + P_f + F + T - Q_o \sin \varphi & (b) \\ w_z = \frac{A_o}{a_x} V - V & (c) \\ \frac{p_1}{\gamma} = K \frac{w_z^2}{2g} & (d) \\ \phi_o = p_1 A_o & (e) \end{cases} \quad (3-24)$$

应该指出，方程组 (3-24) 对其他结构形式的驻退机，并没有普遍意义。除了驻退后坐微分方程以外，其余方程 (c)、(d)、(e) 都因结构不同而异。另外，直接求解方程组也是没有意义的，因为未知数个数多于方程个数。在反后坐装置设计之前，已先进行内外弹道设计和火炮总体设计，即  $Q_o$ 、 $P_{pr}$ 、 $\varphi$  等量已知，而  $R$ 、 $\phi_o$ 、 $P_f$ 、 $F$ 、 $T$ 、 $p_1$ 、 $w_z$ 、 $V$  等量仍未知。但对特定的已知条件和求解对象，方程组是可解的。其求解思路，正是反后坐装置设计计算的基本思路，这也是建立这个模型的目的所在。在基本假设下建立的方程，虽然一定程度地反映了后坐部分受力和运动规律，以及驻退机内部液体运动规律，但却不能解出驻退机内流场各参量的分布。这个工作需要应用流体力学的理论，建立更为精确的物理模型和数学模型，运用计算流体力学的知识，借助于电子计算机才能完成。

## 二、两类问题的求解思路

反后坐装置设计计算中，经常遇到正面问题和反面问题。这两类问题对于方程组 (3-24) 具有不同的已知条件和求解对象。

正面问题：在正常射击条件（ $\varphi = 0^\circ$ 、常温、正装药）下，已知后坐阻力规律（ $R = R(X)$  或  $R = R(t)$ ），求解流液孔尺寸和驻退机结构尺寸。

反面问题：在各种射击条件下，已知驻退机结构尺寸和流液孔尺寸，求解实际的后坐阻力和后坐运动诸元（ $R = R(t)$ ， $V = V(t)$ ， $X = x(t)$  等）。

下面按方程组 (3-24) 简要说明这两类问题的求解思路。

### 1. 正面问题求解思路

(1) 在给定的射击条件（正装药、常温、 $\varphi = 0^\circ$ ）下，进行内弹道计算，然后根据火药气体不同作用时期解出  $P_{pr} - t$ 。

(2) 根据总体设计要求确定  $R = R(X)$  或  $R = R(t)$  规律 (第四章介绍)。由 (3-24)(a) 式

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pr} - R$$

其中, 炮膛合力  $P_{pr}$  和后坐阻力  $R$  均为已知, 在初始条件

$$X|_{t=0} = 0; \quad V|_{t=0} = 0 \quad (3-25)$$

下, 解二阶微分方程, 可以得到  $V = V(t)$ ,  $X = X(t)$ , 进而得到  $V-X$  曲线。

由于在弹丸沿膛内运动时期,  $P_{pr}$  仅是时间  $t$  的离散的表格函数, (a) 式不能用一般的解微分方程的方法求解 (第五章将讨论这一问题)。

(3) 由方程 (c)、(d)、(e) 消去  $w_2$  和  $p_1$ , 得出液压阻力  $\phi_0$  与后坐速度  $V$  和驻退机结构尺寸  $A_0$ 、 $a_x$  的关系 (第七章介绍)

$$\phi_0 = \frac{K\gamma}{2g} \left( \frac{A_0 - a_x}{a_x} \right)^2 A_0 V^2 = f(a_x) V^2 \quad (3-26)$$

(4) 由方程 (b) 可知, 当复进机设计 (第六章介绍) 后, 复进机力  $P_f$  随后坐行程  $X$  的变化规律, 即  $P_f = P_f(X)$  已知, 驻退机和复进机紧塞装置摩擦力  $F$ 、摇架导轨摩擦力  $T$  可以预先估算出, 因此 (b) 式可写为

$$\phi_0 = R - (P_f + F + T - Q_0 \sin \varphi) \quad (3-27)$$

由上式可以得到满足理想后坐阻力变化规律的  $\phi_0-X$  规律。

(5) 当合理的确定液压阻力系数  $K$  后, 将  $V-X$  和  $\phi_0-X$  代入 (3-26) 式, 可以解出满足理想的液压阻力变化规律的  $a_x-X$ 。当沟槽宽度  $b$  确定后, 变化的  $a_x$  是依赖变化的沟槽深度  $h_x$  而实现的。

$$h_x = \frac{a_x + A_g}{b} \quad (3-28)$$

到此为止, 已将流液孔尺寸  $h_x-X$  计算出来, 当然与一般机械设计一样, 在计算的同时还应进行驻退机的结构设计。

## 2. 反面问题求解思路

(1) 在给定的射击条件下进行内弹道计算, 得到整个火药气体作用时期的炮膛合力值, 即  $P_{pr}-t$ 。

(2) 将 (c)、(d)、(e) 式联立消去  $w_2$  和  $p_1$ , 得到液压阻力的表达式  $\phi_0 = f(a_x) V^2$  (第七章介绍)。并根据复进机具体结构型式, 导出以行程  $X$  为自变量的复进机力表达式  $P_f = P_f(X)$  (第六章介绍)。以及根据反后坐装置具体结构, 导出紧塞装置的摩擦力  $F$  的表达式 (第八章介绍)。将各式一并代入 (a) 式, 得

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pr} - \phi_0 - P_f - N_0 \quad (3-29)$$

其中,  $N_0$ ——后坐阻力中不随后坐行程  $X$  变化的常数部分。

(3) 用逐次近似法求解微分方程 (3-29) 式, 得到  $X = X(t)$ ,  $V = V(t)$  和  $R = R(t)$  (第七章介绍)。

与正面问题不同, 反面问题是考虑了实际射击条件与实际结构尺寸计算的, 液压阻力系数  $K$  应尽可能地通过试验得到, 这样可使计算结果与实验有较好的符合。

## 第四章 后坐阻力规律的选择

从这一章开始, 我们着重介绍反后坐装置正面问题, 即在正常射击条件下, 如何设计驻退机液孔。解决正面问题的关键是如何确定后坐阻力规律  $R = R(X)$  或  $R = R(\dot{t})$  和如何解驻退后坐运动微分方程 (在第五章介绍)。要合理地确定后坐阻力变化规律, 必须了解火炮受力情况。由于火炮射击时有静止性和稳定性的要求, 所以火炮受力不能过大。

这一章首先研究发射时火炮保持静止性和稳定性的条件, 然后从火炮的静止性和稳定性出发, 提出选择后坐阻力规律的具体方法。

这一章还将对后坐运动作简要的分析, 从中了解后坐部份受力和运动的关系, 以帮助我们更合理的选择后坐阻力规律。

### 第一节 后坐时全炮的受力分析

火炮在土壤上射击时, 其受力和运动现象是十分复杂的。由于火炮各零部件金属的弹性和土壤的弹塑性, 在主动力炮膛合力  $P_p$ 、弹丸回转力矩  $M_{hz}$  和全炮重力  $Q_s$  的作用下, 火炮产生沿三个坐标轴的直线位移和绕三个坐标轴的角位移, 以及相应的多自由度受迫振动合成的复杂的运动。这是刚体静力学所不能解决的, 必须在一定的假设条件下, 在动力学的理论指导下建立适当的力学模型来解决 (在第十三章介绍)。

下面介绍一种建立在刚体静力学基础上的分析方法, 虽然理论与实际有相当的差异, 但由于方法简单, 导出的结论较实用, 在反后坐装置设计中仍被广泛采用。

#### 一、后坐时全炮的受力分析

基本假设:

1. 火炮和地面均为绝对刚体;
2. 火炮放置于水平地面上, 方向角为  $0^\circ$ , 忽略弹丸回转力矩  $M_{hz}$  的影响, 认为所有的力都作用在射面 (即过炮膛轴线而垂直地面的平面) 内;
3. 射击时全炮处于平衡状态, 不移动、不跳动。

由图 4-1 可看出, 取全炮为自由体, 后坐时火炮受到如下主动力:

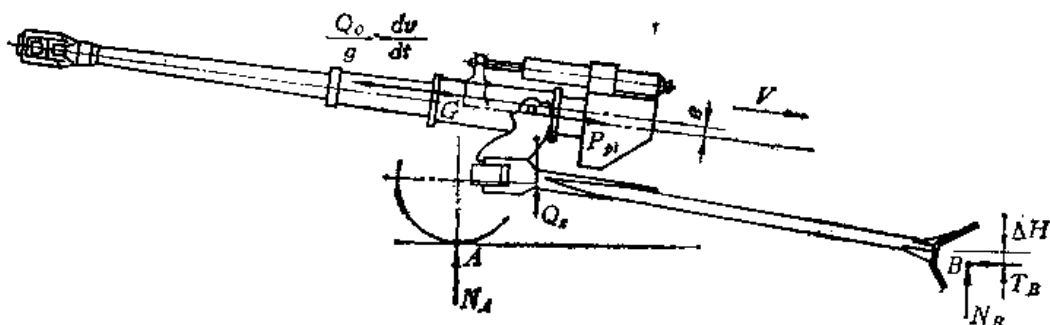


图4-1 后坐时全炮受力情况

$P_{pt}$ ——炮膛合力，作用在炮膛轴线上，方向向后；

$Q_z$ ——火炮战斗状态全重，作用在火炮重心上。

后坐时火炮所受的约束反力有：

$N_A$ 、 $N_B$ ——地面对车轮和驻锄的垂直反力（略去地面对车轮的摩擦力）；

$T_B$ ——地面对驻锄的水平反力。

将全炮视为质点系，应用质点系的达朗贝尔原理，考虑到后坐部份的后坐运动，在后坐部份质心  $G$  上加入惯性力  $\frac{Q_o}{g} \frac{dv}{dt}$ ，则主动力、约束反力和惯性力三者形式上组成平衡力系。

在列出平面力系平衡方程式之前，作如下处理：将炮膛合力  $P_{pt}$  向后坐部份质心  $G$  简化。令后坐部份质心至炮膛轴线的距离为  $e$ ，并规定后坐部份质心在炮膛轴线下时  $e$  为正；在炮膛轴线上时  $e$  为负。根据力系简化原理，在  $G$  上加方向相反、大小等于  $P_{pt}$  的两力  $P'_{pt}$  和  $P''_{pt}$ ，如图 4-2 所示。其中  $P'_{pt}$  与  $P''_{pt}$  组成一以  $e$  为力偶臂的力偶矩  $P_{pt}e$ ，称为动力偶矩。 $e$  为正时， $P_{pt}e$  顺时针方向， $e$  为负时， $P_{pt}e$  逆时针方向。由驻退后坐运动微分方程

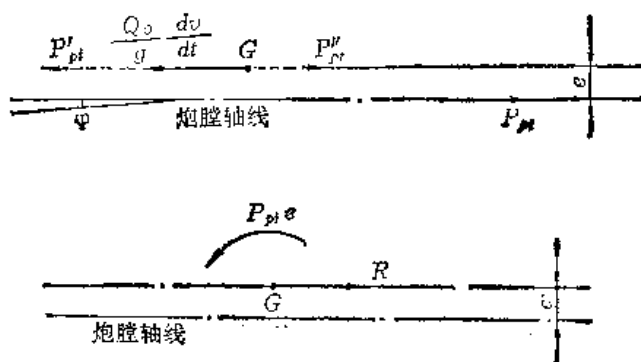


图 4-2 炮膛合力  $P_{pt}$  向质心简化

$$\frac{Q_o}{g} \frac{dv}{dt} = P_{pt} - R$$

移项得

$$R = P_{pt} - \frac{Q_o}{g} \frac{dv}{dt} \quad (4-1)$$

根据 (4-1) 式，平移到后坐部份质心上的  $P'_{pt}$  与  $\frac{Q_o}{g} \frac{dv}{dt}$  合并为一个方向向后的力，此力在数值上等于  $R$ 。由此可见，发射对火炮的作用，即惯性力  $\frac{Q_o}{g} \frac{dv}{dt}$  与炮膛合力  $P_{pt}$  的作用，等效于动力偶矩  $P_{pt}e$  和通过质心  $G$  方向向后的  $R$  力的作用。这是我们分析火炮发射时的受力后得出的一个重要结论。这个结论之所以重要，是因为它把后坐阻力  $R$  与全炮受力直接建立了联系，成为分析炮架各部件受力的出发点。应该指出， $P_{pt}e$  作用是短暂的。而且当  $e = 0$  时， $P_{pt}e = 0$ ，这样，发射对火炮的作用就只有作用在后坐部份质心上方向向后的力  $R$  了。此  $R$  力的大小和变化规律是通过反后坐装置设计实现的。

简化后的全炮受力情况如图 4-3 所示。引入下列符号表示相应的几何尺寸：

$D$ ——当射角为  $\varphi$  时，在后坐的某瞬时全炮重心到支点  $B$  的水平距离；

$h$ ——当射角为  $\varphi$  时，力  $R$  到支点  $B$  的距离；

$L$ ——支点  $A$  与  $B$  之间的水平距离。

在这里，驻锄支点  $B$  是指驻锄垂直和水平反力的交点，而两反力分别通过相应的驻

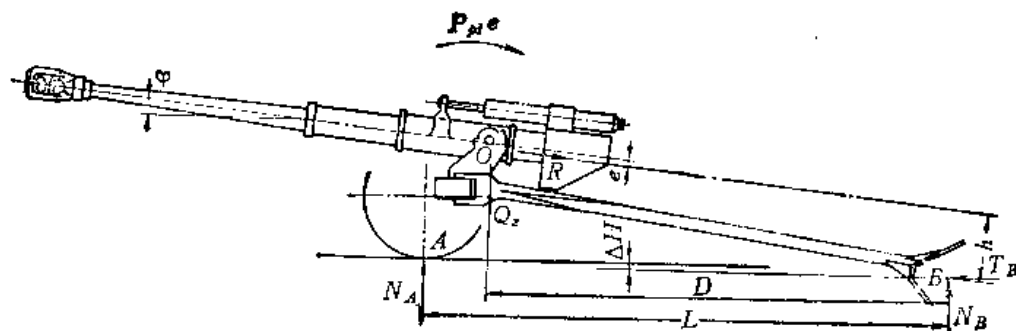


图4-3 简化后的全炮受力情况

锄板平面中心。驻锄支点  $B$  与地面之间的距离为  $\Delta H$ 。

取水平方向向后为  $X$  轴的正方向，垂直向上为  $Y$  轴的正方向，建立力的平衡方程：

$$\sum X = 0 \quad R \cos \varphi - T_B = 0 \quad (4-2)$$

$$\sum Y = 0 \quad N_A + N_B - Q_z - R \sin \varphi = 0 \quad (4-3)$$

$$\sum M_R = 0 \quad P_{pr}e + Rh + N_A L - Q_z D = 0 \quad (4-4)$$

式 (4-4) 中的  $P_{pr}e$  或正或负，取决于  $e$  的符号。

由上面三个方程式解出三个约束反力得

$$T_B = R \cos \varphi \quad (4-5)$$

$$N_A = \frac{Q_z D - P_{pr}e - Rh}{L} \quad (4-6)$$

$$N_B = R \left( \sin \varphi - \frac{h}{L} \right) + P_{pr} \frac{e}{L} + Q_z \left( 1 - \frac{D}{L} \right) \quad (4-7)$$

从这些平衡方程可以看出，当内弹道参量、结构尺寸和重量一定时，各个约束反力只与后坐阻力  $R$  有关。从这些约束反力出发来分析火炮后坐时的静止性和稳定性，必然对后坐阻力  $R$  提出某些限制。

## 二、火炮的静止和稳定条件

先分析射击时火炮如何保证静止性。所谓火炮的静止性是指火炮在射击时不沿水平方向移动。由式 (4-5) 可知，火炮沿水平方向保持静止，需要使驻锄提供的水平反力  $T_B$  在任何时候都能与力  $R$  的水平分力  $R \cos \varphi$  相抵消。即

$$[T_B] \geq R \cos \varphi \quad (4-8)$$

式中  $[T_B]$ ——驻锄所能提供的最大水平反力。 $[T_B]$  取决于驻锄板垂直投影面积  $F$  和土壤不破坏的条件下所能提供的最大单位面积抗力  $p_t$  的大小。于是

$$[T_B] = p_t F \quad (4-9)$$

对于不同的土质可取  $p_t = 2.5 \sim 4$  公斤力/厘米<sup>2</sup>。如 56-85 J 设计时取  $p_t = 4.83$  公斤力/厘米<sup>2</sup>，59-130 J 设计时取  $p_t = 4.24$  公斤力/厘米<sup>2</sup>。

当  $\varphi = 0^\circ$  时， $R \cos \varphi = R_{\varphi=0} = R_{\max}$ ，故

$$[T_B] \geq R_{\max} \quad (4-10)$$

(4-10) 式是保证火炮静止性的条件。通过驻锄设计，可使此条件得以实现。当已



知  $R_{max}$  时, 按单个驻锄受力设计足够大的驻锄面积来保证火炮的静止性。

火炮的稳定性是指发射时火炮不跳离地面。因此稳定条件是车轮始终跟地面接触。由式 (4-6) 得

$$N_A = \frac{Q_z D - P_{pr} e - Rh}{L} \geq 0$$

即

$$Q_z D \geq P_{pr} e + Rh \quad (4-11)$$

(4-11) 式就是火炮的稳定条件。可以看出,  $Q_z D$  是使火炮压向地面的力矩, 称为稳定力矩。而  $P_{pr} e$  和  $Rh$  则使火炮有绕  $B$  点翻倒的趋势, 称为翻倒力矩, 或称倾复力矩。由此可见, 火炮的稳定条件就是要使稳定力矩在射击过程中总大于翻倒力矩。

下面我们具体分析火炮的稳定条件, 在定量分析以前, 先对如何满足稳定条件作一定性的分析。

由式 (4-11) 可知, 欲保持火炮射击稳定性, 根本途径是设法增大稳定力矩, 减小倾复力矩。

增大稳定力矩的途径包括增大火炮的战斗全重  $Q_z$  和增大  $Q_z$  到支点  $B$  的距离  $D$ 。增大  $Q_z$  和  $D$  有利于火炮稳定性, 但易使火炮趋于笨重和纵向尺寸偏大, 降低了机动性能和行军通过性能。当然在不影响火炮机动性能的条件下, 允许适当增大  $Q_z$  和尺寸  $D$ 。

减小倾复力矩的途径包括如下几个方面:

1. 减小动力偶矩  $P_{pr} e$ 。当内弹道设计完成后,  $P_{pr}$  的变化规律已确定了, 动力偶矩  $P_{pr} e$  的减小, 只有靠减小动力偶臂  $e$  来实现。

在火炮总体设计时, 应尽量使后坐部份质量对炮膛轴线上下对称分布, 尽量使后坐部份重心靠近炮膛轴线, 即使  $e \approx 0$ 。应该注意, 尽管  $e$  值很小, 由于  $P_{pr}$  数值很大,  $P_{pr} e$  数值仍相当可观。因此, 若总体布置满足不了  $e = 0$ , 就应在炮膛轴线上方或下方加配重, 使  $e$  尽量地小。

2. 减小后坐阻力  $R$ 。尽量减小后坐阻力是反后坐装置设计的首要任务。特别是对于射击稳定性要求严格的野战火炮更是如此。目前可采取的措施有:

(1) 在大射角射击时, 保证炮尾不碰地的情况下, 增大后坐长度  $\lambda$ 。如果仍然不能达到要求, 可采用变后坐的原理;

(2) 增大后坐部份重量  $Q_0$ 。不少火炮采用此方法。由于增加  $Q_0$  间接增加了全炮重量, 因此只能一定程度地增加  $Q_0$ , 或在不改变全炮重量的情况下, 设法增加后坐部份重量  $Q_0$ ;

(3) 采用炮口制退器。由于在火药气体后效期内, 炮口制退器提供一向前的制退力, 抵消了部份炮膛合力, 从而为减小后坐阻力  $R$  提供了可能。此方法应用广泛, 详见第十二章;

(4) 采用前冲原理。详见第十一章。

3. 减小  $R$  力对支点  $B$  的力臂  $h$ 。要减小力臂  $h$ , 必须降低火线高  $H$ 。火线高  $H$  是反映反坦克炮性能的一个重要指标。因为  $H$  越小, 当外弹道性能不变时, 火炮的直射距离越大, 有利于消灭敌人、保存自己。但是, 降低火线高受装填不方便和大射角射击时炮尾碰地的限制。

综上所述,影响稳定力矩和颠复力矩的诸因素是互相依赖和相互制约的。单纯地强调某一因素是不可能获得良好的火炮综合性能的。

为了给出满足稳定条件时火炮受力与一些主要尺寸之间的定量关系,必须研究射角 $\varphi$ ,后坐行程 $X$ 对尺寸 $D$ 和 $h$ 的影响。

发射时,火炮重心至支点 $B$ 的水平距离 $D$ 随着火炮后坐而减小,这是由于后坐部份重心 $Q_h$ 后移了一段距离 $X$ ,而引起的全炮重心后移造成的。为了讨论方便,参照图4-4,记

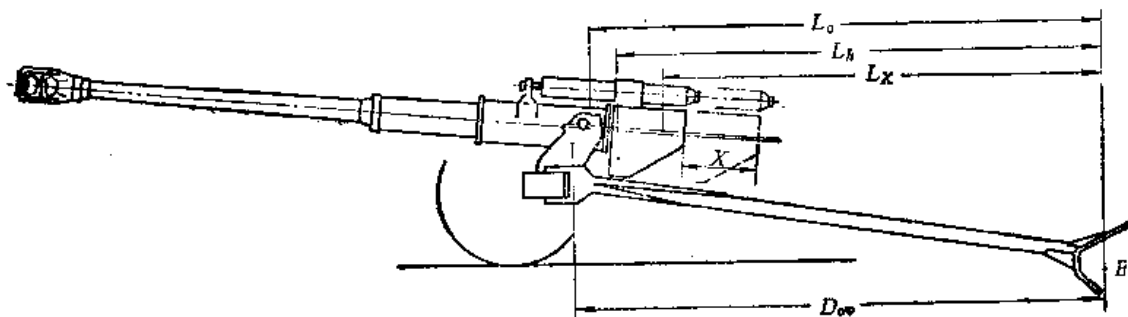


图4-4 后坐时火炮重心的变化

$D_{o\varphi}$ ——当射角为 $\varphi$ 时,射击前( $X=0$ )全炮重心至支点 $B$ 的水平距离;

$L_o$ ——当射角为 $\varphi$ 时,射击前( $X=0$ )后坐部份重心至支点 $B$ 的水平距离;

$L_x$ ——当射角为 $\varphi$ 时,后坐某瞬时,后坐部份重心至支点 $B$ 的水平距离;

$Q_h$ ——火炮除去后坐部份以外的重量;

$L_h$ ——当射角为 $\varphi$ 时, $Q_h$ 的重心至支点 $B$ 的水平距离。

将全炮重量 $Q_z$ 用 $Q_o$ 和 $Q_h$ 表示,有

$$Q_z = Q_o + Q_h$$

显然, $Q_h$ 的重心位置不随后坐行程而变化。根据重心合成的原理,射击前

$$Q_z D_{o\varphi} = Q_o L_o + Q_h L_h$$

后坐某一瞬间

$$Q_z D = Q_o L_x + Q_h L_h$$

由以上两式消去 $Q_h L_h$ 则得

$$Q_z D_{o\varphi} - Q_z D = Q_o (L_o - L_x)$$

因为

$$L_o - L_x = X \cos \varphi$$

故

$$Q_z D = Q_z D_{o\varphi} - Q_o X \cos \varphi \quad (4-12)$$

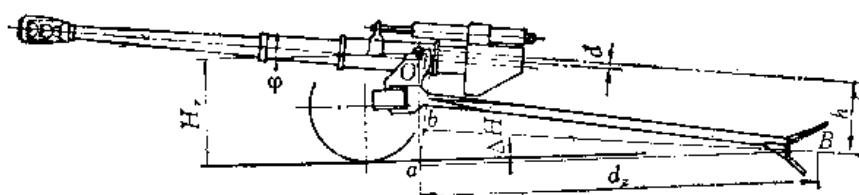
将(4-12)式代入(4-11)式,得出火炮稳定条件为

$$Q_z D_{o\varphi} - Q_o X \cos \varphi \geq P_{pe} e + R h \quad (4-13)$$

由上式可看出,随着后坐行程 $X$ 的增大,稳定力矩减小,从而降低了火炮稳定性。

力 $R$ 的作用线(即后坐部份重心运动轨迹)到支点 $B$ 的距离,随着射角 $\varphi$ 的增大而减小。 $h$ 可从图4-5中的几何关系求得。图中

$H_z$ ——火炮耳轴中心与地面的距离;

图4-5 力臂  $h$  的几何关系图

$d_z$ ——火炮耳轴中心至支点  $B$  的水平距离；

$d$ ——耳轴中心到后坐部份重心后坐轨迹间的距离，耳轴在上方时为负；

$\Delta H$ ——支点  $B$  到地面的距离。

由图可知：

$$h = af - ab + d$$

$$af = (H_z + \Delta H) \cos \varphi$$

$$ab = d_z \sin \varphi$$

$$\text{故, } h = (H_z + \Delta H) \cos \varphi - d_z \sin \varphi + d \quad (4-14)$$

式 (4-14) 反映了力臂  $h$  与射角  $\varphi$  的关系，当  $\varphi$  增大时，力臂  $h$  减小，使颠复力矩  $Rh$  减小，火炮稳定性得到加强，当  $\varphi$  继续增大时， $h$  减小甚至为负值，这时  $Rh$  变为稳定力矩；当  $\varphi$  减小时，力臂  $h$  增大，颠复力矩  $Rh$  也增大，使火炮稳定性减弱。当射角  $\varphi$  减小到  $\varphi_j$  时，火炮处于稳定与不稳定之间的过渡状态，即稳定极限。如果  $\varphi$  角继续减小，火炮就不稳定了。我们将火炮保持稳定性的最小射角称为稳定极限角，记为  $\varphi_j$ 。为了进一步分析，将  $\varphi = \varphi_j$  时各量记以  $j$  的脚标，因此有

$$h_j = (H_z + \Delta H) \cos \varphi_j - d_z \sin \varphi_j + d \quad (4-15)$$

将式 (4-15) 代入式 (4-13)，有

$$Q_z D_{\sigma \varphi_j} - Q_o X \cos \varphi_j = P_{pe} e + R_j h_j \quad (4-16)$$

解出  $R_j$  得

$$R_j = \frac{Q_z D_{\sigma \varphi_j} - Q_o X \cos \varphi_j}{h_j} - \frac{P_{pe} e}{h_j} \quad (4-17)$$

上式说明，对应于  $\varphi = \varphi_j$ ，火炮处于稳定极限，此时火炮所受的力  $R_j$  称为稳定极限后坐阻力。所以，在任意射角  $\varphi$  下，反后坐装置所提供的实际后坐阻力值  $R$ ，都不应超过稳定极限后坐阻力  $R_j$ ，否则火炮将处于不稳定状态。故，设计时应保证

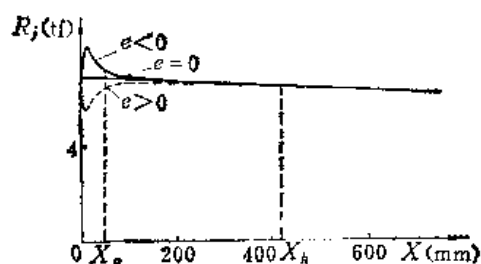
$$R \leq R_j = \frac{Q_z D_{\sigma \varphi_j} - Q_o X \cos \varphi_j}{h_j} - \frac{P_{pe} e}{h_j} \quad (4-18)$$

为了有一定的稳定储备，通常取

$$R = 0.9 R_j = 0.9 \frac{Q_z D_{\sigma \varphi_j} - Q_o X \cos \varphi_j}{h_j} - 0.9 \frac{P_{pe} e}{h_j} \quad (4-19)$$

式 (4-19) 是在一定假设条件下，通过受力分析得到的。它从射击稳定性出发，对后坐阻力  $R$  提出了限制，对选取合理的后坐阻力变化规律起指导作用。

当火炮有关重量、结构尺寸和稳定极限角  $\varphi_j$  确定后，由 (4-19) 式可知稳定极限后坐阻力  $R_j$  只是行程  $X$  的线性函数。如图 4-6 所示， $P_{pe} e$  对  $R_j$  的影响集中在火药气体作用时期。当  $e > 0$  时， $P_{pe} e$  使  $R_j$  减小。当  $e < 0$  时， $P_{pe} e$  使  $R_j$  增大。

图4-6 稳定极限后坐阻力  $R_j$  随后坐行程  $X$  的变化

在正面设计时, 可先选取  $\varphi_j$  再计算  $R_j$ 。对不同类型的火炮  $\varphi_j$  选取范围如下:

反坦克炮和加农炮  $\varphi_j = 0^\circ$  左右

榴弹炮  $\varphi_j = 10^\circ \sim 16^\circ$

### 三、火炮稳定极限角的计算

在全炮的技术设计完成后, 已知火炮全重和结构尺寸的实际数据, 以及各射角的实际后坐阻力的变化规律, 可根据 (4-16) 式, 推导出火炮的实际稳定极限角的计算公式。其方法是将 (4-16) 式中每一项都化为  $\varphi_j$  的函数, 然后再解出  $\varphi_j$  来。

将全炮重量  $Q_x$  分为两部份, 一为起落部份重量  $Q_q$ , 一为火炮除去起落部份以外的炮架重量  $Q'_j$ , 因此

$$Q_x = Q_q + Q'_j$$

由重心合成原理, 有

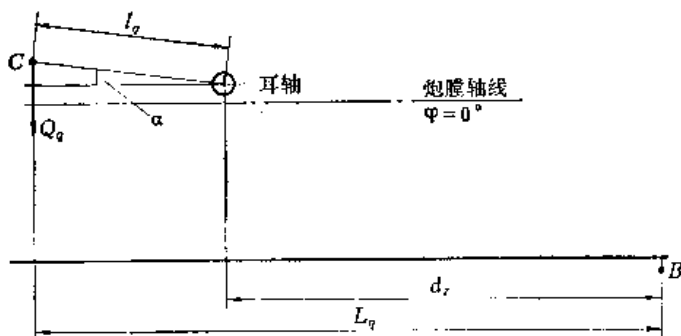
$$Q_x D_{ox} = Q_q L_q + Q'_j L'_j \quad (4-20)$$

式中  $L'_j$  ——  $Q'_j$  重心至支点  $B$  的水平距离;

$L_q$  —— 在某射角  $\varphi$  时, 起落部份重心至支点  $B$  的水平距离。

而  $L_q = d_x + l_q \cos(\varphi + \alpha)$  (4-21)

式中  $l_q$  —— 起落部份重心至耳轴中心的连线长, 如图 4-7 所示;

图4-7  $L_q$  的几何关系图

$\alpha$  —— 当射角  $\varphi = 0^\circ$  时, 起落部份重心与耳轴中心连线跟水平线的夹角。重心高于耳轴中心时  $\alpha$  为正, 反之为负。

将 (4-21) 式代入 (4-20) 式, 得

$$Q_z D_{\varphi} = Q_q [d_z + l_q \cos(\varphi + \alpha)] + Q'_j L'_j$$

当  $\varphi = 0^\circ$  时

$$Q_z D_{\alpha_0} = Q_q d_z + Q_q l_q \cos \alpha + Q'_j L'_j \quad (4-22)$$

当  $\varphi = \varphi_j$  时

$$Q_z D_{\varphi_j} = Q_q d_z + Q_q l_q \cos(\varphi + \alpha) + Q'_j L'_j$$

将式 (4-22) 代入上式, 得

$$\begin{aligned} Q_z D_{\varphi_j} &= Q_z D_{\alpha_0} - Q_q l_q \cos \alpha + Q_q l_q \cos(\varphi + \alpha) \\ &= Q_z D_{\alpha_0} - Q_q l_q \cos \alpha + Q_q l_q \cos \alpha \cos \varphi - Q_q l_q \sin \alpha \sin \varphi \end{aligned} \quad (4-23)$$

当  $\varphi = \varphi_j$  时

$$Q_z D_{\varphi_j} = Q_z D_{\alpha_0} - Q_q l_q \cos \alpha + Q_q l_q \cos \alpha \cos \varphi_j - Q_q l_q \sin \alpha \sin \varphi_j \quad (4-24)$$

由后坐阻力方程 (3-17) 式可知,  $R$  是射角  $\varphi$  的函数, 为了计算简便, 这里假设  $R$  与  $\varphi$  无关。将 (4-15) 和 (4-24) 式代入 (4-16) 式, 并简化为

$$\begin{aligned} [R(H_z + \Delta H) + Q_o X - Q_q l_q \cos \alpha] \cos \varphi_j - (R d_z - Q_q l_q \sin \alpha) \sin \varphi_j \\ = Q_z D_{\alpha_0} - Q_q l_q \cos \alpha - P_{pe} - R d \end{aligned} \quad (4-25)$$

令

$$a = R(H_z + \Delta H) + Q_o X - Q_q l_q \cos \alpha$$

$$b = R d_z - Q_q l_q \sin \alpha$$

$$c = Q_z D_{\alpha_0} - Q_q l_q \cos \alpha - P_{pe} - R d$$

则式 (4-25) 可写成三角方程

$$a \cos \varphi_j - b \sin \varphi_j = c$$

此三角方程的解是

$$\varphi_j = \arccos \frac{c}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \arctg \frac{b}{a}$$

将  $a$ 、 $b$ 、 $c$  的值代入得

$$\begin{aligned} \varphi_j &= \arccos \frac{Q_z D_{\alpha_0} - Q_q l_q \cos \alpha - P_{pe} - R d}{\sqrt{[R(H_z + \Delta H) + Q_o X - Q_q l_q \cos \alpha]^2 + (R d_z - Q_q l_q \sin \alpha)^2}} \\ &\quad - \arctg \frac{R d_z - Q_q l_q \sin \alpha}{R(H_z + \Delta H) + Q_o X - Q_q l_q \cos \alpha} \end{aligned} \quad (4-26)$$

上式是计算火炮实际稳定极限角的公式。将一些特殊点 (如最大膛压点、炮口点、后效期结束点和后坐終了点等) 的  $P_{pe}$ 、 $R$ 、 $X$  值代入 (4-26) 式, 即可计算出各点所对应的稳定极限角, 其中的最大值就是火炮的实际稳定极限角  $\varphi_j$ 。应该注意, 计算时所用的  $R$  与  $X$  的值, 应采用与选定的稳定极限角  $\varphi_j$  相近的射角下的  $R$  和  $X$  值。按这种方法计算, 56-85 J 的  $\varphi_j = 0^\circ$ , 59-130 J 的  $\varphi_j = -1^\circ 57'$ , 54-122 L 的  $\varphi_j = 16^\circ 30'$ 。

#### 四、高射炮炮架射击时的静止性和稳定性

高射炮与一般野战火炮不同, 它有  $360^\circ$  的方向射界。为保证在任何方向射击时的静止性, 通常不能采用架尾驻锄, 而是在十字炮床和炮脚的端部嵌以打入式驻锄。四个打入式驻锄断面呈棱形, 以保证在任何方向都能提供阻止火炮平移的约束力。根据火炮的静止性, 这种驻锄的结构尺寸, 应保证最大后坐阻力小于土壤抗力与全部承载面积的乘

积, 而土壤的总承载面积应包括四个驻锄和四个炮脚座盘在与射向垂直的平面上的投影总面积。

由于高射炮的战斗全重比同口径的野炮重得多, 因此射击时的稳定性是较易保证的。但在设计中仍须对稳定性进行校核。校核时通常取射角  $\varphi = 0^\circ$ , 并应在稳定性最不利的射向上进行, 此射向通常跟两个相邻座盘中心连线相垂直。因为此时  $D_{ay}$  最小。

## 第二节 后坐运动的简要分析

上一节我们讨论了发射时全炮受力情况, 得出了一个很重要的结论: 发射对火炮的作用 (炮膛合力向后坐部份质心的简化), 可以归纳为通过后坐部份质心, 方向向后的力  $R$  和动力偶矩  $P_{pr}e$  的作用。该  $R$  在数值上等于后坐阻力。考虑到火炮的稳定性,  $R$  在后坐全过程中应满足  $R \leq R_j$ 。设计中取  $R = 0.9R_j$ 。这一节我们给定  $R$  的变化规律, 分析后坐运动的速度变化规律, 以及在后坐过程中作用力和运动状态所遵循的动力学原理。其目的是: 指导确立合理的后坐阻力  $R$  的变化规律; 进一步了解反后坐装置的工作实质。

由驻退后坐运动微分方程

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pr} - R$$

可知, 当内弹道确定后, 炮膛合力  $P_{pr}$  也就随之确定了。若后坐阻力  $R$  已知, 便可解上述驻退方程。当  $t = 0$  时,  $V = 0$ ,  $X = 0$ , 积分上式, 得

$$\begin{cases} V = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t P_{pr} dt - \frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt \\ X = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t P_{pr} dt - \frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt \end{cases} \quad (4-27)$$

应该指出, 膛内时期炮膛合力  $P_{pr}$  是平均压力  $p$  的函数, 而此时  $p$  仅是时间  $t$  的离散函数, 或称为时间  $t$  的表格函数。因此式 (4-27) 中关于  $P_{pr}$  的积分, 只能用数值积分的方法解决, 这给人工计算带来某些困难。

应用力的独立作用原理, 将后坐部份的运动看作  $P_{pr}$  和  $R$  两力单独作用的迭加。我们将后坐部份在  $P_{pr}$  单独作用下的运动称为自由后坐。记自由后坐的速度为  $W$ , 行程为  $L$ , 则其运动方程为

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dW}{dt} = P_{pr} \quad (4-28)$$

当  $t = 0$  时,  $W = 0$ ,  $L \approx 0$ , 积分上式, 得

$$\begin{cases} W = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t P_{pr} dt \\ L = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t P_{pr} dt \end{cases} \quad (4-29)$$

将式 (4-29) 代入式 (4-27), 得

$$\begin{cases} V = W - \frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt \\ X = L - \frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt \end{cases} \quad (4-30)$$

(4-30) 式称为转换方程。它说明在解驻退方程时, 可借助于解自由后坐诸元这一手段来解决膛内时期炮膛合力的积分问题。关于驻退方程的解, 我们将在第五章加以讨论。但是, 只要驻退方程右端是确定的, 就可通过 (4-30) 式解出运动诸元  $V = v(t)$  和  $X = x(t)$ 。

下面分别对驻退后坐和自由后坐运动作简要分析。

### 一、驻退后坐的特点

驻退方程为

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dv}{dt} = P_{pt} - R$$

设后坐阻力  $R$  的变化规律如图 4-8 所示。当  $t = 0$  时,  $R = R_0$ ;  $t = t_g$  时,  $R = R_g$  (以后  $R = R_g = \text{常数}$ ), 解驻退方程, 可得后坐速度  $V = v(t)$  和后坐行程  $X = x(t)$ 。先分析驻退后坐速度的变化规律: 从图 4-8 可看出, 后坐开始时, 炮膛合力比后坐阻力

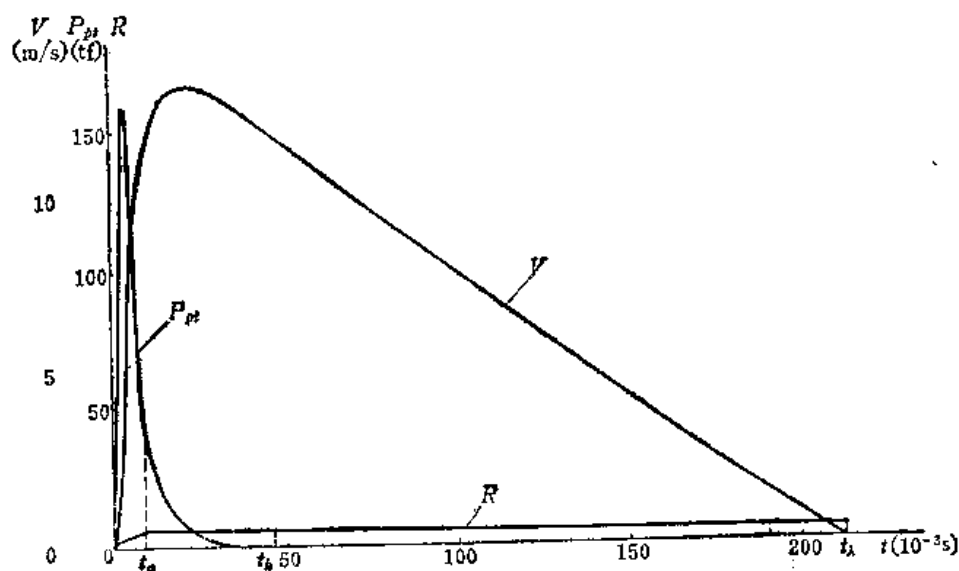


图4-8 驻退后坐的特点 (冲量与动量关系)

$R$  大得多, 即  $P_{pt} \gg R$ , 后坐部份的速度从零开始, 猛然加速, 速度曲线是骤然上升的; 当后坐到某一时刻,  $P_{pt} = R$  时, 此时后坐速度达到最大值,  $V = V_{\max}$ ; 继续后坐,  $P_{pt} < R$ , 后坐速度从  $V_{\max}$  减小, 最后后坐运动停止,  $V = 0$ 。可见, 驻退后坐速度经历了由零加速到  $V_{\max}$ , 再减速最后到零的加速和减速过程。当  $P_{pt} = R$  时, 速度曲线有一个极值,  $V = V_{\max}$ 。

为了便于计算, 将驻退后坐运动分为三个时期:

1. 弹丸沿膛内运动时期, 时间范围为  $0 < t \leq t_g$ , 此时  $P_{pt} \gg R$ , 后坐部份加速后坐;
2. 火药气体后效时期, 时间范围为  $t_g < t \leq t_k$ , 该时期内后坐运动由加速转为减速, 一般  $V_{\max}$  出现在这一时期内;
3. 惯性后坐时期, 时间范围为  $t_k < t \leq t_h$ , 此时期无火药气体作用,  $P_{pt} = 0$ , 后坐

部份只在后坐阻力  $R$  作用下减速, 一直到  $V = 0$  为止。

对驻退方程进行一次积分, 当  $t = 0$  时,  $V = 0$ , 有

$$\int_0^V \frac{Q_0}{g} dV = \int_0^t (P_{pt} - R) dt$$

$$\frac{Q_0}{g} V = \int_0^t P_{pt} dt - \int_0^t R dt \quad (4-31)$$

根据动量定理, 上式表明后坐部份由静止状态开始, 所获得的动量应等于该时间间隔内, 炮膛合力  $P_{pt}$  与后坐阻力  $R$  的冲量之差。

当后坐终了,  $t = t_h$  时, 后坐速度  $V_h = 0$ , 故

$$\int_0^{t_h} P_{pt} dt = \int_0^{t_h} R dt \quad (4-32)$$

火药气体总的作用时间  $t_k = t_g + \tau$ , 其中,  $t_g$  是弹丸沿膛内运动的总时间,  $\tau$  为火药气体后效期的总时间。在  $t_k$  以后,  $P_{pt} = 0$ , 则有

$$\int_0^{t_k} P_{pt} dt = \int_0^{t_h} R dt \quad (4-33)$$

我们将  $\int_0^{t_k} P_{pt} dt$  称为炮膛合力对后坐部份作用的全冲量;  $\int_0^{t_h} R dt$  称为后坐阻力的全冲量。(4-33)式说明了欲使后坐运动在  $t_h$  时刻停下来, 炮膛合力在  $0 \sim t_k$  内对后坐部份的全冲量, 应与后坐阻力在  $0 \sim t_h$  时间内, 对后坐部份的全冲量相等。

从积分的涵义, (4-33) 式可理解为曲线  $P_{pt}-t$  所包围的面积应与曲线  $R-t$  所包围的面积相等, 后坐运动才能在  $t_h$  时刻内停下来。图 4-8 所示为 56-85 J 的  $P_{pt}-t$  与  $R-t$  曲线。

由于炮膛合力  $P_{pt}$  作用时间短, 而后坐阻力  $R$  作用时间长, 即

$$t_k \ll t_h$$

由式 (4-33) 可以看出

$$R \ll P_{pt}$$

由上面分析可知, 从动量的观点看, 反后坐装置如同一个缓冲器, 它将一个数值很大、作用时间很短、变化剧烈的炮膛合力  $P_{pt}$  转化为数值较小、作用时间较长、变化较平缓的后坐阻力  $R$  作用于炮架。一般  $R_{\max} = \left( \frac{1}{15} \sim \frac{1}{30} \right) P_{pt\max}$ 。

还可以把运动微分方程改写为

$$\frac{Q_0}{g} V dV = (P_{pt} - R) dX$$

当  $X = 0$  时,  $V = 0$ , 积分上式, 得

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{Q_0}{g} V^2 = \int_0^X P_{pt} dX - \int_0^X R dX \quad (4-34)$$

根据动能定理, 上式表明后坐部份由静止状态开始, 在某一过程中获得的动能, 应等于该过程中炮膛合力  $P_{pt}$  和后坐阻力  $R$  对后坐部份所做的全功。

当后坐终了  $X = \lambda$  时,  $V = 0$ , 故

$$\int_0^\lambda P_{pt} dX = \int_0^\lambda R dX \quad (4-35)$$



显然, 当后坐行程  $X$  超过后效期结束时的后坐行程  $X_k$  后,  $P_{pt} = 0$ , 故有

$$\int_0^{X_k} P_{pt} dX = \int_0^{\lambda} R dX \quad (4-36)$$

$\int_0^{X_k} P_{pt} dX$  称为炮膛合力在后坐全过程中, 对后坐部份作的总功(正功);  $\int_0^{\lambda} R dX$  称为后坐阻力在后坐全过程中, 对后坐部份作的总负功。式 (4-36) 说明了欲使后坐运动在有限的长度  $\lambda$  内停下来, 后坐阻力  $R$  在后坐长度  $\lambda$  内所做的总负功, 应能抵消炮膛合力  $P_{pt}$  在此过程中对后坐部份作的总功 (正功)。

从积分的涵义可以理解为, 曲线  $P_{pt}-X$  所包围的面积, 与曲线  $R-X$  所包围的面积相等, 后坐运动才能在后坐行程  $\lambda$  内停下来。图 4-9 所示为 56-85 J 的  $P_{pt}-X$  和  $R-X$  曲线。

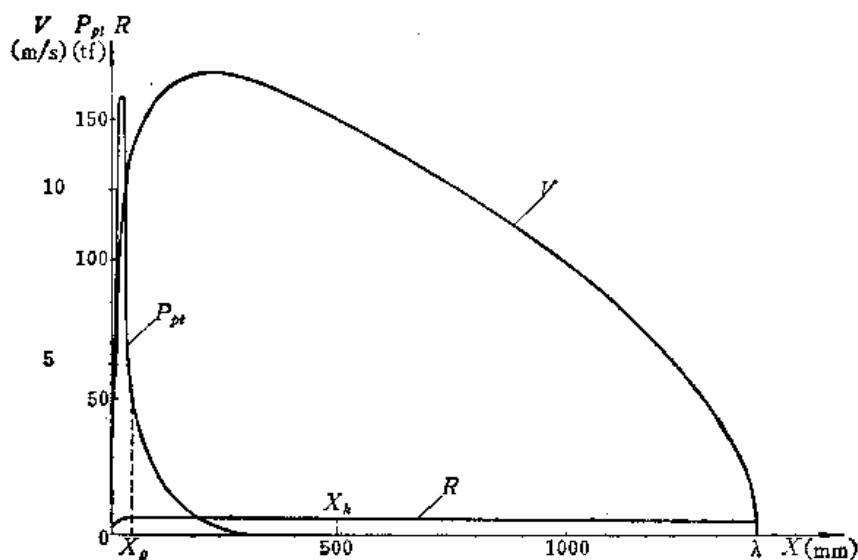


图 4-9 功与动能关系

由于炮膛合力  $P_{pt}$  对后坐部份作用的行程很短, 而后坐阻力  $R$  在整个后坐行程  $\lambda$  中起作用, 即

$$X_k \ll \lambda$$

由式 (4-36) 可知

$$R \ll P_{pt}$$

由上面分析可知, 从动能的观点看, 后坐运动是由于炮膛合力  $P_{pt}$  和后坐阻力  $R$  对后坐部份做功的结果。对炮架来说, 反后坐装置将数值很大、变化急剧的力  $P_{pt}$  在短距离内作的功, 转化为数值较小、变化较平稳的力  $R$ , 在较长距离上作的功。从做功的角度看并没有减少, 但作用在炮架上的力  $R$  却减小了。

## 二、自由后坐的特点

由自由后坐运动微分方程

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dW}{dt} = P_{pt}$$

当  $t = 0$  时,  $W = 0$ , 积分上式, 得

$$W = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t P_{pt} dt$$

$$L = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t P_{pt} dt$$

下面分析自由后坐运动速度的特点, 当  $t < t_k$  时, 由于不存在后坐阻力, 只有炮膛合力  $P_{pt}$  的作用, 后坐部分始终是加速运动的。当  $t \geq t_k$  时,  $P_{pt} = 0$ , 此后再无提供后坐部分加速的力, 因此, 自由后坐速度达到最大,  $W = W_{\max} = W_k$ 。如果在没有任何阻力的理想情况下, 后坐部分将保持以  $W_{\max}$  速度后坐。图 4-10 是无炮口制退器时的自由后坐速度曲线。

当  $t = 0$  时,  $W = 0$ ; 当  $t = t_k$  时,  $W = W_k = W_{\max}$ , 积分自由后坐运动微分方程, 有

$$\frac{Q_0}{g} W_{\max} = \int_0^{t_k} P_{pt} dt \quad (4-37)$$

根据动量定理, 式 (4-37) 表明自由后坐时, 后坐部分的总动量等于炮膛合力  $P_{pt}$  在火药气体作用时期 ( $t_k = t_z + \tau$ ) 的全冲量。当内弹道确定后, 炮膛合力的全冲量是个常数, 即

$$\int_0^{t_k} P_{pt} dt = I_0 = \text{常数} \quad (4-38)$$

也就是, 自由后坐的总动量是个常数, 故

$$\frac{Q_0}{g} W_{\max} = I_0 \quad (4-39)$$

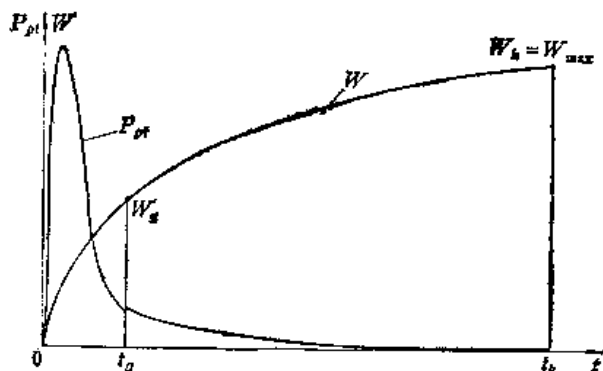


图4-10 无炮口制退器的自由后坐速度

由上式可知, 当内弹道条件确定后, 增加后坐部分重量  $Q_0$ , 可以使自由后坐最大速度  $W_{\max}$  减小。

将自由后坐运动方程改写为如下型式

$$\frac{Q_0}{g} W \frac{dW}{dL} = P_{pt}$$

当  $L = 0$  时,  $W = 0$ ; 当  $L = L_k$  时,  $W = W_k = W_{\max}$ , 积分上式, 得

$$\frac{Q_0}{2g} W_{\max}^2 = \int_0^{L_k} P_{pt} dL \quad (4-40)$$

根据动能定理, 式 (4-40) 表明自由后坐时, 后坐部分的总动能等于炮膛合力  $P_{pt}$  在  $L_k$  行程上作的总功。

将式 (4-39) 代入 (4-40) 式, 得

$$Q_0 \int_0^{L_k} P_{pt} dL = \frac{g}{2} I_0^2 = \text{常数} \quad (4-41)$$

从上式可看出, 当内弹道条件确定后, 增加后坐部分重量  $Q_0$ , 必然使炮膛合力作的总功  $\int_0^{L_k} P_{pt} dL$  减小, 由式 (4-40) 可知, 也必然使自由后坐的动能  $\frac{Q_0}{2g} W_{\max}^2$  减小。又, 由 (4-35) 式可知

$$\int_0^{X_k} P_{pt} dX = \int_0^{\lambda} R dX$$

而当  $R$  变化较平稳时, 可用积分平均值  $R_{pj}$  代替, 以作估算用, 于是有

$$R_{pj} = \frac{\int_0^\lambda R dX}{\lambda}$$

$$\int_0^\lambda R dX = R_{pj} \lambda$$

因为  $L_k \approx X_k$ , 故

$$\frac{Q_0}{2g} W_{\max}^2 = \int_0^{L_k} P_{pt} dL \approx \int_0^{X_k} P_{pt} dX = \int_0^\lambda R dX = R_{pj} \lambda$$

即

$$\frac{Q_0}{2g} W_{\max}^2 \approx R_{pj} \lambda \quad (4-42)$$

式 (4-42) 常常被用于估算后坐阻力的大小。当内弹道条件和后坐部分重量已知时, 通过计算自由后坐最大动能, 在已知后坐长度时, 可估算出  $R_{pj}$  来。由于增加后坐部分重量  $Q_0$ , 自由后坐动能  $\frac{Q_0}{2g} W_{\max}^2$  必然减小, 从式 (4-42) 可看出, 当  $\lambda$  一定时, 使得  $R_{pj}$  减小。这就是增加  $Q_0$  在一定条件下可使后坐阻力减小的原因。

应该指出, 式 (4-42) 在认为  $L_k \approx X_k$  情况下导出的近似结果, 只适于作为相对量比较用。

### 第三节 后坐制动图

为了讨论方便, 一般将设计时选定的理想的后坐阻力  $R$  对时间  $t$  或后坐行程  $X$  变化规律用图形表示, 此图形称之为后坐制动图。对于不同类型的火炮, 有不同种类的后坐阻力的变化规律。根据不同类型的火炮, 选择合理的前坐制动图, 不仅是解驻退方程的需要, 而且对新设计火炮反后坐装置而言, 应作为理想的后坐阻力规律来设法实现它。

#### 一、选择后坐制动图的原则

既然后坐制动图的选择合理与否十分重要, 同时又涉及到火炮受力以及后坐部分运动的规律, 那么, 如何选取呢? 一般选择制动图时应考虑下述原则。

##### 1. 应尽量减小炮架受力

后坐阻力的大小就是炮架受力的大小, 而炮架的强度计算必须根据后坐阻力的最大值进行。较大的后坐阻力, 必然要求炮架有较大的强度和刚度, 使重量增加。因此, 从减小炮架受力出发, 后坐阻力最大值  $R_{\max}$  应尽量小。在后坐长度  $\lambda$  确定的条件下, 为使后坐阻力做的总负功抵消炮膛合力作的总功, 即

$$\int_0^{X_k} P_{pt} dX = \int_0^\lambda R dX$$

应使图 4-11 所示几种  $R-X$  曲线所包围的面积相等。与此同时, 为保证  $R_{\max}$  最小, 应取后坐阻力  $R = R_m = \text{常数}$ , 或接近常数规律变化, 如图 4-11 粗线所示。而  $R$  按斜直线变化或按折线变化, 都使  $R_{\max}$  值大于按常数变化的  $R_{\max}$  值。

## 2. 应尽量缩短后坐长

一般情况下, 应使后坐长度尽可能的短。短的后坐长度可以减小摇架及起落部分的纵向尺寸, 有利于火炮在大射角射击时, 使炮尾不碰地的情况下降低火线高。但在炮膛合力作的总功确定的情况下, 减小后坐长度 $\lambda$ , 必然使后坐阻力 $R$ 增大, 使火炮的稳定性减弱, 并使炮架受力增大。对舰炮、海岸炮、坦克炮等, 它们的炮架与军舰、基础、坦克连接, 射击时的稳定性是有保证的。这类火炮由于受炮塔尺寸的限制, 在选择后坐制动图时, 首先考虑

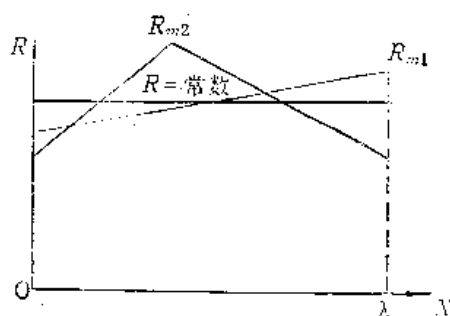


图4-11 做功面积相同时各种后坐阻力的变化

使后坐长尽量小, 在保证后坐长尽量小的条件下, 尽量减小后坐阻力。例如, 某85T的 $\lambda = 280 \sim 320$ 毫米, 59-100T的 $\lambda = 490 \sim 555$ 毫米。中小口径自动高射炮, 为了提高火炮射速, 也要求后坐长度较短, 如65-37G的 $\lambda = 150 \sim 180$ 毫米, 59-57G的 $\lambda = 300 \sim 360$ 毫米。对野战火炮(如牵引式地面炮), 在选择后坐制动图时, 应首先保证稳定性, 在保证稳定性的条件下, 尽量减小后坐长度。因此, 野战火炮为了减小后坐阻力, 一般都具有较长的后坐长度。例如56-85J的 $\lambda = 580 \sim 675$ 毫米, 54-122J的 $\lambda = 985 \sim 1050$ 毫米, 59-130J的 $\lambda = 1250 \sim 1350$ 毫米。为了在较低的火线高时后坐不碰地, 一些射角变化较大的野战火炮的后坐长度是可变的。由于大射角后坐时火炮的稳定性是有保证的, 故可适当提高后坐阻力来减短后坐长度, 例如59-130J, 当射角 $\varphi = 34^\circ \sim 45^\circ$ 时,  $\lambda$ 仅为775~815毫米。

## 3. 野战火炮应满足稳定性要求

由第一节对稳定性的讨论可知, 为保证稳定性, 后坐阻力 $R$ 由式(4-19)给出

$$R = 0.9 R_j = 0.9 \frac{Q_z D_{ovj} - Q_o X \cos \varphi_j}{h_j} - 0.9 \frac{P_{pe} e}{h_j}$$

上式中 $R_j$ 由两项组成, 第一项为随后坐行程 $X$ 递减的直线, 与有无炮口制退器或有无 $e$ 值无关。第二项与有无 $e$ 值或有无炮口制退器有关, 若 $e < 0$ 使稳定极限后坐阻力 $R_j$ 变大, 反之若 $e > 0$ 使 $R_j$ 变小(如图4-6所示)。但是, 由于第二项在火药气体后效期结束后就不复存在了, 故第一项在后坐全过程中起主要作用。因此, 在拟定后坐制动图时, 常常认为 $R_j$ 只包括第一项, 即只是后坐行程的函数。这样做会带来一些误差, 但这种处理方法使计算简单, 已能满足正面设计的精度要求。

关于第二项可做如下处理。当有炮口制退器时, 弹丸出炮口以后即可略去第二项。当 $e = 0$ 时, 只影响弹丸沿膛内运动时期的 $R_j$ 大小, 对于 $e > 0$ 时, 使 $R_j$ 减小的情况, 为了保证射击稳定性必须予以考虑。为了缩短后坐长, 应该使拟定的后坐阻力 $R$ 沿 $R_j$ 下方变化, 尽量利用 $R_j$ 所包围的面积, 即尽量充满稳定界。对于 $e < 0$ 时, 使 $R_j$ 增大的情况, 从炮架受力角度, 一般不利用增加的面积, 以保证炮架受力较小。

总之, 按随后坐行程递减的阻力规律, 其最大值虽较常数阻力规律的阻力值为大, 但这是在保证稳定性的条件下, 力求得到较小的后坐长度所必须的, 也是野战火炮满足稳定性所必须的。

#### 4. 考虑后坐阻力变化规律实现的可能性

由后坐阻力方程

$$R = \phi_0 + P_{f_0} + F + T - Q_0 \sin \varphi$$

可看出后坐阻力包括驻退机后坐时的液压阻力  $\phi_0$ 、复进机力  $P_{f_0}$ 、摩擦力  $F + T$  和后坐部分重量分力，其中  $P_{f_0}$ 、 $F + T$  和  $Q_0 \sin \varphi$  有其各自的变化规律。要获得理想的后坐阻力规律，只有通过控制驻退机液压阻力  $\phi_0$  来实现。液压阻力  $\phi_0$  是靠驻退机活塞挤压液体高速流过流液孔而产生的。后坐开始和终了时，因后坐速度  $V_0 = V_k = 0$ ，故此时驻退机液压阻力  $\phi_0 = 0$ 。这样在后坐开始时，后坐阻力起始值  $R_0$  不能任意确定，而必须满足

$$R_0 = P_{f_0} + F + T - Q_0 \sin \varphi \quad (4-43)$$

式中

$P_{f_0}$ ——复进机的初力，在设计复进机时确定；

$F$ ——紧塞装置的摩擦力， $F = v Q_0$ ；

$v = 0.3 \sim 0.5$ ——紧塞装置的相当摩擦系数；

$T$ ——摇架滑轨摩擦力， $T = f Q_0 \cos \varphi$ ；

$f = 0.16 \sim 0.20$ ——摇架滑轨与后坐部分的相当摩擦系数；

$\varphi$ ——射角，应取制定理想后坐阻力规律所规定的射角。一般野炮  $\varphi = \varphi_f$ ，高炮取  $\varphi = 0^\circ$ ，变后坐火炮短后坐的制动图取  $\varphi = \varphi_{\max}$ ，而长后坐的制动图取  $\varphi = 0^\circ$ 。

应该说明，后坐终了时后坐阻力应满足

$$R_k = P_{f_k} + F + T - Q_k \sin \varphi$$

因此，在复进机设计时，选择复进机末力  $P_{f_k}$  应受到  $P_{f_k} \leq R_k - (F + T - Q_k \sin \varphi)$  的约束。

由于液体的性质决定了液压阻力  $\phi_0$  的变化需要一个过程，不可能突然升高和降低。故在后坐开始一段，后坐阻力由  $R_0$  增至  $R_{\max}$  的过程不能太短，否则驻退机是难以实现的。同时，后坐阻力  $R$  的变化不允许有突跃，这对火炮受力和全炮振动都产生极不利的影响。

#### 5. 后坐阻力变化规律应尽量简单便于计算

为了便于计算，通常取后坐阻力为时间或行程的线性函数。当弹丸在膛内运动时期和后效期，为便于应用转换方程对时间积分求解运动诸元，一般取后坐阻力为时间的线性函数（也有在弹丸沿膛内运动时期取为时间的余弦函数的）。在惯性时期，由于炮膛合力为零，后坐运动只与后坐阻力有关，故一般后坐阻力多取为行程的线性函数。

### 二、固定式火炮的后坐制动图

由于固定式火炮的炮架固定于地面或安装于很重的基础上，其射击稳定性是有保证的。因此，这类火炮的后坐制动图主要从缩短后坐长度和尽量减小后坐阻力考虑拟定的。

固定式火炮（简称固定炮）第一类制动图如图 4-12(a) 所示，在后坐全长取后坐阻力为常数。这种制动图是旧式火炮反后坐装置普遍采用的，它的最大优点是简单，但由于后坐阻力的起始值  $R_0$  不能任意选定，其后坐阻力变化规律不能完全实现。因此，出

现了固定炮的第二类制动图, 如图 4-12(b) 所示。为考虑实现的可能性, 后坐开始  $R = R_0$ , 在弹丸沿膛内运动时期结束时, 后坐阻力上升到  $R = R_g = \text{常数}$ 。一般弹丸沿膛内运动时期 ( $0 \leq t \leq t_g$ ) 取后坐阻力为时间的线性函数, 即

$$R = R_0 + \frac{R_g - R_0}{t_g} t \quad (4-44)$$

式中之  $R_g$  可以通过包括后坐长度  $\lambda$  在内的几个已知参数确定 (下一章介绍)。

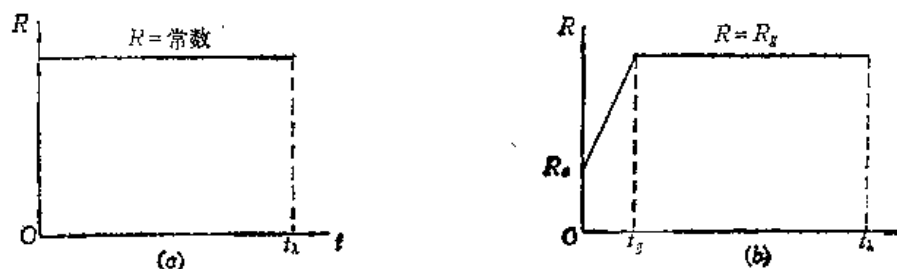


图4-12 固定式火炮的制动图

如果弹丸沿膛内运动时期取后坐阻力随时间按三角函数规律由  $R_0$  上升到  $R_g$ , 则可取

$$R = R_0 + (R_g - R_0) \cdot \frac{1 - \cos \frac{\pi}{t_g} t}{2} = \frac{R_g + R_0}{2} - \frac{R_g - R_0}{2} \cos \frac{\pi}{t_g} t$$

采用上式, 在开始阶段阻力  $R$  上升比较平稳。

### 三、野炮的后坐制动图

野战火炮 (简称野炮) 与固定炮不同, 它要求机动性强, 火炮全重轻, 因此保证射击稳定性是十分重要的。选择野战火炮的后坐制动图时, 必须首先满足在稳定极限角下的射击稳定性, 然后再考虑后坐长度和最大后坐阻力最小的原则。常见的有三类制动图。

第一类制动图, 如图 4-13 所示, 其特点是在火药气体作用时期把  $R$  分成随时间变化的两段直线。

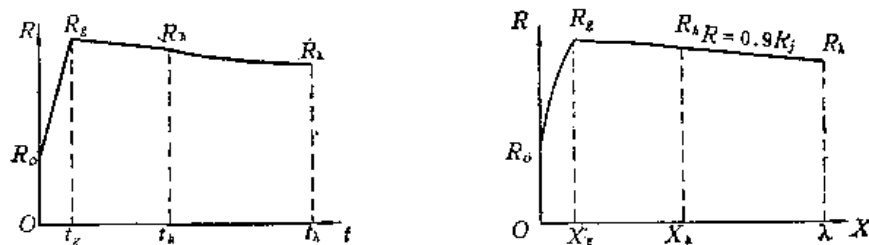


图4-13 野炮第一类制动图

弹丸沿膛内运动时期 ( $0 < t \leq t_g$ ) 取

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0 + \frac{R_g - R_0}{t_g} t \\ R_g &= 0.9 \frac{Q_{\pi} D_{\text{ovj}} - Q_0 X_g \cos \varphi_j}{h_j} \end{aligned} \right\} \quad (4-45)$$

后效期 ( $t_g < t \leq t_k$ ) 取

$$\left. \begin{aligned} R &= R_g - \frac{R_g - R_k}{\tau} (t - t_g) \\ R_k &= 0.9 \frac{Q_s D_{ovj} - Q_o X_k \cos \varphi_j}{h_j} \end{aligned} \right\} \quad (4-46)$$

式中  $X_g$ 、 $X_k$  为对应于弹丸沿膛内运动时期结束和后效期结束的驻退后坐行程。

惯性时期 ( $t_k < t \leq t_b$ ) 取  $R$  为行程  $X$  的函数, 即

$$R = 0.9 \frac{Q_s D_{ovj} - Q_o X \cos \varphi_j}{h_j} \quad (4-47)$$

这类制动图,  $R$  的变化规律简单、易计算, 充满度好 (即在稳定极限后坐阻力  $R_j$  的曲线下所占面积的百分比大), 可以获得较短的后坐长度。它适于  $P_{pe}$  对稳定界影响可以忽略的情况, 如带有中等效率的炮口制退器 (或  $e = 0$ ) 的火炮。它的缺点是弹丸沿膛内运动时期的后坐阻力  $R$  上升较快。

第二类制动图是在第一类制动图的基础上保留充满度好的优点, 同时考虑  $P_{pe}$  ( $e > 0$ ) 使稳定界最大值向后移的特点而拟定的。为此, 它将第一类后坐制动图中  $R$  的前两段的分界点由  $t_g$  向后移至  $t_a = (1.4 \sim 1.5)t_g$ , 以减轻后坐阻力突然变化的程度, 如图 4-14 所示。

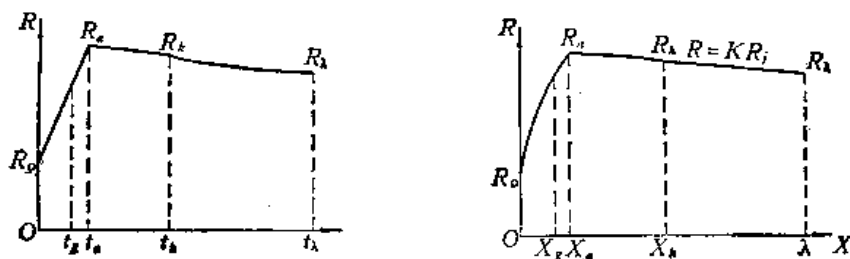


图4-14 野炮第二类制动图

由于当  $X = X_a$  ( $t = t_a$ ) 时,  $P_{pe}$  的数值已经很小, 在计算此时的  $R_j$  时可忽略它的影响。故第一段直线包括弹丸沿膛内运动时期和后效期的一部分 ( $0 \leq t \leq t_a$ ), 则

$$\left. \begin{aligned} R &= R_o + \frac{R_a - R_o}{t_a} t \\ R_a &= 0.9 \frac{Q_s D_{ovj} - Q_o X_a \cos \varphi_j}{h_j} \end{aligned} \right\} \quad (4-48)$$

后效时期的其余时间内 ( $t_a < t \leq t_k$ )

$$\left. \begin{aligned} R &= R_a - \frac{R_a - R_k}{t_k - t_a} (t - t_a) \\ R_k &= 0.9 \frac{Q_s D_{ovj} - Q_o X_k \cos \varphi_j}{h_j} \end{aligned} \right\} \quad (4-49)$$

惯性时期的后坐阻力与第一类制动图形式相同, 仍可用 (4-47) 式表示。这类制动图有较好的充满度, 但计算稍显复杂。

第三类制动图的特点是后效时期的后坐阻力值为常数, 即  $R = R_k$ 。与第一类制动图相比, 它的后坐阻力的最大值由  $R_g$  减至为  $R_k$ , 因此弹丸沿膛内运动时期的后坐阻力上

升较平稳, 如图 4-15 所示。它的另一个特点是后效时期驻退后坐诸元计算较简单。但对于大威力的火炮, 其  $\omega$ 、 $v_0$ 、 $\beta$  等均较大, 故火药气体后效期较长, 此类制动图的充满度不好, 使后坐长度较长。

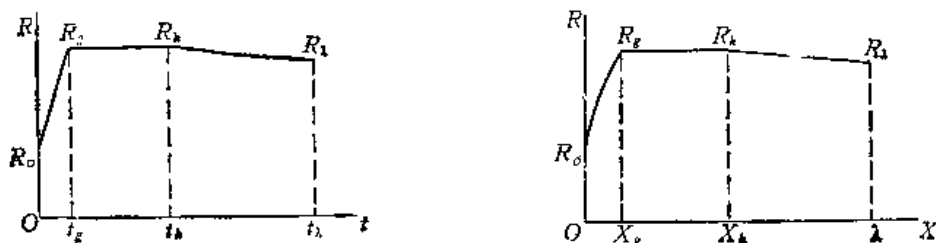


图4-15 野炮第三类制动图

第三类制动图的后坐阻力规律可表示如下:

弹丸沿膛内运动时期 ( $0 \leq t \leq t_g$ )

$$\left. \begin{aligned} R &= R_0 + \frac{R_k - R_0}{t_g} t \\ R_k &= 0.9 \frac{Q_s D_{ovj} - Q_0 X_k \cos \varphi_j}{h_j} \end{aligned} \right\} \quad (4-50)$$

后效期 ( $t_g < t \leq t_k$ )

$$R = R_k = \text{常数} \quad (4-51)$$

惯性时期仍然与第一类制动图相同, 后坐阻力由式 (4-47) 表示。

除了以上所介绍的较典型的制动图之外, 设计者可根据不同火炮的具体工作条件, 灵活运用上述原则, 合理地拟定后坐制动图。

应该指出, 对于口径较大, 射角变化又大的野战火炮, 一般都采用变后坐长的反后坐装置, 即在大射角增大后坐阻力减小后坐长度, 这种短后坐情况多选用固定式火炮的制动图。而在小射角时, 为减小后坐阻力保证射击稳定性, 这种长后坐情况多选用野炮的制动图。



## 第五章 驻退后坐运动微分方程的解

积分后坐运动微分方程, 可以得到式 (4-27)

$$\begin{cases} V = \frac{g}{Q_0} \int_0^t P_{pr} dt - \frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt \\ X = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t P_{pr} dt - \frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt \end{cases}$$

由于膛合力  $P_{pr}$  是内弹道平均压力的表格函数, 故不能直接积分。目前有两种解决方法。一是回避这个积分, 引入自由后坐的概念, 将膛合力  $P_{pr}$  的冲量用自由后坐运动的后坐部分的动量表示, 而求后坐部分动量就比较容易了。二是利用数值方法求解微分方程, 一般采用龙格-库塔方法, 在电子计算机上计算, 其精度对工程设计是足够的了。数值解法将在第十六章加以介绍, 这一章介绍第一种方法, 以及典型的后坐阻力规律的驻退后坐运动微分方程的解。

### 第一节 自由后坐

前面我们部分地分析了为什么要研究自由后坐运动, 下面我们再仔细地分析问题。

#### (1) 有助于解驻退后坐运动微分方程

由于引入自由后坐的概念, 解驻退方程可通过转换方程

$$\begin{cases} V = W - \frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt \\ X = L - \frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt \end{cases}$$

变为解出自由后坐速度  $W$  和行程  $L$ , 再分段积分后坐阻力, 从而得到驻退方程的解  $V$  和  $X$ 。

#### (2) 有助于研究后效时期

在第三章中我们曾指出, 至今对后效时期的认识, 不如对弹丸沿膛内运动时期的认识深刻。这是由于后效时期, 火药气体对炮和弹丸的作用是复杂的, 这给试验研究和理论计算带来一定困难。目前后效期的某些计算公式, 包括膛合力计算公式在内, 不论是理论的还是经验的都还离不开试验。而自由后坐的理论为这种试验提供了理论基础。

研究火炮自由后坐的装置, 一般称为自由后坐台。它使后坐部分在后坐时无反后坐装置约束, 同时使摩擦尽量小, 并使后坐部分处于水平状态。

在自由后坐台上测得后坐部分最大自由后坐速度  $W_{max}$  等量, 通过必要的计算可间接测得后效期火药气体作用系数  $\beta$  和炮口制退器效率  $\eta$  等。因此, 它是从事火炮设计和研究的必不可少的装置。

下面按弹丸沿膛内运动时期和火药气体后效期分别讨论自由后坐诸元的计算。

### 一、弹丸沿膛内运动时期的自由后坐诸元计算

为了回避积分  $-\frac{g}{Q_0} \int_0^t P_{pr} dt$ 、 $-\frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t P_{pr} dt$ ，可利用内弹道的计算结果，根据动量守恒定理，直接导出  $W$ 、 $L$  与弹丸沿膛内运动诸元  $v$ 、 $l$  的关系。

把后坐部分、装药和弹丸看成是一个质点系，该系统在发射过程中，沿水平方向所有外力之和为零，而火药气体作用对该系统是内力。根据质点系的动量守恒定律可知，若作用在质点系上所有外力在某坐标轴上的投影的代数和恒为零，则该质点系的动量保持不变。由于发射前后坐部分、装药和弹丸是静止的，系统的总动量为零，故发射的任一瞬间系统仍保持总动量为零。即

$$\Sigma mV = 0 \quad (5-1)$$

取地面为参考系，以弹丸运动方向为正，则该系统总动量为零，即

$$-M_0 W + mw + K = 0 \quad (5-2)$$

式中  $M_0$ 、 $m$ ——后坐部分及弹丸的质量；

$W$ 、 $w$ ——某瞬间后坐部分及弹丸运动的绝对速度；

$K$ ——该瞬间火药气体的总动量。

装药在某瞬时的总动量，通常根据内弹道学分析膛内压力分布规律时所采用的基本假设来计算，即

(1) 整个炮膛具有相同的截面面积  $s$ ；

(2) 火药气体质点在弹丸后部空间均匀分布；

(3) 火药气体质点的运动速度按直线规律分布，在弹底处的火药气体速度等于弹丸的运动速度  $w$ ，在炮膛底部的火药气体速度等于后坐部分运动的速度  $W$ ，如图 5-1 所示。

考查某一瞬时，设弹底至膛底之距离为  $l$ ，取距膛底  $x$  处的微小单元火药气体质量为  $d\mu$ ，厚度为  $dx$ ，其速度为  $u_x$ ，则该微小单元火药气体具有的动量为  $dk$ ，则

$$dk = d\mu u_x \quad (5-3)$$

由假设 (1) 和 (2) 得， $d\mu = \mu dx$ ，其中  $\mu = \frac{\omega}{g}$  为火药气体总质量。

由假设 (3) 得， $u_x = (w + W)x - W$ ，

于是将上面两式代入 (5-3) 式，得

$$dk = \mu [(w + W)x - W] dx$$

积分上式，可得到该瞬时火药气体的总动量

$$K = \int_0^1 \mu [(w + W)x - W] dx = \mu \cdot \frac{w - W}{2} \quad (5-4)$$

将式 (5-4) 代入式 (5-2) 中，得

$$-M_0 W - \frac{\mu}{2} W + mw + \frac{\mu}{2} w = 0$$

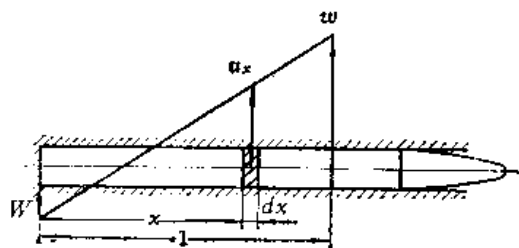


图5-1 火药气体在膛内的速度分布

故

$$\begin{cases} W = \frac{m+0.5\mu}{M_o+0.5\mu} w \\ L = \frac{m+0.5\mu}{M_o+0.5\mu} x \end{cases} \quad (5-5)$$

式中  $x$  为弹丸在膛内运动的绝对行程。

将  $w$ 、 $x$  换算成内弹道的相对于身管的弹丸速度  $v$  和行程  $l$ 。由于

$$\begin{cases} w = v - W \\ x = l - L \end{cases} \quad (5-6)$$

代入式 (5-5) 得

$$\begin{cases} W = \frac{m+0.5\mu}{M_o+m+\mu} v = \frac{q+0.5\omega}{Q_o+q+\omega} v \\ L = \frac{m+0.5\mu}{M_o+m+\mu} l = \frac{q+0.5\omega}{Q_o+q+\omega} l \end{cases} \quad (5-7)$$

由式 (5-7) 可看出, 当内弹道计算给出  $v-t$  和  $l-t$  曲线后, 只要乘以常系数  $\frac{q+0.5\omega}{Q_o+q+\omega}$ , 即可得到  $W-t$ 、 $L-t$  曲线, 它们与  $v-t$  和  $l-t$  变化规律相似, 如图 5-2 所示。

弹丸出炮口瞬间  $t=t_x$  时, 有

$$\begin{cases} W_x = \frac{q+0.5\omega}{Q_o+q+\omega} v_x \\ L_x = \frac{q+0.5\omega}{Q_o+q+\omega} l_x \end{cases} \quad (5-8)$$

内弹道  $\Gamma AY$  表解法解出的弹丸相对于炮膛的速度  $v_x$  一般与实测初速  $v_o$  不符合。为了使计算的  $v_x$  与实测的初速  $v_o$  一致, 引入修正系数  $\xi$  对表速度值进行修正。这种解法不仅使炮口点的弹丸速度与  $v_o$  符合较好, 而且也对膛内各点速度逐点进行修正。这种修正的结果, 可以认为弹丸的速度已是绝对速度值了。因此, 在计算自由后坐速度时, 应采用

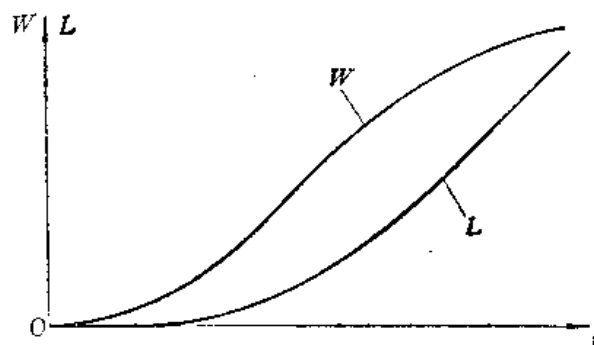


图5-2 弹丸沿膛内运动时期的自由后坐速度和行程

$$W = \frac{q+0.5\omega}{Q_o+0.5\omega} v \quad (5-9)$$

弹丸出炮口瞬间, 有

$$W_x = \frac{q+0.5\omega}{Q_o+0.5\omega} v_o \approx \frac{q+0.5\omega}{Q_o} v_o \quad (5-10)$$

在计算自由后坐速度时, 应区别内弹道解出的弹丸速度是相对的还是绝对的, 来确定正确的公式计算。但计算自由后坐行程时, 当没有特别指出弹丸行程是绝对的时, 一般用相对行程的关系式计算。

## 二、火药气体后效期自由后坐诸元的计算

火药气体后效时期, 炮膛合力  $P_p$  不论是理论公式还是经验公式, 都能表示为时间的解析函数形式, 因此可以直接积分自由后坐运动方程, 求出自由后坐的速度和行程。下面只就炮膛合力的经验公式讨论自由后坐诸元的计算。

### 1. 后效期自由后坐诸元的计算公式

炮膛合力的经验公式

$$P_p = P_g e^{-t/b} \quad (5-11)$$

应特别指出, 此时时间  $t$  是以后效期开始 ( $t = t_g$  时) 为零计算的。

将上式代入自由后坐运动方程式 (4-28), 得

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dW}{dt} = P_g e^{-t/b}$$

当  $t = 0$  时,  $W = W_g$ ; 当  $t = t$  时,  $W = W$ , 对上式积分, 得

$$W = W_g + \frac{gP_g}{Q_0} b (1 - e^{-t/b}) \quad (5-12)$$

因  $W = \frac{dL}{dt}$ , 代入上式再积分一次, 得

$$L = L_g + W_g t + \frac{gP_g}{Q_0} b [t - b (1 - e^{-t/b})] \quad (5-13)$$

当后效期终了时,  $t = \tau$ , 此时自由后坐速度达到最大值

$$W_{\max} = W_g + \frac{gP_g}{Q_0} b (1 - e^{-\tau/b}) \quad (5-14)$$

此时相应的行程为

$$L_k = L_g + W_g \tau + \frac{gP_g}{Q_0} b [\tau - b (1 - e^{-\tau/b})] \quad (5-15)$$

以后由于炮膛合力为零, 因而后坐不再加速, 后坐部分保持以不变的最大自由后坐速度  $W_{\max}$  匀速后坐。

为了利用式 (5-12) 和式 (5-13) 计算后效期的自由后坐诸元, 还要解决参数  $\tau$  和  $b$  的计算问题。

一般认为膛内火药气体的压力降至  $p_k = 1.8$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 时后效期结束, 此时的炮膛合力  $P_{p,\tau} \approx sp_k$ , 由式 (5-11) 可知

$$P_{p,\tau} = P_g e^{-\tau/b} \approx sp_k \quad (5-16)$$

而近似计算后效期开始的炮膛合力  $P_g$  可按下式

$$P_g \approx sp_g$$

将上式代入式 (5-16), 有

$$sp_g e^{-\tau/b} = sp_k$$

解出后效期延续时间  $\tau$

$$\tau = b \ln \frac{p_g}{p_k} = 2.303 b \lg \frac{p_g}{p_k} \quad (5-17)$$

或

$$\tau = 2.303 b \lg \frac{p_g}{1.8} \quad (5-18)$$

计算后效期时间常数  $b$ ，可根据自由后坐最大速度的公式求得

$$U_{\max} = \frac{q + \beta \omega}{Q_0} v_0 \quad (5-19)$$

式 (5-19) 实际上反映了弹丸、火药和后坐部分在自由后坐过程中的动量守恒。式中  $\beta$  为火药气体作用系数，它可由经验公式和理论公式求得，其物理意义后面还要介绍。

将式 (5-19) 和式 (5-9) 代入式 (5-14) 中，得

$$-\frac{q + \beta \omega}{Q_0} v_0 = -\frac{q + 0.5 \omega}{Q_0} v_0 + \frac{g}{Q_0} P_g b (1 - e^{-t/b})$$

再将  $P_g \approx s p_g$  和  $P_g e^{-t/b} \approx s p_k$  代入上式，得

$$\beta \omega v_0 = 0.5 \omega v_0 + g b s (p_g - p_k)$$

解出  $b$ ，得

$$b = \frac{(\beta - 0.5) \omega v_0}{g s (p_g - 1.8)} \approx \frac{(\beta - 0.5) \omega v_0}{g P_g} \quad (5-20)$$

到此为止，当确定了火药气体作用系数  $\beta$  后，即可通过式 (5-20) 和式 (5-18) 计算  $b$  和  $\tau$ 。特别注意的是  $b$  和  $\tau$  是十分重要的两个参数，一般  $\tau$  值为百分之几秒， $b$  值为千分之几秒。在  $\tau$  和  $b$  值核对准确后再计算自由后坐诸元。

下面介绍  $b$  的物理意义：由动量定理可知，后效期后坐部分动量的增量等于此时炮膛合力的全冲量。将炮膛合力在后效期的全冲量记为  $I_h$ ，则

$$I_h = \int_0^{\tau} P_{pt} dt = \frac{Q_0}{g} (W_{\max} - W_g)$$

将式 (5-19) 和式 (5-9) 代入，经整理后得

$$I_h = \frac{\omega}{g} (\beta - 0.5) v_0 \quad (5-21)$$

式 (5-21) 与式 (5-20) 比较可得

$$I_h = \frac{\omega}{g} (\beta - 0.5) v_0 = P_g b \quad (5-22)$$

(5-22) 式说明当内弹道确定后，弹丸出炮口时的炮膛合力  $P_g$  也确定了，时间常数  $b$  的大小决定着后效期炮膛合力全冲量大小。常数  $b$  越大反映了  $I_h$  越大。后效期炮膛合力随时间变化曲线下的面积就是后效期炮膛合力的全冲量，如图 5-3 所示。以  $b$  为底以

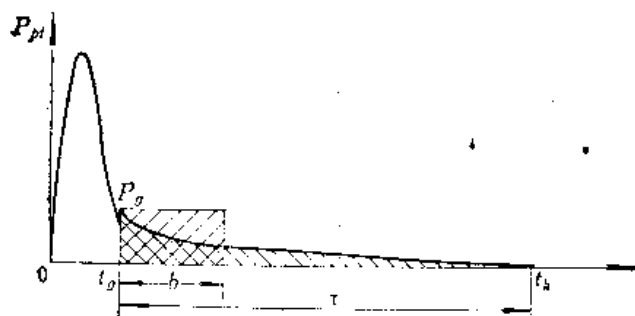


图5-3 常数  $b$  的物理意义

$P_g$  为高的矩形面积应等于后效期炮膛合力曲线下的面积。因此， $b$  越大后效期炮膛合力全冲量就越大。同时，在  $P_g$  确定的情况下， $b$  大也反映了后效期延续时间  $\tau$  长。因

为  $b$  大  $I_k$  也大, 当  $P_g$  一定时, 为使曲线下的面积也增大,  $P_{pr}$  必然衰减得慢, 故  $\tau$  必然也就长了。

## 2. 火药气体作用系数 $\beta$ 的讨论

火药气体作用系数  $\beta$  最早出现在最大自由后坐速度  $W_{\max}$  的公式 (5-19) 中, 即

$$W_{\max} = \frac{q + \beta \omega}{Q_0} v_0$$

此式可改写为

$$-\frac{Q_0}{g} W_{\max} - \frac{q}{g} v_0 - \frac{\beta \omega}{g} v_0 = 0$$

若将后坐部分, 弹丸和装药视为一个系统, 并且在火药气体作用的整个时期, 火药气体只对后坐部分和弹丸做功, 而与外界无能量交换的情况下, 上式正好反映了该系统的动量守恒。 $-\frac{Q_0}{g} W_{\max}$  是后效期结束后坐部分的动量,  $\frac{q}{g} v_0$  是此时弹丸的动量,  $\frac{\beta \omega}{g} v_0$  是后效期结束时火药气体的总动量。显然此时火药气体的平均速度  $v_{pj} = \beta v_0$ , 故

$$\beta = \frac{v_{pj}}{v_0} \quad (5-23)$$

式 (5-23) 说明了火药气体作用系数  $\beta$  具有一定的物理意义, 它表示后效期结束时火药气体平均速度与弹丸初速的比值。以上是从质点系的动量定理出发得到的结论。将后坐部分看成是一个质点, 由质点的动量定理, 后坐部分在后效期结束时自由后坐的动量变化应等于后效期内膛合力  $P_{pr}$  的全冲量  $I_k$ , 由式 (5-21) 得

$$I_k = \int_0^{\tau} P_{pr} dt = \frac{Q_0}{g} (W_{\max} - W_g) = (\beta - 0.5) \frac{\omega}{g} v_0$$

上式说明了火药气体作用系数  $\beta$  越大,  $I_k$  越大。 $\beta$  的大小反映了后效期膛合力全冲量的大小。由第四章可知, 从火炮受力的观点分析,  $\beta$  越大火炮受力越大。因此, 火药气体作用系数  $\beta$  是火炮设计中一个十分重要的系数。

由于后效期的复杂性和人们对它认识的欠缺, 长期以来, 以实验为依据发展起来的经验的和理论公式约有二十余种。但是每个公式只限于某些弹道条件, 普遍使用会带来很大误差, 这样给正确地选择  $\beta$  带来一定困难。这里推荐的方法是:

在设计新火炮进行反后坐装置正面计算 (或估算) 时, 一般按经验公式估算  $\beta$  值

$$\beta = \frac{A}{v_0} \quad (5-24)$$

式中  $A$ ——经验系数, 因武器不同,  $A$  的取值范围不同:

对于榴弹炮、加榴炮  $A = 1300$ ;

对于大中口径加农炮及小口径高初速火炮  $A = 1250 \sim 1275$ 。

在进行反后坐装置反面计算 (或精确计算) 时, 一般采用多变指数  $K$  修正的特征线法数值计算程序计算, 可以获得与实验的  $\beta$  值有较好符合的结果 (详见第十二章)。

在有条件利用试验测得后坐部分的自由后坐最大速度  $W_{\max}$  后, 可应用下式确定实验的  $\beta$

$$\beta = -\frac{Q_0 W_{\max} - q v_0}{\omega v_0} \quad (5-25)$$

### 三、有炮口制退器时自由后坐诸元的计算公式

无炮口制退器后效期结束时, 后坐部分、弹丸和火药气体三者沿炮膛轴线方向的动量关系用下式表示

$$-\frac{Q_0}{g} W_{\max} - \frac{q}{g} v_0 - \frac{\beta \omega}{g} v_0 = 0$$

当采用炮口制退器时, 认为弹丸具有的动量  $\frac{q}{g} v_0$  不变, 火药气体的总动量在炮膛轴线上的投影减小了, 即

$$-\frac{\beta_r \omega}{g} v_0 < -\frac{\beta \omega}{g} v_0$$

式中  $\beta_r$  称为有炮口制退器时的火药气体作用系数, 显然  $\beta_r < \beta$ 。由于  $\frac{\beta_r \omega}{g} v_0$  减小, 要保持动量守恒, 必然后坐部分自由后坐动量  $\frac{Q_0}{g} W_{\max}$  也减小, 使最大自由后坐速度由  $W_{\max}$  降至  $W_{KT}$ ,  $W_{KT}$  称为有炮口制退器时, 后效期结束时的自由后坐速度。所以

$$-\frac{Q_0}{g} W_{KT} - \frac{q}{g} v_0 - \frac{\beta_r \omega}{g} v_0 = 0$$

即

$$W_{KT} = -\frac{q + \beta_r \omega}{Q_0} v_0 \quad (5-26)$$

以上仅从动量的观点分析了采用炮口制退器给自由后坐速度带来的影响。关于炮口制退器的作用原理和设计计算将在第十二章专门研究。这里仅介绍与计算自由后坐诸元有关的表征炮口制退器性能的几个特征量。

#### 1. 几个特征量

炮口制退器的能量特征量也称为炮口制退器的效率, 记为  $\eta_T$ 。它表示炮口制退器使后坐部分自由后坐动能减少量与原来动能的百分比, 即

$$\eta_T = \frac{\frac{Q_0}{2g} (W_{\max}^2 - W_{KT}^2)}{\frac{Q_0}{2g} W_{\max}^2} = 1 - \left( \frac{W_{KT}}{W_{\max}} \right)^2 \quad (5-27)$$

将式 (3-19) 和式 (3-26) 代入上式得

$$\eta_T = 1 - \left( \frac{q + \beta_r \omega}{q + \beta \omega} \right)^2 \quad (5-28)$$

上两式说明, 当通过试验测出后坐部分的  $W_{\max}$  和  $W_{KT}$  时, 可用式 (5-27) 求出炮口制退器的实际效率  $\eta_T$ , 此为测量炮口制退器效率的常用方法。当能计算出  $\beta_r$  和  $\beta$  时, 可用式 (5-28) 求出  $\eta_T$ , 此为计算炮口制退器的一般思路。

炮口制退器的冲量特征量  $\chi$ , 表示有炮口制退器时后效期炮膛合力的全冲量  $I_T$  与无炮口制退器时后效期炮膛合力的全冲量  $I_h$  的比值, 即

$$\chi = \frac{I_T}{I_h} = \frac{\int_0^{\tau} P_{p,r} dt}{\int_0^{\tau} P_{p,i} dt} = \frac{\frac{Q_0}{g} (W_{KT} - W_g)}{\frac{Q_0}{g} (W_{\max} - W_g)} = \frac{W_{KT} - W_g}{W_{\max} - W_g} \quad (5-29)$$

式中  $P_{pt,T}$  为有炮口制退器时后效期的炮膛合力。将式 (5-19)、(5-10) 和 (5-26) 代入式 (5-29), 得

$$\chi = \frac{(q + \beta_T \omega) - (q + 0.5 \omega)}{(q + \beta \omega) - (q + 0.5 \omega)} = \frac{\beta_T - 0.5}{\beta - 0.5} \quad (5-30)$$

当由试验测出  $W_{\max}$ 、 $W_{KT}$  和  $W_g$  时, 代入式 (5-29) 可计算出  $\chi$ , 当已知  $\beta_T$  和  $\beta$  值后, 代入式 (5-30) 也可计算出  $\chi$  来。但式 (5-30) 在正面设计时使用不便, 我们将式 (5-28) 和式 (5-30) 联立, 消去  $\beta_T$ , 可得出以  $\eta_T$  表示的  $\chi$  表达式, 即

$$\chi = \frac{(q + \beta \omega) \sqrt{1 - \eta_T} - (q + 0.5 \omega)}{(\beta - 0.5) \omega} \quad (5-31)$$

(5-31) 式表示, 当内弹道条件确定后,  $q$ 、 $\omega$  已知, 选定  $\beta$  和一定效率的炮口制退器  $\eta_T$  后,  $\chi$  是常数, 说明后效期冲量比  $I_T/I_b$  是个常数。若认为有无炮口制退器后效期延续时间  $\tau$  不变, 则

$$\chi = \frac{\int_0^\tau P_{pt,T} dt}{\int_0^\tau P_{pt} dt} = \frac{P_{pt,T}}{P_{pt}} \quad (5-32)$$

也就是说, 后效期中任一瞬间带炮口制退器的炮膛合力  $P_{pt,T}$  与该瞬间不带炮口制退器的炮膛合力  $P_{pt}$  之比是常数。这个结论很重要, 它使我们在计算带炮口制退器的自由后坐诸元时, 只需以

$$P_{pt,T} = \chi P_{pt} \quad (5-33)$$

代替, 仍可沿用前面介绍的有关公式。

由式 (5-31) 可知,  $\chi$  的大小决定于  $\eta_T$  的大小,  $\eta_T$  越大  $\chi$  越小, 甚至为负值。当  $\chi$  为负值时说明  $P_{pt,T}$  不再是自由后坐运动的动力, 而改变为自由后坐运动的阻力。 $\chi$  对炮膛合力和自由后坐速度的影响如图 5-4 所示。

炮口制退器还有一个特征量是  $\beta_T$ ——有炮口制退器时的火药气体作用系数。 $\beta_T$  反映了带炮口制退器的火炮后效期结束时火药气体在炮膛轴线方向的平均速度与弹丸初速之比。当  $\eta_T$  确定后, 可按式 (5-28) 计算  $\beta_T$ , 即

$$\beta_T = \frac{(q + \beta \omega) \sqrt{1 - \eta_T} - q}{\omega}$$

(5-34)

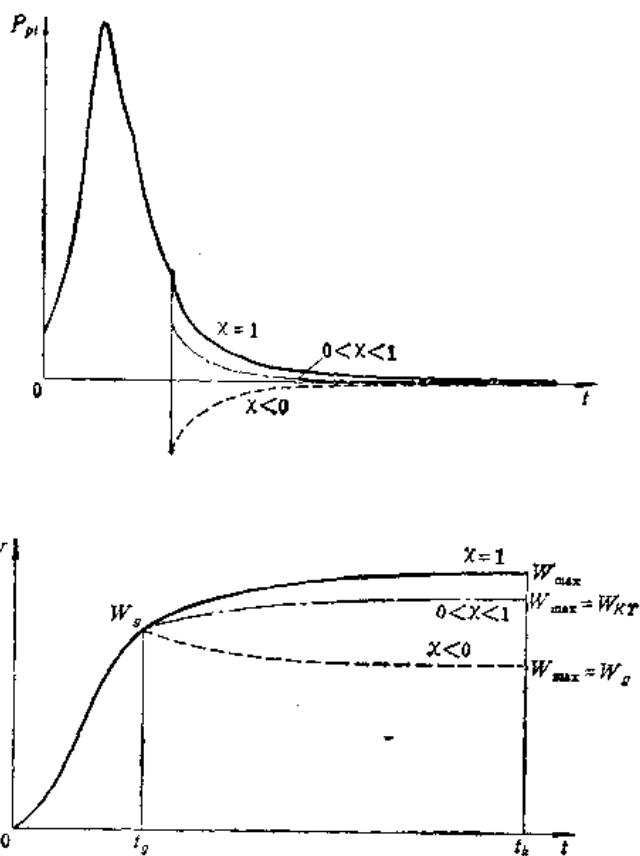


图5-4  $\chi$ 对后效期  $P_{pt,T}$  和  $W$  的影响



## 2. 带炮口制退器的自由后坐诸元计算公式

由式 (5-33), 有

$$P_{pt,\tau} = \chi P_{pt} = \chi P_g e^{-t/b}$$

从上面分析可知, 有炮口制退器与无炮口制退器后效期自由后坐诸元的公式相似, 只是以  $\chi P_g$  代表  $P_g$ , 即

$$W = W_g + \frac{g\chi P_g}{Q_0} b (1 - e^{-t/b}) \quad (5-35)$$

$$L = L_g + W_g t + \frac{g\chi P_g}{Q_0} b [t - b (1 - e^{-t/b})] \quad (5-36)$$

当后效期结束时,  $t = \tau$ , 有

$$W_{KT} = W_g + \frac{g\chi P_g}{Q_0} b (1 - e^{-\tau/b}) \quad (5-37)$$

$$L_{KT} = L_g + W_g \tau + \frac{g\chi P_g}{Q_0} b [\tau - b (1 - e^{-\tau/b})] \quad (5-38)$$

总之, 这一节介绍了自由后坐诸元的求解方法, 弹丸沿膛内运动时期按式 (5-7) 或 (5-9) 计算, 后效期按式 (5-35) 和 (5-36) 计算。无炮口制退器时, 只是  $\chi = 1$  的特例。手算时可按一定的计算步骤列出表格计算 (参见第十五章计算实例), 以防止出现计算错误。计算后应作出  $W-t$  和  $L-t$  曲线, 一方面对计算结果作一检查, 另一方面为后续计算作准备。

## 第二节 固定式火炮驻退后坐运动微分方程的解

上一节我们介绍了自由后坐诸元的解法, 也就是用动量守恒的原理解决了炮膛合力的积分  $\int_0^t P_{pt} dt$  和  $\int_0^t dt \int_0^t P_{pt} dt$ 。如果选定理想的后坐阻力变化规律  $R = R(t)$  或  $R = R(X)$ , 由转换方程

$$V = W - \frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt$$

$$X = L - \frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt$$

由于后坐阻力  $R$  是时间  $t$  或行程  $X$  的解析函数, 故令

$$w' = \frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt$$

$$l' = \frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt$$

代入转换方程, 驻退后坐运动诸元得

$$V = W - w' \quad (5-39)$$

$$X = L - l' \quad (5-40)$$

从物理意义上看,  $w'$  和  $l'$  相当于后坐部分只在后坐阻力作用下的运动速度和行程。 $w'$  和  $l'$  可根据具体的后坐制动图积分而得。下面我们先讨论较简单的固定式火炮驻退后坐诸元的计算。

### 一、固定式火炮第一类制动图

固定式火炮第一类制动图是最简单的一种制动图,后坐阻力 $R$ 的变化规律为一直线。分析其驻退方程的解,在工程设计中没有多少实用价值,因为这种制动图目前很少采用。但是由此推导出的公式,将某些总体设计的重要参量联系起来,并具有较简单的形式,故常常做为总体设计中进行估算的依据。

因为 $R = \text{常数}$ ,故后坐阻力 $R$ 的积分为

$$w' = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt = -\frac{g}{Q_0} R t$$

$$l' = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt = -\frac{g}{2Q_0} R t^2$$

将上式代入转换方程,有

$$V = W - w' = W - \frac{g}{Q_0} R t \quad (5-41)$$

$$X = L - l' = L - \frac{g}{2Q_0} R t^2 \quad (5-42)$$

式(5-41)和(5-42)可适用于弹丸沿膛内运动时期,后效期和惯性时期驻退后坐诸元计算。对于膛内时期和后效期,应按计算自由后坐诸元的各点,即 $t_m, t_k, t_g, t_g + b, t_g + 2b, \dots$ ,并将相应的 $W$ 、 $L$ 值代入式(5-41)和(5-42)求出 $V$ 、 $X$ 值。对于惯性时期,只须用 $W_{\max}$ 和 $L_k + W_{\max}(t - t_k)$ 代替上两式中的 $W$ 和 $L$ 〔若有炮口制退器,则用 $W_{KT}$ 和 $L_{KT} + W_{KT}(t - t_k)$ 代替之〕,并以等时间间隔进行计算,直到 $V = 0$ 为止。

下面讨论驻退后坐最大速度 $V_{\max}$ 及其出现的时间 $\theta_1$ 。由驻退方程可看出,炮膛合力 $P_p$ 和后坐阻力 $R$ 相等是 $V_{\max}$ 出现的条件。考虑炮口制退器对后效期炮膛合力的影响,则有

$$\chi P_g e^{-\theta_1/b} = R \quad (5-43)$$

解出 $\theta_1$ ,得

$$\theta_1 = b \ln \frac{\chi P_g}{R} = 2.303 b \lg \frac{\chi P_g}{R} \quad (5-44)$$

式(5-44)是认为后效期炮膛合力按指数规律变化推导出的公式,如果后效期炮膛合力计算公式不同, $\theta_1$ 的计算公式也应改变。应该指出,采用炮口制退器时,由于使炮膛合力在弹丸出炮口瞬间有一突然降落,因而会影响 $V_{\max}$ 的大小和出现的时机。由图5-5可知,用弹丸出炮口时炮膛合力和后坐阻力值作判断,当 $\chi P_g > R_g$ 时, $V_{\max}$ 出现在后效期中,出现的时间可按式(5-44)计算,再以 $t_{\theta_1} = t_g + \theta_1$ 代入式(5-41)可求出对应的 $V_{\max}$ 。显然, $V_{\max} > V_g$ ,如图5-5中 $V_1$ 的情况。当 $\chi P_g \leq R_g$ 时,后效期内后坐部分不再作加速运动,因此 $V_{\max} = V_g$ ,它出现在 $t = t_g$ 时刻,如图5-5中 $V_2$ 和 $V_3$ 的情况。

后坐终了时,有

$$V_A = 0 = W_{\max} - \frac{g}{Q_0} R t_A$$

因此后坐总时间为

$$t_k = \frac{Q_0 W_{\max}}{gR} \quad (5-45)$$

由式(5-42)知, 后坐长度为

$$\lambda = L_K + W_{\max} (t_k - t_K) - \frac{g}{2Q_0} R t_k^2$$

将(5-45)式代入, 并解出 $R$ 得

$$R = \frac{\frac{Q_0 W_{\max}^2}{2g}}{\lambda - L_K + W_{\max} t_K} \quad (5-46)$$

固定式火炮一般限制后坐长度, 因此, 在确定了后坐长度 $\lambda$ 后, 先计算出 $W_{\max}$ 、 $L_K$ 和 $t_K$ , 代入(5-46)式, 即可计算出常数后坐阻力 $R$ 值。然后再代入(5-41)和(5-42)式计算出全部驻退后坐运动诸元。当有炮口制退器时, 只须以 $W_{KT}$ 和 $L_{KT}$ 代替式(5-46)中的 $W_{\max}$ 和 $L_K$ 即可计算出此时的常数后坐阻力。

作为总体估算公式, 当考虑有炮口制退器时, 应用能量特征量 $\eta_T$ 并以 $L_{KT}$ 代替(5-46)式中之 $L_K$ , 即为

$$R = \frac{\frac{Q_0}{2g} W_{\max}^2 (1 - \eta_T)}{\lambda - L_{KT} + W_{\max} \sqrt{1 - \eta_T} t_K} \quad (5-47)$$

当内弹道和火炮重量确定后, 后坐阻力 $R$ 、后坐长度 $\lambda$ 和炮口制退器效率 $\eta_T$ 三者受式(5-47)约束, 已知其中两个量可估算另一个量。当火炮重量和尺寸确定后, 后坐阻力 $R$ 受稳定条件限制, 利用式(5-47)可合理的确定后坐长度 $\lambda$ 和炮口制退器的效率 $\eta_T$ 。反之, 当已知 $\eta_T$ 和 $\lambda$ 时, 用式(5-47)估算后坐阻力 $R$ 比用式(4-42)要好得多。

## 二、固定式火炮第二类制动图

由第四章可知, 考虑到后坐阻力实现的可能性, 对于固定式火炮建议采用第二类制动图。

### 1. 弹丸沿膛内运动时期

当确定了 $R_0$ 和 $R_g$ 后, 这一时期后坐阻力变化规律为

$$R = R_0 + \frac{R_g - R_0}{t_g} t$$

因此, 后坐阻力 $R$ 的积分为

$$w' = \frac{g}{Q_0} \int_0^t R dt = \frac{g}{Q_0} \left( R_0 + \frac{R_g - R_0}{2t_g} t \right) t$$

$$V' = \frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt = \frac{g}{2Q_0} \left( R_0 + \frac{R_g - R_0}{3t_g} t \right) t^2$$

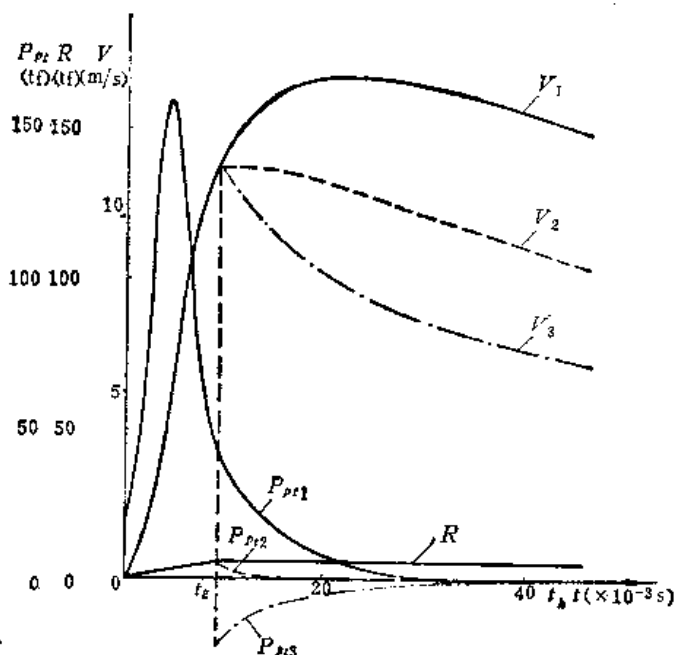


图5-5 驻退后坐最大速度出现时机

代入转换方程, 得

$$V = W - \frac{g}{Q_0} \left( R_0 + \frac{R_g - R_0}{2t_g} t \right) t \quad (5-48)$$

$$X = L - \frac{g}{2Q_0} \left( R_0 + \frac{R_g - R_0}{3t_g} t \right) t^2 \quad (5-49)$$

当  $t = t_g$  时, 有

$$w'_g = \frac{g}{Q_0} \frac{R_0 + R_g}{2} t_g$$

$$l'_g = \frac{g}{Q_0} \frac{2R_0 + R_g}{6} t_g^2$$

代入式 (5-48) 和式 (5-49), 得

$$V_g = W_g - w'_g = W_g - \frac{g}{Q_0} \frac{R_0 + R_g}{2} t_g \quad (5-50)$$

$$X_g = L_g - l'_g = L_g - \frac{g}{Q_0} \frac{2R_0 + R_g}{6} t_g^2 \quad (5-51)$$

## 2. 后效时期

这个时期后坐阻力的变化规律为  $R = R_g = \text{常数}$ 。由于

$$dw' = -\frac{g}{Q_0} R dt$$

当后效期开始  $t = t_g$  时,  $w' = w'_g$ , 后效期中某一瞬时  $t = t$  时,  $w' = w'$  积分上式, 得

$$\int_{w'_g}^{w'} dw' = -\frac{g}{Q_0} \int_{t_g}^t R dt$$

即

$$w' = w'_g + \frac{g}{Q_0} \int_{t_g}^t R dt \quad (5-52)$$

代入转换方程, 得

$$V = W - w'_g - \frac{g}{Q_0} \int_{t_g}^t R dt = W - w'_g - \frac{g}{Q_0} R_g (t - t_g) \quad (5-53)$$

又由于  $w' = \frac{dl'}{dt}$ , 再将式 (5-52) 积分一次, 得

$$l' = l'_g + w'_g (t - t_g) + \frac{g}{Q_0} \int_{t_g}^t dt \int_{t_g}^t R dt \quad (5-54)$$

代入转换方程, 得

$$\begin{aligned} X &= L - l'_g - w'_g (t - t_g) - \frac{g}{Q_0} \int_{t_g}^t dt \int_{t_g}^t R dt \\ &= L - l'_g - w'_g (t - t_g) - \frac{g}{2Q_0} R_g (t - t_g)^2 \end{aligned} \quad (5-55)$$

在膛内时期和后效时期计算驻退后坐运动诸元时, 其计算间隔应与自由后坐诸元计算间隔一致。应该注意, 式 (5-53) 和式 (5-55) 中时间变量  $t$  是以后坐开始为零计算的时间。

最大驻退后坐速度出现的时间, 按  $P_{pr}$  的经验公式计算, 有

$$\theta_1 = b \ln \frac{\chi P_g}{R_g} = 2.303 b \lg \frac{\chi P_g}{R_g}$$

对应的  $V_{\max}$  和  $X_{e1}$  值, 有

$$V_{\max} = W_{e1} - w'_k - \frac{g}{Q_0} R_g \theta_1 \quad (5-56)$$

$$X_{e1} = L_{e1} - l'_g - w'_g \theta_1 - \frac{g}{2Q_0} R_g \theta_1^2 \quad (5-57)$$

当  $t = t_K$  时

$$V_K = W_{\max} - w'_k - \frac{g}{Q_0} R_g \tau \quad (5-58)$$

$$X_K = L_K - l'_g - w'_g \tau - \frac{g}{2Q_0} R_g \tau^2 \quad (5-59)$$

如果采用炮口制退器, 在应用式 (5-58) 和式 (5-59) 时, 应以  $W_{KT}$  和  $L_{KT}$  代替式中的  $W_{\max}$  和  $L_K$ 。

### 3. 惯性时期

此时后坐阻力的变化规律仍为  $R = R_g = \text{常数}$ 。将驻退方程改写为

$$\frac{Q_0}{g} V dV = -R dX$$

当  $X = X_K$  时,  $V = V_K$ , 当  $X = X$  时,  $V = V$  积分上式, 得

$$V^2 = V_K^2 - \frac{2g}{Q_0} \int_{X_K}^X R dX \quad (5-60)$$

即

$$V^2 = V_K^2 - \frac{2g}{Q_0} R_g (X - X_K) \quad (5-61)$$

当后坐终了时,  $X = \lambda$ ,  $V_\lambda = 0$ , 即

$$V_K^2 - \frac{2g}{Q_0} R_g (\lambda - X_K) = 0$$

故

$$\lambda = -\frac{Q_0}{2g} \frac{V_K^2}{R_g} + X_K \quad (5-62)$$

惯性时期的延续时间, 可由动量定理求得

$$Q_2 = \frac{Q_0}{g} \frac{V_K}{R_g} \quad (5-63)$$

后坐总时间为

$$t_h = t_g + \tau + Q_2 \quad (5-64)$$

### 4. 常数后坐阻力 $R_g$ 的确定

将式 (5-58) 和式 (5-59) 代入式 (5-62), 得

$$\lambda = \frac{Q_0}{2g} \frac{1}{R_g} \left[ W_{\max} - w'_k - \frac{g}{Q_0} R_g \tau \right]^2 + L_K - l'_g - w'_g \tau - \frac{g}{2Q_0} R_g \tau^2$$

将  $w'_k$  和  $l'_g$  的表达式代入上式, 得

$$\begin{aligned} \lambda = & \frac{Q_0}{2g} \frac{W_{\max}^2}{R_g} - \frac{1}{2} - \frac{R_0}{R_g} W_{\max} t_g - W_{\max} \left( -\frac{t_g}{2} + \tau \right) + L_K \\ & + \frac{g}{Q_0} \left( -\frac{1}{8} - \frac{R_0^2}{R_g} - \frac{1}{12} R_0 - \frac{1}{24} R_g \right) t_g^2 \end{aligned}$$

略去  $l_g^2$  项, 解出  $R_g$ , 得

$$R_g = \frac{\frac{Q_o}{2g} W_{\max}^2 - \frac{1}{2} W_{\max} R_o t_g}{\lambda - L_K + W_{\max} \left( \frac{t_g}{2} + \tau \right)} \quad (5-65)$$

当采用炮口制退器时, 应用 (5-65) 式须以  $W_{KT}$  和  $L_{KT}$  代替  $W_{\max}$  和  $L_K$ 。  
对某 85 T 的计算结果 (不带炮口制退器) 如图 5-6 所示。

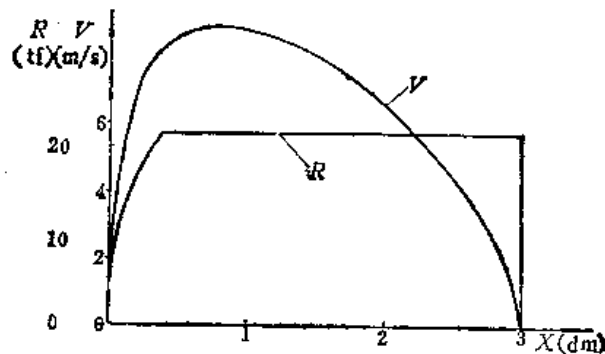


图5-6 某85T按固定炮第二类制动图的驻退后坐诸元

### 第三节 野战火炮驻退后坐运动微分方程的解

野炮采用的后坐制动图形以第二类 and 第三类为最常见。两者比较而言, 第三类制动图对于后效期较长的火炮充满度不好, 使后坐长度增大; 而第二类制动图充满度较好, 但计算较繁。这一节我们以第二类制动图为例, 推导计算驻退后坐诸元的公式。学会了第二类制动图求解驻退方程的思路, 第三类制动图驻退方程求解问题就迎刃而解了。

#### 一、弹丸沿膛内运动时期 ( $0 \leq t \leq t_g$ )

这一时期后坐阻力变化规律, 由第四章可知

$$\begin{cases} R = R_o + \frac{R_a - R_o}{t_a} t; & t_a = (1.4 \sim 1.5) t_g \\ R_a = 0.9 \frac{Q_a D_{ovj} - Q_o X_a \cos \varphi_j}{h_j} \end{cases} \quad (4-48)$$

由于  $X_a$  是  $R_a$  的函数, 此时无法求得, 为计算方便, 常用  $L_a$  代替  $X_a$  来计算  $R_a$ 。因  $L_a > X_a$ , 为使所求得的  $R_a$  近似程度好些, 可适当地加大稳定系数, 取

$$R_a \approx 0.91 \frac{Q_a D_{ovj} - Q_o L_a \cos \varphi_j}{h_j} \quad (5-66)$$

而  $L_a$  可由 (5-13) 式求解

$$L_a = L_g + W_g (t_a - t_g) + \frac{g P_g}{Q_o} b [(t_a - t_g) - b (1 - e^{-\frac{t_a - t_g}{b}})] \quad (5-67)$$

将 (4-48) 式中  $R$  的表达式作如下积分

$$w' = \frac{g}{Q_o} \int_0^t R dt = \frac{g}{Q_o} \left( R_o t + \frac{R_a - R_o}{2t_a} t^2 \right)$$

$$l' = -\frac{g}{Q_0} \int_0^t dt \int_0^t R dt = -\frac{g}{2Q_0} \left( R_0 t^2 + \frac{R_a - R_0}{3t_a} t^3 \right)$$

得驻退后坐诸元为

$$V = W - w' = W - \frac{g}{Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{2t_a} t \right) t \quad (5-68)$$

$$X = L - l' = L - \frac{g}{2Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{3t_a} t \right) t^2 \quad (5-69)$$

当  $t = t_g$  时, 有

$$V_g = W_g - \frac{g}{Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{2t_a} t_g \right) t_g \quad (5-70)$$

$$X_g = L_g - \frac{g}{2Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{3t_a} t_g \right) t_g^2 \quad (5-71)$$

## 二、后效期 ( $t_g < t \leq t_K$ )

由于  $t_a$  在后效期中, 故将后效期按阻力变化规律不同分为两段。

### 1. 第一段 ( $t_g < t \leq t_a$ )

后坐阻力变化规律同膛内时期, 有

$$R = R_0 + \frac{R_a - R_0}{t_a} t$$

因此, 驻退后坐诸元为

$$V = W - \frac{g}{Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{2t_a} t \right) t$$

$$X = L - \frac{g}{2Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{3t_a} t \right) t^2$$

当  $t = t_a$  时, 有

$$V_a = W_a - \frac{g}{Q_0} \frac{R_0 + R_a}{2} t_a \quad (5-72)$$

$$X_a = L_a - \frac{g}{2Q_0} \frac{2R_0 + R_a}{3} t_a^2 \quad (5-73)$$

### 2. 第二段 ( $t_a < t \leq t_K$ )

后坐阻力变化规律为

$$\begin{cases} R = R_a - \frac{R_a - R_K}{t_K - t_a} (t - t_a) \\ R_K = 0.9 \frac{Q_z D_{ovj} - Q_0 X_K \cos \varphi_j}{h_j} \end{cases} \quad (4-49)$$

同样取

$$R_K \approx 0.91 \frac{Q_z D_{ovj} - Q_0 L_K \cos \varphi_j}{h_j} \quad (5-74)$$

其中

$$L_K = L_g + W_g \tau + \frac{g P_g}{Q_0} b [\tau - b (1 - e^{-\tau/b})]$$

同样作积分如下

$$w' = w'_a + \frac{g}{Q_0} \int_{t_a}^t R dt = w'_a + \frac{g}{Q_0} \left[ R_a - \frac{R_a - R_K}{2(t_K - t_a)}(t - t_a) \right] (t - t_a) \quad (5-75)$$

$$\begin{aligned} l' &= l'_a + w'_a(t - t_a) + \frac{g}{Q_0} \int_{t_a}^t dt \int_{t_a}^t R dt \\ &= l'_a + w'_a(t - t_a) + \frac{g}{2Q_0} \left[ R_a - \frac{R_a - R_K}{3(t_K - t_a)}(t - t_a) \right] (t - t_a)^2 \end{aligned} \quad (5-76)$$

代入转换方程, 得

$$V = W - w'_a - \frac{g}{Q_0} \left[ R_a - \frac{R_a - R_K}{2(t_K - t_a)}(t - t_a) \right] (t - t_a) \quad (5-77)$$

$$X = L - l'_a - w'_a(t - t_a) - \frac{g}{2Q_0} \left[ R_a - \frac{R_a - R_K}{3(t_K - t_a)}(t - t_a) \right] (t - t_a)^2 \quad (5-78)$$

其中

$$\begin{cases} w'_a = \frac{g}{Q_0} \cdot \frac{R_a + R_K}{2} t_a \\ l'_a = \frac{g}{2Q_0} \cdot \frac{2R_a + R_K}{3} t_a^2 \end{cases}$$

当  $t = t_K$  时, 有

$$V_K = W_{\max} - w'_a - \frac{g}{Q_0} \cdot \frac{R_a + R_K}{2} (t_K - t_a) \quad (5-79)$$

$$X_K = L_K - l'_a - w'_a(t_K - t_a) - \frac{g}{Q_0} \cdot \frac{2R_a + R_K}{6} (t_K - t_a)^2 \quad (5-80)$$

特别指出, 以上公式中时间  $t$  是以后坐开始为零计算的。对于带有炮口制退器的火炮, 在应用式 (5-79) 和 (5-80) 时, 应以  $W_{KT}$  和  $L_{KT}$  替换式中  $W_{\max}$  和  $L_K$ , 同时在计算后效期驻退后坐诸元时, 所有自由后坐诸元的计算, 应用带炮口制退器时的计算公式。

### 三、惯性时期 ( $X_K < X \leq \lambda$ )

这个时期后坐阻力变化规律为

$$R = K \frac{Q_z D_{\alpha j} - Q_0 X \cos \varphi_j}{h_j} \quad (5-81)$$

其中  $K$  为稳定系数。由于  $R_K$  已由式 (5-74) 确定了, 在确定  $R_K$  时, 又以  $L_K$  代替  $X_K$ , 现在  $X_K$  可由 (5-80) 式计算出。如果仍用  $K = 0.91$  计算, 会使惯性时期后坐阻力与后效期后坐阻力不连续而出现跳跃。为了使后坐阻力变化规律保持连续, 应由 (5-74) 式已定出的  $R_K$  值和由 (5-80) 式计算出  $X_K$  值, 确定稳定系数  $K$ , 即

$$K = \frac{R_K h_j}{Q_z D_{\alpha j} - Q_0 X_K \cos \varphi_j} \quad (5-82)$$

然后, 直接将  $R$  代入驻退方程, 解出速度为

$$V^2 = V_K^2 - \frac{2g}{Q_0} \int_{X_K}^X R dX \quad (5-60)$$



而积分

$$\begin{aligned}\int_{X_K}^X R dX &= \int_{X_K}^X K \frac{Q_z D_{0\varphi j}}{h_j} dX - \int_{X_K}^X K \frac{Q_o X \cos \varphi_j}{h_j} dX \\ &= \frac{1}{2} (R_K + R) (X - X_K)\end{aligned}$$

代入 (5-60) 式, 有

$$V^2 = V_K^2 - \frac{g}{Q_o} (R_K + R) (X - X_K) \quad (5-83)$$

在计算时, 一般给定后坐行程计算步长  $\Delta X = 50 \sim 100$  毫米。按式 (5-81) 计算出对应之  $R$  值, 再代入 (5-83) 式计算对应的驻退后坐速度  $V$ 。

#### 四、驻退后坐最大速度 $V_{\max}$ 出现时间 $\theta_1$ 的计算

当用弹丸出炮口时的炮膛合力和后坐阻力作判断, 出现  $\chi P_g > R_g$  时, 应利用  $V_{\max}$  出现的条件  $P_g = R$ , 求出  $\theta_1$ , 即

$$\chi P_g e^{\gamma \theta_1 / b} - R_g - \frac{R_g - R_K}{t - t_g} (t_g + \theta_1 - t_g) = 0 \quad (5-84)$$

上式是仅有一个未知量  $\theta_1$  的超越方程, 可用解超越方程的计算方法, 求解出  $\theta_1$ 。再用  $t_{\theta_1} = t_g + \theta_1$ , 代入后效期驻退后坐诸元计算公式求出相应之  $V_{\theta_1}$  和  $X_{\theta_1}$  来。

#### 五、惯性时期延续时间 $\theta_2$ 和后坐总时间 $t_h$ 的计算

$\theta_2$  可按动量定理求得, 由于  $V_h = 0$ , 故惯性时期后坐部分的动量改变量为  $\frac{Q_o}{g} V_K$ , 应等于此时作用在后坐部分的力的冲量

$$\frac{Q_o}{g} V_K = \frac{R_K + R_h}{2} \theta_2$$

解出  $\theta_2$ , 得

$$\theta_2 = \frac{2Q_o}{g} \frac{V_K}{R_K + R_h} \quad (5-85)$$

后坐总时间  $t_h$  为

$$t_h = t_g + \tau + \theta_2$$

#### 六、 $\lambda$ 的计算

在一般计算时, 可根据 (5-83) 式按行程间隔逐点计算  $V^2$  值, 当  $V^2$  出现负值时, 可以用插值法求出对应于  $V^2 = 0$  的后坐行程, 这个行程就是  $\lambda$  值。有时总体估算不需要计算全部驻退后坐诸元, 仅从后效期结束的数据直接求出  $\lambda$ , 因此有必要导出  $\lambda$  的计算公式。

由式 (5-83), 当  $X = \lambda$  时,  $V_h = 0$ , 得

$$V_K^2 - \frac{g}{Q_o} (R_K + R_h) (\lambda - X_K) = 0 \quad (5-86)$$

式中

$$R_K = K \frac{Q_z D_{0\varphi j} - Q_o X_K \cos \varphi_j}{h_j}$$

$$\begin{aligned}
 R_{\lambda} &= K \frac{Q_s D_{ovj} - Q_o \lambda \cos \varphi_j}{h_j} = K \frac{Q_s D_{ovj} - Q_o (X_K + \lambda - X_K) \cos \varphi_j}{h_j} \\
 &= R_K - K \frac{Q_o \cos \varphi_j}{h_j} (\lambda - X_K)
 \end{aligned} \quad (5-87)$$

将  $R_K$  和  $R_{\lambda}$  代入式 (5-86) 中, 并整理为二次方程形式

$$\frac{Q_o}{g} V_K^2 - 2R_K (\lambda - X_K) + K \frac{Q_o \cos \varphi_j}{h_j} (\lambda - X_K)^2 = 0$$

解出  $\lambda$  得

$$\lambda = X_K + \frac{h_j}{K Q_o \cos \varphi_j} \left[ R_K - \sqrt{R_K^2 - K \frac{Q_o \cos \varphi_j}{h_j} \frac{Q_o}{g} V_K^2} \right] \quad (5-88)$$

又由 (5-87) 式, 知

$$\lambda = X_K + \frac{h_j}{K Q_o \cos \varphi_j} (R_K - R_{\lambda})$$

比较式 (5-88) 和上式括号项, 故根号前只取负号, 舍去取正号的一个根。

应该注意, 考虑到计算精度, 根号内的数据应尽量计算得精确一些。

总之, 第二节和第三节给出了计算驻退后坐诸元的思路。手算时, 可根据计算步骤列表计算 (参见第十五章计算实例)。最后将计算结果描绘出  $V-X$  和  $R-X$  曲线, 以备后续计算用。图 5-7 为 56-85 J (不带炮口制退器) 按野炮第二类制动图计算的驻退后坐诸元。

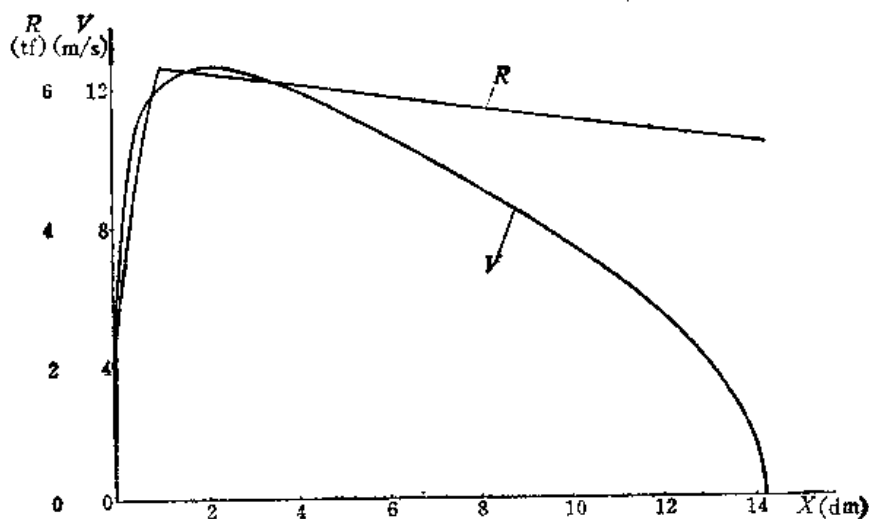


图5-7 56-85 J 按野炮第二类制动图计算的驻退后坐诸元

## 第六章 复进机设计

本章主要介绍弹簧式复进机和液体气压式复进机的一般设计方法。

由第三章可知,当正面设计时,在选定后坐阻力变化规律解出驻退后坐方程得到驻退后坐诸元后,应先进行复进机设计,然后再进行驻退机设计。为什么必须遵循这样的设计程序呢?从第四、五章可知,当火炮的内弹道条件和后坐部分重量确定后,后坐部分的运动只取决于后坐阻力的变化规律。后坐阻力方程

$$R = \phi_0 + P_f + F + T - Q_0 \sin \varphi$$

式中,后坐部分重量分力  $Q_0 \sin \varphi$  当射角确定后为一常量,紧塞装置和摇架导轨的摩擦力  $F + T$ ,在反后坐装置正面设计时可按常量计算,一般取

$$T = f Q_0 \cos \varphi, \quad f = 0.16 \sim 0.20 \text{——摇架导轨的摩擦系数,}$$

$$F = v Q_0, \quad v = 0.3 \sim 0.5 \text{——紧塞装置的相当摩擦系数。}$$

当根据火炮复进的要求选定弹性元件的各参数后,在后坐过程中复进机力  $P_f$  是后坐行程  $X$  的单值函数。图 6-1 所示为液体气压式复进机  $P_f-X$  曲线。

要想使  $P_f-X$  变化规律按人们预想的另一种规律变化是十分困难甚至是不可能的。因而在后坐阻力各组成部分中,可供调整以适应理想后坐阻力规律的只有驻退机液压阻力  $\phi_0$ 。如果使

$$\phi_0 = R - P_f - F - T + Q_0 \sin \varphi$$

(6-1)

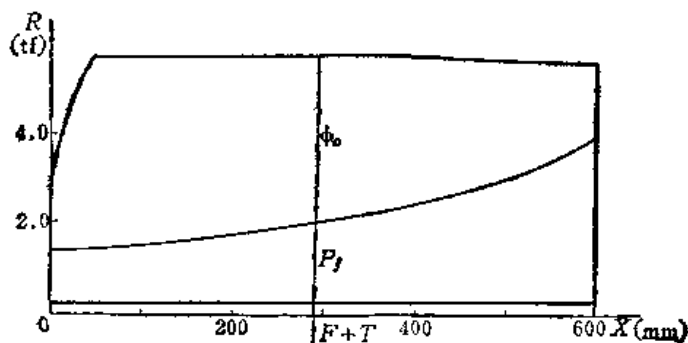


图6-1 56-85 J 后坐阻力各组成部份的变化规律

那么后坐阻力理论上就与理想的后坐阻力规律吻合。这说明理想的后坐阻力变化规律最终是靠控制驻退机液压阻力规律来实现的。因此,在反后坐装置设计程序上,必然是先设计好复进机,确定了符合要求的复进机力的变化规律,然后再设计驻退机最后保证后坐阻力的理想变化规律。56-85 J 后坐阻力各部分随后坐行程的变化规律大体如图 6-1 所示。

### 第一节 弹簧式复进机的设计

弹簧式复进机具有结构简单、工作可靠、性能不受温度变化的影响等优点,但是由于弹簧重量较大又不便于调整复进速度,因此只适于小口径高炮和航炮。

#### 一、复进机力的变化规律

弹簧式复进机用弹簧来储存能量,火炮后坐过程中压缩弹簧,因此复进机力是随压缩量按直线规律变化的。由于火炮的后坐行程就是弹簧的压缩量,复进机力  $P_f$  随后坐

行程的变化规律可写为

$$P_f = P_{f0} + cX \quad (6-2)$$

式中  $P_{f0}$ ——复进机的初力;

$c$ ——弹簧的刚度系数。

当后坐终了时,  $X = \lambda$ , 复进机末力

$$P_{f\lambda} = P_{f0} + c\lambda \quad (6-3)$$

若取弹簧末力  $P_{f\lambda}$  与初力  $P_{f0}$  之比为压缩比  $m$ , 则

$$m = \frac{P_{f\lambda}}{P_{f0}} = \frac{P_{f0} + c\lambda}{P_{f0}}$$

弹簧的刚度系数可写为

$$c = \frac{(m-1)P_{f0}}{\lambda} \quad (6-4)$$

设计弹簧式复进机, 主要是合理地选定主要参量  $P_{f0}$  和  $m$ , 在确定了  $P_{f0}$  和  $m$  并给定后坐长  $\lambda$  后, 可按式 (6-4) 求出弹簧的刚度系数, 进而具体设计弹簧的结构尺寸并计算复进机力。

## 二、确定 $P_{f0}$ 和 $m$ 的原则

复进机的首要任务是在整个射角范围内均能保持后坐部份在待击发位置, 并且当后坐部份有微小后移时, 它能克服各种摩擦力, 将它推回原位。因此复进机初力应由下式确定

$$P_{f0} > Q_0(\sin\varphi_{\max} + f \cos\varphi_{\max} + v) = \alpha Q_0 \quad (6-5)$$

当取  $f = 0.16$ ,  $v = 0.4$  时,  $\alpha$  有下列数值:

表 6-1

$\varphi_{\max}$	$20^\circ \sim 30^\circ$	$30^\circ \sim 40^\circ$	$40^\circ \sim 45^\circ$	$45^\circ \sim 60^\circ$	$> 60^\circ$
$\alpha$	0.9~1.10	1.10~1.20	1.20~1.25	1.25~1.35	1.40

如56-85 J 的  $P_{f0} = 960$  公斤力,  $Q_0 = 785$  公斤,  $\alpha = P_{f0}/Q_0 = 1.22$  (按  $\varphi_{\max} = 35^\circ$ )。如果火炮出于某种要求, 需要复进时给其他机构 (如自动机、输弹机等) 提供较多的能量, 复进机初力可以选得更大些。例如: 65-37 G 的  $\alpha = P_{f0}/Q_0 = \frac{365}{130} = 2.81$ , 59-57 G 的  $\alpha = P_{f0}/Q_0 = \frac{930}{380} = 2.46$ 。

总之, 在确定复进机的初力  $P_{f0}$  时, 应综合考虑上述两方面的因素并参考现有火炮的有关数据合理确定之。

确定弹簧式复进机的压缩比  $m$  应以弹簧重量最轻为原则。弹簧的重量主要取决于弹簧的全部压缩功的大小。在复进机初力  $P_{f0}$  和后坐长  $\lambda$  确定的条件下, 弹簧的压缩功越小, 弹簧的重量就越轻。弹簧的全部压缩功为

$$A = \frac{1}{2} P_{f\lambda} (F_0 + \lambda) \quad (6-6)$$

式中  $F_0$  为弹簧的初压缩量。考虑到  $P_{fz} = mP_{f0}$ , 有

$$F_0 = \frac{P_{f0}}{c} = P_{f0} \frac{\lambda}{(m-1)P_{f0}} = \frac{\lambda}{m-1}$$

代入式 (4-6) 得

$$A = \frac{1}{2} P_{f0} \lambda \frac{m^2}{m-1} \quad (6-7) \quad -\frac{2A}{P_{f0}\lambda}$$

式 (6-7) 说明了, 当初力  $P_{f0}$  和后坐长一定时, 弹簧压缩功  $A$  仅为压缩比  $m$  的函数。以  $m$  为自变量, 画出  $A = f(m)$  的曲线, 如图 6-2 所示。从曲线上可看出, 当  $m = 2$  时, 压缩功  $A$  有极小值。当然, 式 (6-7) 直接对  $m$  求导, 也可得出此结论。

因此弹簧式复进机通常取  $m = 2$

左右, 过大或过小都会使所设计的弹簧较重。例如, 65-37 G 的  $m = 2.06$ , 59-57 G 的  $m = 1.85$ 。

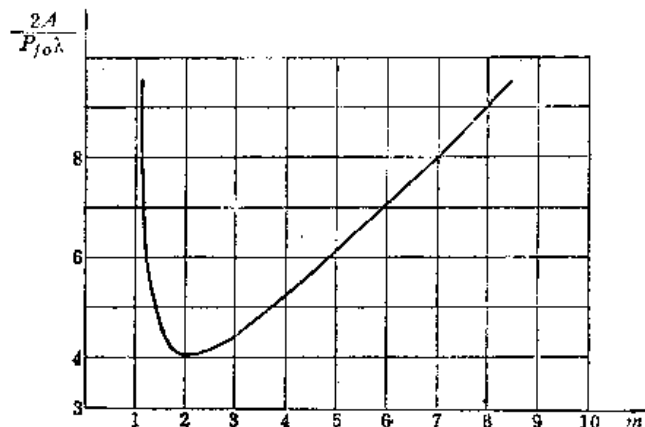


图6-2 压缩功  $A$  随  $m$  变化的曲线

### 三、弹簧结构尺寸的确定

设计弹簧是在总体布置确定的复进机所占空间内, 具体确定弹簧的材料、弹簧钢丝的断面形状尺寸、弹簧圈数及中径等基本参数, 以保证所选定的初力  $P_{f0}$  和压缩比  $m$  (或刚度系数  $c$ ), 并满足强度的要求。

火炮的复进簧均用合金弹簧钢制造, 常用材料有 60Si2MnA、65Si2MnWA 和 60Si2A 等热轧或冷拉弹簧钢。例如 55-37 G 用 60Si2A, 59-57 G 用 65Si2MnWA。

由于火炮对复进簧的重量和尺寸要求苛刻, 尽管它的工作条件很恶劣, 但是许用剪应力还是定得远比一般弹簧高。通常

$$[\tau] = 90 \sim 110 \text{ 公斤力/毫米}^2$$

如 65-37 G 图纸上规定  $[\tau] = 104 \text{ 公斤力/毫米}^2$ , 59-57 G 的  $[\tau] = 108 \text{ 公斤力/毫米}^2$ 。

弹簧设计的经验表明, 当弹簧的材料、圈数、中径和压缩功相同时, 圆形截面的圆柱螺旋弹簧比矩形截面的圆柱螺旋弹簧重量轻。当弹簧的材料和压缩功相同时, 在一定条件下矩形截面弹簧制作得比圆形截面弹簧短一些。为了减小纵向尺寸使结构紧凑, 复进簧通常用矩形截面的圆柱螺旋弹簧, 并使其长边与簧圈轴线相垂直。

弹簧设计的规范及方法较多, 在设计弹簧时可参考有关的资料和计算书, 这里仅介绍一种较简单的方法。

#### 1. 弹簧计算的公式

三种截面形状的圆柱螺旋弹簧计算公式如表 6-2 所示。

表中  $P$ ——弹簧力;

$G$ ——弹簧材料的剪切弹性模数, 一般  $G = 8000 \text{ 公斤力/毫米}^2$ ;

$D$ ——弹簧中径;

$n$ ——弹簧圈数;

$\xi$ 、 $\eta$ ——系数, 取决于矩形弹簧的长短边之比  $a/b$ , 见表6-3。

表6-2 圆柱螺旋弹簧计算公式

弹簧截面形状	最大剪应力 $\tau_m$ (公斤力/毫米 <sup>2</sup> )	最大载荷 $P_m$ (公斤力)	变形量 $F$ (毫米)	刚度 $c$ (公斤力/毫米)
圆形 (直径为 $d$ )	$\tau_m = 2.55 \frac{P_m D}{d^3}$	$P_m = 0.393 \frac{d^3}{D} [\tau]$	$F = 8 \frac{P D^3 n}{G d^4}$	$c = \frac{1}{8} \frac{G d^4}{D^3 n}$
正方形 (边长为 $a$ )	$\tau_m = 2.4 \frac{P_m D}{a^3}$	$P_m = 0.416 \frac{a^3}{D} [\tau]$	$F = 5.57 \frac{P D^3 n}{G a^4}$	$c = \frac{1}{5.57} \frac{G a^4}{D^3 n}$
矩形 (长边 $a$ 垂直轴线)	$\tau_m = \xi \frac{P_m D}{b^3}$	$P_m = \frac{1}{\xi} \frac{b^3}{D} [\tau]$	$F = \eta \frac{P D^3 n}{G b^4}$	$c = \frac{1}{\eta} \frac{G b^4}{D^3 n}$

表6-3 系数  $\xi$ 、 $\eta$  值

$a/b$	1.0	1.5	1.75	2.0	2.5	3.0	4.0	6.0	10.0
$\xi$	2.404	1.442	1.195	1.016	0.775	0.625	0.442	0.278	0.160
$\eta$	5.567	2.670	2.086	1.713	1.256	0.995	0.698	0.439	0.252

## 2. 弹簧尺寸的确定

在选定了弹簧的材料, 确定了许用剪应力和剪切弹性模数后, 可运用上述有关公式进行多方案计算, 然后对各方案从结构尺寸、重量等方面作综合分析, 最后择优选定。大致程序是先根据最大载荷  $P_m$  (它应比弹簧末力  $P_n$  稍大, 即在后坐终了尚有  $\Delta$  的压缩量才能使弹簧各圈固合, 故  $P_m = P_n + c\Delta$ ), 从强度方面考虑确定几组弹簧的尺寸  $D$ 、 $d$  (或者  $D$ 、 $a$ ;  $D$ 、 $b$  等), 然后, 从刚度方面确定弹簧的有效圈数, 再按照几何关系求出其他的弹簧结构参数, 最后比较各方案确定最合理的一组, 并绘制零件图。

圆形截面圆柱螺旋弹簧的设计步骤如下:

选择弹簧的旋绕比  $c' = \frac{D}{d}$ ,  $c'$  小说明绕制弹簧时钢丝变形大, 绕制困难, 应力分布不均匀的程度大, 簧圈内侧  $\tau_m$  也大;  $c'$  大则反之, 并使弹簧运动时各圈容易不稳定。通常  $c'$  取在 4~8 之间。

由于所设计弹簧应满足强度要求, 有

$$\tau_m = 2.55 \frac{P_m D}{d^3} = 2.55 \frac{P_m c'}{d^2} \leq [\tau]$$

于是, 解出  $d$ , 得

$$d \geq 1.6 \sqrt{\frac{P_m c'}{[\tau]}} \quad (6-8)$$

及

$$D = c' d \quad (6-9)$$

式 (6-8) 和 (6-9) 是根据强度要求设计尺寸  $D$ 、 $d$  的公式, 设计时可选定几个  $c'$  计算几组  $D$ 、 $d$  供选择。计算出的  $d$  应圆整为钢丝的标准直径。其余参数按下述各式确定;

有效圈数  $n = \frac{Gd^4}{8D^3c}$

最大载荷下单圈变形  $f_m = \frac{P_m}{nc}$  毫米

弹簧圈之间隙  $\delta = f_m$  毫米

弹簧圈节距  $t = \delta + d$  毫米

螺旋升角  $\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{t}{\pi D}$  度, 一般  $\alpha = 6^\circ \sim 9^\circ$

总圈数  $n_1 = n + 2$

弹簧自由高度  $H = n\delta + (n_1 + 0.5)d$  毫米

弹簧展开长度  $L = \frac{\pi D n_1}{\cos \alpha}$  毫米

弹簧重量  $Q = \frac{\pi d^2}{4} L \gamma$  公斤,  $\gamma = 7.85 \text{克/厘米}^3$

末力作用下弹簧的变形  $F_k = \frac{P_k}{c}$  毫米

初力作用下弹簧的变形  $F_o = \frac{P_o}{c}$  毫米

末力作用下弹簧的高度  $H_k = H - F_k$  毫米

初力作用下弹簧的高度  $H_o = H - F_o$  毫米

矩形截面圆柱螺旋弹簧的设计步骤与圆形截面的大体相同。

先确定几组弹簧的中径  $D$  和钢丝长短边比值  $a/b$ , 查出系数  $\xi$  和  $\eta$ , 然后按下述各式进行计算:

$$b \geq \sqrt{\xi \frac{P_m D}{[\tau]}} \quad \text{毫米}$$

$$a = \frac{a}{b} \cdot b \quad \text{毫米}$$

$$n = \frac{Gb^4}{\eta D^3 c}$$

$$f_m = \frac{P_m}{nc} \quad \text{毫米}$$

$$\delta = f_m \quad \text{毫米}$$

$$t = \delta + b \quad \text{毫米}$$

$$\alpha = \text{tg}^{-1} \frac{t}{\pi D} \quad \text{度}$$

$$n_1 = n + 2$$

$$H = n\delta + (n_1 + 0.5)b \quad \text{毫米}$$

$$L = \frac{\pi D n_1}{\cos \alpha} \quad \text{毫米}$$

$$Q = abL\gamma \quad \text{公斤}$$

$$F_k = \frac{P_k}{c} \quad \text{毫米}$$

$$F_0 = \frac{P_0}{C} \quad \text{毫米}$$

$$H_\lambda = H - F_\lambda \quad \text{毫米}$$

$$H_0 = H - F_0 \quad \text{毫米}$$

对现有炮用弹簧的校核计算表明, 矩形截面弹簧的实际应力  $\tau_m$  (如 59-100 G 平衡机簧  $\tau_m = 122.5$  公斤力/毫米<sup>2</sup>, 59-57 G 复进簧  $\tau_m = 119.2$  公斤力/毫米<sup>2</sup>) 比圆形截面弹簧的实际应力  $\tau_m$  (如 59-57 G 平衡机簧  $\tau_m = 58.6$  公斤力/毫米<sup>2</sup>) 大。这说明在矩形截面和圆形截面簧外廓尺寸大致相同的条件下, 矩形截面弹簧实际所能承受的负荷要比圆形截面的大, 因而在设计矩形截面弹簧时应考虑采用  $[\tau] > 100$  公斤力/毫米<sup>2</sup> 的许用应力。

## 第二节 液体气压式复进机的设计

液体气压式复进机易于控制液流通道调节复进速度, 应用于大中口径火炮上比弹簧式复进机结构紧凑, 重量轻, 因此它是目前野战火炮较普遍采用的一种复进机。它以气体作为储能介质, 液体则起传力和密封气体的作用。它的缺点是气体的工作性能随温度、压力等条件变化, 须经常检查和调正。

### 一、液体气压式复进机力的变化规律

液体气压式复进机在后坐过程中, 由于活塞的运动使复进机中的气体受到压缩, 同时通过筒壁与外界进行热交换。其压力 (由液体传递) 对活塞的作用就是复进机力  $P_f$ 。一般用多变过程来描述, 即

$$p_f W^n = p_{f0} W_0^n = \text{常数} \quad (6-10)$$

式中  $p_{f0}$ 、 $p_f$ ——复进机中气体的初压力和某瞬时的压力;

$W_0$ 、 $W$ ——气体的初体积及某瞬时的体积;

$n$ ——多变指数, 它取决于复进机的散热条件及活塞运动速度。一般均取  $n = 1.3$ , 但有的资料推荐取  $n = 1.10 \sim 1.20$ 。

根据式 (6-10) 复进机力可写为

$$P_f = A_f p_f = A_f p_{f0} \left( \frac{W_0}{W} \right)^n \quad (6-11)$$

式中  $A_f$  为复进机活塞工作面积。

气体的体积  $W$  随活塞运动的距离 (即后坐行程  $X$ ) 而变化, 即

$$W = W_0 - A_f X$$

将上式代入式 (6-11) 得

$$P_f = A_f p_{f0} \left( \frac{W_0}{W_0 - A_f X} \right)^n = P_{f0} \left( \frac{W_0}{W_0 - A_f X} \right)^n \quad (6-12)$$

式 (6-12) 即为计算液体气压式复进机力的基本公式。复进机力的变化规律如图 6-3 所示。

后坐终了时,  $X = \lambda$ , 复进机的末力为

$$P_P = P_{f0} \left( \frac{W_0}{W_0 - A_f \lambda} \right)^n \quad (6-13)$$

在复进机力的计算中, 为了计算简便引入一个叫做“复进机初体积相当长度  $S$ ”的



量,  $S = \frac{W_o}{A_f}$ 。从量纲上看  $S$  为一长度, 它的意义是, 复进机初体积所占空间的截面积如果与活塞工作面积  $A_f$  相同, 此容积的长度即为  $S$ 。此时复进机力和复进机末力可写为

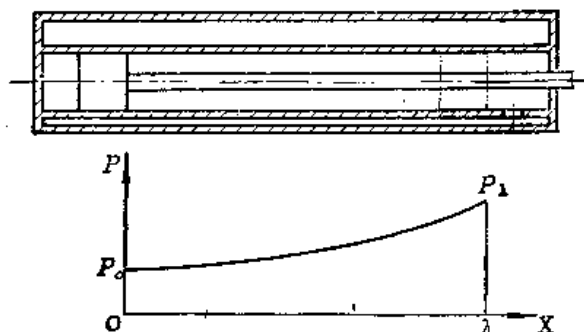


图6-3 复进机工作原理和复进机力

$$P_f = P_{fo} \left( \frac{S}{S - X} \right)^n \quad (6-14)$$

$$P_{fk} = P_{fo} \left( \frac{S}{S - \lambda} \right)^n \quad (6-15)$$

由上一节可知, 复进机末力与初力之比值称为压缩比  $m$

$$m = \frac{P_{fk}}{P_{fo}} = \left( \frac{S}{S - \lambda} \right)^n = \left( \frac{W_o}{W_o - A_f \lambda} \right)^n$$

解出  $W_o$  并引入  $m$ , 得

$$W_o = \frac{A_f \lambda}{1 - m^{-1/n}} = A_f S \quad (6-16)$$

在设计时确定了  $m$  和  $n$  之后, 可先由表 4-4 查出  $\frac{1}{1 - m^{-1/n}}$  的值。再利用(6-16)式计算气体的初体积  $W_o$ 。

表6-4  $\frac{1}{1 - m^{-1/n}}$  值

$n \backslash m$	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
1.1	2.876	2.613	2.413	2.263	2.140	2.038	1.957	1.886	1.822	1.769
1.2	3.086	2.802	2.580	2.417	2.280	2.170	2.078	2.000	1.933	1.875
1.3	3.293	2.985	2.749	2.570	2.420	2.300	2.200	2.113	2.040	1.977
$n \backslash m$	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
1.1	1.725	1.683	1.646	1.613	1.583	1.557	1.532	1.511	1.491	1.472
1.2	1.823	1.778	1.738	1.700	1.668	1.640	1.612	1.588	1.566	1.546
1.3	1.924	1.872	1.828	1.789	1.755	1.722	1.693	1.665	1.641	1.618

## 二、液体气压式复进机主要参数的确定原则

设计液体气压式复进机和弹簧式复进机一样, 首先要合理地确定复进机初力  $P_{fo}$  和压缩比  $m$ 。

液体气压式复进机初力  $P_{f_0}$  的确定与弹簧式的相同, 这里不再重复。在确定了初力  $P_{f_0}$  以后, 要根据复进机注气方式的不同, 合理选定复进机气体初压  $p_{f_0}$ 。对于师以下野战火炮, 复进机要能人工用唧筒注气, 因此气体初压不能太高, 一般  $p_{f_0}$  应小于 50 公斤力/厘米<sup>2</sup> (如 56-85 J,  $p_{f_0}=48$  公斤力/厘米<sup>2</sup>, 54-122 L,  $p_{f_0}=33$  公斤力/厘米<sup>2</sup>)。对于口径较大的火炮, 通常用贮气瓶注气,  $p_{f_0}$  可以取得大一些, 这样可使复进机结构尺寸小一些。如 59-130 J 的  $p_{f_0}=56$  公斤力/厘米<sup>2</sup>, 60-122 J 的  $p_{f_0}=61$  公斤力/厘米<sup>2</sup>, 59-100 G 的  $p_{f_0}=70$  公斤力/厘米<sup>2</sup>。

当确定了复进机初力  $P_{f_0}$  和初压  $p_{f_0}$  以后, 由下式计算出活塞工作面积  $A_f$ , 即

$$A_f = \frac{P_{f_0}}{p_{f_0}} \quad (6-17)$$

选择压缩比  $m$ , 首先考虑应尽量减小结构尺寸。由式 (6-16) 可知, 压缩比  $m$  越大, 对于确定的  $A_f$  和  $\lambda$ , 其气体的初容积  $W_0$  就越小, 越有利于减小结构尺寸; 但对于液体气压式复进机, 仅考虑减小结构尺寸是不够的, 因为增加  $m$  能提高复进机在后坐过程中所贮存的能量  $E_f$ , 即

$$\begin{aligned} E_f &= \int_0^\lambda P_f dX = \int_0^\lambda P_{f_0} \left( \frac{S}{S-X} \right)^n dX = \frac{P_{f_0} S}{n-1} \left( m^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \\ &= \frac{p_{f_0} W_0}{n-1} \left( m^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) \end{aligned} \quad (6-18)$$

同时, 在绝热条件下, 活塞 (通过液体) 以后坐速度急剧压缩气体, 使气体温度  $T_\lambda$  增高。由多变过程, 有

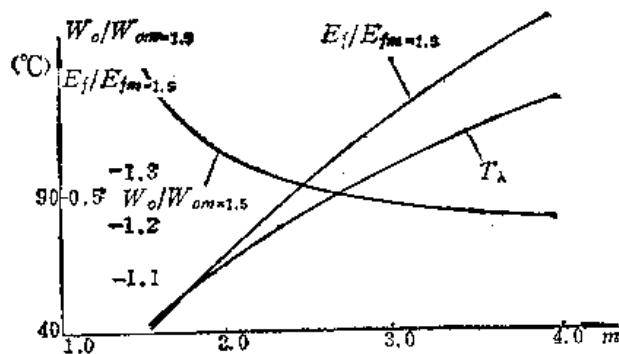
$$T_\lambda = T_0 \left( \frac{p_\lambda}{p_{f_0}} \right)^{\frac{n-1}{n}} = T_0 m^{\frac{n-1}{n}} \quad (6-19)$$

式中  $T_0$  为复进机气体的初始温度。式 (6-18) 和 (6-19) 表示  $E_f$  和  $T_\lambda$  均为压缩比  $m$  的增函数。若取多变指数  $n=1.33$ , 气体初始温度  $T_0=15^\circ\text{C}$ , 由式 (6-16) 计算出不同  $m$  值的初容积比  $W_0/W_{0m=1.5}$ , 进而可计算出表 6-5 的结果, 并可绘成如图 4-3 所示的曲线。

表 6-5  $W_0/W_{0m=1.5}$ ,  $E_f/E_{fm=1.5}$ ,  $T_\lambda$  随  $m$  的变化

$m$	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0
$W_0/W_{0m=1.5}$	1.00	0.647	0.529	0.468	0.432	0.408
$E_f/E_{fm=1.5}$	1.00	1.15	1.28	1.39	1.49	1.58
$T_\lambda(^{\circ}\text{C})$	45.48	69.05	88.52	105.25	119.99	133.23

由图 6-4 可以看出,  $W_0/W_{0m=1.5}$  随  $m$  的增大而递减, 而  $E_f/E_{fm=1.5}$ 、 $T_\lambda$  随  $m$  增大而递增。当  $m>3$  时, 继续增大  $m$  对减小初体积  $W_0$  的效果不太明显, 而由此带来的压缩过程中气体温度的升高, 以及后坐终了时储能过大, 将给反后坐装置设计带来困难。前者对驻退液的安定性和紧塞不利, 后者增加了复进剩余能量, 给节制复进和保证复进的稳定性带来困难。因此液体气压式复进机压缩比  $m$  也不宜过高, 一般中小口径火炮取

图6-4  $W_o/W_{om=1.5}$ ,  $E_f/E_{fm=1.5}$ ,  $T_A$  随  $m$  的变化曲线

$m=1.5\sim 2.5$ , 大口径火炮为了使结构紧凑, 可取  $m=2.5\sim 3$ 。但在具体选取压缩比  $m$  时, 除了考虑使结构紧凑、重量轻及后坐过程中贮存足够的能量外, 还应考虑后坐制动图的约束, 使复进机末力  $P_{f\lambda}$  满足下式:

$$P_{f\lambda} = mP_{fo} \leq R_{\lambda} - (F + T - Q_o \sin \varphi) \quad (6-20)$$

此外, 还受火炮总体设计的约束, 如火炮对复进机的某些特殊要求和对复进机的尺寸要求等。要经过综合考虑合理选定  $m$ 。例如, 59-100 G 的  $m=2.03$ , 54-122 L 的  $m=2.63$ , 59-130 J 的  $m=2.7$ 。56-85 J 的压缩比较高,  $m=3.62$ , 这可能是为了满足驻退机与复进机具有大体相同的外形尺寸这一总体要求所致。

在复进机设计过程中, 当合理选定初力  $P_{fo}$  和压缩比  $m$ , 并确定了气体初压  $p_{fo}$  时, 也就确定了复进机的活塞工作面积  $A_f$  和气体的初体积  $W_o$ , 而  $A_f$  和  $W_o$  则是确定液体气压式复进机结构尺寸的依据。

### 三、液体气压式复进机结构尺寸的确定

结构尺寸通常指的是复进杆直径以及内、中、外筒的内外径等。确定的顺序是从复进杆开始由内向外, 即内筒、中筒、外筒的次序进行。确定这些尺寸时, 除了和一般机械设计一样, 应满足零件的强度和刚度外, 液体气压式复进机还应遵循如下原则:

(1) 保证复进机内气体密封可靠。在任何射角下, 不应使各筒连接缝隙和通孔暴露于气体中 (应始终浸入液体中);

(2) 保证各筒之间的液体流动通畅。

应该指出, 确定结构尺寸时, 一般应和必要的计算和绘制结构草图同时进行。如各筒长度与活塞装置的结构、后坐长度、活塞宽度、通孔位置、各筒连接方式以及有无复进节制活瓣等有关, 这些都应在绘制结构草图时进行分析确定。

下面以杆后坐的复进机为例介绍主要结构尺寸的确定方法。对于筒后坐情况只介绍它们的不同点。

#### 1. 复进杆直径 $d_f$

杆后坐的复进杆在后坐复进过程中受力情况如图 6-5 所示。取复进杆为自由体, 并

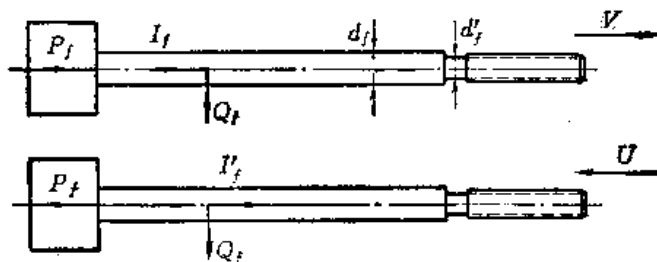


图6-5 复进杆的受力分析

应用动静法, 在加速后坐和复进时, 复进杆除受有复进机力  $P_f$  外, 还受有惯性力  $I_f$  (或  $I'_f$ )。由于复进时加速度小, 加速复进时  $I'_f$  与  $P_f$  方向相反。故复进杆在后坐时受力比复进时大。复进机力  $P_f$  的最大值出现在后坐终了时 (即  $P_{fk}$ )。惯性力  $I_f$  出现在  $\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\max}$  时, 即  $I_f = \frac{Q_f}{g} \left(\frac{dV}{dt}\right)_{\max}$ , 其中,  $Q_f$  为带活塞的复进杆重量。

由后坐运动微分方程, 有

$$\left(\frac{dV}{dt}\right)_{\max} = \frac{g}{Q_o} (P_{pf\max} - R_{pm})$$

故

$$I_f = -\frac{Q_f}{Q_o} (P_{pf\max} - R_{pm}) \approx -\frac{Q_f}{Q_o} P_{pf\max}$$

考虑安全起见, 认为后坐时复进杆最大受力为  $P_{fk} + I_f$ , 因此应使复进杆最小直径处满足拉伸强度, 即

$$-\frac{\pi}{4} d_f'^2 [\sigma] \geq P_{fk} + I_f \quad (6-21)$$

式中  $d_f'$ ——复进杆退刀槽处直径;

$[\sigma]$ ——材料的许用拉应力,  $[\sigma] = \frac{1}{3} \sigma_s$ 。

因此

$$d_f' \geq 2 \sqrt{\frac{P_{fk} + I_f}{\pi [\sigma]}} \quad (6-22)$$

考虑到复进杆外径  $d_f$  比螺纹外径大, 应使

$$d_f \geq 1.13 d_f' \quad (6-23)$$

并将其向大调整为紧塞元件的标准尺寸。复进杆的材料一般采用 40Cr, 屈服极限  $\sigma_s = 55 \sim 60$  公斤力/毫米<sup>2</sup>。

## 2. 复进机内筒的内径 $D_f$ 和外径 $D_f'$

内筒内径就是复进活塞的直径, 当确定了  $d_f$  后, 内筒内径应由活塞工作面积  $A_f$  确定。由

$$A_f = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - d_f^2) \quad (6-24)$$

得

$$D_f = \sqrt{d_f^2 + \frac{4}{\pi} A_f} \quad (6-25)$$

所得之  $D_f$  应调整为紧塞元件的标准尺寸。然后, 再将调整后的  $D_f$  代入式 (6-24), 计算出实际的活塞工作面积  $A_f$ 。与此同时, 要对初力  $P_{fo}$  或初压力  $p_{fo}$  进行必要的调整: 或者保持初压力不变, 利用式 (6-17) 计算出实际的初力  $P_{fo}$  作为最后计算值; 或者保持初力  $P_{fo}$  不变, 利用式 (6-17) 计算出实际的初压力  $p_{fo}$  作为最后计算值。

内筒外径  $D_f'$  是根据强度确定的。内筒最恶劣的工作状态出现在后坐终了时, 这时筒内没有压力, 而筒外却作用着最大的工作压力  $p_{fk}$ 。因此应将内筒看成只受外压作用

的厚壁圆筒，按第二强度理论根据厚壁圆筒公式，有

$$|E\varepsilon_{t1}| = \left| -p_2 \frac{2r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right| \leq [\sigma_y]$$

将  $p_2 = p_{fk}$ ,  $2r_2 = D'_f$ ,  $2r_1 = D_f$  代入，得

$$D'_f \geq D_f \sqrt{\frac{[\sigma_y]}{[\sigma_y] - 2p_{fk}}} \quad (6-26)$$

内筒壁厚  $\delta$  按下式计算

$$\delta \geq 0.5D_f \left( \sqrt{\frac{[\sigma_y]}{[\sigma_y] - 2p_{fk}}} - 1 \right) \quad (6-27)$$

式中  $E\varepsilon_{t1}$ ——内表面的切向相当应力，

$[\sigma_y]$ ——许用压应力。一般  $[\sigma_y] = (1.5 \sim 2.0)[\sigma]$ ,  $[\sigma] = \frac{1}{3}\sigma_s$ 。

内筒材料多用40Cr，屈服极限  $\sigma_s = 55 \sim 60$  公斤力/毫米<sup>2</sup>。所得之内筒外径  $D'_f$  也应调整为整数。

当内筒承压长度超过  $4.9\rho\sqrt{\frac{\rho}{\delta}}$  时，须检验内筒受外压作用的稳定性。受外压圆筒仍保持稳定的临界压力为：

$$p_{lj} = \frac{E\delta^3}{4\rho^3(1-\mu^2)} \quad \text{或} \quad p_{lj} = \frac{E\delta^3}{4\rho^3} \quad (6-28)$$

式中  $\rho$ ——内筒的平均半径（可取  $\rho = \frac{D_f}{2}$ ）；

$E$ ——弹性模数，对于钢取  $E = 2.1 \times 10^6$  公斤力/厘米<sup>2</sup>；

$\mu$ ——泊松比，钢为  $\mu = 0.24 \sim 0.28$ 。

稳定性的安全系数应大于 5~10。例如56-85 J 的复进机内筒， $\delta = 3.5$  毫米， $\rho = 28$  毫米，其  $p_{lj} = 1015$  公斤力/厘米<sup>2</sup>，安全系数  $n = \frac{p_{lj}}{p_{fk}} = 5.85$ 。

### 3. 复进机外筒的内径 $D_s$ 和外径 $D'_s$

图6-6所示为具有两个筒的杆后坐复进机，其内筒与后盖安装时是搭接的，因此要求任何射角时液面都应盖住搭接处的缝隙，以防气体进入内筒。为了减少液量将内外筒偏心配置。

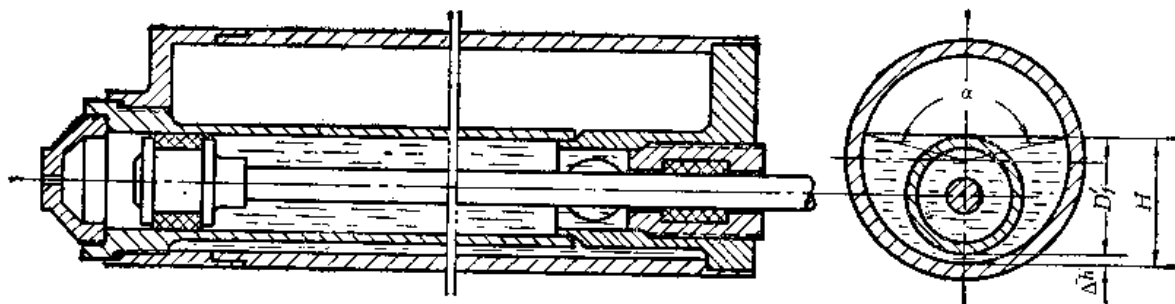


图6-6 杆后坐复进机结构简图

外筒内径  $D_b$  是根据气体初容积确定的。为了保证液体密封气体, 当射角  $\varphi = 0^\circ$  时, 液面高为  $H$ , 由图6-6可知

$$H = D_b' + \Delta h \quad (6-29)$$

式中  $\Delta h$  为内外筒间在下部的间隙。为了保证液体流动通畅, 一般  $\Delta h = 2.5 \sim 5$  毫米。如某100 T的  $\Delta h = 2.5$  毫米, 54-122 L的  $\Delta h = 3.0$  毫米。

外筒容纳气体的空间长度  $L_{B_1}$  可通过绘制结构草图确定。气体初容积  $W_0$  是通过液面上方的断面为弓形的体积保证的。若弓形面积为  $F$ , 则

$$F = \frac{W_0}{L_{B_1}} \quad (6-30)$$

弓形面积取决于液面高度  $H$  和外筒内径  $D_b$ , 即

$$F = \frac{\pi}{4} D_b^2 \frac{\alpha}{360^\circ} - \frac{1}{2} \left( \frac{D_b}{2} \right)^2 \sin \alpha = \frac{D_b^2}{8} \left( \frac{\pi \alpha}{180^\circ} - \sin \alpha \right) \quad (6-31)$$

而

$$H = \frac{D_b}{2} \left( 1 + \cos \frac{\alpha}{2} \right) \quad (6-32)$$

式中  $\alpha$  为液面对应之张角。

从式 (6-31) 和 (6-32) 中消去  $D_b$ , 得

$$\frac{F}{H^2} = \frac{\frac{\pi \alpha}{180^\circ} - \sin \alpha}{2 \left( 1 + \cos \frac{\alpha}{2} \right)^2} \quad (6-33)$$

式 (6-33) 的  $F$ 、 $H$  和  $\alpha$  三个量中, 只要知道两个量即可求出第三个量。在设计复进机时, 通常是已知  $F$  和  $H$ , 利用上式求张角  $\alpha$ 。为了便于计算, 把  $\frac{F}{H^2} = \varphi(\alpha)$  编成表6-6。有了张角  $\alpha$  即可利用式 (6-32) 求出外筒内径  $D_b$ 。

$$D_b = \frac{2H}{1 + \cos \frac{\alpha}{2}} \quad (6-34)$$

计算出  $D_b$  后, 应向大的方向调整成毫米的整数尺寸。调整后要使  $W_0$  不变, 必须重新计算液面高度。表6-6中列出  $F_1$  和  $H_1$ , 其中

$$\begin{cases} F_1 = \frac{1}{2} \left( \frac{\pi \alpha}{180^\circ} - \sin \alpha \right) \\ H_1 = 1 + \cos \frac{\alpha}{2} \end{cases} \quad (6-35)$$

与式 (6-31)、(6-32) 比较, 不难看出  $F_1$  和  $H_1$  表示当  $\frac{D_b}{2} = 1$  时的弓形面积和相应的液面高度。将式 (6-35) 代入式 (6-31) 和 (6-32) 中, 有

$$\begin{cases} F = F_1 \frac{D_b^2}{4} \\ H = H_1 \frac{D_b}{2} \end{cases} \quad (6-36)$$

于是, 可得出

$$F_1 = \frac{4F}{D_b^2} \quad (6-37)$$

$$H_1 = \frac{2H}{D_b} \quad (6-38)$$

表6-6  $\alpha$  与  $\frac{F}{H^2}$ 、 $F_1$ 、 $H_1$  的对应关系

$\alpha^\circ$	$\frac{F}{H^2}$	$H_1$	$F_1$	$\alpha^\circ$	$\frac{F}{H^2}$	$H_1$	$F_1$
5	0.0000	1.9990	0.0001	131	0.3827	1.4147	0.7658
10	0.0001	1.9962	0.0004	132	0.3943	1.4067	0.7803
15	0.0004	1.9914	0.0015	133	0.4063	1.3987	0.7950
20	0.0009	1.9848	0.0035	134	0.4186	1.3907	0.8087
25	0.0018	1.9763	0.0069	135	0.4313	1.3827	0.8245
30	0.0035	1.9659	0.0118	136	0.4443	1.3746	0.8395
35	0.0049	1.9537	0.0186	137	0.4576	1.3665	0.8546
40	0.0073	1.9397	0.0277	138	0.4713	1.3584	0.8697
45	0.0108	1.9239	0.0392	139	0.4854	1.3502	0.8850
50	0.0146	1.9063	0.0533	140	0.4999	1.3420	0.9003
55	0.0197	1.8870	0.0704	141	0.5147	1.3338	0.9158
60	0.0260	1.8660	0.0906	142	0.5300	1.3256	0.9314
65	0.0336	1.8434	0.1141	143	0.5457	1.3173	0.9470
70	0.0426	1.8192	0.1410	144	0.5619	1.3090	0.9627
75	0.0534	1.7934	0.1715	145	0.5784	1.3007	0.9786
80	0.0660	1.7660	0.2057	146	0.5954	1.2924	0.9945
85	0.0808	1.7373	0.2437	147	0.6129	1.2840	1.0105
90	0.0980	1.7071	0.2854	148	0.6309	1.2756	1.0266
95	0.1187	1.6756	0.3309	149	0.6493	1.2672	1.0428
100	0.1409	1.6428	0.3803	150	0.6683	1.2588	1.0590
101	0.1459	1.6361	0.3906	151	0.6878	1.2504	1.0753
102	0.1511	1.6293	0.4010	152	0.7078	1.2419	1.0917
103	0.1564	1.6225	0.4117	153	0.7284	1.2334	1.1082
104	0.1618	1.6157	0.4224	154	0.7496	1.2249	1.1247
105	0.1674	1.6088	0.4333	155	0.7713	1.2164	1.1413
106	0.1732	1.6018	0.4444	156	0.7937	1.2079	1.1580
107	0.1791	1.5948	0.4556	157	0.8166	1.1994	1.1747
108	0.1852	1.5878	0.4670	158	0.8403	1.1908	1.1915
109	0.1915	1.5807	0.4784	159	0.8645	1.1822	1.2084
110	0.1979	1.5736	0.4901	160	0.8895	1.1736	1.2253
111	0.2045	1.5664	0.5019	161	0.9152	1.1650	1.2422
112	0.2113	1.5592	0.5138	162	0.9416	1.1564	1.2592
113	0.2183	1.5519	0.5259	163	0.9687	1.1478	1.2763
114	0.2255	1.5446	0.5381	164	0.9966	1.1392	1.2934
115	0.2329	1.5373	0.5504	165	1.0254	1.1305	1.3105
116	0.2405	1.5299	0.5629	166	1.0549	1.1219	1.3277
117	0.2483	1.5225	0.5755	167	1.0853	1.1132	1.3449
118	0.2563	1.5150	0.5883	168	1.1165	1.1045	1.3621
119	0.2645	1.5075	0.6012	169	1.1487	1.0958	1.3794
120	0.2729	1.5000	0.6142	170	1.1817	1.0872	1.3967
121	0.2817	1.4924	0.6273	171	1.2158	1.0785	1.4140
122	0.2906	1.4848	0.6406	172	1.2507	1.0698	1.4314
123	0.2997	1.4772	0.6540	173	1.2869	1.0610	1.4488
124	0.3092	1.4695	0.6676	174	1.3239	1.0523	1.4662
125	0.3188	1.4617	0.6813	175	1.3622	1.0436	1.4836
126	0.3288	1.4540	0.6951	176	1.4015	1.0349	1.5010
127	0.3390	1.4462	0.7090	177	1.4420	1.0262	1.5185
128	0.3495	1.4384	0.7230	178	1.4837	1.0178	1.5359
129	0.3603	1.4305	0.7372	179	1.5266	1.0087	1.5533
130	0.3712	1.4226	0.7514	180	1.5708	1.0000	1.5708

具体计算液面高度的方法如下：先按 (6-30) 式计算出  $F$ ，然后将调整好的  $D_b$  代入式 (6-37) 求出  $F_1$ ，再以  $F_1$  查表6-6，找出对应之  $H_1$  值。于是调整后的液面高度  $H$ ，可按式 (6-36) 中

$$H = H_1 \frac{D_b}{2}$$

计算出。

外筒外径  $D'_b$  是由外筒强度确定的。外筒可看作有底的受内压的厚壁圆筒，由厚壁圆筒公式按第二强度理论，有

$$E\varepsilon_{ct} = p_1 \left[ (1 + \mu) \frac{r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + (1 - 2\mu) \frac{r_1^2}{r_2^2 - r_1^2} \right] \leq [\sigma]$$

将  $p_1 = p_{fk}$ ,  $r_1 = \frac{D_b}{2}$ ,  $r_2 = \frac{D'_b}{2}$ ,  $\mu = 0.3$  代入，得

$$D'_b \geq D_b \sqrt{\frac{[\sigma] + 0.4p_{fk}}{[\sigma] - 1.3p_{fk}}} \quad (6-39)$$

$$\delta \geq 0.5D_b \left( \sqrt{\frac{[\sigma] + 0.4p_{fk}}{[\sigma] - 1.3p_{fk}}} - 1 \right) \quad (6-40)$$

外筒材料多用 40Cr 或 35Cr，其屈服极限  $\sigma_s = 55$  公斤力/毫米<sup>2</sup>。为了保证外筒的刚度，其厚度最小处一般不应小于 5 毫米。如某 100 T 复进机外筒用 35Cr 制造，最小壁厚为 5.75 毫米。

#### 4. 筒后坐复进机结构尺寸确定的特点

筒后坐的情况，由于复进杆在后坐复进过程中，始终是静止不动的，即  $I_f = I'_f = 0$ 。因此作用在复进杆上的力只有复进机力  $P_f$ ，当  $X = \lambda$  时受力最大，即  $P_f = P_{fk}$ 。在利用式 (6-22) 计算复进杆退刀槽处外径  $d'_f$  时，只要使  $I_f = 0$  即可。

筒后坐的另一个特点是在结构上增加了一个中筒，以使气体不能进入内筒。由于各种复进机的中筒布置方法不同，使得确定中筒和外筒尺寸的时机也不同。

56-85 J 复进机 (如图 6-7 所示)，为了使外筒与驻退机外径相同，采取使复进杆、内筒与外筒同心，将中筒向下偏心配置的方式，这样可以尽量加大储气空间，并使液面尽量降低。它的中筒内表面的上

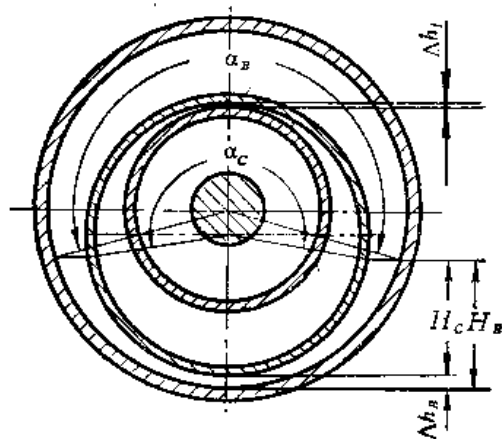


图6-7 56-85 J 复进机横截面

方与内筒间隙为  $\Delta h_f$ ，由于中筒内外承受的压力相等，故可取较薄的壁厚  $\delta$  ( $\delta = 3$  毫米左右) 用普通碳钢制造。属于这样的结构，可以先确定外筒内外径，再由简单的几何关系确定出中筒尺寸：

$$D'_c = \frac{D_f}{2} + \Delta h_f + \frac{D_b}{2} - \Delta h_b + \delta \quad (6-41)$$

$$D_c = \frac{D'_f}{2} + \Delta h_f + \frac{D_b}{2} - \Delta h_b - \delta \quad (6-42)$$

式中  $D'_c$  和  $D_c$  为中筒的外径和内径。56-85 J 的  $\Delta h_f = 1.5$  毫米， $\Delta h_b = 4.0$  毫米， $\delta = 2.5$  毫米。

由于外筒尺寸已经确定， $W$  要靠仔细调整液面高度  $H$  来保证。所需储气空间的截面积为



$$F = \frac{W_o}{L_f}$$

式中  $L_f$  为外筒内腔长度。此面积为两个弓形面积之差 (见图6-7)。

$$F = F_b - F_c \quad (6-43)$$

式中  $F_b$ ——外筒内径与液面上方所包围的弓形面积;

$F_c$ ——中筒外径与液面上方所包围的弓形面积。

两弓形面积可以表示为

$$\begin{cases} F_b = \left( \frac{\alpha_b}{360^\circ} \pi - \frac{1}{2} \sin \alpha_b \right) \frac{D_b^2}{4} \\ F_c = \left( \frac{\alpha_c}{360^\circ} \pi - \frac{1}{2} \sin \alpha_c \right) \frac{D_c'^2}{4} \end{cases} \quad (6-44)$$

式中  $\alpha_b$  和  $\alpha_c$  分别为外筒和中筒液面对应之张角。

调整液面高度  $H$  的方法如下: 先估算一个液面高  $H_b$  (液面对于中筒底之高  $H_c = H_b - \Delta h_b$ ), 再由式 (6-38) 求出对应于  $H_c$ 、 $H_b$  的  $H_{1c}$  和  $H_{1b}$ , 查表6-6求出对应之张角  $\alpha_c$  和  $\alpha_b$  (或对应的  $F_{1c}$  和  $F_{1b}$ ); 利用式 (6-44) 或式 (6-36) 计算出  $F_c$  和  $F_b$ , 再代入式 (6-43) 计算出  $F$ 。如果与所需  $F$  值不符, 应适当调整  $H_b$ , 再计算一次, 一直到与所需  $F$  值一致为止。最后的  $H_b$  即为所求之液面高度。

59-130 J 的复进机如图6-8所示。复进杆、内筒和中筒同心, 并偏心配置于外筒下方。此时, 先确定中筒尺寸再确定外筒尺寸。中筒尺寸的确定应考虑中筒和内筒之间保留一定的间隙  $\Delta h_f$  和中筒壁厚  $\delta$  (如60-122 J 的  $\Delta h_f = 7.5$  毫米, 中筒  $\delta = 3.5$  毫米), 即

$$D_c' = D_f' + 2(\Delta h_f + \delta) \quad (6-45)$$

$$D_c = D_f' + 2\Delta h_f \quad (6-46)$$

由于这种复进机结构上的特点, 中筒的密封较可靠, 不需要使液面将中筒全盖住。为了计算方便, 一般使液面与外筒中心取平。外筒

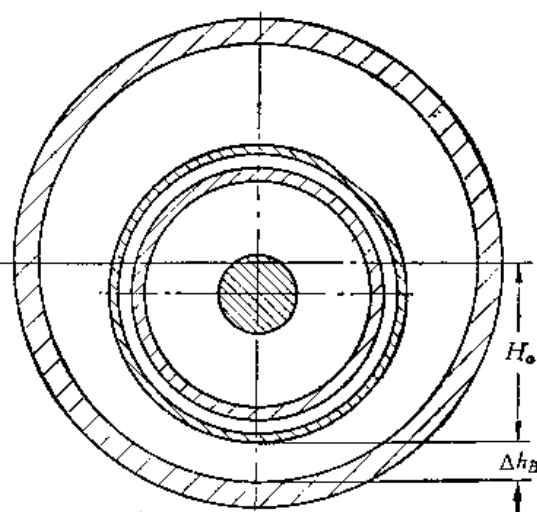


图6-8 59-130 J 复进机的横截面

尺寸的确定须在满足  $W_o$  的情况下, 经过反复计算。确定外筒内径  $D_b$  时, 先给出一估算值  $D_b$ , 求出液面对于中筒底部的高度  $H_c = \frac{1}{2} D_b - \Delta h_b$ , 而  $F_b = \frac{\pi}{8} D_b^2$ ,  $F_c$  可按  $\frac{2H_c}{D_c} = H_{1c}$ , 查表6-6求出  $F_{1c}$  得到。由式 (6-43) 计算出  $F$  后, 若与所需之  $F$  不符, 可重新调整  $D_b$ , 再求  $F$  直到完全符合为止。

外筒外径  $D_o'$  也由受内压的厚壁圆筒公式确定与杆后坐情况相同。

#### 四、液体气压式复进机的液量检查表的制作原理

选定  $P_{fo}$  和  $m$  后, 复进机力的变化规律就确定了。为保证  $P_{fo}$  和  $m$  而确定的结构尺寸, 未必符合实际情况。能否使火炮在任何时候都保持所设计的  $P_{fo}$  和  $m$ , 这是关系到

火炮能否正常工作的重要问题。实际上  $P_{f0}$  不变是靠保持初压  $p_{f0}$  不变来保证的,  $m$  不变是靠保持气体初体积  $W_0$  不变来保证的。在复进机内总容积一定的情况下, 要使  $W_0$  不变必须使液体量  $W_y$  不变。这就是在射击前必须对复进机的气压和液量进行检查并调整到正常范围内的道理。检查和调整的顺序: 先检查和调整液量, 在液量正常的条件下, 再调整气压。液量检查的方法是: 用人工后坐, 在一定后坐行程  $l$  上测量两点的气压值, 查表判断液量是否符合标准。

由于人工后坐的速度很慢, 气体在压缩过程中可与外界进行充分的热交换, 因此可以认为由第一条刻线后坐  $l$  距离至第二条刻线, 气体压缩过程为等温过程, 即

$$p_{f0}W_0 = p_{f1}W_1$$

而

$$W_0 = W_q - W_y$$

$$W_1 = W_q - W_y - A_f l$$

式中  $W_q$ ——复进机内空间的总容积;

$W_y$ ——复进机内液体量。由此, 得

$$p_{f1} = \frac{W_0}{W_1} p_{f0} = \frac{W_q - W_y}{W_q - W_y - A_f l} p_{f0} = \frac{1}{1 - \frac{A_f l}{W_q - W_y}} p_{f0} \quad (6-47)$$

(6-47) 式说明, 对于某一等温压缩过程, 在压缩行程  $l$  时的压力  $p_{f1}$  与  $p_{f0}$  是线性关系, 它是一条过原点的直线, 其斜率为

$$\operatorname{tg} \alpha = \left( 1 - \frac{A_f l}{W_q - W_y} \right)^{-1}$$

当  $A_f l$  和  $W_q$  一定时, 直线的斜率只取决于液体量  $W_y$  的多少。当液量少于标准液量时, 即  $W_{y1} < W_y$ , 直线斜率为

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{1}{1 - \frac{A_f l}{W_q - W_{y1}}} < \operatorname{tg} \alpha$$

当液量多于标准液量  $W_y$  时, 即  $W_{y2} > W_y$ , 其斜率为

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{1}{1 - \frac{A_f l}{W_q - W_{y2}}} > \operatorname{tg} \alpha$$

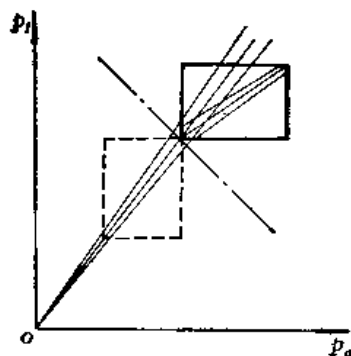


图6-9 复进机液量检查表原理图

如果将标准液量  $W_y$ , 允许最少液量  $W_{y1}$  和允许最多液量  $W_{y2}$  代入 (6-47) 式, 可得出如图6-9所示的三条直线。由于复进机初压  $p_{f0}$  只在标准值附近变化, 故在火炮上常常截取三直线的一部分绘成液量检查表。检查液量时, 分别测出  $p_{f0}$  和  $p_{f1}$  后, 即可在表中找出相应的坐标点。如果该点落在三条直线之间, 则液量符合标准; 如果此点落于直线外侧, 则应由纵或横坐标的差值, 按比例计算出液体的偏差量。

后期出厂的某些火炮, 液量检查表已改为可直接读出液量偏差数值的形式, 但原理仍然是一样的。

## 第七章 节制杆式驻退机设计

由第三章介绍可知, 建立在一维定常流动假设下的节制杆式驻退机设计理论, 其正面问题解题步骤为: 先根据火炮的性能和战术技术要求, 拟定后坐制动图形 (给出理想的后坐阻力变化规律  $R-t$  或  $R-X$  曲线), 继而解驻退后坐运动微分方程 (后坐运动分析) 得到理想的后坐运动规律, 即  $V-X$  和  $t-X$  关系。然后, 设计复进机得到  $P_f-X$  曲线。在正面问题中, 认为  $F+T-Q_0\sin\varphi = \text{常数}$ , 这样, 由后坐制动图形得

$$\phi_0 = R - P_f - (F + T - Q_0\sin\varphi)$$

从上式得到的  $\phi_0-X$  规律是由后坐制动图形得到的理想的液压阻力变化规律, 如图 7-1 所示。最后, 我们根据所设计驻退机的具体结构, 建立液压阻力方程

$$\phi_0 = f(a_x)V^2$$

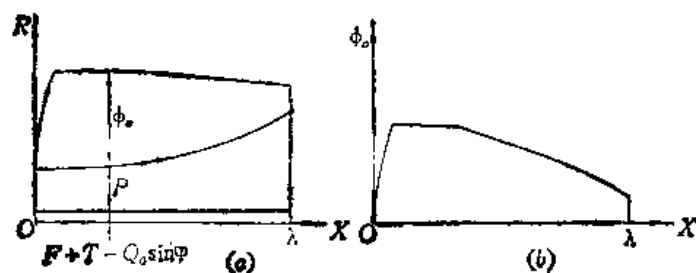


图7-1 理想的  $R-X$  和  $\phi_0-X$  曲线

分析上面两式不难看出, 以  $X$  为自变量可以逐点解出流液孔  $a_x$  的尺寸大小 (即  $a_x-X$ )。

本章主要内容是: 根据流体力学的基本原理推导节制杆式驻退机的液压阻力方程; 节制杆式驻退机流液孔的计算及主要结构尺寸的确定; 反面问题计算的时机和解法; 节制杆式驻退机液压阻力系数; 以及节制杆式驻退机设计中的某些理论与实践问题。

### 第一节 节制杆式驻退机的液压阻力方程

典型的节制杆式驻退机结构如图 7-2 所示。这种型式的驻退机目前广泛地应用在制式的火炮中, 它与其他型式的驻退机比较, 动作确实可靠, 理论较为完善并与实际有较好的符合。

#### 一、节制杆式驻退机内液体流动特点

与最简单式驻退机相比, 节制杆式驻退机有两个特点 (见图 7-2):

第一, 流液孔不是由定直径的小圆孔构成, 而是由定直径的节制环与变直径的节制杆之间的环形面积构成。显然,  $a_x$  随节制杆与节制环的相对位置而变化, 而  $a_x$  的变化规律取决于节制杆的外形;

第二, 有两股液流。后坐时, 在活塞推动下, 工作腔 I 内排出的液流分为两股: 一股经节制杆与节制环之间的环形孔  $a_x$  流入非工作腔 II, 它是后坐时产生驻退机液压阻

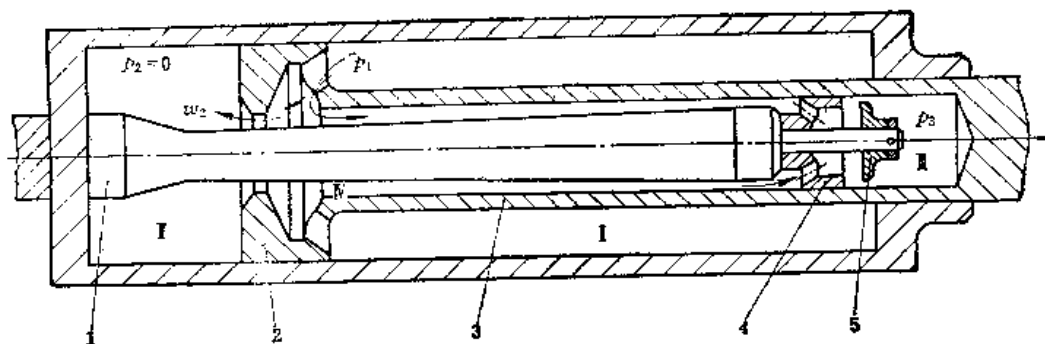


图7-2 节制杆式驻退机原理图

1—变直径的节制杆；2—节制环；3—驻退杆；4—调速筒；5—活瓣。

力的主要液流，称为“主流”；另一股由驻退杆内壁与节制杆之间的环形管道经调速筒的几个孔推开活瓣进入内腔Ⅱ，称为“支流”。复进时，驻退杆内腔为一复进节制器，为了在复进全程都能提供制动的阻力，要求内腔在后坐过程中始终充满液体。

在两股液流中，主流的作用和最简单式驻退机是相似的，在活塞压力  $p_1$  的作用下，从工作腔经  $a_x$  流入非工作腔。由于驻退杆不断抽出，非工作腔产生真空，即  $p_2 = 0$ 。支流液体在活塞压力  $p_1$  作用下进入驻退杆内腔，由于内腔始终充满液体，不产生真空，故  $p_3 > 0$ 。可以认为支流是在  $p_1 - p_3$  作用下的流动。支流存在着一个最小截面积  $\Omega_1$ ，该截面出现的位置因具体结构的不同而不同。由于结构设计时保证整个支流流经的通道面积都大于  $\Omega_1$ ，因此，认为  $\Omega_1$  相当于一常数流液孔。这样，支流的作用与在  $p_1 - p_3$  作用下，流经常数流液孔  $\Omega_1$  的最简单式驻退机相当。

## 二、液压阻力方程的推导

首先引入以下符号：

$d_T$ ——驻退杆直径；

$D_T$ ——活塞直径，活塞工作面积  $A_0 = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_T^2)$ ；

$d_1$ ——内腔直径，复进节制器工作面积  $A_{fj} = \frac{\pi}{4} d_1^2$ 。

$d_p$ ——节制环直径，节制环孔面积  $A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2$ ；

$\delta_x$ ——节制杆直径，节制杆截面积  $A_x = \frac{\pi}{4} \delta_x^2$ ；

流液孔面积  $a_x = A_p - A_x = \frac{\pi}{4} (d_p^2 - \delta_x^2)$ ；

$\Omega_1$ ——支流最小截面积。

方程推导时仍沿用第三章对驻退机内液体流动假设：即以地球为参考系的一维的不可压缩的定常流动。此外，还要假设：

(1) 驻退杆内腔在后坐时始终充满液体；

(2) 由于活塞上斜孔面积足够大，认为液体由工作腔流经斜孔后压力无损失，仍为  $p_1$ ；

(3) 忽略液体流经液孔的收缩现象。

方程推导的思路与最简单式驻退机液压阻力方程的相同。

### 1. 液流速度的计算

若驻退机为杆后坐，后坐速度为  $V$ ，单位时间  $dt$  内，活塞移动  $dX$  距离，液体重量为  $\gamma$ ，则对主流来说，活塞移动  $dX$  距离，被排挤的液体重量为

$$A_o dX \gamma + (A_{ij} - A_x) dX \gamma$$

前一项为活塞直接排挤的液体重量，后一项是由于节制杆由驻退杆内拔出所排挤的液体重量。由连续方程可知，这些液体的一部分经  $a_x$  流入非工作腔，重量为  $w'_2 a_x dt \gamma$ ，流过  $a_x$  的速度为  $w'_2$ ；另一部分流入内腔（由于内腔始终充满），重量为  $A_{ij} dX \gamma$ ，故有

$$A_o dX \gamma + (A_{ij} - A_x) dX \gamma = w'_2 a_x dt \gamma + A_{ij} dX \gamma \quad (7-1)$$

简化上式，并因  $\frac{dX}{dt} = V$ ，得

$$\begin{aligned} (A_o - A_x) V &= a_x w'_2 \\ w'_2 &= \frac{A_o - A_x}{a_x} V \end{aligned} \quad (7-2)$$

此时  $w'_2$  为相对于活塞的速度，而绝对速度  $w_2$  为

$$\begin{aligned} w_2 &= w'_2 - V = \frac{A_o - A_x}{a_x} V - V \\ w_2 &= \frac{A_o - A_p}{a_x} V \end{aligned} \quad (7-3)$$

如果驻退筒后坐， $w'_2$  就是绝对速度。

对支流来说，根据内腔始终充满液体的假设条件，当驻退杆移动  $dX$  距离时，内腔体积增大  $A_{ij} dX$ ，需要  $A_{ij} dX \gamma$  重量的液体补充。设流经支流最小截面积  $\Omega_1$  的流速为  $w_3$ ，由连续方程有

$$A_{ij} dX \gamma = w_3 dt \Omega_1 \gamma \quad (7-4)$$

即

$$\begin{aligned} A_{ij} V &= w_3 \Omega_1 \\ w_3 &= \frac{A_{ij}}{\Omega_1} V \end{aligned} \quad (7-5)$$

显然， $w_3$  就是绝对速度。

### 2. 液体压力的计算

根据伯努利方程可分别列出主流与支流的压力与流速的关系式。

主流：

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{w_2^2}{2g} + H_{r1}$$

将流动条件，即  $H_{r1} = \xi_1 \frac{w_2^2}{2g}$ ； $w_1 = 0$

$$w_2 = \frac{A_o - A_p}{a_x} V；p_2 = 0$$

代入上式得

$$p_1 = \frac{(1 + \xi_1) \gamma}{2g} \left( \frac{A_o - A_p}{a_x} \right)^2 V^2 \quad (7-6)$$

支流,

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{w_1^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + \frac{w_3^2}{2g} + H_{r2}$$

将流动条件, 即

$$H_{r2} = \xi_2 \frac{w_3^2}{2g}; \quad w_1 = 0; \quad w_3 = \frac{A_{fj}}{\Omega_1} V$$

代入上式, 得

$$p_1 - p_3 = -\frac{(1 + \xi_2) \gamma}{2g} \left( \frac{A_{fj}}{\Omega_1} \right)^2 V^2 \quad (7-7)$$

考虑到液体的实际损失, 同时修正理论公式与实验的差别, 分别引入主流液压阻力系数  $K_1$  代替  $1 + \xi_1$ , 支流液压阻力系数  $K_2$  代替  $1 + \xi_2$ , 于是上两式可写为

$$p_1 = \frac{K_1 \gamma}{2g} \frac{(A_0 - A_p)^2}{a_s^2} V^2 \quad (7-8)$$

和

$$p_1 - p_3 = -\frac{K_2 \gamma}{2g} \left( \frac{A_{fj}}{\Omega_1} \right)^2 V^2$$

将  $p_1$  的关系式代入, 可得内腔压力

$$p_3 = \frac{K_1 \gamma}{2g} \frac{(A_0 - A_p)^2}{a_s^2} V^2 - \frac{K_2 \gamma}{2g} \left( \frac{A_{fj}}{\Omega_1} \right)^2 V^2 \quad (7-9)$$

在反后坐装置计算中, 习惯采用混合单位制, 即压力  $p$ ——公斤力/厘米<sup>2</sup>; 面积  $A_0$  或  $a_s$ ——厘米<sup>2</sup>; 重度  $\gamma$ ——公斤/分米<sup>3</sup>; 速度  $V$  或  $w$ ——米/秒; 重力加速度  $g$ ——米/秒<sup>2</sup>; 液压阻力  $\phi_0$ ——公斤力。

采用混合单位制时, 压力公式应改写为

$$p_1 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_0 - A_p)^2}{a_s^2} V^2 \quad (7-10)$$

$$p_3 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_0 - A_p)^2}{a_s^2} V^2 - \frac{K_2 \gamma}{20g} \left( \frac{A_{fj}}{\Omega_1} \right)^2 V^2 \quad (7-11)$$

### 3. 液压阻力 $\phi_0$

杆后坐时, 驻退机的液压阻力, 就是作用于驻退杆上的液体压力的合力。

取驻退杆为自由体, 作用其上的液体压力, 如图 7-3 所示。其中,  $p_3$  作用的投影面

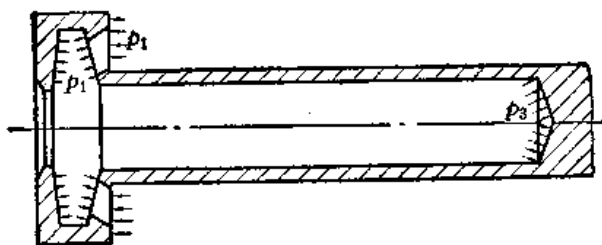


图7-3 驻退杆受力图

积为  $A_{fj}$ ;  $p_1$  除了作用于活塞工作面积  $A_0$  外, 还作用于活塞腔内, 将方向相反的 压力投影抵消掉,  $p_1$  的有效作用面积为  $A_0 + A_{fj} - A_{p0}$ 。求出各压力的合力, 即得

$$\phi_0 = p_1(A_0 + A_{fj} - A_{p0}) - p_3 A_{fj}$$

或  $\phi_0 = p_1(A_0 - A_p) + (p_1 - p_s)A_{ji}$  (7-12)

将  $p_1$  和  $p_1 - p_s$  代入式 (7-12), 得

$$\phi_0 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_0 - A_p)^3}{a_x^2} V^2 + \frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{A_{ji}^3}{\Omega_1^2} V^2$$

或

$$\phi_0 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \left[ \frac{(A_0 - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{ji}^3}{\Omega_1^2} \right] V^2 \quad (7-13)$$

(7-13) 式就是如图7-2所示典型的节制杆式驻退机的液压阻力方程。从上式可以看出, 液压阻力  $\phi_0$  是流液孔  $a_x$  及  $V^2$  的函数, 因此可把  $\phi_0$  表示为

$$\phi_0 = f(a_x) V^2$$

其中

$$f(a_x) = \frac{K_1 \gamma}{20g} \left[ \frac{(A_0 - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{ji}^3}{\Omega_1^2} \right] \quad (7-14)$$

称为结构函数。当驻退机结构尺寸确定后, 通过设计符合  $f(a_x)$  规律的流液孔面积  $a_x$ , 便可得到要求的  $\phi_0$  规律。因此,  $a_x - X$  规律的合理确定是驻退机设计的主要任务。

### 三、流液孔面积的计算

从式 (7-13) 中, 解出  $a_x$  得

$$a_x = \frac{(A_0 - A_p)^{3/2}}{\sqrt{\frac{20g}{K_1 \gamma} \frac{\phi_0}{V^2} - \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{ji}^3}{\Omega_1^2}}} \quad (7-15)$$

上式即为计算流液孔面积的公式。当驻退机结构确定后, 即  $A_0$ 、 $A_p$ 、 $A_{ji}$ 、 $\Omega_1$  等确定后。合理选定液压阻力系数  $K_1$  和  $K_2$ , 以  $X$  为自变量将  $\phi_0 - X$  (理想的液压阻力规律)

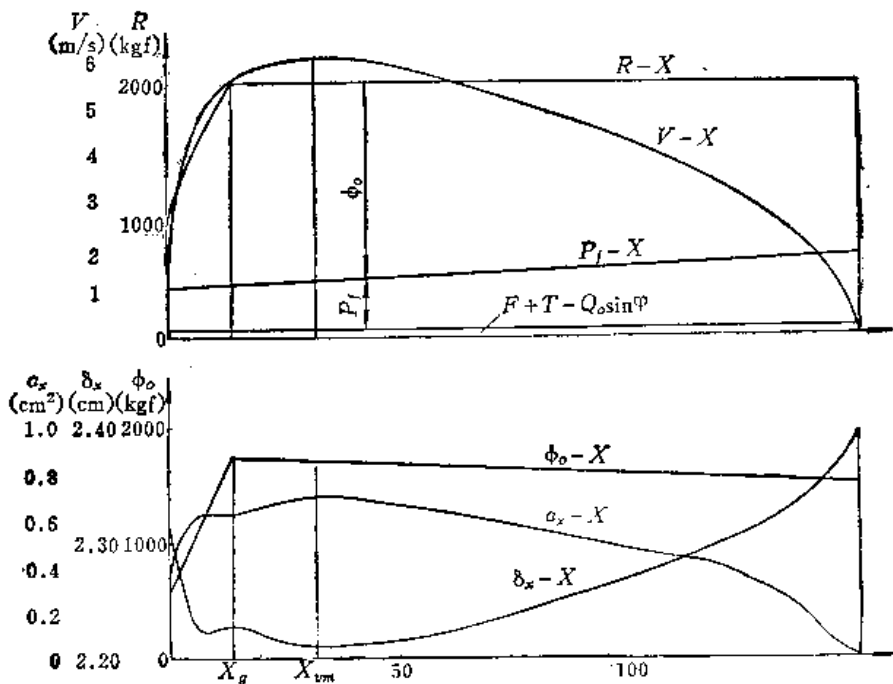


图7-4  $R-X$ ,  $\phi_0-X$ ,  $a_x-X$ ,  $\delta_x-X$  对应关系

和  $V-X$  代入 (7-15) 式, 即可解出流液孔面积  $a_x$  随  $X$  变化规律 ( $a_x-X$ ) (见图 7-4)。

式 (7-15) 中, 分母中的第二项较小, 在粗略计算时可以略去, 于是

$$a_x = \sqrt{-\frac{K_1 \gamma (A_o - A_p)^3}{20g}} \cdot \frac{V}{\sqrt{\phi_0}} \quad (7-16)$$

$a_x$  确定后, 按结构合理要求选定节制环直径  $d_p$ , 就可以计算节制杆理论外形了。即由

$$a_x = \frac{\pi}{4} (d_p^2 - \delta_x^2)$$

得

$$\delta_x = \sqrt{d_p^2 - \frac{4}{\pi} a_x} \quad (7-17)$$

节制杆理论外形  $\delta_x-X$ , 如图 7-4 所示。

#### 四、内腔 (复进节制器工作腔) 液体的充满条件

我们所建立的节制杆式驻退机液压阻力方程, 是在内腔始终充满液体的假设基础上得到的。在推导过程中, 利用此假设才求得支流的流速和主流的流量。另外, 内腔始终充满液体是节制杆式驻退机复进时保证全程制动的需要。可见, 在后坐过程中, 内腔保证充满液体是特别重要的。

所谓充满条件, 就是内腔不产生真空的条件, 即内腔的液体压力  $p_s > 0$ 。由 (7-11) 式, 得到

$$\frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_o - A_p)^2}{a_x^2} V^2 - \frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{A_{ji}^2}{\Omega_1^2} V^2 > 0$$

即

$$\frac{(A_o - A_p)^2}{a_x^2} - \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{ji}^2}{\Omega_1^2} > 0$$

从结构分析中可知, 影响内腔充满的关键尺寸是  $\Omega_1$ 。因为  $\Omega_1$  是支流最小截面积, 故, 当其他结构尺寸确定后, 必须有足够大的  $\Omega_1$ , 才能使不等式成立。解上述不等式, 得

$$\Omega_1 > \sqrt{\frac{K_2}{K_1} \frac{A_{ji}}{A_o - A_p} a_x} \quad (7-18)$$

将 (7-15) 式代入 (7-18) 式, 并化简得

$$\Omega_1 > \sqrt{\frac{K_2 \gamma}{20g} A_{ji}^2 (A_o + A_{ji} - A_p)} \frac{V}{\sqrt{\phi_0}} \quad (7-19)$$

式 (7-18) 或式 (7-19) 为内腔液体充满条件。

实际驻退机中, 支流最小截面积  $\Omega_1$ , 在结构上是一个固定面积, 但从式 (7-18) 和 (7-19) 中看,  $a_x$  与  $\frac{V}{\sqrt{\phi_0}}$  是后坐行程的函数。图 7-5 表示  $a_x-X$  和  $\frac{V}{\sqrt{\phi_0}}-X$  的曲线, 它们在  $X_{V_m}$  (最大速度  $V_m$  处) 时具有最大值。为了保证在整个后坐行程上内腔始终充满,



应使

$$\Omega_1 \geq \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \frac{A_{fj}}{A_0 - A_p} (a_x)_{\max} \quad (7-20)$$

或

$$\Omega_1 \geq \sqrt{\frac{K_2 \gamma}{20g}} A_{fj}^2 (A_0 + A_{fj} - A_p) \left( \frac{V}{\sqrt{\phi_0}} \right)_{\max} \quad (7-21)$$

确定  $\Omega_1$  时, 应满足不等式 (7-20) 或 (7-21), 在结构允许的情况下, 可适当增大  $\Omega_1$  以保证确实充满。但  $\Omega_1$  的增加往往受到结构尺寸的限制。在现有火炮的节制杆式驻退机中, 支流最小截面积  $\Omega_1$  出现的位置一般有两种情况。

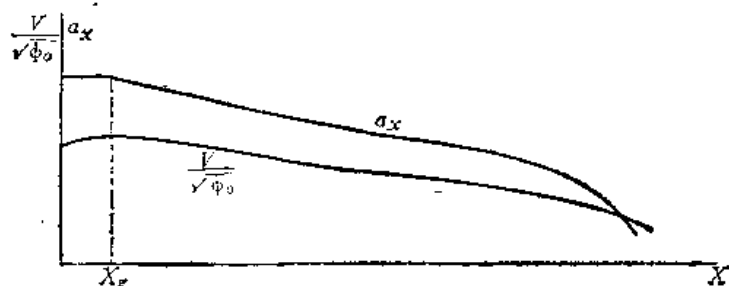


图7-5  $a_x-X$ ,  $\frac{V}{\sqrt{\phi_0}}-X$  曲线

第一种情况是节制环直径小于节制杆活塞直径 ( $d_p < d_1$ )。这时  $\Omega_1$  可能为下述三个面积之一 (见图 7-6)。

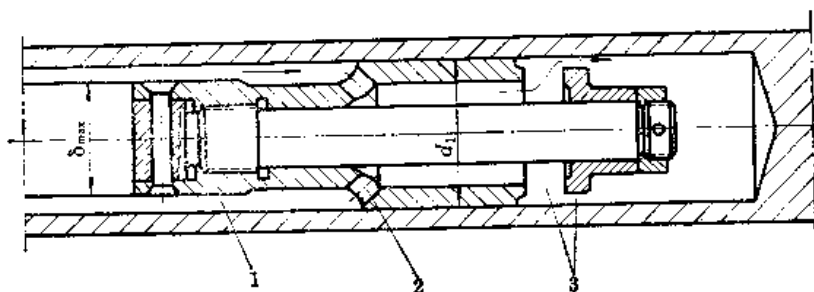


图7-6  $d_p < d_1$  的情况

(1) 节制杆最大截面与驻退杆内腔的环形间隙 (图中 1 的位置), 此时  $\Omega_1 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - \delta_{\max}^2)$ ;

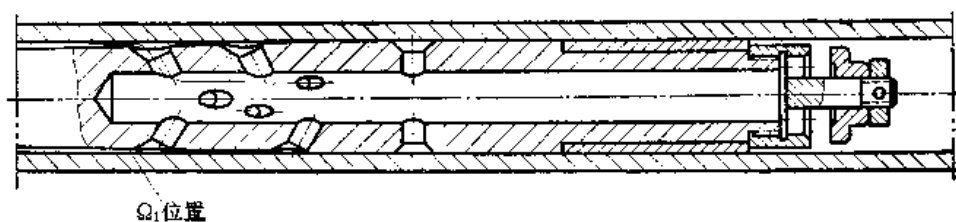
(2) 调速筒上的斜孔总面积 (图中 2 的位置);

(3) 调速活瓣打开的环形面积或活瓣与驻退杆内腔的环形面积 (图中 3 的位置)。

在设计时, 取三者最小面积为  $\Omega_1$ , 如果  $\Omega_1$  不满足式 (7-20) 或 (7-21), 应改变结构尺寸, 使  $\Omega_1$  增大到满足为止。

第二种情况是节制环直径大于或等于节制杆活塞直径 ( $d_p \geq d_1$ )。

由于第一种情况的结构 ( $d_p < d_1$ ) 不便于分解、结合, 故有些火炮的节制环直径  $d_p$  与节制杆最大直径  $\delta_{\max}$  取相同的名义尺寸。这样造成  $d_1$  与  $\delta_{\max}$  之间的环形间隙很小, 为了保证充满, 在节制杆直径较小的部位顺着液流方向钻几排斜孔, 如图 7-7 所示。此时  $\Omega_1$  的位置出现在第一排孔边缘处的环形截面 (当然第一排孔的面积大于该环形面积)。

图7-7  $d_p \geq d_1$  的情况

为了进一步说明影响充满条件的因素，下面分析  $\frac{p_3}{p_1}$  式的变化规律。

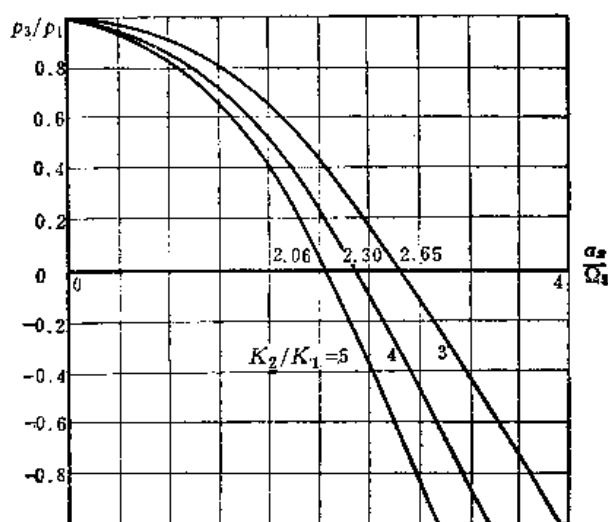
由

$$\frac{p_3}{p_1} = \frac{\frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_o - A_p)^2}{a_x^2} V^2 - \frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^2}{\Omega_1^2} V^2}{\frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_o - A_p)^2}{a_x^2} V^2}$$

化简为

$$\frac{p_3}{p_1} = 1 - \left( \frac{A_{fj}}{A_o - A_p} \right)^2 \frac{K_2}{K_1} \left( \frac{a_x}{\Omega_1} \right)^2 \quad (7-22)$$

上式中， $\frac{A_{fj}}{A_o - A_p}$  项对于一个确定的驻退机结构为常数。当  $\frac{K_2}{K_1}$  或  $\frac{a_x}{\Omega_1}$  改变时  $\frac{p_3}{p_1}$  的变化曲线如图 7-8 所示。

图7-8 56-85 J 的  $\frac{p_3}{p_1} - \frac{a_x}{\Omega_1}$  曲线

从图中可看出：

(1) 在  $\frac{K_2}{K_1}$  一定 (例如  $\frac{K_2}{K_1} = 4$ ) 时， $\frac{p_3}{p_1} - \frac{a_x}{\Omega_1}$  为一抛物线。改变  $\frac{a_x}{\Omega_1}$  比值，会出现以下几种情况：

当  $\frac{a_x}{\Omega_1} = 0$ ，即  $a_x = 0$  时， $\frac{p_3}{p_1} = 1$ ，即  $p_1 = p_3$ 。此时，由于主流液孔  $a_x$  关闭，

全部液体进入支流, 使内腔压力  $p_3$  达到最大值;

当  $\frac{a_x}{\Omega_1} < 2.30$ , 即  $\Omega_1 > \frac{a_x}{2.30}$  时,  $\frac{p_3}{p_1} > 0$  即  $p_3 > 0$ , 内腔充满;

当  $\frac{a_x}{\Omega_1} = 2.30$ , 即  $a_x = 2.30\Omega_1$  时,  $\frac{p_3}{p_1} = 0$  即  $p_3 = 0$ ;

当  $\frac{a_x}{\Omega_1} > 2.30$ , 即  $\Omega_1 < \frac{a_x}{2.30}$  时,  $\frac{p_3}{p_1} < 0$  即  $p_3 < 0$ , 内腔不充满。

上面分析说明在  $\frac{K_2}{K_1}$  一定时, 影响内腔充满的因素是面积比  $\frac{a_x}{\Omega_1}$ , 只有  $\Omega_1$  超过某一数值时, 充满条件才成立。

(2) 当  $\frac{K_2}{K_1}$  改变时, 随着  $\frac{K_2}{K_1}$  的增大, 即随着  $K_2$  的增大, 抛物线向左方移动, 它表示保证充满条件成立的  $\frac{a_x}{\Omega_1}$  值减小, 即  $\Omega_1$  值增大。例如,  $\frac{K_2}{K_1} = 5$  时,  $p_3 > 0$  的条件是  $\Omega_1 > \frac{a_x}{2.06}$ 。这是因为  $K_2$  的增大表示支流液流损失增大, 流入内腔困难, 为了保证充满, 必须加大  $\Omega_1$  才行。

对液压阻力系数  $K$  的测试和分析 (见第六节) 表明,  $K_1$  和  $K_2$  实际上并非常数, 它们都随行程  $X$  变化而变化, 而且, 在后坐开始阶段  $K_2$  一般都大于平均阻力系数。而按照充满条件式 (7-19) 计算  $\Omega_1$  时,  $K_2$  都用平均值代入, 这是造成后坐起始阶段内腔往往不充满的原因之一。为了保证后坐过程中内腔始终充满,  $K_2$  选得适当大些是必要的。

## 第二节 节制杆式驻退机结构尺寸的确定

确定节制杆式驻退机主要结构的尺寸, 应在设计理论节制杆外形  $\delta_x-X$  以前完成。在确定驻退机结构尺寸时, 应从各零件的工作条件、强度、结构合理性及火炮总体设计的要求出发全面地加以考虑。本节首先介绍确定节制杆式驻退机几个主要结构尺寸的一般方法。这些主要尺寸是: 驻退机工作长度  $L$ 、驻退筒直径  $D_T$ 、驻退杆外径  $d_T$ 、内腔直径  $d_1$ 、节制环直径  $d_p$  及节制杆外形尺寸等。然后介绍在结构设计中应注意的问题。

### 一、主要结构尺寸的确定

#### 1. 驻退机工作长度 $L$

从图 7-9 中可见,

$$L = \lambda_{\max} + l + 2e$$

式中  $\lambda_{\max}$ ——最大后坐长度;

$l$ ——驻退杆活塞长度, 一般  $l$  取为  $(0.5 \sim 0.7)D_T$ 。当  $D_T$  未知时, 可取  $l = (0.5 \sim 0.7)d$ ,  $d$  为火炮口径;

$e$ ——考虑到装配误差及极限射击条件而保留的余量, 一般  $e$  不小于 20~30 毫米。

#### 2. 活塞工作面积 $A_0$

$A_0$  是影响驻退机径向尺寸的主要参数。确定  $A_0$  的主要依据是驻退机工作腔最大压力  $p_{1\max}$  和驻退机液体温升。



(2) 由式 (7-26) 确定  $W_y$ , 再由式 (7-25) 求出  $A_o = -\frac{W_y}{\lambda_{\max} + 2e}$ , 然后由式 (7-23) 反算出  $p_{1\max} = \frac{\phi_{o\max}}{A_o}$ , 检验  $p_{1\max}$  紧塞能否实现, 如能实现则  $A_o$  成立, 否则增加  $W_y$  重复以上工作, 直到满意为止。

### 3. 驻退筒内径 $D_T$ 及驻退杆直径 $d_T$

$A_o$  确定后, 按公式  $A_o = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_T^2)$  同时确定出  $D_T$  和  $d_T$ 。为此先引进一个经验系数  $y$

$$y = \frac{D_T}{d_T}$$

统计现有火炮,  $y$  值约在 1.7~2.3 之间。当  $A_o$  一定时, 取较大的  $y$  值可得到较小的  $D_T$  和  $d_T$ , 驻退机结构紧凑, 但内腔工作面积  $A_{ij}$  也小, 会引起节制杆刚度不足; 若取较大的  $y$  值则相反。 $y$  值选定后则有

$$d_T = 2 \sqrt{\frac{A_o}{\pi(y^2 - 1)}} \quad (5-27)$$

$$D_T = y d_T = 2y \sqrt{\frac{A_o}{\pi(y^2 - 1)}} \quad (5-28)$$

指定若干个  $y$  值, 由上两式算出相应的  $d_T$  和  $D_T$ , 选择合适的一组, 并调正为标准直径及与标准紧塞元件一致的尺寸。确定  $d_T$  和  $D_T$  后, 应重新计算实际工作面积  $A_o$ 。

### 4. 驻退杆内腔直径 $d_1$

驻退杆内腔直径  $d_1$  根据驻退杆拉伸强度确定。

当驻退机为杆后坐时, 则

$$d_1 = \sqrt{d_T^2 - \frac{4}{\pi} \frac{(\phi_o + I)_{\max} + F_{sp}}{[\sigma]}} \quad (7-29)$$

式中  $I$  ——驻退杆的惯性力,  $I = -\frac{q_g}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} \approx \frac{q_g}{Q_o} P_{pi}$ , 其中  $q_g$  为驻退杆与活塞的重量;

$F_{sp}$  ——驻退杆紧塞装置摩擦力;

$[\sigma]$  ——驻退杆材料的许用应力, 安全系数可取 2.5~3.5。

驻退杆材料一般用 40Cr 或 35CrMoA, 其  $\sigma_s = 55 \sim 60$  公斤力/毫米<sup>2</sup>。

当驻退机为筒后坐时, 方法同前, 只是式 (7-29) 中  $I = 0$ 。

在进行强度校核时,  $(\phi_o + I)_{\max}$  可能出现在  $P_{pi\max}$  或  $\phi_{o\max}$  处, 应取其中最大者。

对于驻退杆壁较薄、复进时驻退杆内腔压力  $p_{3f\max}$  较高的火炮应当进行强度校核。按厚壁圆筒受内压的公式, 有

$$\frac{2}{3} \frac{2d_T^2 + (d_1 + 2h_m)^2}{d_T^2 - (d_1 + 2h_m)^2} p_{3f\max} \leq [\sigma]$$

式中  $p_{3f\max}$  ——复进时内腔最大压力,  $p_{3f\max} = \frac{\phi_{ff\max}}{A_{ij}}$ ;

$\phi_{ff\max}$ ——复进节制器最大液压阻力，在初步估算时可取：

$$\phi_{ff\max} \approx 0.9(P_{fn} - Q_0 f),$$

$P_{fn}$ ——后坐终了时的复进机力；

$Q_0 f$ ——后坐部分的摩擦力；

$h_m$ ——复进节制器沟槽最大深度；

$[\sigma]$ ——许用拉伸应力，可用  $[\sigma] = \frac{1}{3} \sigma_s$ 。

### 5. 节制环直径 $d_p$

$d_p$  的选择主要决定于驻退杆内腔结构，特别是驻退杆与节制杆调速筒的联结关系。

对于  $d_1 > d_p$  的结构，支流最小截面积  $\Omega_1$  可能出现在驻退杆内腔与节制杆最大直径的环形间隙处。为了确保在该处出现  $\Omega_1$ ， $d_1$  与  $d_p$  ( $\delta_{x\max}$  与  $d_p$  名义尺寸相同) 之间的间隙应足够大，一般取

$$d_p = d_1 - (4 \sim 6) \text{ 毫米}$$

对于  $d_1 \leq d_p$  的结构，一般取  $d_p = d_1$  (名义尺寸)。

### 6. 节制杆外形尺寸

由上一节可知， $\delta_x$  根据  $d_p$  和  $\alpha_x$  由式 (7-15) 计算得到。图 7-10 为计算的  $\alpha_x - X$  与  $\delta_x - X$  理论曲线。

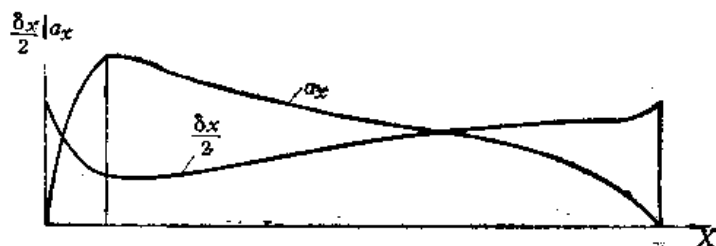


图7-10 流液孔面积及节制杆直径的理论曲线

由于节制杆长度与直径之比很大，必须校核其纵向稳定性。计算压杆稳定性的欧拉公式为

$$P_{lj} = K \frac{EI_{\min}}{l^2}$$

式中  $P_{lj}$ ——杆件纵向弯曲的临界载荷 (公斤)；

$l$ ——杆长度，节制杆长度可取  $l = \lambda_{js}$ ；

$E$ ——材料的弹性模数，钢的  $E = 2.1 \times 10^6$  公斤/厘米<sup>2</sup>；

$I_{\min}$ ——杆最小截面的惯性矩， $I_{\min} = \frac{\pi}{64} \delta_{\min}^4$ ；

$K$ ——与杆两端固定情况有关的系数，通常把节制杆视为一端固定，一端铰接，其  $K = 2\pi^2 = 19.72$ 。

节制杆承受最大载荷为复进节制器的最大液压阻力  $\phi_{ff\max}$ 。为了保证压杆稳定，校核时安全系数  $n$  应不低于 5，一般取

$$n = \frac{P_{lj}}{\phi_{ff\max}} = 5 \sim 10$$

如节制杆稳定性不足, 应修改  $d_T$  及  $d_1$  重新校核。

## 7. 驻退筒外径 $D_1$

$D_1$  由强度确定, 根据厚壁圆筒受内压  $p_{1\max}$  的公式

$$D_1 \approx D_T \sqrt{\frac{(\sigma) + \frac{2}{3} p_{1\max}}{(\sigma) - \frac{4}{3} p_{1\max}}}$$

驻退筒材料一般用 40Cr 或 35Cr,  $\sigma_r = 50 \sim 55$  公斤力/毫米<sup>2</sup>, 计算时可取  $(\sigma) = \frac{1}{3} \sigma_r$ 。为了保证必要的刚度, 驻退筒最薄处壁厚应不小于 5 毫米, 计算结果也应调整为标准系列。

此外, 驻退机与摇架, 后坐部分的连接件强度也应校核, 安全系数一般取 2 以上。

表 7-1 列出了一些火炮节制杆式驻退机的参量, 供设计时参考。

上面确定的结构尺寸, 仅仅是绘制结构草图的基础。

表 7-1 几种火炮驻退机的参量

火炮名称	$D_T$ (毫米)	$d_T$ (毫米)	$\gamma$	$A_0$ (厘米 <sup>2</sup> )	$d_1$ (毫米)	$d_p$ (毫米)	$\delta_{\min}$ (毫米)	$\lambda$ (毫米)	$\lambda_{fs}$ (毫米)	$p_{1\max}$ (公斤力/厘米 <sup>2</sup> )	$W_y$ (分米 <sup>3</sup> )
55-57 F	75	42	1.79	30.33	30	25.7	18.4	970~1060	1100	100	4.4
56-85 J	102	48	2.13	63.62	38	38.05	30.4	580~660	675	120	4.75
100 J	95	58	1.64	44.46	44	39.9	36.3	1000~1140	1180	170	6.80
59-100 T	125	50	2.50	94.2	44	38	30.8	490~550	570	350	6.40
54-122 L	110	50	2.19	75.4	40	40	24.3	960~1065	1100	100	10.0
60-122 J	125	65	1.92	89.52	52	43	32.5	790~930	950	220	14.7
59-130 J	170	98	1.73	151.55	80	60	60	775(短)/1250(长)	1350	240/120	28.7
66-152 JL	125	65	1.92	89.52	52	43	32.5	910	950		14.7
65-37 G	58	34	1.71	17.34	27	24	21.6	150~180	185	130	0.5
59-57 G	70	40	1.75	25.91	32	24.2	19	300~360	370	120	1.5

## 二、结构设计中应注意的问题

细致而具体地完善结构图时, 常常碰到一些经验性的尺寸和结构需要确定。

### 1. 关于液流通道

为了使理论计算和实际情况较好的符合, 液流通道表面应光滑, 相关的零件表面加工光洁度应达到  $\nabla 8 \sim \nabla 9$  或者更高; 凡通道变化 (如扩大、缩小或转弯) 的地方, 轮廓应尽量接近流线型; 应使主流所有通道截面均大于  $a_z$  (有的经验提出应大于  $3a_{z\max}$ ), 支流所有通道截面面积应大大超过  $\Omega_1$ ; 节制环应有一定的宽度, 一般取 5~10 毫米, 以保证  $a_z$  的准确值, 但也不宜过宽, 否则在节制杆截面变化时影响  $a_z$  的变化规律。

为了减少经驻退杆活塞间隙漏过的液体量, 一般将活塞套车出数条环形槽, 以增大液流的局部损失, 阻滞液体漏过。

### 2. 关于加工工艺

(1) 活塞的温度间隙: 驻退杆活塞和节制杆活塞与筒壁间有速度较高的相对运动, 为了减小摩擦和便于更换, 二活塞都采用锡青铜套。由于铜比钢的膨胀系数大, 为了防止液温升高后铜套与筒壁之间发生卡滞, 应在常温时留有温度间隙 (见图 7-11)。常温

的温度间隙  $\Delta_0$  用下式计算

$$\Delta_0 + \Delta D'_T > \Delta D_T$$

并认为  $D_T = D'_T$ , 有

$$\Delta_0 > \beta_r D_T \Delta T - \beta_g D_T \Delta T \quad (7-30)$$

式中  $\beta_r, \beta_g$ ——青铜与钢的线膨胀系数,  $\beta_r = 0.000017 \sim 0.000021, \beta_g = 0.000012$ ;

$D_T$ ——活塞直径;

$\Delta T$ ——温升 ( $^{\circ}\text{C}$ )。

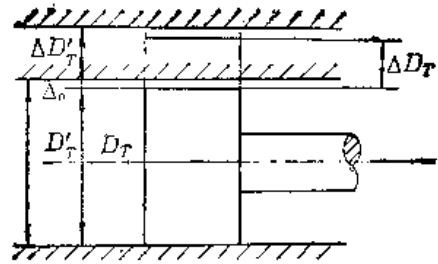


图7-11 活塞的温度间隙

一般驻退杆活塞  $\Delta_0 = 0.20 \sim 0.25$  毫米, 节制杆活塞  $\Delta_0 = 0.08 \sim 0.12$  毫米, 为了保证高温时活塞运动自由, 还应留出动配合间隙  $\delta$ 。因此, 活塞尺寸应为  $D - \Delta_0 + \delta$ , 或者  $(D - \Delta_0)_{+0}^0$ 。实际加工多采用选配法实现。

(2) 轴向装配误差:  $a_x$  的起始位置是影响流液孔变化规律的一个因素, 它是靠节制环和节制杆的装配位置确定的, 是通过一系列相关零件的长度尺寸公差保证的。如果定位基准选择不当, 尺寸链过长, 势必增大轴向装配误差。一般这一误差不应超过  $5 \sim 10$  毫米。为了减少轴向装配误差的影响, 65-37 G 采用驻退杆轴向位置可以调整的连接方式。在驻退机装配时按流液孔正确的起始位置在驻退杆上划好刻线, 并用专用的检查板对准 (见图 7-12)。这可大大减少装配尺寸链的环数, 使  $a_x$  的准确位置容易保证, 而轴向加工公差也要求不高。在勤务使用时, 还可以通过变化刻线的位置来调整后坐长度与后坐时间, 使左右两管连发射击时同步。

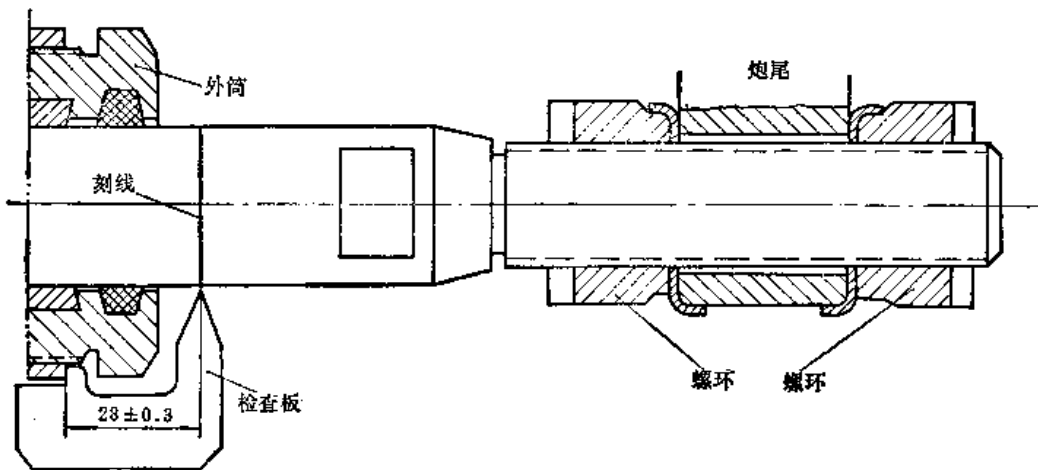


图7-12 65-37 G 驻退杆定位及与炮尾的连接

(3) 对加工的特殊要求: 由于驻退筒内表面及驻退杆内外表面工作条件较恶劣, 要求有良好的防腐性和耐磨性, 为此需作表面镀铬处理。

驻退机中液体压力很高, 因此, 驻退筒及紧塞装置应按高压容器的要求进行密封试验和强度试验。对驻退筒进行强度试验, 用比其最大工作压力大  $20 \sim 50\%$  的压力, 保持  $8 \sim 15$  分钟。驻退机装配好以后, 用略大于最大工作压力的压力, 保持  $8 \sim 15$  分钟进行密封性试验。

### 3. 关于勤务使用

驻退机设计应使部队操作、检查与维修简单方便。例如, 为了射前检查液量及换液



方便, 注液孔的位置应暴露和便于排气及放液; 为便于分解、结合和调换紧塞装置应易于装拆。

### 第三节 节制杆外形的初调整与后坐反面问题计算

由正面问题计算得到的流液孔  $a_x-X$  和节制杆  $\delta_x-X$  曲线是理论外形, 它不能实际用在驻退机上。从某种意义上讲, 正面问题得到的是尚须调整的节制杆的理论外形。

#### 一、节制杆外形初调整的必要性

节制杆的理论外形在实际应用时存在着以下两个问题:

1. 对火炮实际射击条件的适应性差。如前所述,  $\delta_x-X$  的理论外形是在正常射击条件 (常温、正装药、 $\varphi=0^\circ$ ) 下计算出来的, 因此, 当  $X \leq 0$  及  $X \geq \lambda$  时,  $a_x=0$  (因  $V=0$ )。实际射击时, 射击条件不同于正常情况, 若以高温、强装药和  $\varphi=\varphi_{\max}$  的条件射击, 则后坐长将比正常情况增加 10% 左右。如仍用理论外形的节制杆, 必然出现后坐终了时  $V>0$ ,  $a_x=0$ ,  $p_1$  将急剧增高的“液力闭锁”现象。此时, 驻退机和炮架受力陡增, 使稳定性破坏, 甚至使零件损坏。另外, 由于轴向加工误差的存在, 节制杆与节制环的相对位置在装配后会出现一定的位置偏差。这就是说, 对于理论外形的节制杆, 即使射击条件不变, 仍会出现当  $X=\lambda$  时,  $V>0$ ,  $a_x=0$  的“液力闭锁”现象。因此必须对理论节制杆外形的起始段和终了段进行调整, 使直径适当减小, 工作段长度适当延长。这样才能适应各种射击条件和轴向装配误差。

2. 理论外形加工工艺性差。理论计算的  $\delta_x-X$  曲线在弹丸出炮口点附近变化很大, 不便于加工。一般在不影响驻退机性能的情况下, 将理论外形调整为几个锥度。

为了区别以后对节制杆的再调整, 将为克服“液力闭锁”和改善加工工艺性而对理论外形进行的调整称为初调整。

#### 二、节制杆外形初调整的方法

下面以一种经验的调整方法为例介绍调整的一般原则。

1. 起始段的调整原则是将  $a_x$  增大, 并向外延伸  $\Delta l$ 。

理论计算与实践都说明, 起始段的  $a_x$  增大一些对整个后坐运动影响不大。原因很明显, 在弹丸沿膛内运动时期,  $P_{pr} \gg R$ , 后坐阻力  $R$  在此时期不是主要的, 改变  $R$  对整个后坐运动影响很小。同时大多数加农炮驻退机内有保留空间, 在保留空间消失前驻退机不提供液压阻力, 起始段的  $a_x$  向增大的方向调整就更无关系了。

节制杆起始段的调整应使外形尽量简单。一般按  $\delta_{x_{\min}}$  (即  $a_{x_{\max}}$  处) 将起始段调整为圆柱形 (见图 7-13) 或圆锥形。 $\Delta l$  应考虑轴向装配误差, 一般  $\Delta l=10$  毫米。

确定节制杆根部直径  $\delta_{x_0}$ , 应避免节制杆根部与节制环卡滞, 一般  $\delta_{x_0} \leq d_p - 2$  毫米。对于起始段为圆柱形者, 应注意圆柱段与根部联结圆角应大些。对于起始段为圆锥段形者, 只要联结  $\delta_{x_{\min}}$  点和  $\delta_{x_0}$  点即可, 这种情况的节制杆根部强度要比圆柱形的好些。

2. 终了段的调整原则是增大  $a_x$  并延伸到极限后坐长  $\lambda_{jx}$ 。在调整终了段时, 应综合考虑各种射击条件的变化, 确定极限后坐长  $\lambda_{jx}$ , 并保证在  $X=\lambda_{jx}$  时,  $a_x>0$ 。一般

$$\lambda_{jx} = (1.08 \sim 1.20) \lambda$$

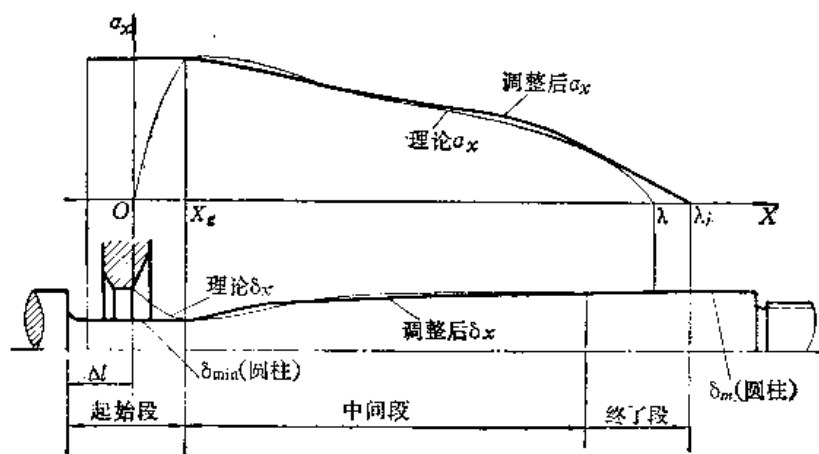


图7-13 节制杆外形的初调整

具体方法是从正常后坐长 $\lambda$ 的最后5%左右作节制杆外形的切线，并延长至 $\lambda_{jx}$ 。使 $\delta_{x\max}$ 的名义尺寸与 $d_p$ 相同，上下偏差均为负，或者在名义尺寸上使 $\delta_{x\max} < d_p$ 。以保证 $a_x > 0$ 。

3. 中间段的调整原则是使外形工艺性良好，并尽量接近理论外形。一般将此段调整为若干个锥度。为加工和测量方便，折点与定位基准的距离应取整数，折点处节制杆直径的尾数应按 $\frac{1}{10}$ 毫米选取。

应该指出，节制杆外形初调整是件细致的工作。一般将 $\delta_x-X$ 理论外形在径向上放大若干倍以求调整更准确些。节制杆初调整完毕后，可以画出零件图。

判断节制杆外形初调整合理与否的标准是射击实践。即火炮试验得到的后坐长 $\lambda$ 、后坐速度 $V$ 和后坐阻力规律是否满足设计要求。但是，为减少实践的盲目性，需要对调整后的驻退机后坐阻力和后坐运动诸元先进行一次计算。特别是目前电子计算机在各个领域得到广泛应用，利用电子计算机作一次计算远比作一次试验省时省力。因此这种计算作为试验手段的一个补充是十分必要的。这种计算是已知初调整后的流液孔 $a_x-X$ ，反过来解出 $R-X$ 。由于已知和求解条件与正面问题刚好相反，所以称为“后坐反面问题”计算。

经计算或试验得到的后坐长 $\lambda$ 和 $R-X$ 及运动规律，若仍然不满足设计要求，则对节制杆再进行调整，称为再调整。一个好的驻退机设计，应该经过初调整、再调整等多次调整才能完成。关于再调整将在以后介绍。

### 三、后坐反面问题计算特点和时机

截止到此，以前几章讨论的问题，归结起来是已知 $R-X$ 变化规律后，如何设计流液孔 $a_x$ ，这属于正面问题。在正面问题计算中，由于驻退机结构还是未知的，故其中的许多参数，如紧塞装置摩擦力 $F$ 、后坐部份重量 $Q$ 等都是估算的。又由于尚未进行试验，液压阻力系数 $K$ 也只能参考同类型结构驻退机初步选取。这就决定了后坐正面问题的设计计算结果必然存在着较大的近似性。所以，在驻退机设计后，有必要进行反面问题计算。由于计算时机不同，已知条件与所要计算的参数也不同，因此后坐反面问题有各种

不同情况。节制杆外形初调整后的反面问题计算是其中之一。与正面问题的比较见表7-2。

表7-2 正面问题与反面问题计算特点比较

	驻退机后坐正面问题		节制杆外形初调整后的反面问题
计算情况	正常射击条件 ( $\varphi = \psi$ 或 $\varphi = 0^\circ$ 、常温、正装药)		同 左
已知条件	后坐制动图，正面问题计算的后坐运动诸元		驻退机实际尺寸及初调整后的流液孔
求 解	驻退机流液孔		实际的后坐阻力及后坐运动参数
计算时采	$Q_0, F$	估 算	按结构计算
用的数据	$K$	参考同类型结构选取	同 左

除此以外，反面问题计算的其他时机包括检验各种极限工作条件下火炮的性能，为火炮的大型试验作准备，同时也为炮架的强度、刚度校核提供受力的数据。另外，如实际需要使火炮正常射击条件（装药量  $\omega$ 、弹重  $q$ 、射角  $\varphi$ 、驻退液重度  $\gamma$  等）中的一个发生变化，也都要进行反面问题计算。

总之，反面问题计算，作为对火炮受力和运动规律的预测手段，被广泛应用着。

#### 四、后坐反面问题的解法

应用计算机解后坐反面问题将在第十六章中介绍，这里只研究解后坐反面问题的两种常用的计算方法——逐次近似法和假设函数法。

后坐反面问题的数学描述是解微分方程

$$\frac{Q_0}{g} \frac{dV}{dt} = P_{pr} - R$$

初始条件为，当  $t = 0$  时， $X = 0$ ， $V = 0$ ， $P_{pr} = 0$ ， $R = R_0$ ，

其中

$$R = \phi_0 + P_f + F + T - Q_0 \sin \varphi$$

并有

$$\phi_0 = f(a_x) V^2$$

$$P_f = P_{f0} \left( 1 - \frac{X}{S} \right)^n \quad (\text{液体气压式})$$

$$P_f = P_{f0} + cX \quad (\text{弹簧式})$$

$$T - Q_0 \sin \varphi = Q_0 (f \cos \varphi - \sin \varphi)$$

式中  $F$  包括驻退机和复进机两部份紧塞装置摩擦力，一般可分为两部份：一部份是与压力有关的（如皮碗），记为  $F_B$ ；另一部份是与压力无关的（如紧塞垫），记为  $F_C$ 。因此

$$F = F_B + F_C = v_x \phi_0 + v_f P_f + F_C$$

若用  $N_c$  表示各常数项之和，有

$$N_c = F_C + Q_0 (f \cos \varphi - \sin \varphi)$$

代入后坐阻力方程，有

$$R = (1 + v_z) f(a_x) V^2 + (1 + v_t) P_{fo} \left(1 - \frac{X}{S}\right)^{-n} + N_c \quad (7-31)$$

于是,

$$\frac{Q_o}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pt} - (1 + v_z) f(a_x) V^2 - (1 + v_t) P_{fo} \left(1 - \frac{X}{S}\right)^{-n} - N_c \quad (7-32)$$

解后坐反面问题就是解上面的二阶微分方程。由于  $P_{pt}(t)$  是以表格函数给出的,  $f(a_x)$  是  $X$  的函数, 它们都不是对  $t$  的解析函数, 不能用分离变量法直接积分求解, 故式 (7-32) 无解析解, 只能用数值法求解。

由运动微分方程

$$\frac{Q_o}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pt} - R$$

得

$$dV = -\frac{g}{Q_o} (P_{pt} - R) dt$$

设在微小的时间间隔  $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$  内,  $R$  的变化规律已知, 对微分方程积分, 得

$$V_n = V_{n-1} + \frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} P_{pt} dt - \frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} R dt$$

再积分, 得

$$X_n = X_{n-1} + V_{n-1}(t_n - t_{n-1}) + \frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \int_{t_{n-1}}^t P_{pt} dt - \frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \int_{t_{n-1}}^t R dt$$

由自由后坐的概念可知

$$\begin{cases} \frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} P_{pt} dt = W_n - W_{n-1} \\ -\frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \int_{t_{n-1}}^t P_{pt} dt = L_n - L_{n-1} - W_{n-1}(t_n - t_{n-1}) \end{cases} \quad (7-33)$$

将式 (7-33) 代入上面两式, 得

$$V_n = W_n - (W_n - V_{n-1}) - \frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} R dt \quad (7-34)$$

$$X_n = L_n - (L_{n-1} - X_{n-1}) - (W_{n-1} - V_{n-1})(t_n - t_{n-1}) - \frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \int_{t_{n-1}}^t R dt \quad (7-35)$$

如果对  $R$  的两个积分可积, 当已知前一点的  $t_{n-1}$ 、 $X_{n-1}$ 、 $L_{n-1}$ 、 $V_{n-1}$ 、 $W_{n-1}$  时, 由上述两式可计算出下一点的  $V_n$  和  $X_n$ 。

### 1. 逐次近似法

该方法认为在  $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$  取得很小时,  $R$  在此间隔内可以认为是常数, 可用矩形代替曲边梯形 (见图 7-14)。两个积分如下:

$$\frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} R dt = \frac{g}{Q_o} R \Delta t_n \quad (7-36)$$

$$\frac{g}{Q_o} \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \int_{t_{n-1}}^t R dt = \frac{g}{2Q_o} R \Delta t_n^2 \quad (7-37)$$

将式 (7-36) 和 (7-37) 代入 (7-34) 和 (7-35) 式得

$$V_n = W_n - (W_{n-1} - V_{n-1}) - \frac{g}{Q_o} R \Delta t_n \quad (7-38)$$

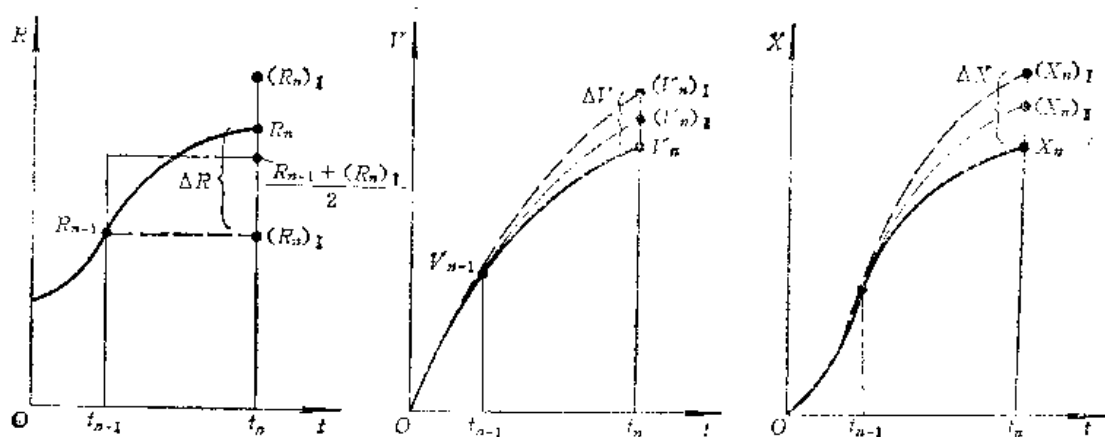


图7-14 逐次近似法图示

$$X_n = L_n - (L_{n-1} - X_{n-1}) - (W_{n-1} - V_{n-1})(t_n - t_{n-1}) - \frac{g}{2Q_0} R \Delta t_n^2 \quad (7-39)$$

逐次近似法的具体作法如下:

第一次近似: 取  $(R_n)_1 = R_{n-1}$ , 而

$$R_{n-1} = (1 + v_z) f(a_{x_{n-1}}) V_{n-1}^2 + (1 + v_f) P_{fo} \left(1 - \frac{X_{n-1}}{S}\right)^n + N_c \quad (7-40)$$

将所得之  $R_{n-1}$  代入式 (7-38) 和 (7-39), 即得到  $t_n$  时刻运动诸元  $(V_n)_1$  和  $(X_n)_1$ 。计算表明, 这种近似必然带来较大的误差, 不能满足计算精度要求, 为此需要进行第二次近似。

第二次近似: 将第一次近似所得的结果  $(V_n)_1$  和  $(X_n)_1$  代入式 (7-31) 得

$$(R_n)_1 = (1 + v_z) f(a_{x_n}) V_n^2 + (1 + v_f) P_{fo} \left(1 - \frac{X_n}{S}\right)^n + N_c \quad (7-41)$$

由于  $(V_n)_1 > V_n$ , 由上式得到的  $(R_n)_1 > R_n$ , 故第二次近似时取

$$R = \frac{R_{n-1} + (R_n)_1}{2}$$

将  $R$  代入式 (7-38) 和 (7-39), 得到第二次近似值  $(V_n)_1$ ,  $(X_n)_1$ 。计算表明它们十分接近实际值。可以证明, 经  $n$  次接近, 近似值收敛于实际值。对于反面问题计算, 第二次近似所得的结果已满足工程计算的需要。

如果  $t_{n-1}$  点是起始点, 由初始条件:  $t = 0$  时,  $X = 0$ ,  $V = 0$ ,  $R_0 = (1 + v_f) P_{fo} + N_c$ , 只要给定时间间隔, 就可逐点计算直到  $t_n = t_h$  为止。

## 2. 假设函数法

该方法假定在  $\Delta t_n = t_n - t_{n-1}$  间隔内, 阻力  $R$  按线性规律变化, 即

$$R = R_{n-1} + \frac{R_n - R_{n-1}}{t_n - t_{n-1}} (t - t_{n-1})$$

由图 7-15 可看出, 用梯形代替曲边梯形, 作积分

$$\begin{aligned} -\frac{g}{Q_0} \int_{t_{n-1}}^{t_n} R dt &= \frac{g}{2Q_0} (R_n + R_{n-1}) \Delta t_n \\ -\frac{g}{Q_0} \int_{t_{n-1}}^{t_n} dt \int_{t_{n-1}}^t R dt &= \frac{g}{6Q_0} (R_n + 2R_{n-1}) \Delta t_n^2 \end{aligned}$$

代入式 (7-34) 和 (7-35) 得

$$V_n = W_n - (W_{n-1} - V_{n-1}) - \frac{g}{2Q_0} (R_n + R_{n-1}) \Delta t_n \quad (7-42)$$

$$X_n = L_n - (L_{n-1} - X_{n-1}) - (W_{n-1} - V_{n-1})(t_n - t_{n-1}) - \frac{g}{6Q_0} (R_n + 2R_{n-1}) \Delta t_n^2 \quad (7-43)$$

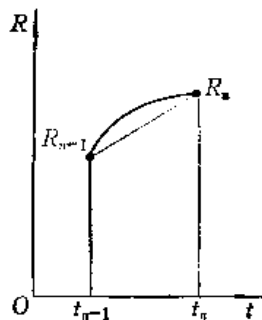


图7-15 假设函数法图示

第一次近似: 取  $(R_n)_1 = R_{n-1}$  代入式 (7-42) 和 (7-43) 解出第一次近似结果  $(V_n)_1$  和  $(X_n)_1$ 。

第二次近似: 将  $(V_n)_1$  和  $(X_n)_1$  代入 (7-40) 式求得  $(R_n)_2$ , 再代入 (7-42) 和 (7-43) 式, 得到第二次近似结果  $(V_n)_2$  和  $(X_n)_2$ , 即为所求。

由于假设函数法较逐次近似法收敛速度快, 精度高, 故时间步长可以取得大些。

上述两种方法计算到  $V_n$  为负值时, 可利用插值方法得到  $V_n = 0$  时的  $t_n$  和  $X_n$ 。

### 3. 反面问题计算的步骤

(1) 确定时间间隔  $\Delta t_n$ 。并按此时间间隔作出  $W-t$ 、 $L-t$ 、 $P_f-X$  和  $f(a_x)-X$  曲线;

(2) 计算起始诸元,  $t=0$  时,  $X=0$ ,  $V=0$ ,  $R_0 = (1 + v_f)P_{f0} + N_G$ ;

(3) 列表逐点计算 (以逐次近似法为例, 见表 7-3);

(4) 绘出  $R-X$  和  $V-X$  曲线。

逐次近似法和假设函数法的计算精度主要取决于选定的时间间隔  $\Delta t_n$ 。(当然在同一  $\Delta t_n$  时, 假设函数法比逐次近似法精度高)。由于弹丸沿膛内运动时期后坐诸元变化较快,  $\Delta t_n$  应取得小些; 而惯性时期变化平缓,  $\Delta t_n$  可以取得较大。此外,  $\Delta t_n$  的选取应根据不同火炮的后坐运动特点 (后坐长度的大小和自动机是否参加工作等) 灵活确定。一般, 弹丸沿膛内运动时期  $\Delta t_n = 0.001 \sim 0.003$  秒; 后效期取  $\Delta t_n = (0.5 \sim 1)b$ ; 惯性时期取  $\Delta t_n = 0.005 \sim 0.02$  秒。在接近后坐终了时, 因驻退机液体压力变化较大,  $\Delta t_n$  可适当取小。

逐次近似法和假设函数法有明显的缺点: 计算工作量大, 要逐点计算, 不能超越, 前一点计算的差错直接影响其后的所有计算结果。因此, 计算时必须认真, 细致, 起始数据和常数要准确, 计算过程中要随时检查, 以免返工。这种手算的方法, 正逐渐被定长的龙格-库塔方法代替, 后者在电子计算机上计算反面问题不仅准确, 而且迅速可靠, 给多方案对比带来很大便利。

表7-3 后坐反面问题计算表 (逐次近似法)

(1)	$t_n$	$t_0 = 0$	$t_1$	$t_2$
(2)	$\Delta t_n$			
(3)	$W_n$	0		
(4)	$W_{n-1} - V_{n-1}$	0		
			第一次近似	第二次近似
(5)	$R = R_{n-1}$	—	$(R_n)_1 = R_{n-1}$	$R = \frac{R_{n-1} + (R_n)_1}{2}$
(6)	$-\frac{g}{Q_0} \Delta t_n R$			
(7)	$V_n = (3) - (4) - (6)$	0		
(8)	$L_n$	0		
(9)	$L_{n-1} - X_{n-1}$	0		
(10)	$(W_{n-1} - V_{n-1}) \Delta t_n$	0		
(11)	$-\frac{g}{2Q_0} \Delta t_n^2 R$	—		
(12)	$X_n = (8) - (9) - (10) - (11)$	0		
(13)	$f(a_{xn})$	—		
(14)	$P_{fn}$	$P_{fo}$		
(15)	$(1 + v_x) f(a_{xn}) V_n^2$	—		
(16)	$(1 + v_f) P_{fn}$	$(1 + v_f) P_{fo}$		
(17)	$R_n = (15) + (16) + N_c$	$R_o$	$(R_n)_1$	

常数计算:

$$\frac{g}{Q_0} \Delta t_n =$$

$$(1 + v_B) =$$

$$\frac{g}{2Q_0} \Delta t_n^2 =$$

$$(1 + v_f) =$$

$$N_C =$$

$$R_o = (1 + v_f) P_{fo} + N_C =$$

#### 第四节 反后坐装置的实验分析

客观实践是鉴别理论正确性的唯一尺度。在正确理论指导下的科学实验是客观实践的一个重要方面; 正确的实验结果是对理论进行修正的依据, 也是理论发展的基础。因此反后坐装置单项实验和火炮在各种极限射击条件下的射击试验, 是反后坐装置设计的一个非常重要的阶段。

##### 一、实验研究在反后坐装置设计中的地位

第三章曾经介绍过驻退机液体实际流动状态是十分复杂的, 精确求解流动参数的分布目前还不可能。从这种意义上讲, 建立在一维不可压缩的定常流动理想基础上的反后坐装置设计理论, 虽然还很不完善, 但是作为一种工程上行之有效的设计方法, 目前还被广泛应用着。因此, 摆在我们面前的任务, 一是寻觅较为完善的设计理论, 二是通过

实验修正理论的不足以便正确指导设计。

目前, 根据某些假设建立起来的计算公式仅能反映几个主要参数的变化规律 (例如  $p_1 \propto \frac{V^2}{a_x^2}$ ), 对另外一些参数的变化规律不能正确反映 (例如液体的流动损失)。虽然在公式中引入液压阻力系数进行修正, 但由于  $K$  包含的影响因素较多, 目前还缺乏对它规律性的了解。尤其是当实际情况与假设条件相差较多时,  $K$  值作为一个常数就很难选取。因此必须通过实验手段对正面设计的参数进行检验。

反后坐装置实验的任务是:

- (1) 检验反后坐装置设计及液流孔调整的合理性;
- (2) 检验火炮在各种极限条件下的后坐阻力和后坐运动规律的合理性, 为炮架和自动机设计提供数据;
- (3) 测定各种液温时的液压阻力系数  $K_1$ 、 $K_2$ , 作为进一步调整液孔及反面问题计算的依据。

反后坐装置实验的主要内容是测量  $V$ 、 $X$ 、 $p_t$ 、 $p_1$ 、 $p_3$  等对时间的变化曲线。经过数据处理可得到  $V-X$ 、 $t-X$ 、 $p_t-X$ 、 $p_1-X$  和  $p_3-X$  等曲线, 进而计算出  $\phi_0-X$  与  $R-X$  曲线。有了不同射击条件下的上述曲线, 就可以分析研究反后坐装置设计存在的问题。

## 二、影响火炮后坐运动的主要因素

后坐正面问题计算是在正常射击条件下进行的。所谓正常射击条件, 一般是指: 正装药、常温 ( $+15^\circ\text{C}$ )、射角  $\varphi = \varphi_i$  (或  $0^\circ$ )。此外, 重量与尺寸按公称值计算。实际射击时, 条件是复杂多变的, 如气温、装药量、射角、驻退液温度、弹重以及结构尺寸的偏差等都会对后坐运动产生不同的影响。在这些影响因素中, 装药量、温度与射角是三个主要因素。由方程

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = p_{pr} - \frac{K_1 \gamma}{20g} \left[ \frac{(A_0 - A_t)^3}{a_x^2} + \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{t1}^3}{Q_1^2} \right] V^2 - p_{f0} \left( 1 - \frac{X}{S} \right)^n - F - Q_0 f \cos \varphi + Q_0 \sin \varphi$$

进行分析:

(1) 装药量的影响。在其他条件不变的情况下, 装药量的多少决定了  $P_{pr}$  的大小, 而  $P_{pr}$  对后坐运动的影响是直接的, 因为它是后坐运动的主动力和后坐能量的来源。因此, 最大后坐阻力  $R_{\max}$  与最大后坐长度  $\lambda_{\max}$  必然出现在用最大装药量 (强装药) 射击时, 而最小后坐阻力  $R_{\min}$  与最小后坐长度  $\lambda_{\min}$  必然出现在最小装药量 (减装药) 时。

(2) 温度影响。温度的变化主要影响液压阻力系数  $K$ 、驻退液重度  $\gamma$  及液体气压式复进机初压  $p_{f0}$ , 而  $K$  与  $\gamma$  的综合影响反映了温度对  $\phi_0$  的影响。

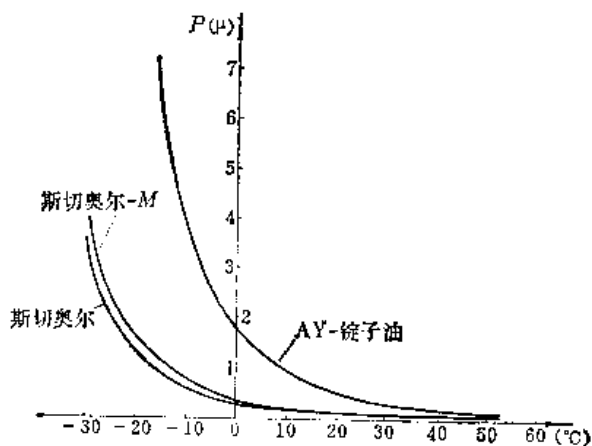


图7-16 几种驻退液粘度随温度的变化



温度升高时,液体重度与粘性下降。根据实测,斯切奥尔-M液温度升高  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $\gamma$  减小约 0.7%, 粘度随温度的变化如图 7-16 所示。粘度减小时,  $K$  也减小。因此  $K\gamma$  值反映了温度对  $\phi_0$  的影响程度。如 59-57G,  $-40^{\circ}\text{C}$  时,  $K_1\gamma=2.1$ ,  $+15^{\circ}\text{C}$  时,  $K_1\gamma=1.41$ ,  $+100^{\circ}\text{C}$  时,  $K_1\gamma=1.25$ 。

温度对液体气压式复进机初压  $p_{f0}$  的影响也很显著。当复进机温度升高时,气体起始状态可视为等容过程,所以  $100^{\circ}\text{C}$  时的初压与  $15^{\circ}\text{C}$  时的初压之比为:

$$\frac{(p_{f0})_{t=100^{\circ}\text{C}}}{(p_{f0})_{t=15^{\circ}\text{C}}} = \frac{(T)_{t=100^{\circ}\text{C}}}{(T)_{t=15^{\circ}\text{C}}} = \frac{273+100}{273+15} = 1.30$$

即温度从  $15^{\circ}\text{C}$  升高到  $100^{\circ}\text{C}$  时,初压  $p_{f0}$  增大 30%。同样计算可得当温度从  $15^{\circ}\text{C}$  降至  $-40^{\circ}\text{C}$  时,初压减少 20%。随着  $p_{f0}$  的升高,在后坐时,整个  $p_f-X$  曲线也相应提高。

图 7-17 是 55-57 F 驻退液温度升高时实测的  $\phi_0-X$  曲线。

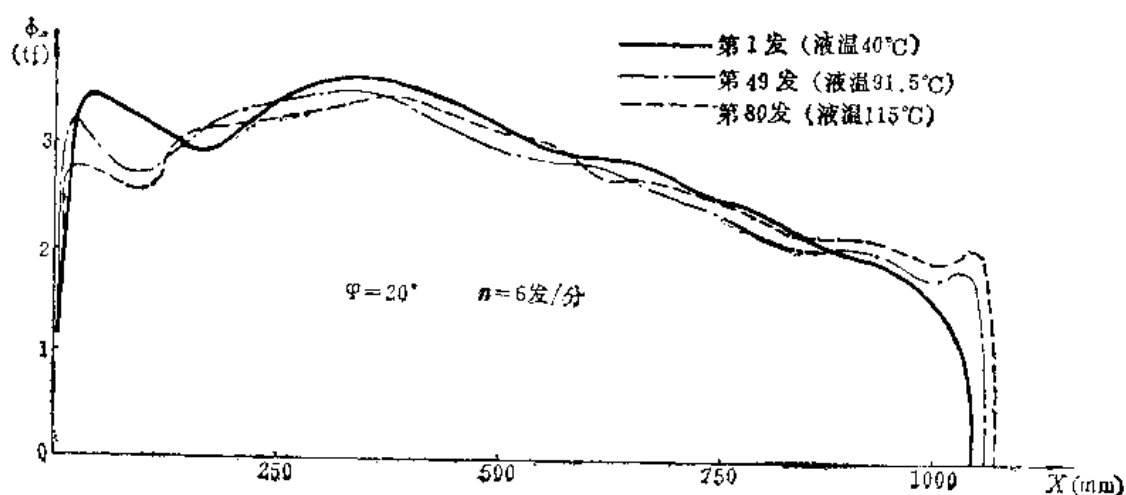


图 7-17 55-57 F 驻退液温度升高时的  $\phi_0-X$  曲线

从曲线可以看出,温度升高时,  $\phi_0$  在后坐前期降低,在后坐末期升高,相应的后坐速度与后坐长度有所增大。这一现象可以用液压阻力方程与后坐运动方便来说明。当温度升高时,  $K\gamma$  减小,引起  $\phi_0$  成比例的下降,这是影响后坐运动的第一个因素。但是,随着  $\phi_0$  下降,后坐阻力也相应减小,于是后坐速度  $V$  将增大(从运动方程可知),  $V$  的增大又使  $\phi_0$  升高(从液压阻力方程可知),这是影响后坐运动的第二因素。两个因素互相影响,共同作用的结果决定了  $\phi_0$  的变化规律。即后坐前期,由于  $P_{pr} \gg R$ , 后坐速度  $V$  主要由  $P_{pr}$  决定,  $R$  的减小对  $V$  影响很小(第二因素不起作用),故这一阶段  $\phi_0$  一直降低,  $V$  升高得较少;在后坐终了阶段,由于  $P_{pr} = 0$ , 后坐速度完全由  $R$  决定,所以  $\phi_0$  的减小使  $V$  增加比较明显(第二因素起主要作用),而达到某一点后,  $V$  增大便使  $\phi_0$  超过原来值;在后坐过程中,由于  $R$  主要是减小的趋势,当后坐速度增大以后,为了消耗更多的后坐动能,只有增加后坐行程,才能保证更大的做功面积,所以  $\lambda$  也相应增大。

从图 7-17 还可看出,在火炮连续发射使驻退液温度达到  $100^{\circ}\text{C}$  以上时,后坐运动规律的变化并不十分明显,而影响最大的是后坐长度的增大。

复进机温升对后坐运动的影响。 $P_f-X$ 变化规律只与复进机初压  $p_{f0}$ 、初容积  $W_0$  等有关而与后坐速度无关。当复进机液体温度升高, 气体初压  $p_{f0}$  增大, 因此使  $R$  增大,  $\lambda$  减小。应该指出, 在连续射击时, 复进机温升虽然低于驻退机, 但由于同样存在着液流损失 (特别是带有复进节制活瓣时), 温升也是不小的。例如, 56-85 J 在 60 发急促射后, 驻退液温度从  $32^\circ\text{C}$  升高至  $103^\circ\text{C}$ , 而复进机则从  $32^\circ\text{C}$  升高至  $60^\circ\text{C}$  (初压  $p_{f0}$  从  $48.5$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 升高至  $53$  公斤力/厘米<sup>2</sup>)。将驻退机保持常温, 在复进机液量相同的情况下, 当初压从  $p_{f0} = 48$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 增加到  $53$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 时, 后坐长度由  $\lambda = 635$  毫米减小为  $615$  毫米。这说明由于温度引起复进机压力变化对火炮后坐运动的影响是很大的。这一影响与驻退机温升对后坐运动的影响刚好相反, 前者使  $R$  增大,  $\lambda$  减小; 后者使  $R$  减小,  $\lambda$  增大。在连续射击时, 复进机温升的影响缓解了由于驻退机温升引起后坐长增加过快的趋势, 因此, 对火炮速射性是有利的。

(3) 射角的影响。射角变化对后坐运动的影响可以直接从后坐阻力方程看出, 在

$$R = \phi_0 + P_f + F + Q_0 f \cos \varphi - Q_0 \sin \varphi$$

中, 仅最后两项与  $\varphi$  有直接关系, 而且  $Q_0 \sin \varphi$  影响最大。当  $\varphi = \varphi_{\max}$  时, 有

$$(R)_{\varphi_{\max}} = \phi_0 + P_f + F + Q_0 f \cos \varphi_{\max} - Q_0 \sin \varphi_{\max}$$

当  $\varphi = \varphi_{\min}$  时

$$(R)_{\varphi_{\min}} = \phi_0 + P_f + F + Q_0 f \cos \varphi_{\min} - Q_0 \sin \varphi_{\min}$$

当射角从最小射角改变到最大射角时, 后坐阻力相差  $\Delta R$  (不考虑由于  $R$  的不同带来的对  $\phi_0$  的影响):

$$\begin{aligned} \Delta R &= (R)_{\varphi_{\min}} - (R)_{\varphi_{\max}} \\ &= Q_0 (\sin \varphi_{\max} - \sin \varphi_{\min}) + f Q_0 (\cos \varphi_{\min} - \cos \varphi_{\max}) \end{aligned} \quad (7-44)$$

例如:  $\varphi_{\max} = 87^\circ$ ,  $\varphi_{\min} = 0^\circ$ ,  $f = 0.2$  代入上式, 则

$$\Delta R = 0.9986 Q_0 - 0.2 Q_0 (1 - 0.0523) = 1.19 Q_0$$

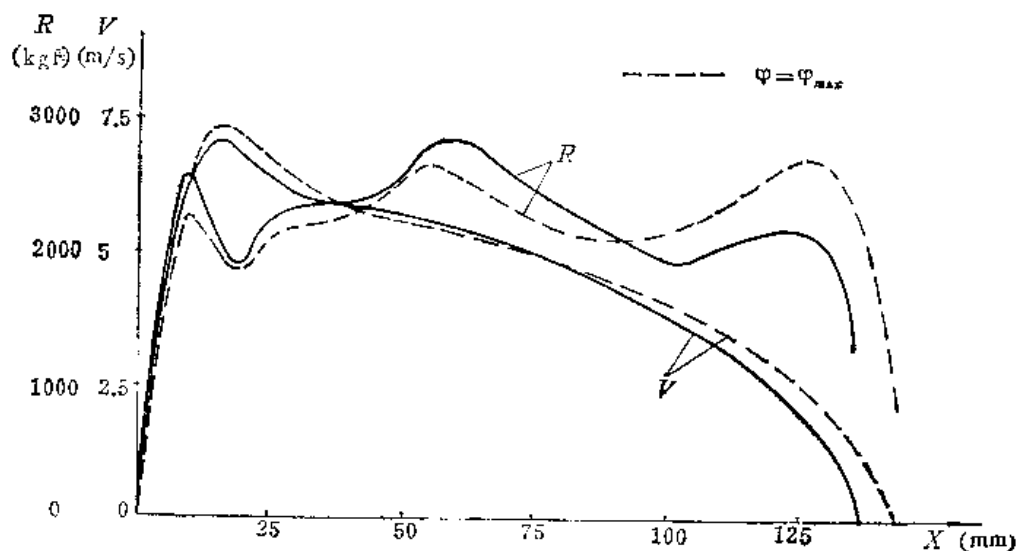


图7-18 某37 G射角变化的  $R-X$ 、 $V-X$  曲线

这说明, 在大射角射击时, 后坐阻力  $R$  将减小。从图 7-18 的曲线可以看出射角  $\varphi$  对后坐运动的影响。图中曲线表明, 大射角下的后坐速度  $V$  和后坐长度  $\lambda$  均大于小射角下的  $V$ 、 $\lambda$ 。

出现上述规律的原因也可用后坐运动微分方程加以说明。和温度对  $\phi_0$  的影响相似, 射角增大时减少了重力分力, 使  $R$  减小,  $V$  增大; 影响  $R$  的另一个因素是在  $R$  减小、 $V$  增大时液压阻力  $\phi$  又与  $V^2$  成正比地上升, 继而又使  $R$  增大。在后坐开始阶段,  $V$  主要取决于  $P_{pr}$ , 所以它的变化不大, 于是  $(R)_{\varphi_{\max}}$  与  $(R)_{\varphi_{\min}}$  保持  $\Delta R$  的等距离变化。在后坐后期,  $V$  完全取决于  $R$ , 第二个影响因素起主导作用。随着  $R$  减小  $V$  不断积累, 当  $V$  增加到某一点时, 使  $(R)_{\varphi_{\max}}$  超过  $(R)_{\varphi_{\min}}$ 。另一方面, 由于后坐开始阶段  $(R)_{\varphi_{\max}}$  减小, 其阻力功必定在后坐终了段加以补偿, 因此, 后坐长度  $\lambda$  必然相应增长。

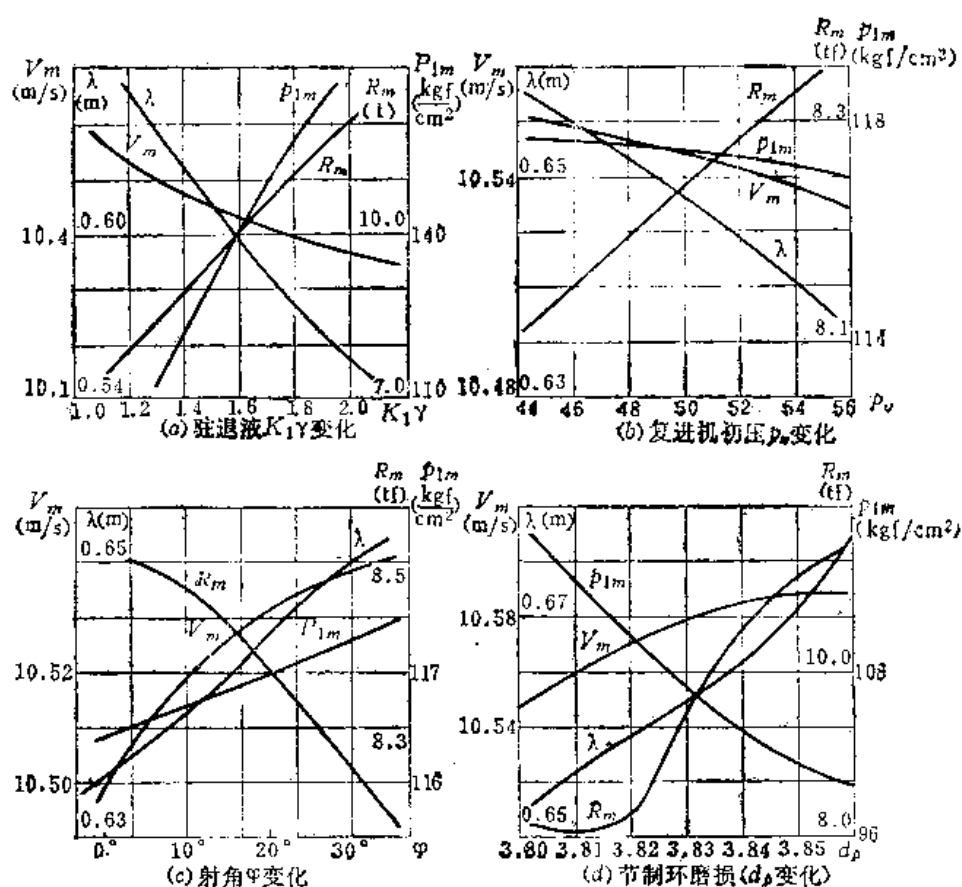


图7-19 56-85J的 $K_1 \gamma$ 、 $p_{fo}$ 、 $\varphi$ 、 $d_p$ 变化对后坐的影响

除了装药、温度、射角之外, 影响后坐运动规律的因素还很多。例如驻退机零件磨损 (活塞间隙加大或节制环直径加大, 节制杆直径变小造成流液孔  $\alpha_x$  增大) 后, 将使  $\phi_0$  减小, 后坐长度增长, 甚至在后坐终了时产生大的阻力波峰 (参见图7-19(d))。又如, 复进机液量多于标准值或初压  $p_{fo}$  较高时, 后坐长缩短; 液量少于标准值或初压  $p_{fo}$  较低时, 后坐长度增长, 等等。图7-19所示是56-85J当驻退液粘度及重度 ( $K_1 \gamma$ )、复进机初压  $p_{fo}$ 、射角  $\varphi$  变化及节制杆磨损 ( $d_p$  增大) 时, 对后坐运动及后坐阻力的影响。曲线是由电子计算机解反面问题的计算结果绘成的, 采用的参数也是与实验结果符合计算后得到的。应当指出, 在影响火炮后坐的因素中, 有些是设计计算时必须考虑的, 有些是在使用与维修中应注意的。

### 三、极限射击条件的确定

从影响后坐运动的三个主要因素出发可以得出极限射击条件:

(1) 最大后坐阻力: 出现在最大装药量 ( $\omega_{\max}$ )、最小射角 ( $\varphi_{\min}$  一般为  $0^\circ$ , 变后坐时则为短后坐的最小射角)、最低液温 ( $t_{\min}$  为  $-40^\circ\text{C}$ ) 时。此条件用以检验火炮炮架的机械强度。为了消除土壤的缓冲作用, 这一实验经常在水泥炮位上进行。

(2) 最大后坐长度: 出现在最大装药量、最大射角 (高射炮一般为  $87^\circ$ , 榴弹炮大于  $65^\circ$ , 加农炮  $35^\circ \sim 45^\circ$ , 变后坐时则为长后坐的最大射角)、最高液温 (连续射击时可达  $100^\circ\text{C}$  以上) 时。此条件用以检验火炮的极限后坐长度  $\lambda_{jx}$ , 与后坐运动有关的部件纵向尺寸是否足够。

(3) 最小后坐长度: 出现在最小装药量、最小射角 ( $\varphi_{\min}$  一般为  $0^\circ$ , 变后坐时为短后坐的最小射角) 及最低液温时。此条件用以检验在后坐时期工作的自动机动作的可靠性 (如能开门、抽筒等)。

(4) 最小复进速度: 出现在最小装药量、最大射角及最低液温时。此条件用以检验在复进时期工作的半自动机动作的可靠性。

用极限射击条件检验火炮机构动作与强度是立足于最恶劣情况的一种严格的方法。但由于某些原因 (如自然条件与技术条件的限制), 目前我国的火炮试验并没有完全满足极限条件, 一般只选其中一、二项。例如, 由于  $-40^\circ\text{C}$  的温度难于获得, 最大后坐阻力条件多以强装药及可能的低温来代替, 而最大后坐长条件往往也用正装药代替强装药进行急促射来达到。有时, 也可用反面问题计算来检验极限条件下的后坐运动规律, 计算时液压阻力系数  $K$  应当是实验得到的。

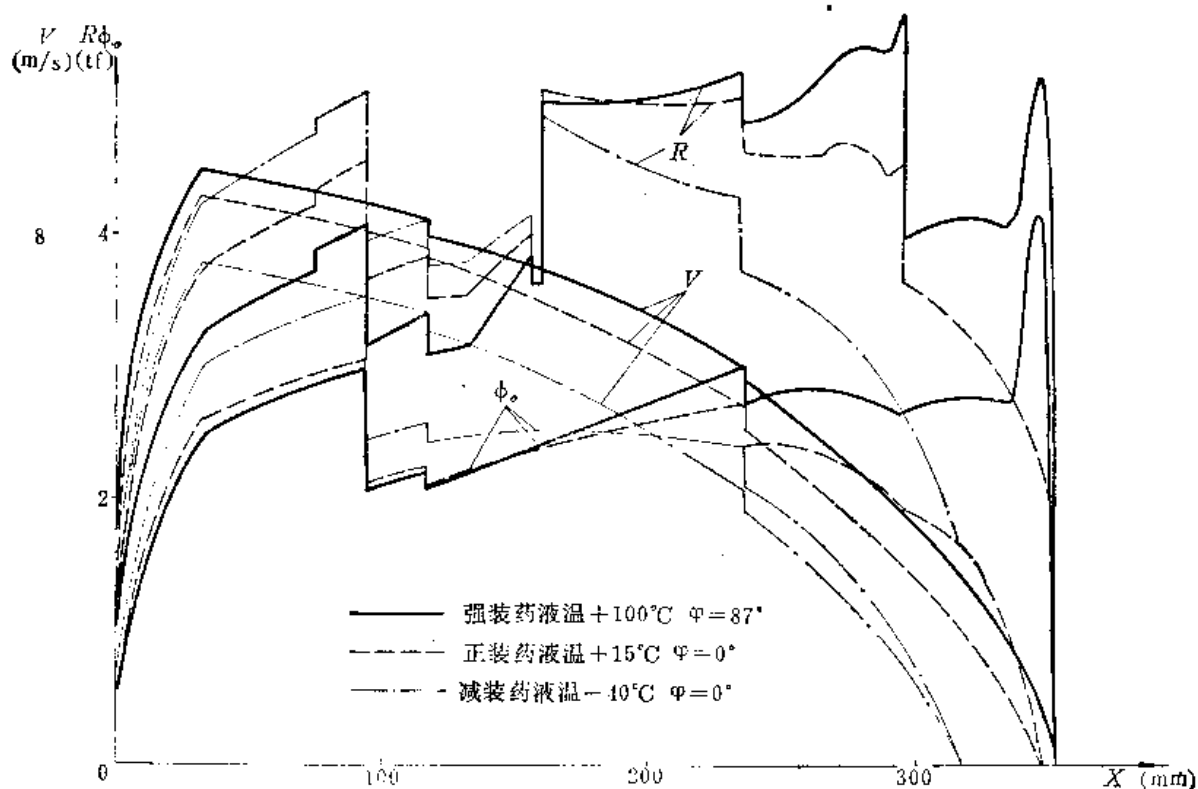


图7-20 59-57 G 几种极限条件下的  $R-X$ 、 $\phi_0-X$ 、 $V-X$  曲线

表7-4 59-57G三种极限条件的计算数据

装 药	射 角	液 温	$K_1Y$	$K_2Y$	$F_{\max}$ (公斤力)	$\lambda$ (毫米)
强	87°	100°C	1.25	1.95	5753	355
正	0°	15°C	1.41	2.20	5097	319
减	0°	-40°C	2.1	3.28	5036	321

表7-4为59-57G三种极限条件下,后坐反面问题计算的数据,图7-20为这几种极限条件下计算得到的后坐阻力曲线。

#### 四、动力效应与液体惯性对实验结果的影响

在测量驻退机工作腔压力  $p_1-t$  以确定液压阻力  $\phi_0$  和液压阻力系数  $K$  的实验中,大家都默认了一个假定:即工作腔内液体压力是均匀分布的。然而,工作腔内沿轴向各点的压力,从活塞工作表面到驻退筒底部,液体压力逐渐增大的事实,已被进一步的实验所证实。了解这种压力分布的不均匀性,对于正确地进行实验修正有着重要意义。影响驻退机工作腔压力分布不均匀的主要原因是液流的动力效应与液体惯性。

##### (1) 动力效应的影响及附加压力 $\Delta p_d$

现以最简单式驻退机为例说明动力效应(见图7-21)。驻退杆后坐时,液体从活塞上的流液孔高速喷出,这样,作用在活塞上的力,除了液体压力  $p_1$  外,还有液流从  $a_x$  喷出的反作用力,此作用力的方向与射流方向相反,液流的这一反作用称为动力效应。

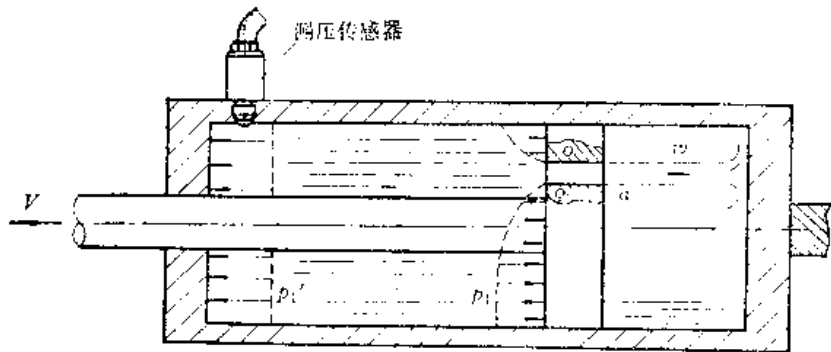


图7-21 液流的动力效应

动力效应引起工作腔压力分布不均匀。当液体经小孔流出时,工作腔内的液体并不是在到达孔口截面  $o-o$  时才突然从静止状态变为速度为  $\omega$  的射流的。液流速度从0增大到  $\omega$  有一个变化过程,这个过程发生在靠近孔口的某一区域(如图中虚线所示)。根据伯努利方程,随着液体流速的增大,液体压力不断降低。因此,活塞表面的压力  $p_1$  必然低于筒底的压力  $p_1'$ ,即

$$p_1 < p_1'$$

或

$$p_1' = p_1 + \Delta p_d$$

式中  $\Delta p_d$  为由于动力效应引起的附加压力。 $\Delta p_d$  可由动量定理导出:

$$\Delta p_d \approx \frac{1}{K_1} \frac{a_x}{A_o + a_x} p_1 \quad (7-45)$$

式中  $K_1$  为驻退机主流液压阻力系数。

从式 (7-45) 可看出,  $\Delta p_d$  与工作腔压力  $p_1$  成正比, 在最大压力  $p_{1\max}$  时,  $\Delta p_d$  具有最大值。

例如, 56-85J 的  $a_{x\max} = 4.16$  厘米<sup>2</sup> (最大压力处),  $A_o = 63.61$  厘米<sup>2</sup>, 取  $K_1 = 1.2$ , 代入上式得

$$\Delta p_{d\max} = \frac{1}{K_1} \frac{a_{x\max}}{A_o + a_{x\max}} p_{1\max} = 5.11\% p_{1\max}$$

这说明, 由于动力效应引起的附加压力, 其最大值可使  $p_1$  与  $p'_1$  之间相差约 5%。如果用  $p'_1$  直接代替  $p_1$  必然给实验数据处理带来误差。

应该指出, 动力效应还直接影响驻退机液压阻力  $\phi_o$  的大小, 使杆后坐与筒后坐时  $\phi_o$  有一定差别。由于这个差别与整个计算的误差相比较小, 所以目前计算液压阻力时通常多不考虑动力效应的影响。也就是说, 不论是杆后坐时还是筒后坐时都使用相同的液压阻力计算公式。

## (2) 液体惯性的影响和附加压力 $\Delta p_g$

驻退机液体压力公式是在稳定流动的假设下得到的, 实际上火炮后坐运动经过加速, 使速度  $V$  达到最大值, 然后减速, 最后停下来。因此驻退机内的流动是不稳定流动。液体在加速和减速流动中必然产生惯性, 因此, 液体除承受正常压力外还承受一附加压力  $\Delta p_g$ 。在筒后坐时,  $\Delta p_g$  出现在工作腔, 杆后坐时,  $\Delta p_g$  出现在内腔 (影响较小)。

下面讨论筒后坐时驻退机工作腔附加压力  $\Delta p_g$  的计算。

由于  $\Delta p_g$  的存在, 在加速后坐时, 使筒底压力  $p'_1$  增大为  $p'_1 + \Delta p_g$ , 在减速后坐时, 使  $p'_1$  减小到  $p'_1 - \Delta p_g$ 。设工作腔内某时刻液体重量  $Q_y$ , 作用在筒底的附加压力

$$\Delta p_g = \frac{1}{A_o} \frac{Q_y}{g} \frac{d^2 X}{dt^2}$$

式中  $A_o$  为活塞工作面积。将后坐运动微分方程

$$\frac{Q_o}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pr} - R$$

代入得

$$\Delta p_g = \frac{1}{A_o} \frac{Q_y}{Q_o} (P_{pr} - R)$$

在后坐过程中, 由于液体不断流入非工作腔, 提供附加压力的液体重量不断减少, 可用下式表示:

$$Q_y = Q_{y0} - A_o X \gamma$$

式中  $Q_{y0}$ ——后坐开始瞬间, 工作腔内液体重量;

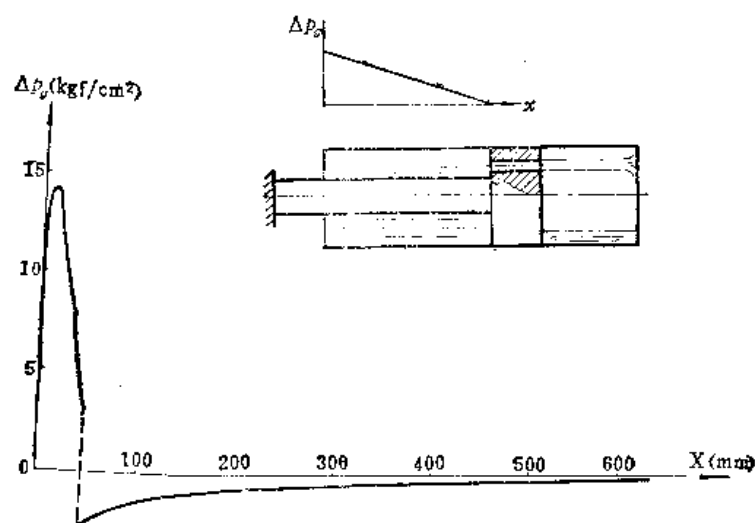
$X$ ——后坐行程;

$\gamma$ ——液体重度。

所以

$$\Delta p_g = \frac{1}{A_o} \frac{Q_{y0} - A_o X \gamma}{Q_o} (P_{pr} - R) \quad (7-46)$$

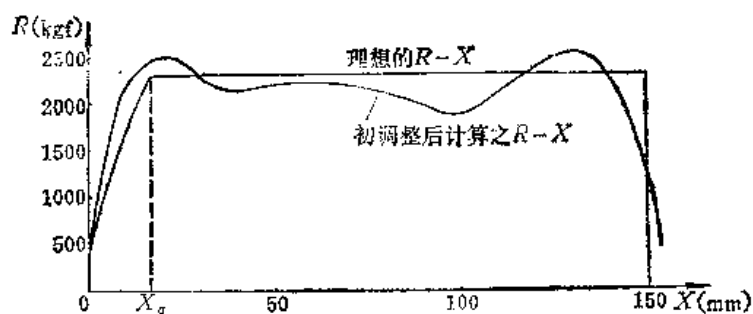
图 7-22 为 56-85J 根据式 (7-46) 计算的  $\Delta p_g - X$  曲线。可以看出, 在最大加速度点,  $\Delta p_g$  可达 14.3 公斤力/厘米<sup>2</sup>, 在弹丸出炮口点,  $\Delta p_g = 3.2$  公斤力/厘米<sup>2</sup>, 相当于该点工

图7-22 56-85 J 的  $\Delta p_g-X$  曲线

作压力  $p_{1\max}$  的 3% 左右。惯性附加压力沿驻退机工作腔轴向分布，自筒底的  $\Delta p_g$  线性地减小至活塞表面为零（见图 7-22）。因此实验测量之压力  $p'_1$  中包含了  $\Delta p_g$ ，在分析实验结果时应加以考虑。

### 第五节 节制杆再调整的方法

后坐正面问题计算中，许多参数的选取（液压阻力系数  $K$  等）都带有一定的经验性，使得节制杆理论外形也带有一定的近似性。在此基础上进行的节制杆初调整，只考虑了克服液力闭锁和改善加工工艺性，并没有考虑理论外形带来的误差。因此初调整后实验所得的后坐阻力变化规律和后坐运动规律与我们预想的存在着较大的差别。如图 7-23 所示。这个差别随设计者经验的多少，选择设计参数的好坏而不同，初学者往往难以掌握。惯用的方法是反复地进行经验性的调整、实验，直到满足要求为止。这一节介绍两种再调整的方法，一种是基于实验的，一种是基于反面问题计算的。它们的共同点是较容易得到预想的结果，使  $R-X$  曲线得到较大的改善。

图7-23 某火炮初调整后的  $R-X$  曲线（正装药， $\varphi = 0^\circ$ ）

#### 一、根据实验曲线判断流液孔设计的好坏

中大口径野炮满足后坐稳定性及炮架强度是它的关键。因此要求  $\varphi_{\max}$  和  $\varphi_{\min}$  时的后

坐阻力曲线都应比较平缓,不允许出现大的压力波峰。由于野战火炮射角变化范围不大,满足这个要求是可能的。如果这个要求没有满足,就必须重新调整流液孔。

固定式火炮(如坦克炮等),由于炮塔结构尺寸的限制,对后坐长度有比较严格的要求,而不存在稳定性的问题。因此,极限条件下必须保证使 $\lambda < \lambda_{js}$ ,后坐阻力局部出现压力波峰是可以允许的。对于这类火炮如果后坐长度变化范围较大,则必须重新调整流液孔。

高射炮和大威力榴弹炮的射角变化范围很大,稳定性的要求界于野炮与固定炮之间,常采用变后坐的结构,因此判断流液孔好坏要综合考虑以下因素:当 $\varphi = 0^\circ$ 时,为保证射击稳定性,减小炮架振动以提高连发射击精度,要求 $R-X$ 曲线尽量平缓变化;大射角时,最大后坐长度应严格限制,此时由于稳定性有保证,故对 $R-X$ 曲线要求不高;由于自动机工作要求,火炮在最小后坐长度或最小复进速度条件下射击时,必须保证自动机正常工作,故应有足够的后坐长度和复进速度。总之,若这类火炮后坐长度变化范围过大,就必须重新调整流液孔。

## 二、用实验曲线调整节制杆的方法

以往再调整节制杆多依靠经验而不进行计算,这虽然方便,但比较粗略,往往反复多次也难于得到理想的结果。若以实验曲线辅以必要的计算就可避免上述缺点。

这种方法应在液压阻力系数 $K$ 测定后进行。下面我们举某37G为例,在初调整后测得的实验曲线(正装药,  $\varphi = 0^\circ$ )如图7-24所示。从曲线上可看出,  $R-X$ 曲线起伏较大,呈“马鞍型”,  $R_{\max}$ 与 $R_{\min}$ 相差近一倍,出现了两个阻力波峰,一个在弹丸出炮口附近,另一个在后坐终了附近。这种现象很普遍,如图7-23所示 $R-X$ 也呈“马鞍型”。由于 $R_{\max}$ 较大,火炮稳定性不足,炮架振动较大,直接影响连发射击精度。这说明流液孔设计不够理想,需加以调整。

用实验曲线调整节制杆的步骤与正面问题计算相似:

1. 从火炮实验中测出后坐速度、位移、工作腔压力和内腔压力,处理出液压阻力系数 $K_1-X$ 、 $K_2-X$ 曲线(选择若干参数变化的特征点,点数少于正面问题计算);
2. 根据实际驻退机紧塞结构,计算出摩擦力 $F$ 。根据实际的后坐部分重量 $Q$ 。计算出导轨摩擦力 $T$ 和 $Q_0 \sin \varphi$ 等;
3. 由实测的 $K_1-X$ 、 $K_2-X$ 、 $V-X$ 和 $P_f-X$ 以及理想的 $R-X$ 变化规律(后坐制动图),按正面问题重新计算出 $\delta_x-X$ ,并再经过初调整,得到适当的锥度。

由于点数较少, $V-X$ 又近似取实验值,故计算工作量较小。图7-24下方为再调整后的实验曲线。可以看出,用这样调整方法使 $R-X$ 曲线得到了改善。明显的阻力峰值 $R_{\max}$ 下降了,稳定性得到改善。因此较容易的得到预想结果。

有时,仅仅需要在后坐开始段或终了段做局部调整,这时可根据具体情况取平均液压阻力系数在部分长度上计算。但必须注意,由于各后坐运动诸元之间是互相影响的,节制杆调整长度过短是不能见效的。

实验手段可靠时,这种调整方法效果较好,也简单直观。但必须在初调整后进行实弹射击后进行。



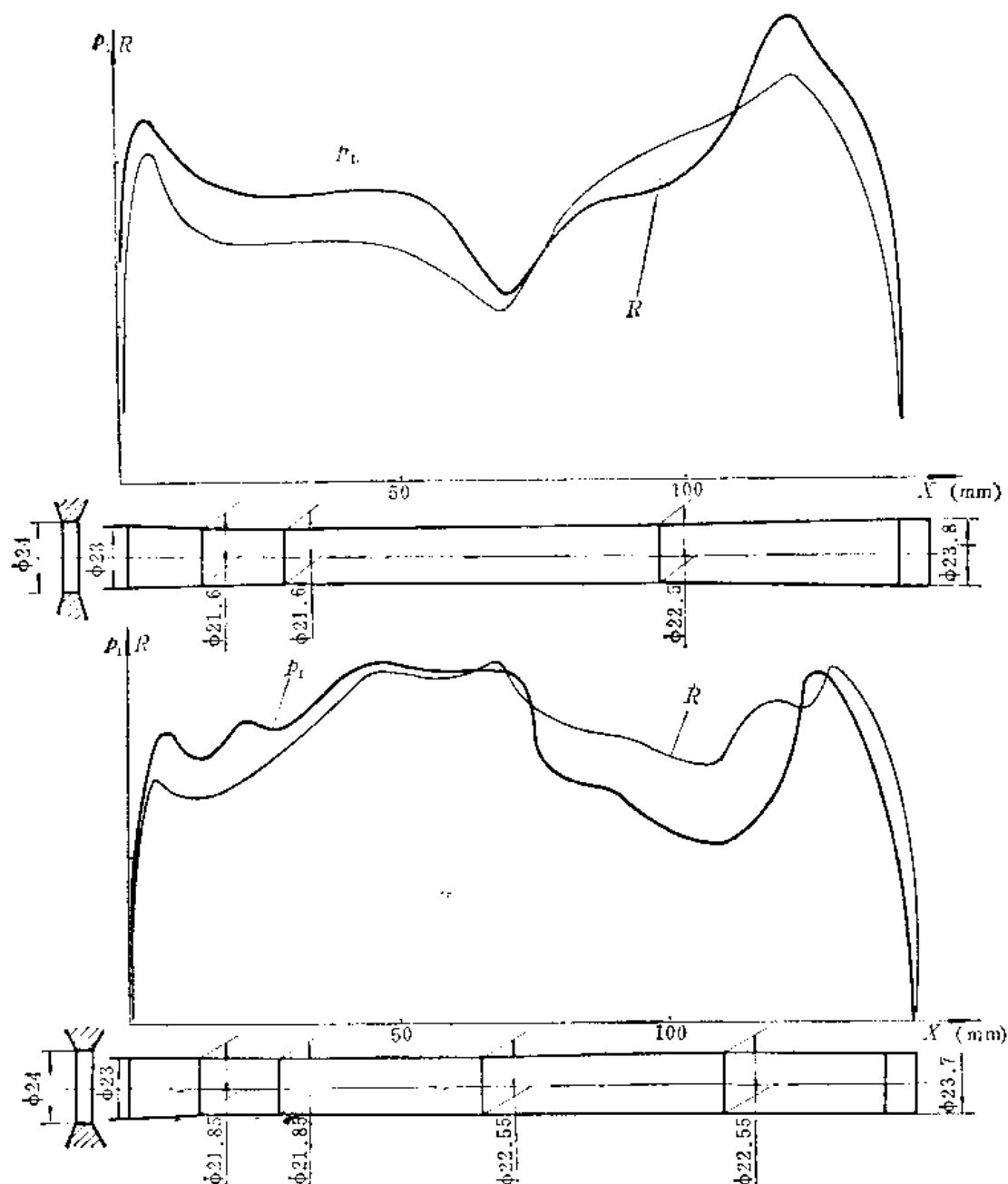


图7-24 某37 G后坐阻力实验曲线

### 三、用反面问题计算调整节制杆的方法

这个方法是在用电子计算机进行后坐反面问题计算的基础上发展起来的。将整个后坐行程按节制杆的不同锥度分成若干个计算区域，在每一计算区域内给定后坐阻力的许可范围，利用电子计算机计算速度快的特点，在此区域内进行反面问题计算，得出此区域内的最大后坐阻力。通过调整此段节制杆的锥度，反复进行反面问题计算使所得的最大后坐阻力在给定的许可范围内。如此逐段调整计算，从而使整个后坐过程中的最大后坐阻力限制在规定的范围内。

下面介绍逐段解反面问题调整节制杆的思路。取初调正后仅包括一个锥度的一段节制杆为例，参见图 7-25。后坐制动图  $R-X$  在此计算区域  $(X_n, X_{n+1})$  中为一斜直线。

为了计算方便,我们这样给定后坐阻力的许可范围:取一定的调整精度  $\varepsilon$  (一般  $\varepsilon = 5\%$ ), 以  $(1 + \varepsilon)R_n$  为最大后坐阻力的上限, 以  $R_n$  为下限, 这一带状区域为给定的后坐阻力的许可范围。这样规定是要求调整后的  $R-X$  曲线充满度好, 可获得较小的后坐长。

设反面问题计算从  $X = X_n$  开始, 对应的节制杆直径为  $\delta_n$  (我们固定  $\delta_n$  不变, 调整节制杆只改变  $\delta_{n+1}$ ), 按初调整后  $X = X_{n+1}$  处的  $\delta_{n+1}$  计算出该段节制杆的锥度, 可得出此段节制杆对应的流液孔的解析关系  $a_x-X$ 。在  $(X_n, X_{n+1})$  中经反面计算可获得最大后坐阻力  $R'$ 。

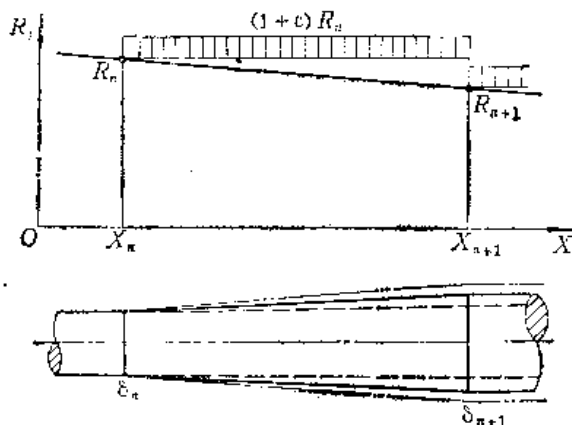


图7-25 用反面问题计算调整节制杆的方法

若  $R' < R_n$  时, 说明充满度不好, 必须增大  $R'$ , 取  $\delta_{n+1} + \Delta$  ( $\Delta$  为节制杆直径的增量, 一般  $\Delta = 0.1$  毫米), 即增大此段节制杆直径, 减小  $a_x$ , 重新从  $X = X_n$  计算反面问题。

若  $R' > (1 + \varepsilon)R_n$  时, 说明  $R'$  超出许可范围, 必须减小  $R'$ , 取  $\delta_{n+1} - \Delta$ , 即减小节制杆直径, 增大  $a_x$ , 重新从  $X = X_n$  计算反面问题。

若  $R_n \leq R' \leq (1 + \varepsilon)R_n$ , 说明  $R'$  满足要求, 此段计算结束。此时  $\delta_{n+1}$  即为调整后的节制杆在  $X = X_{n+1}$  处的尺寸。然后我们固定  $\delta_{n+1}$  不变, 以同样的方法可调整出  $\delta_{n+2}$ 。以此类推, 一直到节制杆最后一段为止。

现在把这种调整方法的步骤归纳如下:

1. 经火炮试验处理出液压阻力系数  $K_1-X$  和  $K_2-X$ ;
2. 按反面问题计算作计算前的数据准备, 并按节制杆初调整的段数, 准备各段相应的  $R_n$  值, 选定精度  $\varepsilon$  和节制杆直径增量  $\Delta$ ;
3. 从起始段开始逐段按上述思路调整, 一直到终了段为止。

这种调整方法可以一次获得较好的结果, 有迅速、省力、调整精度较高等优点。它的缺点是在调整中不能随意增添和减少节制杆段数, 显得死板; 调整精度对初始段初调整精度依赖较大, 并且较大程度上取决于液压阻力系数  $K_1$ 、 $K_2$  的选取是否符合实际。

图 7-26 所示为某火炮节制杆初调整和用反面问题计算再调整计算结果的比较。可看出初调整后  $R-X$  曲线仍为马鞍型, 而再调整后  $R-X$  曲线变化平缓、充满度较好。

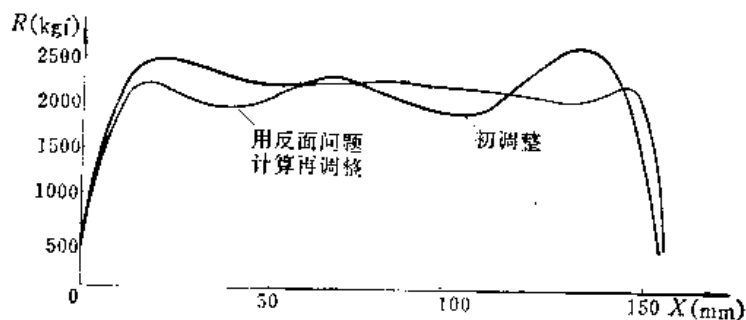


图7-26 初调整与用反面问题计算再调整计算结果比较

## 第六节 液压阻力系数的讨论

在一维不可压缩定常流动的假设下，驻退机工作腔和内腔压力，为

$$p_1 = -\frac{(1+\xi_1)\gamma}{2g} - \frac{(A_o - A_p)^2}{a_x^2} V^2$$

$$p_1 - p_3 = \frac{(1+\xi_2)\gamma}{2g} - \left(\frac{A_H}{\Omega_1}\right)^2 V^2$$

式中  $\xi_1$  和  $\xi_2$  为主流和支流流动的损失系数，它们分别与主流和支流的比能损失  $\frac{w^2}{2g}$  成正比。我们曾指出，按上式计算的压力与实际出入较大，这是由于驻退机内液体流动现象十分复杂，与基本假设不符合造成的。为此，引入了一个十分重要的系数——液压阻力系数  $K$ ，代替损失系数  $\xi$ ，则

$$p_1 = -\frac{K_1\gamma}{20g} - \frac{(A_o - A_p)^2}{a_x^2} V^2$$

$$p_1 - p_3 = -\frac{K_2\gamma}{20g} - \left(\frac{A_H}{\Omega_1}\right)^2 V^2$$

液压阻力系数  $K$  不仅包括了对局部损失和沿程损失等能量损失的修正，它还是一个理论与实际的符合系数。因此正确的选取、测定  $K$ ，对反后坐装置设计是十分重要的。

本节先介绍目前确定  $K$  的方法，即习惯上将  $K$  处理成常数的方法。然后介绍目前国内外在液压阻力系数  $K$  上面所做的一些工作。

### 一、正面问题计算中 $K$ 选取的原则

由于驻退机正面问题计算时，还没有驻退机详细结构，更没有驻退机实物，不能实测  $K_1$  和  $K_2$ 。只能参考同类型驻退机选取液压阻力系数。为了减少盲目性，在选取  $K$  时，应遵循如下原则：

1. 两驻退机的驻退液粘度必须一致。因为液流损失与液体粘度有关，粘度越大，液体在流动中的损失就越大。还应注意驻退机的工作温度是否一致。现有驻退液在常温 and 高温时粘度相差较小。实验也证实，不同驻退液在常温与高温时的液压阻力系数  $K$  相差较小。但在低温与常温比较相差就很大。所以，在常温与高温时，如缺少相同驻退液的  $K$  值，可用其他驻退液的  $K$  值代替。但应注意，此时必须用该温度下的液体重度  $\gamma_t$ ，而不能在高温时以常温重度  $\gamma_{15^\circ}$  代入，否则，将带来很大的误差。

2. 两驻退机结构型式应尽量接近。液压阻力系数  $K$  包含的液流损失主要决定于液流通道的几何形状和尺寸、液流转折的角度和次数等。在选取  $K$  时应尽量保证结构型式（如  $a_x$  的构成，有无中筒、复进节制器型式等）的一致，这样才能使选取的  $K$  值误差小些。

3. 两驻退机液体压力计算公式应相同。液压阻力系数  $K$  是理论与实际的符合系数，即使对于同一驻退机采用不同计算公式， $K$  值也不相同。在选取  $K$  时，应了解它是根据什么公式反算得到的，与我们所用的公式是否一致，否则会带来较大误差。目前常用的节制杆式驻退机液体压力公式，除了式 (7-10) 和 (7-11) 外，还有以下几种：

考虑液流相对速度与绝对速度差别时，有

$$p_1 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_o - A_p + a_x)(A_o - A_p)}{a_x^2} V^2 \quad (7-47)$$

考虑驻退杆活塞温度间隙时, 有

$$p_1 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{(A_o - A_p)^2}{a_x^2} V^2 \quad (7-48)$$

式中  $a_x$ ——折合面积, 即  $a_x = a_x + a_o \sqrt{\frac{K_1}{K_1'}}$ ;

$a_o$ ——活塞间隙面积;

$K_1'$ ——液流经活塞间隙的液压阻力系数, 可取  $K_1' = 3K_1$ 。

4. 两驻退机的后坐速度应尽量相近。实验证明, 即使是相同的驻退机, 在两个不同的后坐速度下所测得的液压阻力系数  $K$  也是不同的。在选取  $K$  时应注意这一点。

表 7-5 中列出了一些制式火炮节制杆式驻退机的液压阻力系数  $K_1$ 、 $K_2$ , 供设计时参考。

表 7-5 几种火炮的液压阻力系数

火 炮	驻退机型式	复进节制器型式	$K_1$	$K_2$	数 据 来 源
65-37G	节制杆	全长制动沟槽式	1.50	6.0	实测, 按式 (7-10), (7-11)
59-57G	节制杆	针 式	1.27	2.0	计算书, 按式 (7-10), (7-11)
55-57F	节制杆	全长制动沟槽式	1.35	3.2	实测, 按式 (7-10), (7-11)
54-76J	节制杆	全长制动沟槽式	1.35	2.5	计算书
56-85J	节制杆	全长制动沟槽式	1.20	3.0	计算书, 按式 (7-47)
100J	节制杆	全长制动沟槽式	1.50	5.0	计算书
59-100T	节制杆	全长制动沟槽式	1.30	5.4	计算书
59-130J	沟槽、带中筒	全长制动沟槽式	2.70 (长后坐)	3.0	计算书
59-152J			1.55 (短后坐)		
66-152JL	节制杆	全长制动沟槽式	1.50	3.0	计算书, 按式 (7-47)

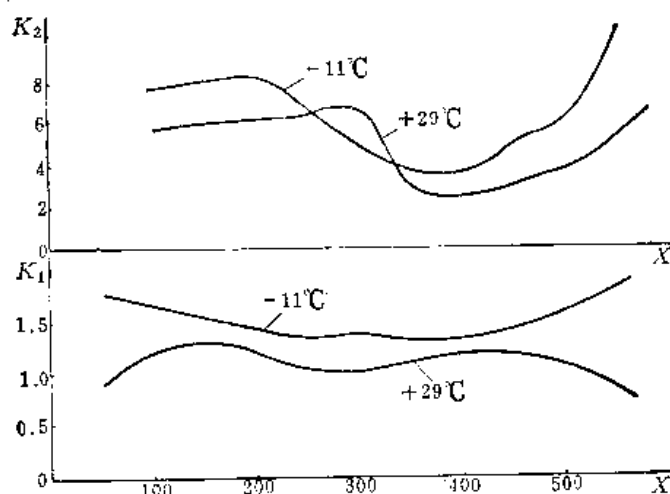
## 二、实验测定 $K$ 的常用处理方法

测定液压阻力系数, 通常是根据不同液温下测量的  $p_1-X$ ,  $p_3-X$  和  $V-X$  曲线, 由下式反算出  $K_1-X$  和  $K_2-X$  来。

$$K_1 = \frac{20g}{\gamma} \frac{a_x^2}{(A_o - A_p)^2} \frac{p_1}{V^2} \quad (7-49)$$

$$K_2 = \frac{20g}{\gamma} \frac{\Omega_1^2}{A_{2j}^2} \frac{p_1 - p_3}{V^2} \quad (7-50)$$

图 7-27 为 56-85J 的  $K_1$  和  $K_2$  曲线。可以看出  $K_1$  和  $K_2$  对  $X$  并不是常数。习惯上为了计算与选取方便都采用平均的液压阻力系数。目前有如下几种平均方法:

图7-27 56-85 J 的  $K_1$ - $X$ 、 $K$ - $X$  实验曲线

### 1. 算术平均

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n K_i}{n} \quad (7-51)$$

式中  $n$  ——在后坐全长上取样点数；

$K_i$  ——第  $i$  个取样点的液压阻力系数值。

### 2. 有条件的积分平均

由于后坐起始段和終了段液体压力变化激烈，压力测量误差较大。而且在  $X \rightarrow 0$  和  $X \rightarrow \lambda$  时， $V \rightarrow 0$ ，使式 (7-49) 和 (7-50) 趋于无穷大。剔除  $X = 0 \sim X$  段和  $X = X_2 \sim \lambda$  段后，有

$$K = \frac{\int_{X_1}^{X_2} K(X) dX}{X_2 - X_1} \quad (7-52)$$

式中  $\int_{X_1}^{X_2} K(X) dX$  可用数值积分方法求得。

### 3. 最小二乘法

用最小二乘法计算平均液压阻力系数，可以通过使实验测定液体压力值与用式 (7-49) 计算的压力值之差的平方最小，来确定平均液压阻力系数。以主流液压阻力系数为例，有

$$p_i = c_1 K_1 \frac{V_i^2}{a_{xi}^2}$$

式中  $c_1 = \frac{\gamma}{20g} (A_o - A_p)^2$  是常数。引入  $\epsilon_i$  表示实验中第  $i$  个取样点测定的工作腔液体压力与计算压力之间的误差，即

$$\epsilon_i = p_{li} - c_1 K_1 \frac{V_{li}^2}{a_{xi}^2}$$

式中  $p_{1i}$ 、 $V_i$ 、 $a_{xi}$  为第  $i$  个取样点处实测之工作腔压力、后坐速度和流液孔面积。由最小二乘法, 对  $i=1, 2, \dots, n$  个取样点有

$$\sum_{i=1}^n \left( p_{1i} - c_1 K_1 \frac{V_i^2}{a_{xi}^2} \right)^2 = \sum_{i=1}^n c_i^2$$

对上式取  $K_1$  的偏导数, 即

$$-\frac{\partial}{\partial K_1} \left( \sum_{i=1}^n c_i^2 \right) = 2 \sum_{i=1}^n \left( p_{1i} - c_1 K_1 \frac{V_i^2}{a_{xi}^2} \right) \left( -c_1 \frac{V_i^2}{a_{xi}^2} \right) = 0$$

因  $c_1 \neq 0$ , 整理并解出  $K_1$ , 得

$$K_1 = \frac{\sum_{i=1}^n p_{1i} \frac{V_i^2}{a_{xi}^2}}{c_1 \sum_{i=1}^n \frac{V_i^4}{a_{xi}^4}} \quad (7-53)$$

同理可得

$$K_2 = \frac{\sum_{i=1}^n (p_{1i} - p_{3i}) V_i^2}{c_2 \sum_{i=1}^n V_i^4} \quad (7-54)$$

式中  $p_{3i}$ ——第  $i$  个取样点处实测之内腔压力;

$c_2$ ——常数,  $c_2 = -\frac{\gamma}{20g} \left( \frac{A_{fj}}{\Omega_1} \right)^2$ 。

目前第一种算术平均已无人使用, 因为它使平均液压阻力系数偏大, 使计算误差大。条件积分平均得到的平均液压阻力系数, 经反面问题计算其后坐长度  $\lambda$  与实验值比较接近, 而最大后坐阻力有时相差较多。这是因为积分平均只能保证  $R-X$  曲线下的面积相等, 即阻力功相等, 而不能保证曲线上各点均重合。最小二乘法, 可使最大后坐阻力吻合得好些, 但后坐长度吻合较差。

由此可见, 目前流行的习惯方法——将液压阻力系数处理为常数, 是一种不完善的方法。随着电子计算机的应用, 在后坐反面问题计算中, 将液压阻力系数处理为变数已成为可能, 其计算结果与实验吻合较好。

### 三、影响液压阻力系数的因素

由 (7-49) 和 (7-50) 式, 知

$$K_1 = k_1(p_1, c_1, V^2, a_x^2)$$

$$K_2 = k_2(p_1, p_3, c_2, V^2)$$

显然,  $c_1$  和  $c_2$  只与液体重度  $\gamma$  和液流通道尺寸 ( $A_o$ 、 $A_p$ 、 $A_{fj}$ 、 $a_x$  和  $\Omega_1$ ) 有关的常数。上式说明, 建立在一维不可压缩定常流动基本假设下的反后坐装置设计理论, 揭示出液压阻力系数  $K$  与液体的性质、驻退机结构、工作腔和内腔压力、后坐速度以及流液孔面积的关系, 而这些因素大多数是后坐行程  $X$  的函数, 故液压阻力系数可以表示为  $K_1 = k_1(X)$ ;  $K_2 = k_2(X)$ 。

实际流动是复杂的,除了上述因素外,液压阻力系数还与下列因素有关:

1. 时间。火炮后坐运动在十分之几秒内完成,驻退机内液体在这短短的时间内经历了由静止到加速,再由减速到静止的过程,流动是非定常的。因此液压阻力系数 $K$ 也必然是时间的函数。

2. 流动状态。由于驻退液有一定的粘度,液体流速变化范围很大,驻退机内液体流动状态实际上经历了层流——湍流——层流过程。两种流态的流动损失是不同的。因此液压阻力系数也取决于流动状态。这集中反映在运动粘性 $\nu$ 和雷诺数 $Re$ 上。

3. 流体的可压缩性。由于驻退液的可压缩性,直接影响流经液孔的流速。

由于影响液压阻力系数的因素是十分复杂的,在反后坐装置设计中给出准确的 $K$ 值,目前还不可能,只能借助于可靠的实验。

驻退机实验的代价是昂贵的,而且在高压范围内,液体流动有脱离、气蚀、冲击波反射等现象,准确地测定压力分布和流速是很困难的。基于这种情况,国外学者们正在发展一种利用数值分析对液压阻力系数进行可靠预测的方法,即在驻退机样机制造和实验前,先在电子计算机上进行模拟。其优点是节省时间和经费。但是二维非定常流动的数值解还处在发展阶段,目前还没有资料说明此方法已在实际设计中应用。

#### 四、几种可行的措施

在目前暂时不能得到液压阻力系数精确值的情况下,为了提高计算的精度,建议在做反后坐装置正面问题计算时,将 $K$ 作常数处理,使正面计算简单,在进行节制杆再调整以及反面问题计算时,将 $K$ 处理为变数,可以提高计算的可靠性,使之与实验有较好的符合。目前国内将 $K$ 处理为变数的方法如下:

##### 1. 将 $K$ 拟合为 $X$ 的一元函数

形式为

$$K_1 = a_0 + a_1 X + a_2 X^2 + a_3 X^3 + \dots$$

$$K_2 = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 + b_3 X^3 + \dots$$

式中  $a$ 、 $b$  为多项式的系数。

将实验中处理出的  $K_1-X$ 、 $K_2-X$  离散点作为已知数据,利用优化技术确定最佳拟合次数,然后用最小二乘法计算出系数  $a_0, a_1, \dots$  和  $b_0, b_1, \dots$  来。

##### 2. 将 $K$ 拟合为 $a_x$ 的一元函数

形式为

$$K_1 = a_0 + a_1 a_x + a_2 a_x^2 + a_3 a_x^3 + \dots$$

$$K_2 = b_0 + b_1 a_x + b_2 a_x^2 + b_3 a_x^3 + \dots$$

##### 3. 将 $K$ 拟合为 $a_x$ 和 $V$ 的二元函数

形式为

$$K_1 = a_{00} V^0 a_x^0 + a_{01} V^0 a_x^1 + a_{02} V^0 a_x^2 + \dots + a_{10} V^1 a_x^0 + a_{11} V^1 a_x^1 + a_{12} V^1 a_x^2 + \dots$$

$$K_2 = b_{00} V^0 a_x^0 + b_{01} V^0 a_x^1 + b_{02} V^0 a_x^2 + \dots + b_{10} V^1 a_x^0 + b_{11} V^1 a_x^1 + b_{12} V^1 a_x^2 + \dots$$

式中  $a_{ij}$ 、 $b_{ij}$  为二元多项式的系数。

上述将 $K$ 做曲线拟合或曲面拟合,均有各种语言标准程序,若将求多项式的函数值的程序与反面问题计算程序合起来,就能计算 $K$ 为变数的后坐反面问题了。

## 第八章 液量调节器和紧塞装置的摩擦力

### 第一节 液量调节器

火炮发射时，后坐部分所得到的动能，在后坐和复进的过程中绝大部分都不可逆地转化为驻退机的热能。在连续发射时，将使驻退机内液体的温度不断地升高，从而带来一些需要解决的问题。

首先，驻退液会因温度的不断升高而膨胀，从而可能出现复进不到位的现象，如果连续射击，就会由于后坐起始位置的后移而破坏原设计的后坐阻力的规律，使后坐长度超差，出现压力波峰等严重现象。通常解决这个问题的办法是在驻退机上设置液量调节器或预先在驻退机内留有一定的空间。用它们来容纳连续射击时，因温度升高体积膨胀而增多的液体。

其次，驻退液的温升若超过其沸点，液体就可能汽化而使复进不到位。此外，在高温时，各紧塞部位的紧塞元件可能损坏而失去紧塞性能。

因此，设计驻退机时，要考虑驻退液最高使用温度和采取控制每发温升的措施（斯切奥尔液的沸点为  $110\sim 112^{\circ}\text{C}$ ，斯切奥尔-M液的沸点为  $89\sim 92^{\circ}\text{C}$ ；橡胶紧塞元件允许温度不超过  $100\sim 110^{\circ}\text{C}$ ，牛皮紧塞元件允许温度不超过  $90\sim 100^{\circ}\text{C}$ ）。为了在战斗中保证火炮的持续发射，每种火炮的勤务指南都规定了最大许可发射速度（见表8-1）。按规定发射速度射击时，由于有热的散失，可保证驻退液的温升不超过限度，也可保证身管的温升不超过限度。

表8-1 各种火炮发射速度的规定（均为全装药）

火炮名称	时间(分)												以后每 小 时
	发射发数	1	3	5	10	15	20	30	40	50	60	120	
59-57G		50				130					330		
56-85 J		10	25	40	50	60	70	90	110	125	140	230	80
54-122 L		6	16	25	40	55	65	75	85	90	100	150	50
59-130 J		5	12	20	35	50	60	75	85	92	100	150	40

#### 一、驻退机液体发热的计算

##### 1. 每次发射驻退机所吸收和散失的热量

在火炮一次发射循环中，后坐部分由于膛底合力的做功获得的能量，在后坐时，一部分被驻退机阻力功消耗，一部分被复进机贮存起来，少部分消耗于相对运动件之间的



摩擦功。复进时，复进机释放的能量，除了克服摩擦功外，剩余能量被驻退机在复进时阻力功所消耗。因此，后坐动能的绝大部分被驻退机所吸收。

一次发射驻退机吸收的能量为：

$$\begin{aligned} E_T &= \int_0^\lambda \phi_o dx + \int_0^\lambda \phi_H d\xi = \int_0^\lambda \phi_o dx + \int_0^\lambda P_{fH} d\xi \\ &= \int_0^\lambda \phi_o dx + \int_0^\lambda p d\xi - \int_0^\lambda R_f d\xi = \int_0^\lambda R dx - 2 \int_0^\lambda R_f d\xi \end{aligned} \quad (8-1)$$

若近似取  $R_f = Q_o(f \cos \varphi + v)$  (其中  $v = 0.3 \sim 0.4$ )

和  $\int_0^\lambda R dx \approx \frac{M_o}{2} W_{\max}^2 (1 - \eta_T)$

则驻退机所吸取的能量为：

$$E_T = \frac{M_o}{2} W_{\max}^2 (1 - \eta_T) - 2Q_o(f \cos \varphi + v) \lambda \quad (8-2)$$

或  $E_T \approx \frac{M_o}{2} W_{\max}^2 (1 - \eta_T)$  (8-3)

驻退机一次发射循环吸收的热量为：

$$q_1 = \frac{E_T}{J} \quad (\text{其中 } J = 427 \text{ 公斤力} \cdot \text{米} / \text{大卡}) \quad (8-4)$$

随着驻退机温度的升高，热量不断地向周围大气中散失。热量散失的量与驻退机散热的表面积  $F$  和它与周围大气的温差  $T - T_{at}$  成正比：

$$dq = \alpha F (T - T_{at}) dt \quad (8-5)$$

式中  $T$ ——驻退机的温度；

$T_{at}$ ——周围大气的温度；

$\alpha$ ——热散失系数  $\alpha = 10 \sim 20$  大卡/米<sup>2</sup>·时。

精确计算每次发射后驻退机净吸收的热量是困难的，计算连续发射若干发后驻退机净得的总热量就更困难。因此，须近似地用系数  $\eta$  来修正。发射  $n$  发后驻退机净得的热量为：

$$Q = \eta n q_1 \quad (8-6)$$

其中修正系数  $\eta = 0.7 \sim 0.9$ ，视驻退机的散热条件而定。

## 2. 驻退机的每发温升和火炮持续射击的发数

每发温升是表示驻退机工作性能的一个参量，它的大小反映火炮能持续射击炮弹的多少。考虑热散失每次发射的温升可用下式计算

$$\Delta T = \frac{\eta q_1}{c_l Q_l + c_g Q_g} \quad (8-7)$$

公式 (8-7) 的分母是驻退机总的热容量，其中  $c_l$  为液体的比热。斯切奥尔-M 液的  $c_l = 0.76 \sim 0.79$  千卡/公斤摄氏度，锭子油的  $c_l = 0.45 \sim 0.46$  千卡/公斤摄氏度。 $c_g$  为驻退机金属的比热，钢的  $c_g = 0.115$  千卡/公斤摄氏度。 $Q_l$ 、 $Q_g$  分别为驻退液及驻退机金属的重量。式 (8-7) 也可写成：

$$\Delta T = \eta \frac{1}{2} \frac{M_o W_{\max}^2 (1 - \eta_T)}{c_l Q_l + c_g Q_g} \quad (8-8)$$

在确定驻退机的结构尺寸时,除了紧塞与强度要求外,还要考虑驻退机的发热,通常每吨-米自由后坐动能约需 1~1.5 公升驻退液。射速较高的自动炮应使每发温升  $\Delta T \leq 1^\circ\text{C}$ 。威力较大的中、大口径火炮或射速较低的火炮应使  $\Delta T \leq 2^\circ\text{C}$  (见下表)。

火 炮 名 称	56-85 J	54-122 L	80-122 J	59-130 J
$\Delta T$ $^\circ\text{C}$		1.25	1.3	0.93
$\frac{W_c}{E_T}$ 公升/吨米	1.366	0.833	0.935	1.255

取标准温度  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ , 驻退液的极限温度通常为  $T_j = 90 \sim 100^\circ\text{C}$ , 最大允许温升为  $\Delta T_{\max} = T_j - T_0$ , 故持续射击的发数用下式计算:

$$n = \frac{\Delta T_{\max}}{\Delta T} \quad (8-9)$$

59-100 T 的  $n = 49.5$  发, 59-130 J 的  $n = 60$  发。

### 3. 驻退液的膨胀

驻退液随着温度的升高其体积的膨胀, 比驻退筒的膨胀大得多。计算液体膨胀量的目的, 在于为设计液量调节器提供依据。

每发液体膨胀量为:

$$\Delta W_{i1} = \beta W_i \Delta T_i \quad (8-10)$$

液体最大膨胀量为:

$$\Delta W_{\max} = \beta W_i \Delta T_{\max} \quad (8-11)$$

其中  $\beta$  为液体的体膨胀系数: 斯切奥尔液的  $\beta = 0.00055$ ; 斯切奥尔-M 液的  $\beta = 0.00065$ ; 锭子油的  $\beta = 0.00069$ 。

因此, 忽略钢件膨胀的影响, 一个发射循环液量调节器应吸收的液体为  $\Delta W_{i1}$ ; 液量调节器在极限温度时应吸收的液体为  $\Delta W_{\max}$ 。

## 二、气压式液量调节器的计算

气压式液体调节器的工作原理如图 8-1 所示。它是一个专门的容器, 以隔板上的小孔 (及弯管) 与驻退机中的液体相通。射击中, 液体发热或气温升高使液体膨胀时, 多余的液体沿弯管进入调节器内腔, 压缩其中的气体。冷却后, 气体膨胀使液体沿弯管流回到驻退机中。

设计气压式液体调节器, 主要是确定调节器的总体积及隔板上的小孔的大小。设计中应使: ①调节器中的气体初体积足够大, 以保证在驻退液接近极限温度, 调节器内气压升高后, 仍让驻退机内发热膨胀的液体在复进剩余力的作用下进入调节器腔; ②隔板上的小孔足够大, 以保证每发温升造成的液体膨胀量  $\Delta W_{i1}$  能在复进第二时期全部进入调节器内腔。

### 1. 气体初体积的确定

在接近极限温度时, 为保证复进到位, 并使多余的液体流入调节器内腔, 液量调节器中气体的压力  $p_s$  应小于复进到位时驻退机中液体的压力  $p_{sho}$ 。

调节器中气体的压力变化服从气体状态方程:

$$p_o W_{io} = RT_o, \quad p_s W_{is} = RT_s$$

式中  $p_o, p_s$ ——调节器中气体在平时及极限温度时的压力;

$W_{io}, W_{is}$ ——调节器中气体在平时及极限温度时的容积;

$T_o, T_s$ ——调节器中气体的平时温度和极限温度。

压力  $p_s$  可以表示为:

$$p_s = p_o \frac{W_{io}}{W_{is}} \cdot \frac{T_s}{T_o}$$

其中

$$W_{is} = W_{io} - \Delta W_{i\max}; \quad T_s = 273 + 15 = 288 \text{ 开};$$

$$T_s = 288 \text{ 开} + \Delta T_{\max}$$

所以

$$p_s = p_o \frac{W_{io}}{W_{io} - \Delta W_{i\max}} \cdot \frac{288 + \Delta T_{\max}}{288} \quad (8-12)$$

压力  $p_{s,ho}$  可参考图8-1用驻退杆的平衡方程求出:

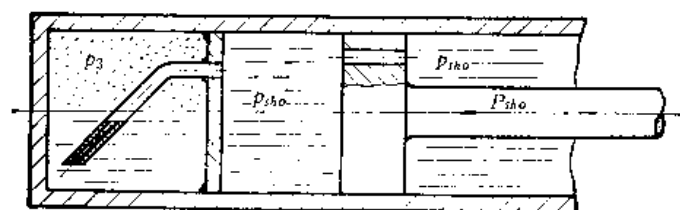


图8-1 气压式液量调节器原理

$$p_{s,ho} \frac{\pi}{4} D_T^2 - p_{s,ho} \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_T^2) - P_{s,ho} = 0$$

其中复进剩余力  $P_{s,ho} = P_{fo} - Q_o(f \cos \varphi_{\max} + S_{1st} \varphi_{\max} + v)$

令

$$A_g = \frac{\pi}{4} d_T^2$$

于是

$$p_{s,ho} = \frac{P_{s,ho}}{A_g} \quad (8-13)$$

根据要求, 应使  $p_s \leq p_{s,ho}$ , 将式 (8-12) 代入可最后得出调节器中气体的初体积:

$$W_{io} \geq \frac{\Delta W_{i\max}}{1 - \frac{288 + \Delta T_{\max}}{288} \cdot \frac{p_o}{p_{s,ho}}} \quad (8-14)$$

通常取气体初压为  $p_o = 1$  公斤力/厘米<sup>2</sup>,  $p_{s,ho} = 10 \sim 15$  公斤力/厘米<sup>2</sup>, 最大温升为  $\Delta T_{\max} = 75 \sim 85^\circ \text{C}$ , 这时

$$W_{io} \geq (1.09 \sim 1.14) \Delta W_{i\max} \quad (8-15)$$

液量调节器中通常盛有一半的液体, 因此, 可取液量调节器内腔的总的体积为:

$$W_T = (1.9 \sim 2.0) W_{io} \quad (8-16)$$

## 2. 隔板上小孔的面积确定

因为液量调节器中气压不高, 后坐及复进第一时期的时间较短, 所以在一次射击中

在此时期内由液量调节器流回到驻退机中的液体量很少，可忽略不计。在考虑隔板上小孔面积的大小时，主要是保证每发温升使液体膨胀量  $\Delta W_{i1}$  在复进第二时期中可靠地流入调节器中。即使使：

$$\Delta W_{i1} = \int_{t_0}^{t_1} a_r \omega_s dt = a_r \int_{t_0}^{t_1} \omega_s dt \quad (8-17)$$

其中  $a_r$ ——隔板上小孔的面积；

$\omega_s$ ——流经小孔时液体的速度。

由伯努利方程知：

$$p_2 - p_1 = -\frac{K_1 \gamma}{20g} \omega_1^2 \quad (8-18)$$

$$p_2 - p_3 = -\frac{K_3 \gamma}{20g} \omega_3^2 \quad (8-19)$$

其中  $p_1$ 、 $p_2$ 、 $p_3$ ——分别为驻退机工作腔、非工作腔和液量调节器腔中的液体压力。  
复进时  $p_1 = 0$ 。

合并两式得：

$$-\frac{K_1 \gamma}{20g} \omega_1^2 = p_3 + \frac{K_3 \gamma}{20g} \omega_3^2$$

在极限情况下， $p_3 = p_{rho}$ ，这时驻退机进入调节器腔液体的流速将是最小的，因此应以此时的条件来计算  $\omega_1$  与  $\omega_3$  的关系：

$$-\frac{K_1 \gamma}{20g} \omega_1^2 = p_{rho} + \frac{K_3 \gamma}{20g} \omega_3^2$$

整理得：

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{20g}{K_1 \gamma} p_{rho} + \frac{K_3}{K_1} \omega_3^2} = \sqrt{\frac{20g}{K_1 \gamma} \frac{p_{rho}}{\omega_3^2} + \frac{K_3}{K_1}} \omega_3 = \varepsilon \omega_3 \quad (8-20)$$

其中速度比  $\varepsilon = \sqrt{\frac{20g}{K_1 \gamma} \frac{p_{rho}}{\omega_3^2} + \frac{K_3}{K_1}}$ ，通常靠实验方法确定。

某些资料上给出  $\varepsilon = 1.6 \sim 2.0$ 。在式 (8-20) 给出速度关系的基础上就可以利用液流连续条件求得进入小孔的  $\omega_3$ ，由：

$$A_{of} d\xi = a_x \omega_1 dt + a_r \omega_s dt = (\varepsilon a_x + a_r) \omega_s dt$$

故

$$\omega_s = \frac{A_{of}}{\varepsilon a_x + a_r} \frac{d\xi}{dt} = \frac{A_{of}}{\varepsilon a_x + a_r} U \quad (8-21)$$

将式 (8-21) 代入 (8-17) 式，并改变相应的积分限：

$$\Delta W_{i1} = a_r \int_{t_0}^{t_1} \frac{A_{of}}{\varepsilon a_x + a_r} U dt = a_r \int_{\rho}^{\lambda} \frac{A_{of}}{\varepsilon a_x + a_r} d\xi$$

其中驻退机流液孔  $a_x$  是随复进行程  $\xi$  而变的量。由于它无解析式，因此只能用图解积分

法求其对  $\xi$  的平均值  $a_{xj} = \frac{\int_{\rho}^{\lambda} a_x d\xi}{\lambda - \rho}$ ，然后以  $a_{xj}$  作为常数代入上式进行积分，故

$$\Delta W_{i1} = a_r \int_{\rho}^{\lambda} \frac{A_{of}}{\varepsilon a_{xj} + a_r} d\xi = \frac{a_r A_{of}}{\varepsilon a_{xj} + a_r} \int_{\rho}^{\lambda} d\xi = \frac{a_r A_{of}}{\varepsilon a_{xj} + a_r} (\lambda - \rho) \quad (8-22)$$

用此式即可解出隔板上的小孔面积:

$$a_2 = \frac{\varepsilon a_{xj} \Delta W'_{i1}}{A_{oi}(\lambda + \rho) - \Delta W'_{i1}} \quad (8-23)$$

### 三、弹簧式液量调节器的计算

另一种较常用的是弹簧式液量调节器, 其原理如图 8-2 所示。弹簧式液量调节器的计算主要是设计弹簧的问题。隔板上的小孔的计算方法与气压式的相同。所设计的弹簧有两条要求: ①弹簧最大伸张时, 应有一定的初力  $P_1$ , 以使液体能被压回到驻退机; ②在极限温度时, 弹簧处于最大压缩时的弹簧力  $P_2$ , 对液体造成的压力  $p_s$  应小于  $p_{sho}$ , 以保证在接近极限温度时, 驻退机内多余的液体仍能进入调节器腔。

为保证第一项要求, 通常取弹簧的初力为调节器活塞紧塞具摩擦力的 1.5 倍, 即

$$P_1 = 1.5F \quad (8-24)$$

为了保证第二项要求, 由图 8-2 可看出, 应保证复进末期液体压力仍足以推动调节器活塞, 即

$$p_{sho} A_T \geq P_2 + F + p_o A_T$$

其中  $p_o$ ——大气压力,  $p_o = 1$  公斤/厘米<sup>2</sup>;

$A_T$ ——调节器活塞截面积。

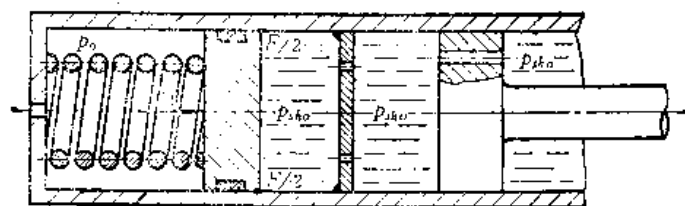


图8-2 弹簧式液量调节器原理

由上式即可得出在极限温度时弹簧最大压缩时的弹簧力:

$$P_2 \leq p_{sho} A_T - p_o A_T - F = (p_{sho} - p_o) A_T - F \quad (8-25)$$

对应于  $P_1$ 、 $P_2$  之间的弹簧工作行程为

$$X_{\max} = \frac{\Delta W_{i \max}}{A_T} \quad (8-26)$$

弹簧刚度系数:

$$C = \frac{P_2 - P_1}{X_{\max}} = \frac{(p_{sho} - p_o) A_T - 2.5F}{X_{\max}} \quad (8-27)$$

根据上列数据就可进行具体的弹簧尺寸设计, 并进一步确定调节器的结构和尺寸。54-122L 液量调节器弹簧的末力  $P_2 = 127$  公斤力; 隔板上的小孔直径为 1 毫米。60-122J 调节器弹簧初力  $P_1 = 113$  公斤力,  $P_2 = 248$  公斤力。

### 四、驻退机保留空间的计算

有些火炮的驻退机上不单独设置液量调节器, 而是让驻退机内不注满液体使之有一定的充满空气的空间。如 56-85 J 和 59-130 J 的驻退机就是这样 (见图 2-14 和 2-17), 它

们的原理如图 8-3 所示。实质上是把液量调节器中的气体直接置入驻退机中, 从而简化了驻退机的结构。

确定保留空间的体积同样也是依据条件  $p_3 \leq p_{sho}$ 。由于气体与液体在同一空间, 可认为它们的温度始终相同。当液体最大膨胀为  $\Delta W_{i\max}$  时, 温度亦由  $T_o$  增加到  $T_j$ , 由气体状态方程可得:

$$p_3 = p_o - \frac{W_{io}}{W_{is}} \frac{T_j}{T_o} \leq p_{sho} \quad (8-28)$$

故保留空间的体积也应为:

$$W_{io} \geq \frac{\Delta W_{i\max}}{1 - \frac{288 + \Delta T_{\max}}{288} \frac{p_o}{p_{sho}}} \quad (8-29)$$

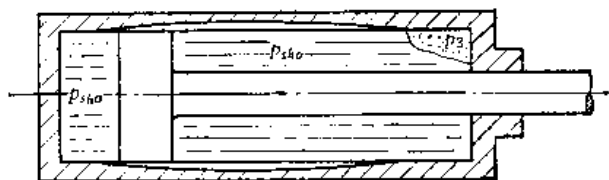


图8-3 保留空间的原理

56-85 J 驻退机中的液体量  $W_i = 4.75$  公升, 保留空间  $W_{io} = 0.25$  公升; 59-130 J 驻退机中液量  $W_i = 28.7$  公升, 保留空间  $W_{io} = 1.5$  公升。在设计中应尽可能使保留空间不要太大, 最好限制在驻退机总容量的 5% 以内, 主要办法是提高  $p_{sho}$ 。此外, 进行后坐及复进反面问题计算时, 应考虑保留空间对后坐和复进时液压阻力的影响。

## 第二节 紧塞装置摩擦力的计算

紧塞装置摩擦力  $F$ , 是后坐阻力也是复进阻力的一部分, 因此在反后坐装置计算中, 需要进行紧塞装置摩擦力的计算。在后坐正面问题计算时, 由于还没有驻退机和复进机的具体结构尺寸, 所以通常把紧塞装置摩擦力取为常数, 即  $F = vQ_o$ , 其中  $v = 0.3 \sim 0.5$ ; 计算复进正面问题时也是这样。在计算后坐反面问题和复进反面问题时, 确定了紧塞装置的结构及紧塞元件的尺寸, 就可以较准确地计算紧塞装置的摩擦力了。

紧塞装置的摩擦力, 是由紧塞元件对相对运动表面产生的径向压力造成的, 此径向压力是保证被紧塞的液体不沿相对运动表面外漏所必须的。径向压力通常包括不变压力和随液体压力变化的压力两部分, 前者是由于压螺或碟形簧等压紧紧塞元件产生的, 后者则是液体压力作用于紧塞元件而产生的。

### 一、紧塞垫的尺寸和摩擦力计算

紧塞垫是一种由石棉绳浸煮成的紧塞元件。它的结构尺寸可按下述经验公式选取 (也可参考现有火炮紧塞垫的尺寸选取)。

在只有一个紧塞垫的情况下:

$$\begin{aligned} h &= (1.5 \sim 2.5) \sqrt{d_1} \\ d_2 &= d_1 + (3 \sim 5) \sqrt{d_1} \\ l &= d_2 \quad \text{或} \quad l = (6 \sim 8) h \end{aligned}$$

其中  $d_1, d_2$ ——紧塞垫之内、外径;

$l, h$ ——紧塞垫之长与厚。

59-57 G 的  $d_1 = 32$  毫米,  $l = 40$  毫米,  $h = 8$  毫米; 56-85 J 的  $d_1 = 65$  毫米,  $l = 60$  毫米,  $h = 10$  毫米。有的火炮为了更好地产生径向压力, 将紧塞垫分成三段, 中间用梭

形截面的隔环隔开, 这时  $l$  应是几段紧塞垫的总长度。

为了求紧塞垫对运动件的摩擦力, 设紧塞装置中的紧塞垫靠压螺提供轴向压力  $p_z$ 。压螺拧紧后, 轴向压力是不变的, 紧塞垫传递给相对运动表面的径向压力以及由此产生的摩擦力也是不变的。此处不考虑摩擦对压螺轴向压力传递的影响, 即认为压螺对紧塞垫的轴向压力在整个紧塞垫的轴向长度上均匀相同。

由广义虎克定律可得径向压力,

$$p_r = \frac{\mu}{1 - \mu} p_z \quad (8-30)$$

其中  $\mu$  是紧塞垫的泊松比, 取  $\mu = 0.45$ , 则

$$p_r = 0.83 p_z \quad (8-31)$$

此压力造成对运动的摩擦阻力:

$$F_c = f_c \pi d_1 l_c p_r = 0.83 f_c \pi d_1 l_c p_z \quad (8-32)$$

其中  $f_c$ ——紧塞垫摩擦系数, 通常  $f_c = 0.07 \sim 0.10$ ,

$d_1$ ——相对运动表面的直径;

$l_c$ ——紧塞的宽度。

通常拧紧压螺时的轴向压力  $p_z$  在  $10 \sim 15$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 范围之内, 于是可以由式 (8-32) 计算出紧塞垫之摩擦阻力  $F_c$ , 显然它是取决于相对运动接触面积的常数。工厂在装配驻退机时, 一般要控制  $F_c$  力的大小。如对 54-122 L, 规定其  $F_c = 80 \sim 95$  公斤力。

有些复进机的紧塞装置, 是以牛皮环和橡胶圈作为紧塞元件的, 如 56-85 J 的复进机。其紧塞原理与紧塞垫相同, 但为了保证平时密封复进机中有压力的液体, 应使紧塞元件传递于相对运动表面上的径向压力大于液体压力, 即  $p_r > p$ 。因此, 在这种紧塞结构中, 总是以碟形簧对橡胶圈施加一个附加的轴向力  $P$ 。此时, 紧塞元件受到的轴向压力为:

$$p_z = p + \frac{P}{S}$$

式中  $p$ ——液体压力;

$S$ ——紧塞元件截面积,  $S = \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_1^2)$ 。

这种复进机紧塞元件摩擦力为:

$$F_f = 0.83 f \pi \left[ d_f l_{f1} \left( p + \frac{P_1}{S_1} \right) + D_f l_{f2} \left( p + \frac{P_2}{S_2} \right) \right] \quad (8-33)$$

式中  $d_f, D_f$ ——复进杆、复进筒内表面的直径;

$l_{f1}, l_{f2}$ ——紧塞元件与复进杆、紧塞元件与复进筒内表面的接触长度;

$P_1, P_2$ ——复进杆、活塞紧塞具碟形簧力;

$S_1, S_2$ ——复进杆、活塞上紧塞元件的截面积。

装配后碟形簧的力不变, 而后坐过程中液体压力不断变化, 因此, 这种结构紧塞具的摩擦力是由一个与压力  $p$  成正比的变量及一个常量组成的, 它可以写成:

$$\begin{aligned} F_f &= 0.83 f \pi (d_f l_{f1} + D_f l_{f2}) p + 0.83 f \pi \left( d_f l_{f1} \frac{P_1}{S_1} + D_f l_{f2} \frac{P_2}{S_2} \right) \\ &= F_{fB} + F_{f0} = \xi_f p + F_{f0} \end{aligned}$$

其中 $F_{fn}$ 是变量部分,  $F_{fn}=0.83f\pi(d_f l_{f1}+D_f l_{f2})p$ 。皮革和镀铬表面的摩擦系数, 在有驻退液润滑的条件下可取 $f=0.04$ , 56-85 J取 $f=0.07$ 。

当橡胶圈配以塑料(聚四氟乙烯)密封环的紧塞元件时, 这种紧塞元件摩擦力的计算同前, 通常取 $f\leq 0.05$ 。与泊松比有关的系数国外一些资料中不取0.83而取0.73。

## 二、皮碗摩擦力的计算

火炮紧塞装置不少是以皮碗作为紧塞元件的, 它的紧塞原理与紧塞垫不同。可以近似认为液体压力不变地传到相对运动表面(见图8-4), 即 $p_r=p$ 。因此紧塞皮碗的摩擦力为

$$F_B=f_B\pi D l_B p \quad (8-34)$$

其中  $l_B$ ——皮碗受液压作用的工作长度(对于橡胶皮碗也有用周边长计算的);

$D$ ——相对运动表面的直径。

当采用双皮碗时, 可认为进入第二个皮碗的液体压力已降至原来压力的一半, 如果两个皮碗相同时, 则其摩擦力为

$$F_B=1.5f_B\pi D l_B p \quad (8-35)$$

一般取橡胶皮碗的摩擦系数 $f_B=0.05\sim 0.06$ 。

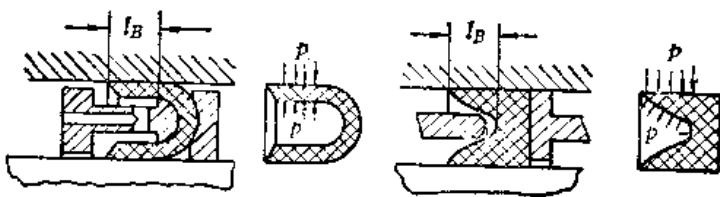


图8-4 皮碗上压力分布

显然, 以皮碗为紧塞元件的紧塞装置, 其摩擦力只与液体压力成正比。驻退机的皮碗摩擦力可写成:

$$F_{Bzt}=\xi_{zt}p_1 \quad (8-36)$$

复进机的皮碗摩擦力也可以写成:

$$F_{Bf}=\xi_f p_0 \quad (8-37)$$

$\xi_{zt}$ 和 $\xi_f$ 均为取决于皮碗结构尺寸及摩擦系数的常数。

由于驻退机和复进机工作时液体压力较高, 皮碗摩擦力较大, 为了准确地进行反面问题计算, 关键在于合理地确定摩擦系数。在条件许可的时候, 最好以实验的方法测出摩擦系数。

## 三、“O”形圈摩擦力的计算

“O”形圈密封液体的径向压力是由装配时有一定的紧缩量以及液体压力形成的。因此其摩擦力的大小取决于“O”形圈橡胶的硬度、紧缩量、工作压力以及工作条件下的投影面积等因素。紧缩量 $K$ 如图8-5所示。

“O”形圈摩擦力为:



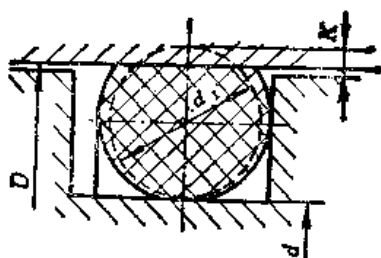


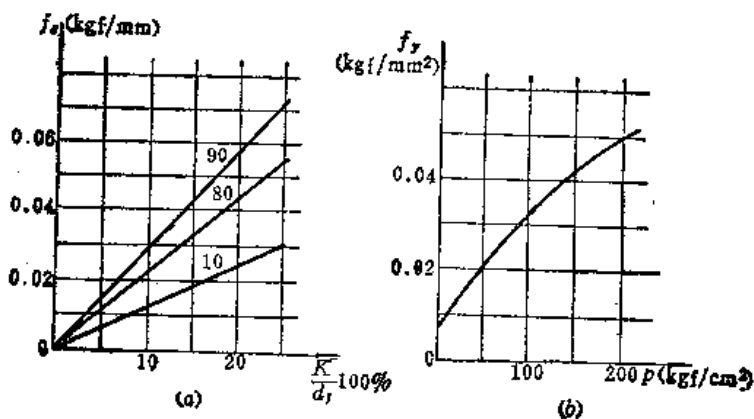
图8-5 “O”形圈的压缩量

$$F = F_e + F_y = f_e \pi D + f_y \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) \quad (8-38)$$

其中  $F_e$ ——紧缩量造成的摩擦力；

$F_y$ ——由承受的压力造成的摩擦力。

由相对紧缩量及橡胶的邵氏硬度查图 8-6 (a) 可得到系数  $f_e$  (公斤力/毫米)；由液体的工作压力查图 8-6 (b) 可得到相应的系数  $f_y$  (公斤力/毫米<sup>2</sup>)。若把图 8-6 中之  $f_y$  近似认

图8-6 系数  $f_e$ 、 $f_y$ 

为是过原点随压力按直线规律变化的量，即：

$$f_y \approx \alpha_y \cdot p$$

则

$$\alpha_y \approx \frac{f_y}{p} = \frac{0.05}{2} = 0.025$$

于是式 (8-38) 可近似写为：

$$F = f_e \pi D + 0.025 \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) p \quad (8-39)$$

綜上各节所述，整个反后坐装置的摩擦力最后都可以归纳成三个部分：随驻退机工作压力  $p_1$  而变的力；随复进机工作压力  $p$  而变的力及一个常数力，即

$$F = F_e + \xi_z p_1 + \xi_f p \quad (8-40)$$

这些摩擦力在进行后坐及复进反面问题计算时，应该分别并入驻退机液压阻力和复进机力，以便简化计算。

## 第九章 复 进

### 第一节 概 述

复进是火炮后坐结束后,后坐部分在复进机力的作用下,回复到待发位置的过程。在整个复进过程中,要求后坐部分平稳、无冲击地复进到位,并保证复进的静止性,稳定性。为了提高火炮的射速,应尽可能的减少复进时间,并且确实可靠地保证自动机和半自动机的工作。火炮复进时,也存在着火炮的后坐部分受力和运动问题以及全炮的受力问题。因此,我们必须研究火炮的全炮和后坐部分在复进时的受力和运动规律。

表9-1 火炮射击循环时间

火 炮 名 称	$t_k$	$t_f$	$t_k + t_f$	$t_k/t_f$
56-85 J	0.163"	0.417"	0.580"	1/2.56
54-122 L	0.168"	1.58"	1.745"	1/9.41
59-57 G	0.29"	0.145"	0.435"	1/0.5
59-100 G	0.175"	0.71"	0.885"	1/4.06

注:  $t_k$  后坐时间;  $t_f$  复进时间。

由复进机设计一章中我们知道,复进机的初力  $P_{f0}$  应大于最大射角时的后坐部分的重量分力和各种摩擦力之和。复进机末力  $P_{fk} = mP_{f0}$ 。可见复进机所贮存的能量不仅足以克服后坐部分的重量分力和摩擦力所做的功将它推回原位,而且使后坐部分在复进过程中获得相当大的速度。较高的复进速度是减短复进时间,提高发射速度以及向其它机构提供足够的能量所必需的。但是,如果复进到位时仍保持有较高的复进速度,就会产生强烈的冲击,从而破坏火炮的稳定性,静止性,甚至损坏火炮的零、部件。因此,火炮复进机的剩余能量在转化为后坐部分的复进动能以后,在复进过程中还要用复进的液压阻力将其消耗掉,保证复进到位时的复进速度接近于零。研究复进就是研究和解决不同火炮符合战术技术要求的最佳受力和运动规律以及如何在结构上实现这些规律。

取复进时的后坐部分为示力体。

$P_f$  复进机力

$Q$  后坐部分重力

$N_{1f}, N_{2f}$  摇架滑板的支反力

$T_{1f}, T_{2f}$  摇架滑板提供的摩擦力

$$T_f = T_{1f} + T_{2f} = f(N_{1f} + N_{2f})$$

$F_f$  紧塞具摩擦力

$\phi_f$  反后坐装置复进时提供的液压阻力

$$\phi_f = \phi_{of} + \phi_{kf} + \phi_{ff}$$

- $\phi_{of}$  液体从驻退机工作腔通过  $a_x$  流入工作腔的液压阻力 (在非工作腔真空消失以前, 尚无液体流过  $a_x$ ,  $\phi_{of} = 0$ )
- $\phi_{kf}$  液体流经复进机中的节制活瓣小孔的液压阻力
- $\phi_{ff}$  复进节制器提供的液压阻力
- $\varphi$  射角

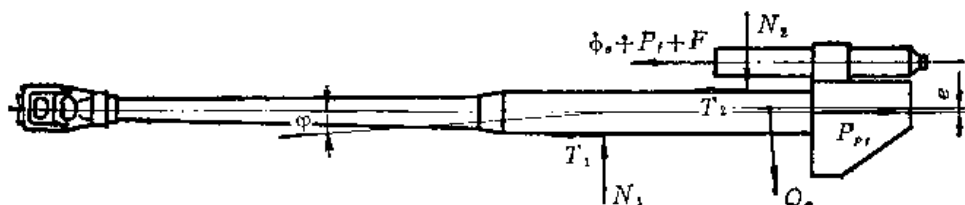


图9-1 复进时后坐部分的受力

在如图 9-1 所示力的作用下, 后坐部分沿炮膛轴线方向复进的运动微分方程为:

$$\frac{Q_o}{g} \frac{d^2\xi}{dt^2} = P_f - \phi_f - (F_f + T_f + Q_o \sin \varphi) \quad (9-1)$$

$\xi$  为复进行程, 以复进方向为正, 且有  $\xi = \lambda - x$ 。

记:

$$R_f = T_f + F_f + Q_o \sin \varphi \quad (9-2)$$

$R_f$  称为复进静阻力。

在复进正面问题计算中, 把静阻力  $R_f$  取为常数。

$$R_f = Q_o (\nu + f \cos \varphi + \sin \varphi) \quad (9-3)$$

在研究复进运动时, 常从复进机力中把各种静阻力减去, 单独研究复进剩余力  $P_{rk}$  和复进液压阻力  $\phi_f$  以及它们的变化对复进运动的影响。即:

$$P_{rk} = P_f - R_f = P_f - (F_f + T_f + Q_o \sin \varphi) \quad (9-4)$$

$P_{rk}$  称复进剩余力。

最后得运动微分方程:

$$\frac{Q_o}{g} \frac{d^2\xi}{dt^2} = P_{rk} - \phi_f \quad (9-5)$$

或

$$\frac{Q_o}{g} \frac{d^2\xi}{dt^2} = r \quad (9-6)$$

$r = P_{rk} - \phi_f$ , 称为复进合力。它的大小和正负表示复进运动加速度的大小和方向, 反映复进时火炮受力的大小和方向, 所以它是一个重要的参量。

$r > 0$ ,  $P_{rk} > \phi_f$ , 复进加速时期 (第一时期)。

$r < 0$ ,  $P_{rk} < \phi_f$ , 复进减速时期 (第二时期)。

$r = 0$ ,  $P_{rk} = \phi_f$ , 复进达到最大速度  $U = U_{\max}$ 。

为满足复进平稳的要求, 允许加速和减速交错出现。

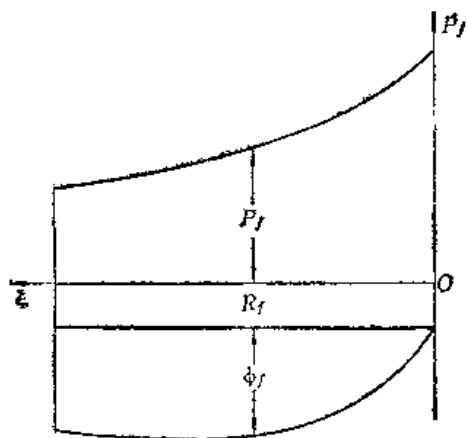


图9-2 复进时微分方程图解

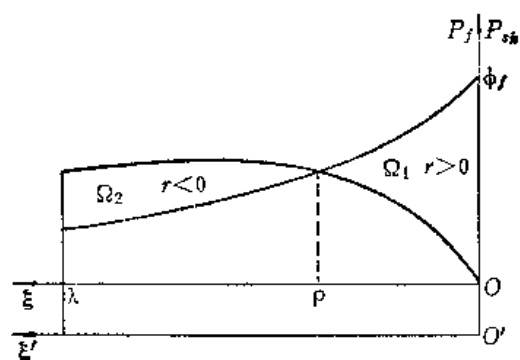


图9-3 复进制动图

复进剩余力  $P_{sh}$  是射角  $\varphi$  的函数。

$$P_{sh} = P_f - Q_0(\nu + f \cos \varphi + \sin \varphi)$$

从式中明显的可以看出，小射角时后坐部分的重量分力小，复进剩余力大，大射角时则相反。因而不同射角时的复进剩余能量  $\Delta E$  也有很大的不同，射角越小， $\Delta E$  就越大，射角越大则  $\Delta E$  越小。

$$\Delta E = \int_0^\lambda P_{sh} d\xi \quad (9-7)$$

例如：56-85 J 的  $Q_0 = 785$  公斤， $p_{fo} = 48$  公斤力/厘米<sup>2</sup>， $W_0 = 2067$  厘米<sup>3</sup>， $m = 3.62$ ， $\lambda = 650$  毫米，取  $n = 1.3$ ， $\nu = 0.4$ ， $f = 0.16$  可算出  $\varphi = 0^\circ$  时复进剩余能量，

$$\begin{aligned} \Delta E_{\varphi=0^\circ} &= \int_0^\lambda [P_f - Q_0(\nu + f)] d\xi \\ &= \frac{p_{fo} W_0}{n-1} \left( m^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) - Q_0(\nu + f) \lambda \\ &= 85800 \text{ 公斤力} \cdot \text{厘米} \end{aligned}$$

$\varphi = 35^\circ$  最大射角时的复进剩余能量，

$$\begin{aligned} \Delta E_{\varphi=35^\circ} &= \frac{p_{fo} W_0}{n-1} \left( m^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) - Q_0(\nu + f \cos 35^\circ + \sin 35^\circ) \lambda \\ &= 58100 \text{ 公斤力} \cdot \text{厘米} \end{aligned}$$

射角变化越大和压缩比越小，复进剩余能量的相对变化越大，因此在复进机设计时，应考虑复进剩余能量随射角变化的影响。

从复进要求无冲击出发，复进到位的速度应为零，即  $U_\lambda = 0$ 。对式 (9-5) 积分有

$$-\frac{Q_0}{2g} U_\lambda^2 = 0 = \int_0^\lambda (P_{sh} - \phi_f) d\xi = \int_0^\lambda r d\xi$$

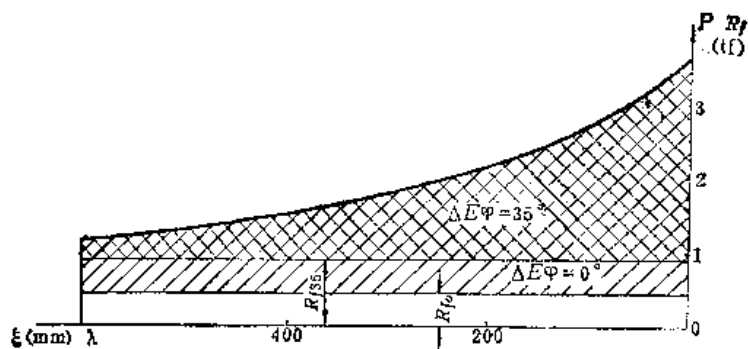


图9-4 56-85 J 复进剩余能量随射角变化曲线

即:

$$\int_0^{\lambda} P_{rA} d\xi = \int_0^{\lambda} \phi_r d\xi \quad (9-8)$$

从图 9-3 中可以看出,  $\Omega_1 = \Omega_2$ 。

以上说明, 在任何射角下, 复进时液压阻力在复进全长上所作的功都应抵消掉复进剩余能量。也就是说, 反后坐装置应在任何射角下都能将全部的复进剩余能量吸收掉。而  $\varphi = 0^\circ$  时剩余能量最多, 是复进节制最不利的工作条件, 因此通常是在  $\varphi = 0^\circ$  的条件下研究和设计复进节制机构。为了保证可靠的复进到位和各机构动作的确实可靠, 在任何射角下都应有足够的复进剩余能量。所以设计好复进节制机构后, 必须在最大射角 (特别是变后坐时), 最小号装药, 低温条件下校验复进运动, 校验各机构动作是否确实可靠和复进是否顺利到位, 复进时间是否合乎要求。不然就得重新设计复进机构或采取其它相应措施。

## 第二节 复进时火炮的静止性和稳定性

火炮复进时的静止性和稳定性也是保证火炮射击精度和密集度的重要条件之一, 所以我们从火炮复进时全炮的受力分析着手, 来建立火炮复进时的静止条件和稳定条件。

基本假设:

1. 火炮放置在水平面上, 所有的力都作用在火炮的对称垂直面内, 亦就是方向射角  $\psi = 0$ 。

2. 地面及炮架均为绝对刚体。

3. 复进时全炮处于平衡状态。

运用动静法原理, 将惯性力作为外力加入系统内, 可将动力学系统视为静力学系统来研究。因为复进过程中, 火炮后坐部分的加速度方向有变化, 为了方便, 将加速时期和减速时期分别作为两个时期来加以研究。

加速时期, 取全炮为示力对象, 后坐部分的惯性力  $I_r$  作用在后坐部分质心上, 其方向是沿炮膛轴线指向后坐方向, 其大小为:

$$I_r = \frac{Q}{g} \frac{d^2\xi}{dt^2} = r \quad (9-9)$$

根据假设所有作用力处于平衡。

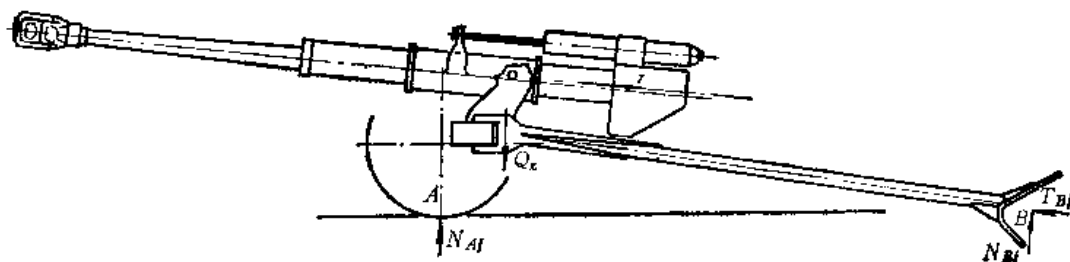


图9-5 复进加速时期火炮受力

$Q_x$  全炮重力

$I_f$  后坐部分的惯性力

$N_{Bf}, T_{Bf}$  地面对驻锄B支反力的垂直分量和水平分量

$N_{Af}$  地面对车轮的垂直支反力

从力图上可以明显的看出, 这受力状态与后坐惯性运动时期的受力状态完全相同, 只是主动力中过后坐部分质心向后的惯性力由后坐阻力 $R$ 改成复进合力 $r$ 。

$$R = P_f + \phi_o + F + T - Q_o \sin \varphi$$

$$r = P_f - \phi_f - F_f - T_f - Q_o \sin \varphi$$

显然,  $R \gg r$ 。由于在计算后坐时, 已保证了火炮的静止性和稳定性, 而复进加速时期火炮所受的力 $r$ 远比后坐时火炮所受的力 $R$ 为小, 所以复进加速时期火炮的静止性和稳定性是完全有保证的。

减速时期, 仍取全炮为示力对象, 后坐部分的惯性力 $I_f$ 变成了过后坐部分质心, 大小等于 $r$ 而方向沿炮膛轴线指向炮口方向的力(如图9-6所示), 这就使火炮构成一种完全不同于后坐时的受力状态。在惯性力 $I_f$ 的作用下, 有使驻锄向上抬起, 火炮绕车轮向前翻转以及整个火炮向前平移的趋势。为了保证火炮良好的战斗性能, 提高火炮的瞄准速度和精度, 提高射速, 要求火炮复进时不前移, 不向前翻转, 即保证火炮复进时的静止性和稳定性。

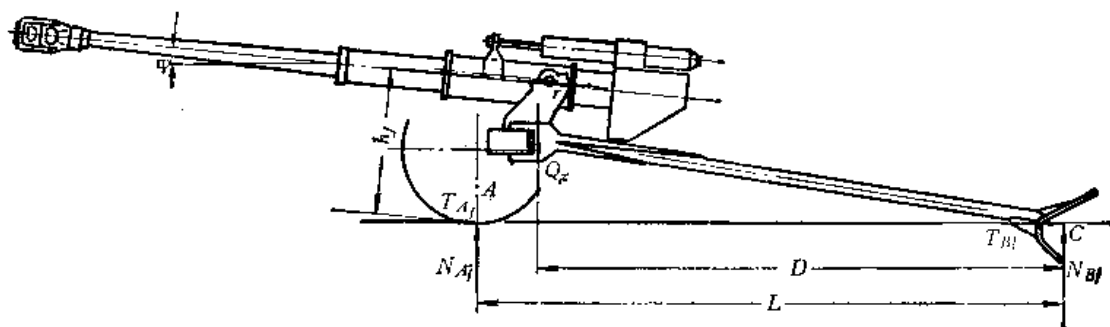


图9-6 复进减速时期全炮的受力

主动力:  $I_f, Q_x$

约束反力:  $N_{Af}, T_{Af}$  地面对车轮的垂直和水平支反力

$N_{Bf}, T_{Bf}$  地面对驻锄的垂直和水平支反力

必须说明, 驻锄的水平支反力 $T_{Bf}$ 不是土壤对下驻锄的正压力提供的, 因为下驻锄前方

由于后坐时驻锄板对土壤的压缩而造成的空隙和疏松, 土壤不可能提供水平反力, 所以认为水平支反力只是上驻锄板与地面的摩擦力提供的。

对如图 9-6 所示的力系, 可列平衡方程,

$$\Sigma F_x = T_{Af} + T_{Bf} - I_f \cos \varphi = 0 \quad (9-10)$$

$$\Sigma F_y = N_{Af} + N_{Bf} - Q_z + I_f \sin \varphi = 0 \quad (9-11)$$

$$\Sigma M_A = N_{Bf} L - Q_z (L - D) + I_f h_f = 0 \quad (9-12)$$

$f$ ,  $\mu$  分别是钢和土壤及车轮和土壤之间的摩擦系数。惯性力  $I_f$  在数值上等于复进合力  $r$ ,  $I_f = |r|$ ,

$$T_{Af} = \mu N_{Af} \quad (9-13)$$

$$T_{Bf} = f N_{Bf} \quad (9-14)$$

则有:

$$N_{Af} = \frac{1}{1 + \mu \tan \varphi} Q_z - \frac{1 + f \tan \varphi}{1 + \mu \tan \varphi} N_{Bf} \quad (9-15)$$

$$N_{Bf} = \frac{Q_z (L - D) - |r| h_f}{L} \quad (9-16)$$

$$|r| = \frac{\mu}{\cos \varphi} N_{Af} + \frac{f}{\cos \varphi} N_{Bf} \quad (9-17)$$

要保证火炮水平方向的静止, 要求车轮与驻锄提供足够的反力。从式 (9-17) 中可以看出, 射角  $\varphi$  最小时, 所提供的反作用力亦最小, 即:

$$|r| \leq T_{Af} + T_{Bf} = \mu N_{Af} + f N_{Bf} \quad (9-18)$$

车轮和驻锄所可能提供的最大反力为  $(T_{Af} + T_{Bf})$ , 则有:

$$(T_{Af} + T_{Bf}) = \mu N_{Af} + f N_{Bf} \quad (9-19)$$

因此火炮复进时的静止条件是:

$$|r| < |r_u| = \mu N_{Af} + f N_{Bf} \quad (9-20)$$

称  $|r_u|$  为保证静止性的极限复进合力。将式 (9-15), (9-16) 导出的  $N_{Af}$  和  $N_{Bf}$  代入式 (9-20), 并在  $\varphi = 0^\circ$  的条件下简化得出:

$$|r_u| = \frac{\mu Q_z - \frac{\mu - f}{L} Q_z \left[ L - D_{oo} + \frac{Q_o}{Q_z} (\lambda - \xi) \right]}{1 - \frac{\mu - f}{L} h_{fo}} \quad (9-21)$$

车轮与地面的摩擦系数, 有刹车时可认为  $\mu = 1$ , 无刹车时可认为  $\mu = 0$ 。驻锄板与地面的摩擦系数  $f = 0.3 \sim 0.4$ 。

车轮不刹车时的静止极限复进合力为:

$$|r_{\mu=0}| = \frac{f Q_z \left[ L - D_{oo} + \frac{Q_o}{Q_z} (\lambda - \xi) \right]}{L + f h_{fo}} \quad (9-22)$$

从式 (9-16) 可以看出, 为使火炮复进时不绕车轮转动, 应有  $N_{s_f} \geq 0$ , 亦即:

$$Q_s(L-D) \geq |r|h_f \quad (9-23)$$

$Q_s(L-D)$  称为复进稳定力矩,  $|r|h_f$  称为复进颠覆力矩。

复进时的稳定条件为:

$$|r| < |\bar{r}| = \frac{1}{h_f} \cdot Q_s(L-D) \quad (9-24)$$

由

$$Q_s D = Q_s D_{os} - Q_o X \cos \varphi$$

$$X = \lambda - \xi$$

则

$$Q_s(L-D) = Q_s(L-D_{os}) + Q_o(\lambda - \xi) \cos \varphi$$

惯性力  $I_f$  对  $A$  点的力臂  $h_f$  参考图 9-6 可得出

$$h_f = H_s \cos \varphi + d + (L - d_s) \sin \varphi$$

于是有:

$$|\bar{r}| = \frac{Q_s(L-D_{os}) + Q_o(\lambda - \xi) \cos \varphi}{H_s \cos \varphi + d + (L - d_s) \sin \varphi} \quad (9-25)$$

从式中可以明显的看出, 当射角  $\varphi$  一定时,  $|\bar{r}|$  值随复进行程  $\xi$  的增大而线性地减小, 即复进稳定性随  $\xi$  的增加而变差, 当  $\xi = \lambda$  时,  $|\bar{r}|$  值最小,

$$|\bar{r}_\lambda| = \frac{Q_s(L-D_{os})}{H_s \cos \varphi + d + (L - d_s) \sin \varphi} \quad (9-26)$$

就是说, 当  $\varphi$  一定时,  $\xi = \lambda$  时,  $|\bar{r}|$  具有最小值。但是对于不同射角  $\varphi$ , 复进到位时复进稳定性也不相同, 在某一射角必定具有其极值。我们取

$$Q_s(L-D_{os}) = Q_s(L-D_{os}) + Q_q l_q \cos \alpha - Q_q \cdot l_q \cdot \cos(\alpha + \varphi) = u(\varphi)$$

$$h_f = H_s \cos \varphi + d + (L - d_s) \sin \varphi = V(\varphi)$$

$$f(\varphi) = \frac{u(\varphi)}{V(\varphi)} = |\bar{r}_\lambda|$$

$$u'(\varphi) = Q_q l_q \sin(\alpha + \varphi)$$

$$u''(\varphi) = Q_q l_q \cos(\alpha + \varphi)$$

$$V'(\varphi) = -H_s \sin \varphi + (L - d_s) \cos \varphi$$

$$V''(\varphi) = -H_s \cos \varphi - (L - d_s) \sin \varphi$$

$$f'(\varphi) = \frac{u'(\varphi)V(\varphi) - u(\varphi)V'(\varphi)}{V^2(\varphi)}$$

$$f''(\varphi) = \frac{u''(\varphi)V(\varphi) - u(\varphi)V''(\varphi)}{V^2(\varphi)}$$

$$- \frac{2V'(\varphi)}{V^3(\varphi)} [u'(\varphi)V(\varphi) - u(\varphi)V'(\varphi)]$$



因为  $u(\varphi)$ 、 $V(\varphi)$ 、 $u'(\varphi)$ 、 $u''(\varphi)$  都大于零， $V''(\varphi)$  小于零，一般说  $V'(\varphi)$  小于零或者是很小的值。这样则有  $f''(\varphi) > 0$ ，说明  $f(\varphi)$  具有极小值。由  $f'(\varphi) = 0$  可求出  $|\bar{r}_x|$  最小值之  $\varphi_f$ 。

$$u'(\varphi)V(\varphi) - u(\varphi)V'(\varphi) = 0$$

$$\begin{aligned} & Q_q l_q \sin(\alpha + \varphi) [H_z \cos \varphi + d + (L - d_z) \sin \varphi] \\ & - [Q_z(L - D_{oo}) + Q_q l_q \cos \alpha - Q_q l_q \cos(\alpha + \varphi)] \\ & \times [-H_z \sin \varphi + (L - d_z) \cos \varphi] = 0 \end{aligned}$$

展开有

$$\begin{aligned} & \{Q_q l_q d \sin \alpha - [Q_z(L - D_{oo}) + Q_q l_q \cos \alpha] \\ & (L - d_z)\} \cos \varphi + \{Q_q l_q d \cos \alpha \\ & + [Q_z(L - D_{oo}) + Q_q l_q \cos \alpha] H_z\} \sin \varphi \\ & + Q_q l_q [H_z \sin \alpha + (L - d_z) \cos \alpha] = 0 \end{aligned}$$

令：

$$\begin{aligned} a &= Q_q l_q d \sin \alpha - [Q_z(L - D_{oo}) + Q_q l_q \cos \alpha] (L - d_z) \\ b &= Q_q l_q d \cos \alpha + [Q_z(L - D_{oo}) + Q_q l_q \cos \alpha] H_z \\ c &= Q_q l_q [H_z \sin \alpha + (L - d_z) \cos \alpha] \end{aligned}$$

则有：

$$a \cos \varphi + b \sin \varphi + c = 0$$

故有

$$\varphi_f = \sin^{-1} \frac{-c}{\sqrt{a^2 + b^2}} - \sin^{-1} \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (9-27)$$

取  $\varphi_f < 90^\circ$

一般为了计算方便， $Q_z \gg Q_q$ ， $l_q$  也很小，可忽略其影响，令  $Q_q l_q = 0$ ，亦即  $D_{oq} \approx D_{oo}$ ，则有：

$$\begin{aligned} a &= -Q_z(L - D_{oo})(L - d_z) \\ b &= Q_z(L - D_{oo})H_z \\ c &= 0 \end{aligned}$$

$$a \cos \varphi + b \sin \varphi = 0$$

$$\tan \varphi = -\frac{a}{b} = \frac{L - d_z}{H_z}$$

$$\varphi_f = \tan^{-1} \frac{L - d_z}{H_z}$$

或

$$\varphi_f = \sin^{-1} \frac{L - d_z}{\sqrt{(L - d_z)^2 + H_z^2}} \quad (9-28)$$

$\varphi_f$  我们称为复进极限稳定角。即使是在射角  $\varphi_f$  时，也应保证火炮的复进稳定性。也就是

设在  $\varphi_f$  时复进稳定性所允许的复进合力值最小。在复进极限稳定角  $\varphi_f$  时所允许的复进合力的极限值称为极限稳定复进合力  $r_j$ ;

$$r_j = \frac{Q_z(L - D_{\text{opf}}) + Q_o(\lambda - \xi)\cos\varphi_f}{H_z\cos\varphi_f + d + (L - d_z)\sin\varphi_f} \quad (9-29)$$

它是随复进行程而递减的直线, 称为复进极限稳定线。当  $\varphi \geq \varphi_f$  时, 稳定性所能允许的复进合力值都比较大。为了使火炮在任何射角时都能保证复进稳定性, 应从最不利的情况出发, 即有:

$$|r| < |r_j|$$

在具体设计复进节制器时, 还应留有一定的稳定余量,

$$|r| = \eta |r_j| \quad (9-30)$$

一般取  $\eta = 0.85 \sim 0.95$ 。

下面我们对复进静止性和稳定性进行讨论。为保证复进减速时期火炮的静止和稳定, 复进合力值要考虑三个相应的限制量  $|r_u|$ ,  $|r_{u=0}|$  和  $r_j$ 。通常情况下, 这三个量的关系为:

$$|r_u| > |r_j| > |r_{u=0}| \quad (9-31)$$

例如: 56-85 J 的  $Q_z = 1725$  公斤,  $D_{\text{op}} = 3402$  毫米,  $L = 3740$  毫米,  $H_z = 835$  毫米,  $d = -3.6$  毫米,  $d_z = 3220$  毫米。当  $\xi = \lambda$  时得出:

$$|r_u| = 1883 \text{ 公斤力} \quad |r_j| = 600 \text{ 公斤力} \quad |r_{u=0}| = 57.3 \text{ 公斤力}$$

因此, 射击时必须将车轮刹住。如果车轮不刹住,  $|r_{u=0}|$  很小, 复进的静止性是难以保证的。在将车轮刹住的情况下, 由于  $|r_j| < |r_u|$ , 只要保证了复进合力  $|r| < |r_j|$ , 即保证了火炮复进的稳定性, 那么火炮复进的静止性也可以得到保证。

对复进减速时期复进合力  $r$  的限制, 实际上是对复进液压阻力  $\phi_f$  的限制。因为  $r = P_{zh} - \phi_f$  或  $\phi_f = P_{zh} - r$ , 减速时期的  $r$  为负值, 因此有:

$$\phi_f = P_{zh} + |r| \leq P_{zh} + |r_j| \quad (9-32)$$

也就是说复进减速时期为了使后坐部分减速,  $\phi_f$  应大于  $P_{zh}$ , 但是其超过部分不能大于  $|r_j|$ , 式 (9-32) 是设计计算复进时考虑复进合力  $r$  变化规律的重要依据。

### 第三节 复进的运动分析

复进是火炮后坐部分在复进机力作用下的运动过程。为了使复进平稳无冲击, 并且使时间尽可能的缩短, 就要对复进合力的变化规律提出要求。为此首先要制定合理的复进制动图, 研究理想的复进液压阻力规律和进行复进运动诸元计算, 也就是对复进过程作动力学分析。这和后坐情况基本一致, 所不同的是研究复进制动时, 必须紧密地联系复进节制器的结构。

#### 一、复进制动图形制订的一般原则

复进制动图是复进剩余力  $P_{zh}$  和复进液压阻力  $\phi_f$  随复进行程变化的图形。因为  $r =$

$P_{sh} - \phi_f$ , 所以制动图也反映了复进合力  $r$  随复进行程的变化规律。在复进制动图中, 直接表示出复进液压阻力和复进剩余力的变化规律, 既可以看出复进剩余力在复进过程中所作的功如何被液压阻力所做的功所抵消, 又能够直接根据液压阻力的规律进行复进制动液孔的设计计算。图 9-7 是一种全长节制复进的制动图。从图中可以清楚地看出, 复进开始时,  $P_{sh} > \phi_f$ , 复进合力  $r > 0$ ; 复进后期  $P_{sh} < \phi_f$ , 则  $r < 0$ 。为了保证复进到位无冲击, 应使复进到位的速度为零。

$$\frac{Q_0}{2g} u_\lambda^2 = \int_0^\lambda (P_{sh} - \phi_f) d\xi = 0 \quad (9-33)$$

$$\int_0^\lambda P_{sh} d\xi = \int_0^\lambda \phi_f d\xi$$

$$\text{或} \quad \int_0^\rho r d\xi = \int_\rho^\lambda |r| d\xi \quad (9-34)$$

$$\Omega_1 = \Omega_2' + \Omega_2''$$

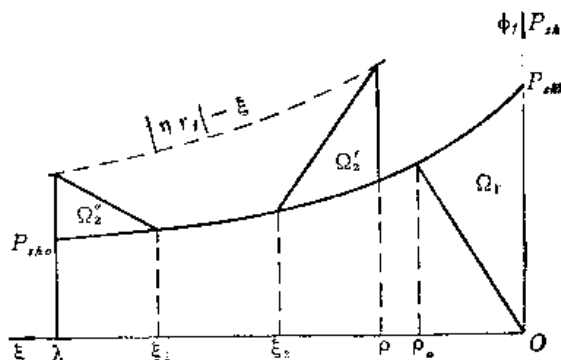


图 9-7 复进制动图举例

也就是说, 保证复进到位无冲击的条件就是液压阻力在复进全过程上所做的功全部抵消掉复进剩余能量。一般取  $U_\lambda = 0.1 \sim 0.15$  米/秒, 以保证后坐部分确实复进到位。考虑到复进剩余能量随射角而变化, 小射角时复进剩余能量多, 而任何射角都应该可靠的复进制动, 使复进剩余能量被液压阻力功消耗掉, 因此, 复进制动图所画的应是在最小射角或  $\varphi = 0^\circ$  时的  $P_{sh}$  和  $\phi_f$  图形, 并据此设计复进节制器。复进节制器设计完成后, 以最大射角  $\varphi_{\max}$  进行复进核算, 要求后坐部分仍能平稳的复进到位。

复进合力的变化不要太剧烈, 以保证复进的平稳性, 尤其不要使复进加速和减速出现多次反复。对于野炮, 应保证复进第二时期的火炮稳定性, 即应使  $|r| < |r_f|$ 。

在复进制动图上, 以虚线  $P_{sh} + |\eta r_f|$  画于驻退机真空消失点  $\rho$  以后, 作为对复进液压阻力  $\phi_f$  值的限制。当  $\phi_f$  超过  $P_{sh} + |\eta r_f|$  值时, 就不能保证复进第二时期火炮的稳定性。应当注意的是, 复进制动图虽然画的是  $\varphi = 0^\circ$  时的图形, 而  $|r_f|$  却是对应复进稳定极限角  $\varphi_f$  的数值, 这样设计可以更可靠的保证各种射角下火炮复进的稳定性。 $\rho$  点以后  $P_{sh} + |\eta r_f|$  曲线下的面积, 是复进液压阻力  $\phi_f$  在该时期内复进稳定性所允许的最大可能的做功面积, 它往往比复进剩余力整个曲线下的面积为小。为使液压阻力的功抵消掉全部复进剩余能量, 野炮往往在第一时期内就提供液压阻力, 因而野炮通常采用全长制动的复进节制器。图 9-7 就是这种复进制动图。固定式火炮不存在复进稳定性问题, 液压阻力  $\phi_f$  的数值不受限制, 通常采用复进后期的局部长度制动的复进节制器。它的特点是在开始很长的一段复进行程内将复进剩余能量全部或大部分转化为复进的动能, 以达到较高的复进速度, 从而缩短了复进时间。中, 小口径的高炮为了提高火炮射速, 都采用局部长度节制复进的制动图。对于野炮为了减短复进时间, 制动图应尽可能快地达到最大速度, 并使其保持较长的距离, 在保证复进稳定的条件下, 让液压阻力  $\phi_f$  的面积尽可能集中于复进的末期。

按复进制动图中液压阻力变化规律计算出的复进节制器沟槽尺寸, 应便于加工。例

如应尽量避免或少出现突跃和尖角, 这些突跃和尖角最容易出现在  $P$  点处。如图 9-8 所示的一种复进制动图, 它基本满足复进的要求, 但是在  $P$  点突然出现较大的  $\phi_{of}$ , 复进节制器液压阻力  $\phi_{ff}$  则必须向下速降, 因而复进节制器沟槽必然有由浅到深的突然变化。这在工艺上实现是相当困难的。

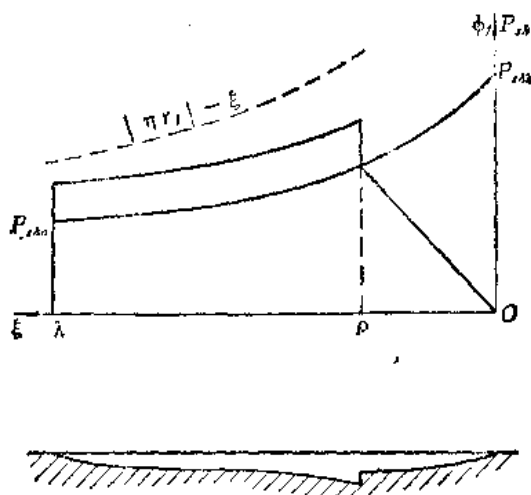


图9-8 野炮第四类复进制动图

## 二、驻退机真空消失位置

在复进制动图上有一个重要的转折点, 即复进合力的突跃点。这个点通常是驻退机非工作腔真空消失的复进行程点。该点的复进行程记为  $\rho$ 。后坐时, 由于驻退杆从驻退机中抽出而加大了驻退机内空间的体积, 形成了驻退机非工作腔的真空。复进中非工作腔真空消失以前, 我们假设没有液体从驻退机流液孔中流过。因此, 总的复进液压阻力  $\phi_f$  中不包含驻退机复进液压阻力  $\phi_{of}$ , 而只包含复进节制器液压阻力  $\phi_{ff}$  (如果是全长制动的活瓣), 和复进节制活瓣液压阻力  $\phi_{bf}$  (如果复进机中有复进节制活瓣)。  $\rho$  点以前,  $\phi_f$  通常比  $P_{c, \lambda}$  小, 所以是复进加速时期。一旦驻退机非工作腔真空消失, 其中的液体在活塞的推挤下以高速流经驻退机流液孔, 复进液压阻力  $\phi_f$  中突然增加了一项驻退机复进液压阻力  $\phi_{of}$ , 于是  $\phi_f$  变得比  $P_{c, \lambda}$  大, 从而使复进进入了减速时期。在制定复进制动图时, 根据反后坐装置的结构特点, 准确的求出  $\rho$  点是很重要的。

后坐时, 驻退杆自驻退筒中抽出, 在后坐终了时其体积为:

$$W_R = -\frac{\pi}{4} d_T^2 \lambda \quad (9-35)$$

这一体积由于后坐时  $p_1$  和  $p_3$  的存在, 只能出现在非工作腔中。复进时, 活塞移动使非工作腔体积缩小, 非工作腔的真空逐渐消失, 而工作腔的体积逐渐增大, 真空由非工作腔逐渐转移到工作腔。假设这一期间非工作腔的液体不流过驻退机流液孔, 复进到  $\rho$  点时, 这一过程结束。对节制杆式驻退机, 复进时活塞的工作面积为  $-\frac{\pi}{4}(D_T^2 - d_p^2)$ , 故

$$W_B = -\frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_p^2) \rho = -\frac{\pi}{4} d_T^2 \lambda$$

$$\rho = \frac{d_T^2}{D_T^2 - d_p^2} \quad (9-36)$$

现有的火炮  $\frac{d_T}{D_T} = \frac{1}{1.7} \sim \frac{1}{2.2}$ ,  $\rho = \left( \frac{1}{3} \sim \frac{1}{5} \right) \lambda$ , 必须指出的是, 实际上复进到  $\rho$  点以前, 驻退机流液孔中难免有液体流过, 因此驻退机流液孔开始提供液压阻力的实际复进行程  $\rho$  应大于理论计算值, 即:

$$\rho > \frac{d_T^2}{D_T^2 - d_p^2} \lambda$$

在整个复进过程中, 驻退机中的真空并没有消失。在复进到  $\rho$  点时, 仍有  $(\lambda - \rho)$  一段驻退杆留在驻退机的外面, 不过此时的真空存在于驻退机工作腔中。只有当火炮后坐部分复进到位时, 驻退机中由于驻退杆的抽出而造成的真空才最后消失。

### 三、典型复进制动图介绍

为了进一步掌握复进制动图的选择和分析方法, 这里给出典型的固定式火炮和野战火炮制动图以供参考。

图 9-9 是一种典型的固定式火炮的复进制动图 (59-57 G 的复进制动图)。在  $\rho$  点以前复进没有任何制动,  $r = P_{th}$ , 复进剩余力所作的功全部转化为后坐部分复进的动能。在  $\rho$  点以后一段行程上, 驻退机非工作腔液体流经驻退机流液孔流回工作腔, 产生了驻退机流液孔液压阻力  $\phi_{of}$ , 复进节制器仍然不参加工作,  $r = P_{th} - \phi_{of}$ 。最后当复进到  $\xi_1$  以后, 针式复进节制器开始起作用, 形成了较高的复进制动液压阻力, 此时  $r = P_{th} - \phi_{of} - \phi_{ff}$ 。在  $\xi_1 \sim \lambda$  的行程中, 有复进节制器参加工作, 才得以保证复进到位的速度近似等于零。火炮后坐部分在  $0 \sim \xi_1$  的行程中始终加速, 复进速度逐渐增加, 这样可以使复进时间大大减少, 以达到增加射速, 并可以使自动机有足够的能量完成动作。

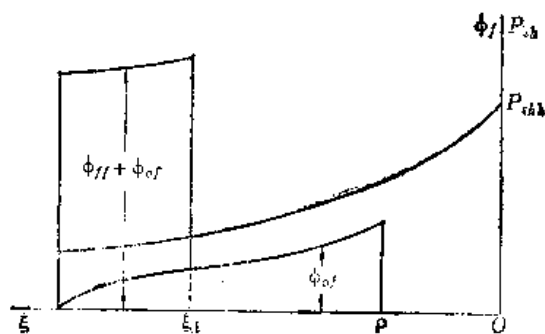


图9-9 固定式火炮复进制动图

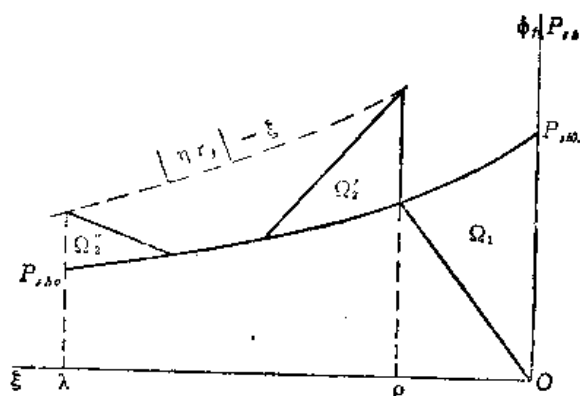


图9-10 野战火炮复进制动图

图 9-10 是一种较典型的野炮复进制动图, 它是复进全长上节制复进的制动图。它把整个复进行程分为五段:  $0 \sim \rho_0$ 、 $\rho_0 \sim \xi_2$ 、 $\xi_2 \sim \lambda$  三段复进合力  $r$  为行程的线性函数; 而  $\rho_0 \sim \rho$ 、 $\xi_2 \sim \xi_3$  二段  $r = 0$ , 即  $P_{th} = \phi_f$ 。在第二时期, 始终两点复进合力不超过稳定极限。这种制动图所以使第二段  $r = 0$ , 主要是为了把  $U_p$  控制在规定的数值上, 保证  $\rho$

点复进稳定条件, 又使复进节制沟槽没有跳跃。后一段  $r = 0$ , 是为了在保证复进到位稳定条件的前提下, 尽量提高复进速度, 以减少复进时间。

$o \sim \rho_o$  段:

通常  $o \sim \rho_o$  段取  $r$  为由  $P_{sh}$  至  $o$  的线性函数, 表达式为

$$r = \frac{P_{sh}}{\rho_o}(\rho_o - \xi) \quad (9-37)$$

$\rho_o$  越大, 这一阶段越长,  $U_{\rho_o}$  越高, 因为  $-\frac{Q_o}{2g} U_{\rho_o}^2 = -\frac{1}{2} P_{sh} \rho_o$  但  $U_{\rho_o}$  的数值是  $\rho$  点的结构条件限制的。为使  $\rho$  点的复进节制器沟槽深度连续变化, 应使  $\rho$  点处突然增加的驻退机液孔液压阻力  $\phi_{of\rho}$  正好等于  $\rho$  点所允许的复进合力值  $|\eta r_{j\rho}|$ , 即  $\phi_{of\rho} = |\eta r_{j\rho}|$ 。同时,  $\rho$  点驻退机液孔液压阻力又等于  $\phi_{of\rho} = f_f(a_{x\rho}) U_{\rho}^2$ ,  $\rho$  点的流液孔面积  $a_{x\rho}$  是确定的, 因此只要控制  $\rho$  点的复进速度  $U_{\rho}$  就满足上述要求。即:

$$\phi_{of\rho} = f_f(a_{x\rho}) U_{\rho}^2 = |\eta r_{j\rho}| \quad (9-38)$$

$$U_{\rho}^2 = \frac{|\eta r_{j\rho}|}{f_f(a_{x\rho})}$$

因为第二阶段  $\rho_o \sim \rho$  的  $r = 0$ , 故  $U_{\rho} = U_{\rho_o}$ 。根据动能定理,  $\rho_o$  点前复进合力所作的功等于后坐部分复进动能, 即:

$$-\frac{1}{2} P_{sh} \rho_o = -\frac{Q_o}{2g} U_{\rho_o}^2 = -\frac{Q_o}{2g} U_{\rho}^2 = -\frac{Q_o}{2g} \frac{|\eta r_{j\rho}|}{f_f(a_{x\rho})}$$

故有

$$\rho_o = \frac{Q_o}{g} \frac{|\eta r_{j\rho}|}{P_{sh}} \frac{1}{f_f(a_{x\rho})} \quad (9-39)$$

式 (9-39) 中,  $Q_o$ 、 $|\eta r_{j\rho}|$ 、 $P_{sh}$ 、 $f_f(a_{x\rho})$  均为已知, 这样可以求得  $\rho_o$ 。这阶段的复进合力规律即可确定。

$\rho_o \sim \rho$  段,  $r = 0$ , 保持了复进速度不变,  $U = U_{\rho_o} = U_{\rho}$ 。

$\rho \sim \xi_2$  段: 这段也取复进合力由  $|\eta r_{j\rho}|$  变化到 0 的线性规律。

即:

$$|r| = |\eta r_{j\rho}| \frac{\xi_2 - \xi}{\xi_2 - \rho} \quad (9-40)$$

$\xi_2$  点是选定的, 通常取  $\xi_2 - \rho = \left( \frac{1}{3} \sim \frac{1}{4} \right) (\lambda - \rho)$ 。

$\xi_2 \sim \xi_3$  段:

为了保持较高的复进速度, 也取  $r = 0$ 。  $U = U_{\xi_2} = U_{\xi_3}$ 。

$\xi_3 \sim \lambda$  段:

取复进合力由 0 到  $|r_k| = |\eta r_{jk}|$  的线性变化规律, 即:

$$|r| = |r_k| \frac{\xi - \xi_3}{\lambda - \xi_3} \quad (9-41)$$

其中  $\xi_2$  点的位置影响本阶段复进合力下的面积。根据制动图制订原则, 应使  $\Omega_1 = \Omega'_2 + \Omega''_2$ ,

$$\Omega_1 = \frac{Q_0}{2g} U_p^2 \quad \Omega'_2 = \frac{1}{2} |\eta r_{jp}| (\xi_2 - \rho)$$

$$\Omega''_2 = \frac{1}{2} |r_k| (\lambda - \xi_3)$$

$$\frac{Q_0}{2g} U_p^2 = \frac{1}{2} |\eta r_{jp}| (\xi_2 - \rho) + \frac{1}{2} |r_k| (\lambda - \xi_3)$$

$$\xi_3 = \lambda + \frac{|\eta r_{jp}|}{|\eta r_{jk}|} (\xi_2 - \rho) - \frac{Q_0}{g} \frac{U_p^2}{|\eta r_{jk}|} \quad (9-42)$$

在复进制动图上各力的变化规律确定以后, 即可进行复进运动的计算。

#### 四、复进运动计算

由于复进制动图选定复进合力为行程变化的函数, 因此只要积分复进微分方程, 即可求得复进运动速度跟复进行程的函数关系。

$$\text{由} \quad \frac{Q_0}{g} \frac{dU}{dt} = r$$

$$\text{有} \quad \frac{Q_0}{g} U \frac{dU}{d\xi} = r$$

$$dU^2 = \frac{2g}{Q_0} r d\xi$$

$$\int_{U_1}^{U_2} dU^2 = \int_{\xi_1}^{\xi_2} \frac{2g}{Q_0} r d\xi \quad (9-43)$$

固定式火炮(以上面介绍的制动图为例):

$0 \sim \rho$  段:  $r = P_{sh}$ , 而  $P_{sh}$  是行程的函数, 则有:

$$\int_0^U dU^2 = \int_0^\xi \frac{2g}{Q_0} P_{sh} d\xi$$

$$U^2 = \frac{2g}{Q_0} \int_0^\xi P_{sh} d\xi$$

$\rho \sim \xi_1$  段:  $r = P_{sh} - \phi_{of} = P_{sh} - f_f(a_x) U^2$ ,  $a_x$  是  $\xi$  的函数, 所以  $\phi_{of}$  是  $\xi$ ,  $U$  的非线性函数, 上面的微分方程不能直接积分, 一般采用数值积分的方法逐点计算。

$\xi_1 \sim \lambda$  段: 根据结构的要求定下  $\xi_1$  点后, 接上段方法计算到  $\xi_1$  点, 得  $U_{\xi_1}$ 。应使

$$\int_{U_{\xi_1}}^{U_\lambda} dU^2 = \frac{2g}{Q_0} \int_{\xi_1}^\lambda r d\xi$$

一般根据结构和自动机的要求,  $U_\lambda$  是事先给定的,  $r$  取为常数。

$$U_\lambda^2 - U_{\xi_1}^2 = \frac{2g}{Q_0} (\lambda - \xi_1) r$$

$$r = \frac{Q_0}{2g} \frac{U_\lambda^2 - U_{\xi_1}^2}{\lambda - \xi_1}$$

$$|r| = \frac{Q_0}{2g} \frac{U_{\xi_1}^2 - U_\lambda^2}{\lambda - \xi_1}$$

则有:

$$\int_{U_{\xi_1}}^U dU^2 = \frac{2g}{Q_0} \int_{\xi_1}^{\xi} r d\xi$$

$$U^2 = U_{\xi_1}^2 - \frac{U_{\xi_1}^2 - U_\lambda^2}{\lambda - \xi_1} (\xi - \xi_1) \quad (9-44)$$

野战火炮(以图9-10为例):

将各段的  $r$  对  $\xi$  的关系式代入(9-43), 即可求出  $U^2$  对  $\xi$  的关系式。

$0 \sim \rho_0$  段:

$$\int_0^U dU^2 = \int_0^{\xi} \frac{2g}{Q_0} \frac{P_{sh\lambda}}{\rho_0} (\rho_0 - \xi) d\xi$$

$$U^2 = \frac{2g}{Q_0} \frac{P_{sh\lambda}}{\rho_0} \left( \rho_0 \xi - \frac{1}{2} \xi^2 \right)$$

$$\xi = 0, U = U_0 = 0; \quad \xi = \rho_0, U^2 = U_{\rho_0}^2 = \frac{g}{Q_0} P_{sh} \rho_0$$

$\rho \sim \xi_2$  段:

$$U^2 = U_{\rho}^2 - \frac{2g}{Q_0} \frac{|\eta r_{jp}|}{\xi_2 - \rho} \left( \xi_2 \xi - \frac{1}{2} \xi^2 - \xi_2 \rho + \frac{1}{2} \rho^2 \right)$$

$$\text{当 } \xi = \xi_2 \text{ 时, } U_{\xi_2}^2 = U_{\rho}^2 - \frac{g}{Q_0} |\eta r_{jp}| (\xi_2 - \rho)$$

$\xi_3 \sim \lambda$  段:

$$U^2 = U_{\xi_3}^2 - \frac{g}{Q_0} |\eta r_{j\lambda}| \frac{(\xi - \xi_3)^2}{\lambda - \xi_3}$$

当  $\xi = \lambda$  时, 联系到  $U_{\lambda 3} = U_{\xi_2}$  及  $\xi_2$  值,

$$U_{\lambda}^2 = U_{\xi_2}^2 - \frac{g}{Q_0} |\eta r_{j\lambda}| (\lambda - \xi_3) = 0$$

#### 第四节 全长复进制动的复进节制器设计

研究了复进时的受力和运动计算以后, 就可以进行复进节制器的设计, 以实现所设想的复进受力和运动规律。在结构分析一章里, 已经介绍了各种复进节制器的结构型式。现可根据选定的制动图, 选择相应的结构型式。复进节制器的设计实际上就是确定复进节制液孔的结构方式、形状和尺寸的问题。对于野炮的复进制动图, 一般采用全长复进制动的复进节制器。最常用的结构型式是装配在驻退机中的节制杆沟槽式复进节制器, 它的原理如图6-11所示。在后坐时, 复进节制器工作腔的液体是充满的, 复进一开始即将节制杆端部的活瓣关闭。节制腔中的液体在节制活塞的作用下只能从两条沟槽流到驻



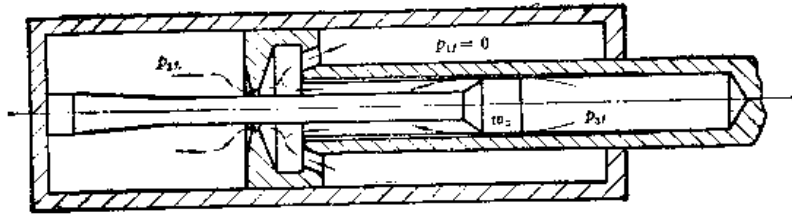


图9-11 节制杆沟槽式复进节制器

退机的工作腔。这样，复进一开始就产生复进节制器的液压阻力  $\phi_{ff}$ 。在驻退机的非工作腔真空消失以后，驻退机流液孔又提供液压阻力  $\phi_{of}$ ，这两部分构成了复进时的液压阻力  $\phi_f$ 。

研究复进时的液压阻力的方法和后坐时的完全一样，假设也相同。现以图9-11所示的节制杆沟槽式复进节制器为例说明。

$$A_{of} = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_P^2) \text{ —— 复进时驻退机活塞工作面积；}$$

$$A_{ff} = \frac{\pi}{4} d_1^2 \text{ —— 复进节制器活塞工作面积；}$$

$D_T$  —— 驻退筒内径；

$d_P$  —— 节制环内径；

$d_1$  —— 驻退杆内径或驻退杆尾杆内径；

$p_{2f}$  —— 驻退机非工作腔的压力；

$p_{3f}$  —— 复进节制器复进时工作腔压力；

$w_2$  —— 液流由驻退机非工作腔经  $a_x$  流入工作腔的绝对速度；

$w'_2$  —— 液流由驻退机非工作腔经  $a_x$  流入工作腔的相对速度；

$w_3$  —— 液流由节制器工作腔经变截面流液孔流入驻退机工作腔的绝对速度；

$w'_3$  —— 液流由节制器工作腔经变截面流液孔流入驻退机工作腔的相对速度；

$a_f$  —— 复进节制器流液孔面积。

液体经驻退机非工作腔经  $a_x$  流入工作腔的速度由连续方程得出：

$$(A_{of} + a_x) d\xi = a_x w'_2 dt$$

$$w'_2 = \frac{A_{of} + a_x}{a_x} U$$

$$w_2 = w'_2 - U = \frac{A_{of}}{a_x} U$$

将  $w_2$  代入伯努利方程，并考虑液体能量损失，

$$p_{2f} = \frac{K_1 \gamma}{20 g} \left( \frac{A_{of}}{a_x} \right)^2 U^2 \quad (9-45)$$

$K_1$  为液压阻力系数， $K_1 = 1.4 \sim 1.6$ 。

复进时驻退机提供的液压阻力为:

$$\phi_{of} = A_{of} p_{zf} = \frac{K_1 \gamma}{20 g} A_{of} \left( \frac{A_{of}}{a_z} \right)^2 U^2 = f_f(a_z) U^2 \quad (9-46)$$

其中 
$$f_f(a_z) = \frac{K_1 \gamma}{20 g} \frac{A_{of}^3}{a_z^2}$$

流经复进节制器流液孔的液流速度, 由液体的连续方程得出, 即:

$$(A_{ff} + a_f) d\xi = w_s a_f dt$$

$$w_s = \frac{A_{ff} + a_f}{a_f} U$$

将  $w_s$  代入伯努利方程, 并考虑液体能量损失, 则有:

$$p_{zf} = \frac{K_2 \gamma}{20 g} \left( \frac{A_{ff} + a_f}{a_f} \right)^2 U^2 \quad (9-47)$$

$K_2$  为复进节制器液压阻力系数,  $K = (3 \sim 4) K_1$

复进节制器的液压阻力为

$$\phi_{ff} = A_{ff} p_{zf} = \frac{K_2 \gamma}{20 g} A_{ff} \left( \frac{A_{ff} + a_f}{a_f} \right)^2 U^2 = f_f(a_f) U^2 \quad (9-48)$$

其中: 
$$f_f(a_f) = \frac{K_2 \gamma}{20 g} A_{ff} \left( \frac{A_{ff} + a_f}{a_f} \right)^2$$

在制动图中, 我们选定复进合力  $r$  的规律, 则有:  $r = p_{sh} - \phi_f = P_{sh} - \phi_{of} - \phi_{ff}$ , 或

$$\phi_{ff} = P_{sh} - \phi_{of} - r \quad (9-49)$$

说明复进合力  $r$  的变化规律是依靠控制复进节制器流液孔面积  $a_f$  的变化而控制  $\phi_{ff}$  的规律来实现的。根据上述结果, 我们可以取得各段的  $\phi_{ff}$ , 并且由  $r$  计算出各段的复进速度  $U$ 。这样就可以求得各段的相应的  $a_f$  值。由式(9-48)得:

$$a_f = \frac{A_{ff}}{\sqrt{\frac{1}{C_2 A_{ff}} \frac{\phi_{ff}}{U^2} - 1}} \quad (9-50)$$

其中: 
$$C_2 = \frac{K_2 \gamma}{20 g}$$

根据上面公式, 我们可以求出  $a_f - \xi$ 。考虑到装配误差的影响和工艺加工的可能性, 对流液孔面积须进行调整。调整后再进行反面计算, 检验调整的合理性和各种不同射击条件下, 其工作的可靠性。

## 第五节 局部长度复进制动的复进节制器设计

固定式火炮由于有不稳定性问题, 要求复进时间短的特点而采用复进末期制动的针式复进节制器。图9-12就是59-57 G局部长度复进制动的原理图, 其工作原理跟一般复进节制器相同。

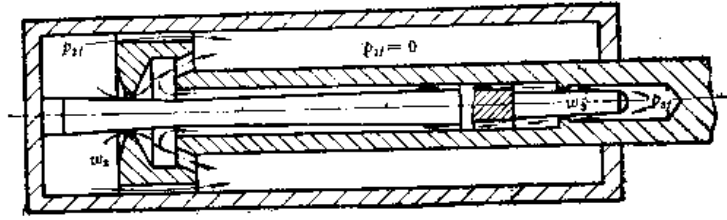


图9-12 针式复进节制器

非工作腔真空消失以前复进不被制动。真空消失以后，液体推动游动活塞打开活塞头上的两条纵向沟槽，非工作腔液体沿此沟槽及后坐流液孔两条通路流向驻退机工作腔。这样由于流液孔面积的增大，只有较小的液压阻力 $\phi_{of}$ 制动复进。在复进最后的95毫米的一段行程上，针式复进节制杆插入驻退杆尾杆的复进节制工作腔时才存在 $\phi_{ff}$ 。这段行程上的液压阻力 $\phi_f$ 包括了驻退机液压阻力和复进节制器液压阻力 $\phi_{ff}$ 。

真空消失以后，液体由非工作腔流向工作腔的两股液流具有相同的液压阻力系数，两条纵向沟槽的截面积为 $a_o$ ，由液流的连续方程得出两股液流的速度

$$(A_{of} + a_x) d\xi = w'_2 (a_o + a_x) dt$$

$$w'_2 = \frac{A_{of} + a_x}{a_o + a_x} U$$

$$w_2 = w'_2 - U = \frac{A_{of} - a_o}{a_o + a_x} U$$

将 $w_2$ 代入伯努利方程后，得出：

$$p_{2f} = \frac{K_1 \gamma}{20 g} \left( \frac{A_{of} - a_o}{a_o + a_x} \right)^2 U^2 \quad (9-51)$$

驻退机的液压阻力为：

$$\phi_{of} = \frac{K_1 \gamma}{20 g} (A_{of} - a_o) \left( \frac{A_{of} - a_o}{a_o + a_x} \right)^2 U^2 = f_1(a_x) U^2 \quad (9-52)$$

其中：

$$f_1(a_x) = \frac{K_1 \gamma}{20 g} (A_{of} - a_o) \left( \frac{A_{of} - a_o}{a_o + a_x} \right)^2$$

复进节制器的液压阻力的求法跟上述相似。根据连续方程

$$A_{ff} d\xi = a_f w_3 dt$$

$$w_3 = \frac{A_{ff}}{a_f} U$$

将 $w_3$ 代入伯努利方程得

$$p_{3f} = \frac{K_2 \gamma}{20 g} \left( \frac{A_{ff}}{a_f} \right)^2 U^2 \quad (9-53)$$

复进节制器的液压阻力为：

$$\phi_{ff} = p_{3f} \cdot A_{ff} = \frac{K_2 \gamma}{20 g} \frac{A_{ff}^3}{a_f^2} U^2 = f_f(a_f) U^2 \quad (9-54)$$

其中:

$$f_f(a_f) = \frac{K_2 \gamma}{20 g} \frac{A_{fj}^3}{a_f^2}$$

公式中的液压阻力系数 $K_1$ ,  $K_2$ 通常根据实验测出的 $p_{2f}$ ,  $p_{3f}$ 值及相应的复进速度值 $U$ , 由公式(9-51)和(9-53)来反求它们的积分平均值。然后用来计算液压阻力及流液孔面积。

由于这种针式复进节制器只在复进末期起作用, 所以前阶段不存在节制器流液孔面积设计问题。这样可以直接对前段进行复进反面问题计算, 对应各复进行程 $\xi$ 求出相应的复进速度 $U$ , 直到 $\xi_1$ 。在针式复进节制器工作的那一段, 通常选定常数复进合力的变化规律, 使复进合力在该段上作功, 直至复进终了符合复进速度。

$$r = P_{sh} - \phi_f = P_{sh} - \phi_{of} - \phi_{ff} = \frac{1}{\lambda - \xi_1} \frac{Q_o}{g} U_1^2$$

$$\phi_{ff} = P_{sh} - \phi_{of} - r$$

由式(9-54)得出:

$$a_f = \frac{A_{fj}}{\sqrt{\frac{1}{C_2 A_{fj}} - \frac{\phi_{ff}}{U^2}}} \quad (9-55)$$

对应 $\xi$ 逐点求出右边各项, 这就保证了常数复进合力的变化规律。

其流液孔面积的变化规律, 亦应按工艺的可能性进行调整, 最终进行反面问题计算, 检验其调整的合理性。

## 第六节 复进反面问题计算

复进反面问题的计算是在复进节制流液孔调整好以后, 按火炮结构、不同的装填条件以及气象条件计算复进运动。也就是说在已知 $a_f - \xi$ 的情况下, 求出 $U - \xi$ ,  $r - \xi$ 的实际变化规律, 计算复进总时间, 检验设计的合理性和工作的可靠性。通常在复进节制流液孔调整后, 进行二种情况的反面问题计算。

1. 全装药、 $\varphi = 0^\circ$ 、最高药温, 检验复进合力是否超过稳定极限, 尤其在复进到位时的速度是否过大, 以致造成较大的冲击和振动。

2. 最小号装药、 $\varphi = \varphi_{\max}$ 、最低药温, 检验自动机和半自动机是否能正常工作, 复进是否到位。

复进反面计算, 主要是求得复进速度 $U$ 和复进合力 $r$ 对复进行程 $\xi$ 的变化规律。除复进剩余力 $P_{sh}$ 外, 其它与液压阻力 $\phi_{of}$ 、 $\phi_{ff}$ 有关的量 $a_s$ 、 $a_f$ 对 $\xi$ 没有解析表达式。因此只能对复进运动微分方程进行数值积分求解。

$$\frac{Q_o}{g} \frac{d^2 \xi}{dt^2} = \frac{Q_o}{g} U \frac{dU}{d\xi} = r \quad (9-56)$$

$$dU^2 = \frac{2g}{Q_o} r d\xi = \frac{2g}{Q_o} (P_{sh} - \phi_{of} - \phi_{ff}) d\xi$$

认为在足够小的复进行程区间 $\Delta \xi_i$ 内, 式中的各力 $P_{sh}$ 、 $\phi_{of}$ 、 $\phi_{ff}$ 均按其两端点的数值所连

成的直线变化, 以便于积分。

$$\frac{Q_o}{2g}(U_i^2 - U_{i-1}^2) = r_{pi} \Delta \xi_i \quad (9-57)$$

$$r_{pi} = \frac{1}{2}(r_i + r_{i-1})$$

$$r_i = P_{shi} - f_f(a_{xi})U_i^2 - f_f(a_{fi})U_i^2$$

$$r_{pi} = \frac{1}{2} \{ [P_{shi} + P_{shi-1} - (f_f(a_{xi}) + f_f(a_{fi}))U_i^2] \\ - [f_f(a_{xi-1}) + f_f(a_{fi-1}))U_{i-1}^2] \} \quad (9-58)$$

式中:

$$P_{shi} = P_{fi} - (F_{fi} + T_f + Q_o \sin \varphi)$$

$$P_{fi} = P_{fo} \left( \frac{s}{s - \lambda + \xi_i} \right)^n$$

$P_{fi}$   $i$  点的复进机力

$T_f$  摇架导轨摩擦力,  $T_f = f Q_o \cos \varphi$

$F_{fi}$   $i$  点的紧塞具摩擦力

$$U_i^2 = U_{i-1}^2 + \frac{2g}{Q_o} \Delta \xi_i r_{pi} = \frac{g}{Q_o} (P_{shi} + P_{shi-1}) \Delta \xi_i \\ - \frac{g}{Q_o} [f_f(a_{xi}) + f_f(a_{fi}))U_i^2 \Delta \xi_i \\ + \left\{ 1 - \frac{g}{Q_o} [f_f(a_{xi-1}) + f_f(a_{fi-1})) \Delta \xi_i \right\} U_{i-1}^2 \quad (9-59)$$

通过移项整理

$$U_i^2 = \frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2 + \frac{C_i}{A_i} \quad (9-60)$$

其中:

$$A_i = 1 + \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i [f_f(a_{xi}) + f_f(a_{fi}))]$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i [f_f(a_{xi-1}) + f_f(a_{fi-1}))]$$

$$C_i = \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i (P_{shi} + P_{shi-1})$$

求得 $\xi_i$ 点的速度 $U_i$ 以后, 即可求得液压阻力和复进阻力:

$$\phi_{ofi} = f_f(a_{xi})U_i^2$$

$$\phi_{fii} = f_f(a_{fi})U_i^2$$

$$r_i = P_{shi} - \phi_{ofi} - \phi_{fii}$$

在该区间内的复进时间为:

$$\Delta t_{ii} = \frac{2\Delta \xi_i}{U_i + U_{i-1}} \quad (9-61)$$

复进的总时间为:

$$t_f = \sum \Delta t_{fi} = \sum \frac{2\Delta \xi_i}{U_i + U_{i-1}}$$

行程间隔  $\Delta \xi_i$  的大小, 根据后坐长度、液压阻力的变化, 流液孔面积的变化而不同, 一般应小于50毫米。但是在复进开始、 $\rho$  点附近、及复进到位处应把间隔取小。

流液孔调整完后以及确定射击条件后, 可对应行程  $\xi_i$  计算出相应的  $P_{shi}$ 、 $f_f(a_{xi})$ 、 $f_f(a_{fi})$  的数值, 由  $\xi_1 = 0$ 、 $U_1 = 0$ 、 $P_{sh1} = P_{shi}$ 、 $\phi_{of1} = 0$ 、 $\phi_{fi1} = 0$  作为第一点开始计算, 其计算表格可参照表 (9-2)。

表9-2 复进反面问题计算表

$$\text{常数计算: } \rho = \frac{2g}{Q_0} \Delta \xi_i = \frac{K_1 \gamma}{20g} A_{of} = \frac{K_2 \gamma}{20g} A_{fi} =$$

1	公 式	单 位	0	1	...	$\rho$	$\rho + 1$	...
2	$\xi_i$	毫米	0					
3	$\Delta \xi_i$	毫米						
4	$a_{xi}$	厘米 <sup>2</sup>	—	—	—	$a_{xp}$		
5	$f_f(a_{xi}) = \frac{K_1 \gamma}{20g} A_{of} \left( \frac{A_{of} + a_{xi}}{a_{xi}} \right)^2$	公斤力/(米/秒) <sup>2</sup>	—	—	—	$f(a_{xp})$		
6	$a_{fi}$	厘米 <sup>2</sup>						
7	$f_f(a_{fi}) = \frac{K_2 \gamma}{20g} A_{fi} \left( \frac{A_{fi} + a_{fi}}{a_{fi}} \right)^2$	公斤力/(米/秒) <sup>2</sup>						
8	$A_i = 1 + \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{xi}) + f_f(a_{fi})]$							
9	$B_i = 1 - \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{xi-1}) + f_f(a_{fi-1})]$							
10	$\frac{B_i}{A_i}$							
11	$P_{fi} = P_{fo} \left( S - \frac{S}{\lambda + \xi_i} \right)^n$	公斤						
12	$P_{shi} = P_{fi} - R_{fi}$	公斤						
13	$C_i = \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i (P_{shi} + P_{shi-1})$	(米/秒) <sup>2</sup>						
14	$\frac{C_i}{A_i}$	(米/秒) <sup>2</sup>						
15	$\frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2$	(米/秒) <sup>2</sup>	0					
16	$U_i^2 = \frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2 + \frac{C_i}{A_i}$	(米/秒) <sup>2</sup>						
17	$U_i$	米/秒						
18	$\Delta t_{fi} = \frac{2\Delta \xi_i}{U_i + U_{i-1}}$	10 <sup>-3</sup> 秒						

应当注意的是,  $f_f(a_x)$  和  $f_f(a_f)$  只有在驻退机和复进节制器起作用时才存在。如果在某一区间有附加阻力, 亦应该考虑在复进合力一项内。在真空消失的  $\rho$  点处,  $\phi_{of}$  突然

出现。在使用公式求速度 $U_{\rho+1}$ 时应加入 $f_f(a_{x\rho})$ 及 $f_f(a_{x\rho+1})$ 这一项。计算的最后结果得到 $P_{rh}-\xi$ 、 $\phi_f-\xi$ 、 $U-\xi$ 等曲线。

### 第七节 部分长度上流液孔为常数的复进节制器设计

由于复进速度（一般野炮的最大复进速度为 $2\text{ M/S}$ 左右或更小）远比后坐速度为小，复进节制器的液压阻力比后坐液压阻力小得多，并且工作面积较小，所以复进节制流液孔的面积很小，即复进节制沟槽的深度很浅，因此制造公差对制动规律的影响比较敏感。按图9-10的制动图设计的复进节制沟槽，工艺性很差，特别是在 $\rho$ 和 $\xi$ 点处有尖角。目前大部分制式野炮（如54-122 L、54-76 J、56-85 J、60-122 J、59-130 J、59-1-130 J等）均采用部分长度上流液孔为常数的复进节制器。这样，可以在相当长一段行程上使沟槽保持不变深度，只是在复进终了段使流液孔逐渐减小。这既可改善工艺性，又能保证野炮较理想的复进运动规律。图9-13表示的就是这种复进制动图。

这种制动图是节制杆沟槽式复进节制器最常用的。由于它很长一段的流液孔是不变的，它的复进合力就不是简单的直线变化规律，而有它自己的特殊规律性，所以必须研究它的设计计算方法。

这种制动图把整个复进运动分为三部分。

$0 \sim \rho$ ：非工作腔真空消失以前，只有常数流液孔 $a_{fo}$ 提供液压阻力 $\phi_{ff}$ 而起节制作用。

$\rho \sim l$ ：非工作腔真空消失，驻退机流液孔 $a_x$ 参加作用。此时复进节制器流液孔仍为 $a_{fo}$ ，它们共同提供液压阻力 $\phi_f = \phi_{of} + \phi_{ff}$ 。

$l \sim \lambda$ ：复进末期必须逐渐减小复进节制器流液孔 $a_f$ ，以提供较大的液压阻力以满足复进要求。该段复进节制器流液孔是变化的。

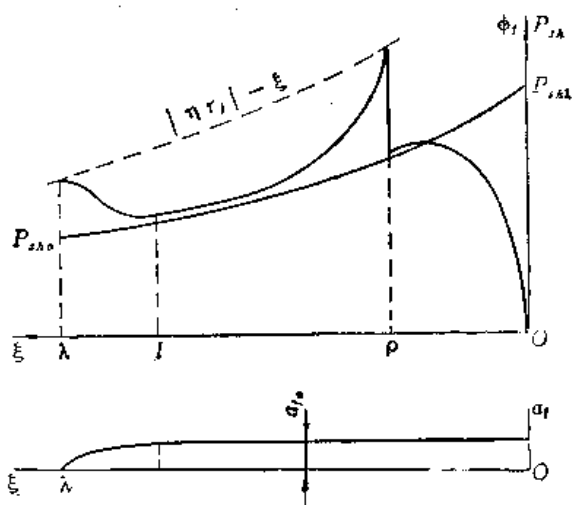


图9-13 局部长度上流液孔为常数的复进制动图

#### 一、常数流液孔的确定和第一段力和运动的计算

第一段中只有常数流液孔提供复进液压阻力 $\phi_f = \phi_{ff} = f_f(a_{fo})U^2$ ，它是复进速度 $U$ 的解析函数。复进剩余力 $P_{rh}$ 也可写成对 $\xi$ 比较容易积分的解析函数形式。这样力和运动规律可以直接解复进运动微分方程，则：

$$\frac{dU^2}{d\xi} = \frac{2g}{Q_o} P_{rh} - \frac{2g}{Q_o} f_f(a_{fo})U^2 \quad (9-62)$$

式中的 $P_{rh}$ 可写成 $\xi$ 的近似方便积分的解析函数表达式

$$P_{rh} = P_{rh0} \cdot e^{-a \frac{\xi}{\rho}} \quad (9-63)$$

其中常数  $\alpha$  是复进剩余力规律的符合系数,

$$\xi = 0 \text{ 时, } P_{sh} = P_{sh_0} \cdot e^0 = P_{sh_0}$$

$$\xi = \rho \text{ 时 } P_{sh} = P_{sh_0} \cdot e^{-\alpha} = P_{sh\rho}$$

解此联立式得:

$$\alpha = \ln \frac{P_{sh_0}}{P_{sh\rho}} \quad (9-64)$$

在  $\xi = 0 \sim \rho$  段中, 这种指数关系式表示的复进剩余力的变化规律, 与实际的复进剩余力的规律比较相近, 且函数关系简单。因为  $a_{f_0}$  是常数, 故  $f_f(a_{f_0})$  亦是常数。令

$$P_H = \frac{2g}{Q_0} f_f(a_{f_0})$$

则复进运动微分方程可改写成:

$$\frac{dU^2}{d\xi} = \frac{2g}{Q_0} P_{sh_0} e^{-\alpha \frac{\xi}{\rho}} - P_H U^2 \quad (9-65)$$

式 (9-65) 是一个一阶线性微分方程。其通式为:

$$\frac{dY}{dX} + P(X)Y = Q(X)$$

它的通解是:

$$\begin{aligned} U^2 &= e^{-\int P_H d\xi} \left[ \int \frac{2g}{Q_0} P_{sh_0} e^{-\alpha \frac{\xi}{\rho}} \cdot e^{\int P_H d\xi} d\xi + c \right] \\ &= \frac{\frac{2g}{Q_0} P_{sh_0}}{P_H - \frac{\alpha}{\rho}} \cdot e^{-\alpha \frac{\xi}{\rho}} + c \cdot e^{-P_H \xi} \end{aligned}$$

将起始条件  $\xi = 0$  时,  $U = 0$  代入可求出积分常数  $c$ ,

$$\begin{aligned} 0 &= \frac{\frac{2g}{Q_0} P_{sh_0}}{P_H - \frac{\alpha}{\rho}} + c \\ c &= -\frac{\frac{2g}{Q_0} P_{sh_0}}{P_H - \frac{\alpha}{\rho}} \end{aligned}$$

最后得:

$$U^2 = \frac{\frac{2g}{Q_0} P_{sh_0}}{P_H - \frac{\alpha}{\rho}} (e^{-\alpha \frac{\xi}{\rho}} - e^{-P_H \xi}) \quad (9-66)$$

上式表示了在第一段中复进速度  $U$  和复进行程  $\xi$  之间存在解析关系, 可将常数代入, 求得  $\xi = \rho$  时的  $U^2$ ,



$$U_p^2 = \frac{\frac{2g}{Q_0} P_{shp}}{P_{ff} - \frac{a}{\rho}} (e^{-a} - e^{a f f \cdot p}) \quad (9-67)$$

其第一段设计的关键是确定常数流液孔 $a_{fo}$ 的大小。因为只有确定了 $a_{fo}$ ，其它计算才有可能进行。其常数流液孔的大小主要取决于 $\rho$ 点的复进稳定性。

$$|r_p| = |P_{shp} - f_f(a_{sp})U_p^2 - f_f(a_{fo})U_p^2| \leq |\eta r_{jp}|$$

当 $a_{fo}$ 较大时， $U_p$ 亦大，这样使 $\rho$ 点的稳定性不能满足。可以减小 $a_{fo}$ 重新验算，直到满足稳定条件为止。设计 $a_{fo}$ 的原则是保证满足复进稳定的条件下，获得尽可能大的复进速度，以缩短复进时间。

第一次试算时，可根据此种制动图的特点，认为 $|\eta r_{jp}| = \phi_{ofp}$ ，则

$$U_p^2 = \frac{|\eta r_{jp}|}{f_f(a_{sp})}$$

相应的有 $\phi_{ffp} = P_{shp}$ ，则

$$U_p^2 = \frac{P_{shp}}{f_f(a_{fo})}$$

两式合并得：

$$\frac{|\eta r_{jp}|}{f_f(a_{sp})} = \frac{P_{shp}}{f_f(a_{fo})} = \frac{P_{shp}}{\frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{a_{fo}^3}}$$

则：

$$a_{fo} = \sqrt[3]{\frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{P_{shp}} \frac{|\eta r_{jp}|}{f_f(a_{sp})}} \quad (9-68)$$

在实际的制动图上， $|\eta r_{jp}| > \phi_{ofp}$ ，按以上的计算结果得到稍大的 $a_{fo}$ 。第一次试算确定常数流液孔的尺寸时，可适当减小 $a_{fo}$ 值，以便减少试算次数。沟槽通常有两条，其宽度视火炮口径的不同在（5～8）毫米范围内，深度应取尾数为0.1毫米为单位，以便于加工和测量。

确定了 $a_{fo}$ 以后，可以按式（9-66）计算 $\xi - U^2$ ，这样可以取得各点的 $\phi_{ff}$ 值，作出复进合力，复进运动的曲线图。但是实际上，指数规律表示的复进剩余力在首尾两点符合较好，其中间比实际复进剩余力稍偏大，因此用指数规律表示的复进剩余力计算得到的 $a_{fo}$ 偏小。有时为了尽可能满足稳定而得到大的复进速度，把理论计算得到的 $a_{fo}$ 值向大的方向归整，而后用数值积分的方法进行反面问题计算以求出实际的 $U^2$ 、 $\phi_{ff}$ 及 $r$ 。

$$U_i^2 = \frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2 + \frac{C_i}{A_i}$$

其中：

$$A_i = 1 + \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i f_f(a_{fo})$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i f_f(a_{fo})$$

$$C_i = \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i (P_{shi} + P_{shi-1})$$

$$\phi_{ff} = f_f(a_{fo}) U^2$$

$$r = P_f - (F_f + T_f + Q_0 \sin \varphi) - \phi_{ff}$$

因为  $a_{fo}$  是常数, 如果  $\Delta \xi_i$  相等, 则  $A_i$ 、 $B_i$  均为常数, 用列表方法计算十分简单。但在接近  $\rho$  点时的  $\Delta \xi$  一般与  $\Delta \xi_i$  不会等值, 此时  $A_i$ 、 $B_i$ 、 $C_i$  的数值也会不同, 计算时应特别注意, 以免出错。

## 二、第二段 ( $\rho \sim l$ ) 的计算

第二段  $a_{fo}$  仍然不变。跟第一段不同的是驻退机流液孔参加了工作。其变化规律已在后坐计算时确定, 因此只需直接使用数值积分的方法进行反面计算, 求出  $U$ ,  $\phi_f = \phi_{of} + \phi_{ff}$  和  $r$ , 并作出其变化曲线。在  $\rho$  点附近  $\phi_f$  变化剧烈, 故应该取较小的积分间隔 ( $\Delta \xi_i < 20$  毫米), 并且进行三点以上的计算。

## 三、第三段 ( $l \sim \lambda$ ) 的设计和计算

第三段中, 复进制动流液孔  $a_f$  是变化的, 因此和其它制动图一样须作正面问题和反面问题计算。为了便于调整该段流液孔, 复进合力通常取为复进行程  $\xi$  按余弦函数变化规律。

$$|r| = |r_l| + \frac{|\eta r_{jk}| - |r_l|}{2} \left( 1 - \cos \frac{\xi - l}{\lambda - l} \pi \right) \quad (9-69)$$

将其代入复进运动微分方程, 即可求得相应的运动规律。

$$\frac{Q_0}{2g} dU^2 = -|r| d\xi$$

$$\begin{aligned} U^2 &= U_l^2 - \frac{2g}{Q_0} \left\{ |r_l| (\xi - l) + \frac{|\eta r_{jk}| - |r_l|}{2} \left[ (\xi - l) - \frac{\lambda - \rho}{\pi} \sin \frac{\xi - l}{\lambda - l} \pi \right] \right\} \\ &= U_l^2 - \frac{g}{Q_0} \left[ (|\eta r_{jk}| + |r_l|) (\xi - l) - \frac{|\eta r_{jk}| - |r_l|}{\pi} (\lambda - l) \sin \frac{\xi - l}{\lambda - l} \pi \right] \quad (9-70) \end{aligned}$$

式中:  $l$  ——第二段的结束点和第三段起始点;

$|r_l|$ ,  $U_l$  ——对应的复进合力和复进速度;

$|\eta r_{jk}|$  ——复进到位时稳定性所允许的最大复进合力值。

从式 (9-70) 中可以清楚看出, 要对第三段进行计算, 必须首先确定  $l$  值。确定  $l$  的依据是使第三段复进合力所作的功全部抵消掉  $l$  处后坐部分复进动能。即  $\xi = \lambda$  时,  $U = 0$ 。于是,

$$\frac{1}{2} - (|\eta r_{jk}| + |r_l|) (\lambda - l) = \frac{Q_0}{2g} U_l^2$$

或

$$U_1^2 - \frac{g}{Q_0} (|\eta r_{jk}| + |r_l|) (\lambda - l) = 0 \quad (9-71)$$

1点也是第二段的结束点,而第二段的计算是用数值积分法,因此不能用解析方法直接求得1值,只能以第二段计算的后面几点中的数据 $\xi_i$ 、 $|r_i|$ 、 $U_i$ 代入式(6-71)中试算。当出现零时,此组数据即为所要求的1、 $|r_l|$ 和 $U_l$ 。如果各组数据代入其结果均不为零时,则取临近出现正值和负值的一组数据,按行程折半插值,直至近似为零或者以对应零插值求取1、 $|r_l|$ 、 $U_l$ 。当确定了1以后,即可以计算出第三段理想的复进合力和运动规律,即得到 $r-\xi$ 、 $U^2-\xi$ 曲线。然后按式(9-50)计算出复进节制流液孔 $a_l$ 的理想变化规律,用前述的方法进行调整后,再进行反面问题计算,反求出实际的复进合力变化规律和运动规律。反面问题计算的结果,其复进合力值应在复进稳定极限范围内。为了保证后坐部分确实能复进到位,还要使复进速度 $U_\lambda$ 在0.1~0.15米/秒范围内。如果不满足上述两个条件,则要求重新调整复进节制流液孔,再进行反面问题计算,直到满足为止。

第三段复进合力可以取别的变化规律,例取直线规律,即:

$$|r| = |r_l| + \frac{|\eta r_{jk}| - |r_l|}{\lambda - l} \quad (9-72)$$

其正面和反面问题计算思路跟上述相同。这样常数流液孔的长度1占整个复进行程的比例也不相同,1大约在 $(2/3 \sim 1/2)\lambda$ 之间,如56—85J的 $l = 0.69\lambda$ ; 59—130J的 $l = 0.60\lambda$ 。

对于不同的第三段复进合力规律,有不同的1值,应参考现有相同类型火炮所设计的1值,以减少试算次数。绘制驻退杆零件图时,应参考现有火炮图纸,特别应注意加工基准和节制杆的调速筒在复进时的起始位置之间的关系。

## 第八节 复进节制活瓣的设计

复进节制活瓣是复进机中的一部分,在一些大威力或复进剩余能量较大的火炮中,都广泛采用此种结构。虽然其结构简单,但是在复进制动过程中起重要的作用。目前,一些新设计的中,大威力火炮中都普遍采用复进节制活瓣。

复进节制活瓣的主要作用是在复进全程上提供一个复进制动的外加阻力,这样就分担了复进节制器的负荷,给设计带来了许多好处。

1. 由于复进速度远小于后坐速度,复进节制器的结构尺寸远比驻退机结构尺寸小,使得复进节制器沟槽很浅,加工的公差会对复进合力有较大的影响,以致理想的阻力规律难以实现。当增加了复进节制活瓣后,在复进剩余能量相同、复进制动规律不变的条件下,提供了一个外加节制活瓣液压阻力 $\phi_{rl}$ ,这就可以减小需提供的复进节制器的液压阻力 $\phi_{rl}$ 。因为结构尺寸不变,就可以增加复进节制器流液孔的面积 $a_l$ ,解决了制造公差带来的复进制动规律改变太大的矛盾。

2. 复进剩余能量的一部分由于复进节制活瓣液压阻力的作用而转化为热能,使复进机液体温度升高。相对地降低了驻退机液体的温升,并有利于确实复进到位。

3. 对 $Q_0$ 较大的火炮(如60—122J, 69—130J),由于射角 $\varphi$ 的变化对复进剩余能量的影响较大,为在整个射角范围内使后坐部分复进均能平稳地到位,可使节制活瓣流液

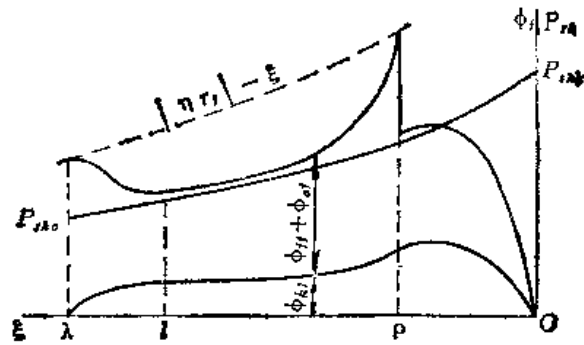


图9-14 有复进节制活瓣的复进制动图

孔面积随射角的增加而自动或人工地增加，改变液压阻力  $\phi_{kf}$  的大小，使不同射角上能获得较一致的复进制动规律。

参考图9-15，复进时复进机外筒的液体在气压  $p_f$  的作用下，使活瓣关闭。液体只能沿活瓣上的小孔  $a_k$  流过，使液体造成了液压损失  $\Delta p$ ，最后流过的液体以压力  $p_f$  作用于复进机活塞，则有

$$P_{fk} = p_f A_f = (p - \Delta p) A_f = P_f - \phi_{kf} \quad (9-73)$$

其中： $\phi_{kf} = \Delta p A_f$  复进节制活瓣液压阻力

复进过程中总的液压阻力  $\phi_f$  有：

$$\phi_f = \phi_{of} + \phi_{ff} + \phi_{kf} \quad (9-74)$$

则：

$$r = P_{fk} - \phi_{of} - \phi_{kf} - \phi_{ff}$$

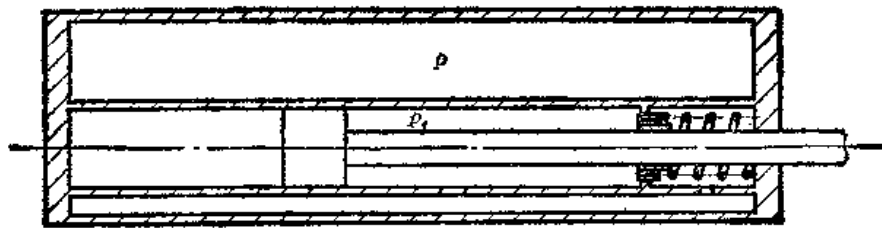


图9-15 复进节制活瓣工作原理图

$\phi_{of}$ 、 $\phi_{ff}$  的求法已在前面阐述，现求取  $\phi_{kf}$ 。由液体连续方程。

$$A_f d\xi = a_k w_k dt$$

$$w_k = \frac{A_f}{a_k} U \quad \text{液体流经活瓣小孔 } a_k \text{ 的速度}$$

$$\text{由伯努利方程:} \quad \Delta p = p - p_f = \frac{K_k \gamma}{20g} \left( \frac{A_f}{a_k} \right)^2 U^2 \quad (9-75)$$

则：

$$\phi_{kf} = A_f \Delta p = \frac{K_k \gamma}{20g} \frac{A_f^3}{a_k^2} U^2 = f_f(a_k) U^2 \quad (9-76)$$

其中:

$$f_f(a_K) = \frac{K_k \gamma}{20g} \frac{A_f^3}{a_K^2}$$

$K_k$  为复进节制活瓣流液孔的液压阻力系数, 可以由实验测得  $\Delta p$  和  $U$  后, 采用取积分平均值获得。也可以参考现有相似结构火炮的现有数据选取。

$a_K$  确定以后,  $f_f(a_K)$  是常数, 可见  $\phi_{kf}$  和  $U^2$  成正比。

复进节制活瓣流液孔面积  $a_K$  确定原则, 仍然是保证  $\rho$  点复进稳定的条件下, 使复进节制器常数流液孔  $a_{fo}$  的面积尽可能的大。此时,  $\rho$  点复进稳定性的条件为:

$$P_{sh\rho} + |\eta r_{j\rho}| \geq \phi_{of\rho} + \phi_{ff\rho} + \phi_{kf\rho} \quad (9-77)$$

其中:

$$\phi_{of\rho} + \phi_{ff\rho} + \phi_{kf\rho} = [f_f(a_{x\rho}) + f_f(a_{fo}) + f_f(a_K)] U_\rho^2$$

$U_\rho^2$  的求法跟部分长度为常数流液孔的复进计算相似, 即:

$$U_\rho^2 = \frac{\frac{2g}{Q_o} P_{sh}}{P_{ff} + P_{kf} - \frac{a}{\rho}} [e^{-a} - e^{-(P_{ff} + P_{kf})\rho}] \quad (9-78)$$

其中:

$$P_{kf} = \frac{2g}{Q_o} f_f(a_K)$$

$a_{fo}$ ,  $a_K$  的确定, 仍按  $\phi_{of\rho} \approx |\eta r_{j\rho}|$ ,  $P_{sh\rho} \approx \phi_{kf\rho} + \phi_{ff\rho}$ , 则有:

$$\frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{A_{ff}^3}{a_{fo}^2} + \frac{K_k \gamma}{20g} \frac{A_f^3}{a_K^2} = \frac{P_{sh\rho}}{|\eta r_{j\rho}|} \frac{K_1 r}{20g} \frac{A_{of}^3}{a_{x\rho}^2} \quad (9-79)$$

设计时, 根据复进节制器沟槽加工的方便性, 先确定  $a_{fo}$  的面积, 而后用式 (9-79) 确定  $a_K$  值。复进节制活瓣流液孔由多个小孔组成。根据直径系列标准, 取小孔的数量是 2 或 3 的整数倍, 计算得  $a_K$  值, 使与式 (9-79) 算得的结果相近。或者, 我们可以先根据直径的系列, 取 2 或 3 整数倍的小孔而算得  $a_K$ , 再由式 (9-79) 算得复进节制流液孔面积  $a_{fo}$ , 然后确定沟槽宽度, 算得沟槽深度, 归整成 0.1 毫米的整数倍。

$$a_K = \frac{A_f^{3/2}}{\sqrt{\frac{K_1}{K_k} \frac{P_{sh\rho} A_{of}^3}{|\eta r_{j\rho}| a_{x\rho}^2} - \frac{K_2}{K_k} \frac{A_{ff}^3}{a_{fo}^2}}} \quad (9-80)$$

或:

$$a_{fo} = \frac{A_{ff}^{3/2}}{\sqrt{\frac{K_1}{K_k} \frac{P_{sh\rho}}{|\eta r_{j\rho}|} \frac{A_{of}^3}{a_{x\rho}^2} - \frac{K_2}{K_k} \frac{A_f^3}{a_K^2}}} \quad (9-81)$$

将确定的一组  $a_{fo}$ ,  $a_K$  值代入式 (9-78) 检验  $\rho$  点的稳定性。如果不满足, 则减小  $a_K$  或  $a_{fo}$  的面积, 直到满足  $\rho$  点的稳定性为止。56-85J 的  $a_{fo}=0.3$  厘米<sup>2</sup>,  $a_K=0.5$  厘米<sup>2</sup>; 59-130J 的  $a_{fo}=0.2$  厘米<sup>2</sup>,  $a_K=0.392$  厘米<sup>2</sup> 可供参考。确定了  $a_K$ 、 $a_{fo}$  以后, 进行有复进

节制活瓣的复进反面问题计算。其方法跟前述的一样，只是在公式中的  $A_i$ 、 $B_i$  项中增加一项常数  $f_f(a_k)$ ，即：

$$A_i = 1 + \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{xi}) + f_f(a_{fi}) + f_f(a_k)]$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{xi-1}) + f_f(a_{fi-1}) + f_f(a_k)]$$

$$C_i = \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [P_{xhi} + P_{xhi-1}]$$

确定  $l$  和第三段  $a_f$  以及工艺调整后，进行反面问题计算的顺序跟前述完全一样。

全长复进制动的火炮，必须保证复进节制腔液体的充满，在驻退机设计时应予以充分的注意。后坐时要求复进节制器上的活瓣迅速及时打开。由于火炮多次后坐、复进，活瓣多次打开、关闭，与调速筒反复撞击，所以在结构设计中应充分考虑其动作的确实可靠，以免活瓣发生变形而被导向杆卡死。为此应尽量减少活瓣的开度，以减小活瓣开启的冲击；尽量减小活瓣的质量，以及在活瓣后方设置一个弹簧以减小冲击，同时保证后坐终了时迅速关闭，以实现全程上的复进制动；还要注意保证节制器充满条件的面积  $\Omega_1$ 。在结构中应注意尽量避免液流通道突然转折，尽量减少尖棱或断面的突变，以减少无法考虑的复杂因素。

## 第十章 其它反后坐装置和液压机构的设计

### 第一节 短节制杆式驻退复进机的设计

为了进一步减轻火炮重量,简化火炮外形结构,不少火炮采用短节制杆式驻退复进机作为它的反后坐装置。美 M198 155 毫米榴弹炮,新 122 毫米榴弹炮, P87-85 毫米高射炮都采用了这种反后坐装置。它也是火炮发展中的一种典型结构,西方称为普特奥克斯 (Puteaux) 式反后坐装置。在设计计算上,各种短节制杆式驻退复进机因具体结构的差异而可能有不同的公式形式,但是具有相同的特点和基本一致的推导思路。此处,我们以 85 高带复进缓冲器的短节制杆式驻退复进机作为典型来研究它的设计计算方法。

参考图 10-1,后坐时火炮的后坐部分带动驻退杆运动,工作腔中的液体沿驻退杆壁上的孔进入容纳有小活塞的驻退杆中腔,并且推动游动活塞环向后打开小活塞杆头上大的通孔进入小活塞内腔。以后,象一般节制杆式驻退机一样,进入活塞内腔的液体分成两股液流。主流经过由短节制杆和节制环所形成的流液孔进入驻退杆后腔,推动短节制杆底座和游动活塞,压缩储气筒中的气体,储存复进的能量。底座带动短节制杆相对驻退杆向后运动来实现对主流液孔的调节。支流经过短节制杆头部的纵向槽,进入小活塞杆前内腔。和节制杆式驻退机一样,支流的最小液流截面  $\Omega_1$  应足够的大,以保证前内腔始终充满液体。在后坐过程中,同样认为由驻退机工作腔进入驻退杆中腔又进入小活塞内腔的液流通道足够的大,可以不考虑液体流动中的压力降落,而认为均等于压力  $p_1$ 。主流只在由活塞内腔流经流液孔  $a_x$  进入驻退杆后腔时才有压力降落  $\Delta p_2 = p_1 - p_2$ 。为了能推动游动活塞,进入后腔的液体压力必须克服储气腔中的压力和游动活塞的摩擦阻力和惯性力,因此须有  $p_2 > p_f$ 。支流的液体在流经其最小截面  $\Omega_1$  以后,压力也由  $p_1$  降落至  $p_3$ 。所有的液体或气体的压力  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_f$  在相应的作用面积上对驻退杆的综合作用就形成了对后坐部分的后坐阻力 (见图 10-1)。

在后坐开始后不长的一段距离上,复进缓冲杆在弹簧作用下,相对于驻退杆向前运动。缓冲杆活塞前方的液体分两路,一路沿驻退杆壁上的槽,一路沿缓冲杆活塞底部的孔推开活门流入复进缓冲器工作腔,直至缓冲杆活塞端面抵住驻退杆前端为止。以后复进缓冲杆便随同驻退杆一起后坐。

复进时,驻退杆储气腔内气体膨胀,在压力  $p_f$  的作用下克服摩擦阻力推动游动活塞和节制杆底座向前运动。由于底座的向前运动,迫使驻退杆后腔及小活塞前内腔的液体沿后坐时主流和支流的相反方向进入活塞内腔。由于复进时驻退杆后腔中液体压力  $p_2$  大于驻退杆中腔中液体压力  $p_1$ ,活塞头上的游动活塞环被推向后方,堵住了活塞头上的大通孔,使得进入活塞内腔中的液体只能沿活塞环上的复进制动流液孔  $a_f$  回到驻退杆中腔和驻退机工作腔。此外,沿活塞环与驻退杆内壁的间隙也有液体的泄漏。流动中液体压力有一系列的降落,因而  $p_f > p_2 > p'_2 > p_1$ ,  $p_3 > p'_2 > p_1$ 。所有这些压力对驻退杆的综合作用,就形成了使后坐部分复进的力。

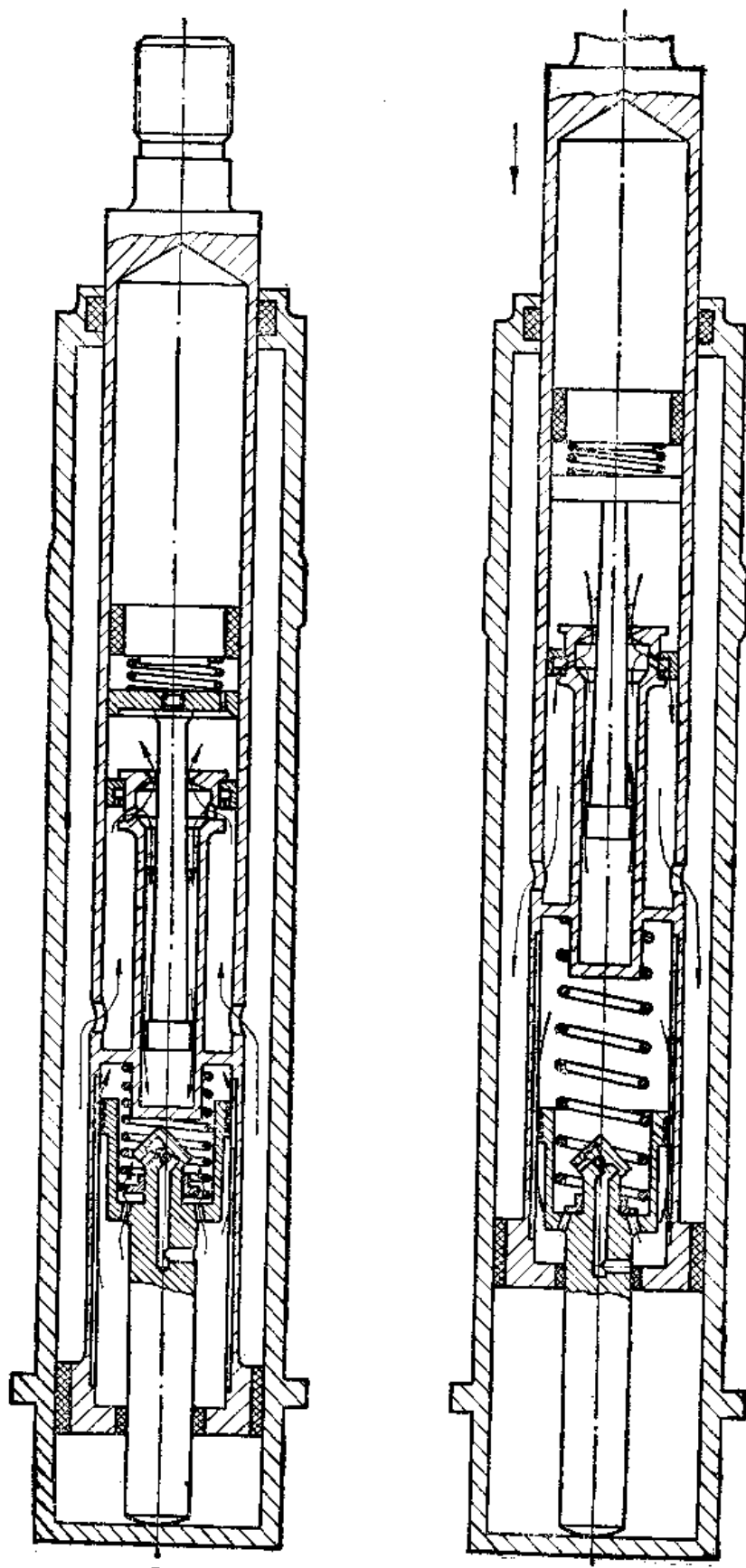


图10-1 短节制杆式驻退复进机动作原理



在复进终了段, 复进缓冲杆顶于驻退复进机前壁上, 产生相对驻退杆的向后运动。当复进缓冲器工作腔中真空消失以后, 其中的液体即将活门关闭, 于是只能沿驻退杆壁上由变宽度槽形成的流液孔  $a_{hc}$  流回活塞的前方。缓冲器工作腔中压力  $p_{hc}$  对驻退杆的作用就形成了对复进的缓冲阻力。

射角大于  $45^\circ$  时, 复进调速器中的钢珠由于重力滚下而打开了缓冲杆中间通道, 使复进缓冲流液总截面加大, 减小了工作腔中压力  $p_{hc}$  和复进缓冲阻力的值, 保证大射角时后坐部分可靠地复进到位。

## 一、后坐运动基本公式的推导

### 1. 名称和符号

直径 (单位: 厘米)

$D_T$ ——驻退复进机筒内径;

$d_T'$ ——驻退杆外径;

$d_T$ ——驻退杆内径 (为便于装配, 中腔、后腔及储气腔的直径均相同);

$d_1$ ——小活塞杆内腔直径;

$d_p$ ——节制环直径;

$\delta_x$ ——短节制杆在流液孔处的直径;

$D_{hc}$ ——复进缓冲器工作腔直径;

$d_{hc}$ ——复进缓冲杆直径;

$d_o$ ——复进节制流液孔直径。

面积 (单位: 厘米<sup>2</sup>)

$A_o = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_T'^2)$  ——驻退杆活塞工作面积;

$A_f = \frac{\pi}{4} d_T^2$  ——复进 (游动) 活塞工作面积;

$A_x = \frac{\pi}{4} \delta_x^2$  ——短节制杆在流液孔处的截面积;

$A_{f1} = \frac{\pi}{4} d_1^2$  ——小活塞杆内腔截面积;

$A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2$  ——节制环孔面积;

$A_{hc} = \frac{\pi}{4} D_{hc}^2$  ——复进缓冲器工作面积;

$a_x = \frac{\pi}{4} (d_p^2 - \delta_x^2) = A_p - A_x$  ——后坐流液孔面积;

$a_{fo} = \frac{\pi}{4} d_o^2 \cdot n$  ——复进节制流液孔面积,  $n$  为孔数;

$a_{hc}$ ——复进缓冲器流液孔面积;

$\Omega_1$ ——支流的最小液流面积。

压力 (单位: 公斤力/厘米<sup>2</sup>)

$p_1$ ——驻退复进机工作腔压力;

$p_2$ ——驻退杆中腔压力;

$\Delta p_2 = p_1 - p_2$ ——主流的压力降落;

$p_3$ ——小活塞杆前内腔压力;

$\Delta p_3 = p_1 - p_3$ ——支流的压力降落;

$p_l$ ——驻退杆储气腔压力;

$p'_2$ ——复进时小活塞内腔压力;

$p_{ho}$ ——复进缓冲器工作腔压力。

速度 (单位: 米/秒)

$V$ ——驻退杆运动速度 (后坐速度);

$V'$ ——游动活塞相对于驻退杆的运动速度;

$w_2$ ——主流流经液孔  $a_r$  时相对于节制环的速度;

$w_3$ ——支流流经  $\Omega_1$  时相对于驻退杆的速度。

## 2. 各腔压力的关系及其计算

为了分析驻退复进机对后坐运动提供的总阻力, 需先了解其各腔压力的情况。分析的方法与节制杆式驻退机的分析相同, 只是主流不是由  $p_1$  流入  $p_2 = 0$  的真空非工作腔, 而是流入压力  $p_2$  比储气腔压力  $p_l$  为高的驻退杆后腔。储气腔的压力  $p_l$  随游动活塞的相对运动, 即随后坐行程的变化是可以确定的。因而, 需要建立的是  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$  与结构尺寸, 后坐速度  $V$  及储气腔压力  $p_l$  的关系式。

首先, 不考虑相对运动, 由液流的连续条件, 求出主流和支流的流速  $w_2$ ,  $w_3$ :

短节制杆运动特点是在后坐或复进过程中, 它相对于驻退杆的运动并不直接等于驻退杆的后坐运动, 而是严格按一定比例关系的运动。这是因为运动是靠不可压缩的液体来传递的。当驻退杆后坐  $X$  距离时, 有  $A_o X$  的液体被挤压入驻退杆内腔。由于内腔其它部分均被金属和液体充满, 这些液体只能压缩气体使游动活塞相对于驻退杆移动  $X'$  距离, 使得

$$A_l X' = A_o X \quad \text{或} \quad A_l dX' = A_o dX$$

我们引用符号

$$P = \frac{A_o}{A_l} = \frac{X'}{X} = \frac{dX'}{dX} = \frac{V'}{V}$$

称为面积比或减速比。就是说如果游动活塞的面积  $A_l$  比驻退杆活塞工作面积  $A_o$  大  $\frac{1}{P}$  倍, 则短节制杆的移动距离和速度就比后坐距离和速度小  $\frac{1}{P}$  倍。

当后坐  $dX$  行程时, 根据小活塞前内腔的充满条件, 支流的流量为  $A_{l1} dX'$ , 由连续条件:

$$A_{l1} dX' = \Omega_1 w_3 dt$$

$$\text{得} \quad w_3 = \frac{A_{l1}}{\Omega_1} \frac{dX'}{dt} \quad \text{而} \quad \frac{dX'}{dt} = P \frac{dX}{dt} = PV$$

$$\text{故} \quad w_3 = \frac{A_{l1}}{\Omega_1} PV \quad (10-1)$$

和节制杆式驻退机相似，主流的流量为：

$$A_o dX - A_{ij} dX' + (A_{ij} - A_x) dX' = A_o dX - A_x dX'$$

由连续条件：

$$A_o dX - A_x dX' = a_x w_x dt$$

得

$$w_x = \frac{A_o - P A_x}{a_x} = -\frac{A_i - A_x}{a_x} P V \quad (10-2)$$

其次，在知道了主流和支流的流速以后，按伯努利方程可求出主流和支流的压力降落。对于主流

$$\Delta p_2 = p_1 - p_2 = \frac{(1 + \xi) \gamma}{20g} w_2^2 = \frac{K \gamma}{20g} w_2^2$$

于是

$$\Delta p_2 = \frac{K \gamma}{20g} \frac{(A_i - A_x)^2}{a_x^2} P^2 V^2 \quad (10-3)$$

对于支流

$$\Delta p_3 = p_1 - p_3 = \frac{(1 + \xi_1) \gamma}{20g} w_3^2 = \frac{K_1 \gamma}{20g} w_3^2$$

于是

$$\Delta p_3 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{ij}^2}{\Omega_1^2} P^2 V^2 \quad (10-4)$$

其中：\$K\$——流液孔 \$a\_x\$ 的液压阻力系数；

\$K\_1\$——流液孔 \$\Omega\_1\$ 的液压阻力系数。

关于液压阻力系数的选值范围，将在后面讨论。注意公式中均采用前面名称符号表中所规定的混合单位。

最后，通过对游动活塞的受力分析，利用上面已经求出的关系式，即可导出各腔压力的计算公式。由图 10-2 所示的游动活塞的受力情况，根据达朗贝尔原理可写出

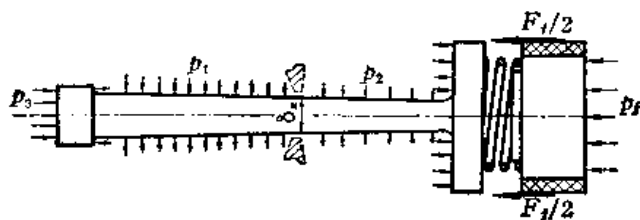


图10-2 游动活塞的受力

$$p_2(A_i - A_x) + p_3 A_{ij} - p_1(A_{ij} - A_x) = p_f A_f + F_f + M_y \frac{d^2 X'}{dt^2}$$

由于游动活塞质量不太大，为简化计算可将式中惯性力略去不计。\$F\_f\$ 为游动活塞的摩擦阻力。在紧塞元件结构尺寸已定时，摩擦阻力与其两侧的压力成正比，可写成：

$$F_f = v_f A_f p_f$$

\$v\_f\$ 为与紧塞元件结构尺寸有关的系数，它可按紧塞装置一章的方法根据紧塞元件具

体结构尺寸和材料的性质导出。于是我们有

$$p_1 A_f - \Delta p_2 (A_f - A_x) - \Delta p_3 A_{fj} = (1 + v_f) p_f A_f$$

或 
$$p_1 = \Delta p_2 \frac{A_f - A_x}{A_f} + \Delta p_3 \frac{A_{fj}}{A_f} + (1 + v_f) p_f$$

将式 (10-3), (10-4) 代入上式, 得

$$p_1 = \frac{K\gamma}{20g} \frac{(A_f - A_x)^3}{a_x^2} \frac{P^2}{A_f} V^2 + \frac{K_1\gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \frac{P^2}{A_f} V^2 + (1 + v_f) p_f \quad (10-5)$$

同时可求出:

$$p_2 = -\frac{K\gamma}{20g} \frac{(A_f - A_x)^2}{a_x^2} \frac{A_x}{A_f} P^2 V^2 + \frac{K_1\gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \frac{1}{A_f} P^2 V^2 + (1 + v_f) p_f \quad (10-6)$$

$$p_3 = \frac{K\gamma}{20g} \frac{(A_f - A_x)^3}{a_x^2} \frac{P^2}{A_f} V^2 - \frac{K_1\gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \frac{A_f - A_{fj}}{A_f} P^2 V^2 + (1 + v_f) p_f \quad (10-7)$$

### 3. 后坐阻力的计算

后坐时的总阻力除其它摩擦力和后坐部分重量分力外, 主要是驻退杆所受的力 (见图 10-3),

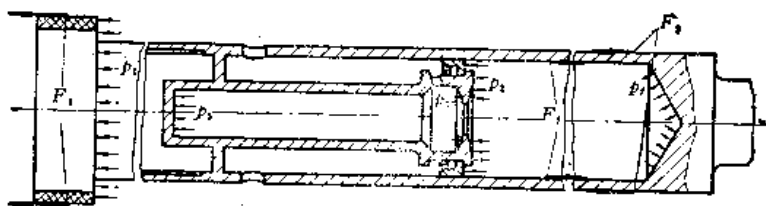


图10-3 后坐时驻退杆的受力

$$R = p_1 A_o + p_3 A_{fj} + p_2 (A_f - A_p) - p_1 (A_{fj} - A_p) - p_f (1 + v_f) A_f + F + T - Q_o \sin \varphi \quad (10-8)$$

式中:  $F$ ——驻退杆活塞及紧塞具的摩擦力,  $F = F_1 + F_2 = F_o + v_o p_1 A_o$ ,

$F_o$ ——紧塞绳的摩擦力, 它是常数, 由装配时决定;

$v_o$ ——与橡胶紧塞元件有关的结构尺寸系数;

$T$ ——摇架滑板的摩擦力, 认为

$$T = f Q_o \cos \varphi$$

式 (10-8) 可改写成:

$$R = p_1 (A_o + A_f) - \Delta p_2 (A_f - A_p) - \Delta p_3 A_{fj} - p_f (1 + v_f) A_f + F + T - Q_o \sin \varphi$$

将式 (10-5), (10-3), (10-4) 代入并化简

$$\begin{aligned} R &= \frac{K\gamma}{20g} \frac{(A_f - A_x)^3}{a_x^2} \frac{A_o + A_f}{A_f} P^2 V^2 + \frac{K_1\gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \frac{A_o + A_f}{A_f} P^2 V^2 \\ &\quad + (A_o + A_f) (1 + v_f) p_f - \frac{K\gamma}{20g} (A_f - A_p) \frac{(A_f - A_x)^2}{a_x^2} P^2 V^2 - \frac{K_1\gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} P^2 V^2 \\ &\quad - p_f (1 + v_f) A_f + F + Q_o (f \cos \varphi - \sin \varphi) \\ &= \frac{K\gamma}{20g} \left( A_f - A_x + \frac{a_x}{P} \right) \frac{(A_f - A_x)^2}{a_x^2} P^3 V^2 + \frac{K_1\gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} P^3 V^2 \\ &\quad + (1 + v_f) p_f A_o + F_o + v_o p_1 A_o + Q_o (f \cos \varphi - \sin \varphi) \end{aligned} \quad (10-9)$$

也可以写成

$$R = \phi_0 + P_f + F + Q_0(f \cos \varphi - \sin \varphi) \quad (10-10)$$

这样, 就把短节制杆式驻退机的后坐阻力归纳成与普通节制杆式驻退机后坐阻力相同的形式。其中由于主流和支流压力降落所形成的那一部分阻力相当于驻退机的液压阻力  $\phi_0$ 。

$$\phi_0 = \frac{K\gamma}{20g} \left( A_f - A_x + \frac{a_x}{P} \right) \frac{(A_f - A_x)^2}{a_x^2} P^3 V^2 + \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} P^3 V^2 \quad (10-11)$$

由储气腔气体压力及游动活塞摩擦阻力的换算压力所形成的那一部分阻力相当于复进机力  $P_f$

$$P_f = (1 + v_f) A_0 p_f \quad (10-12)$$

$$\text{其中} \quad p_f = p_{f0} \left( \frac{W_0}{W_0 - A_0 X} \right)^n = p_{f0} \left( \frac{S}{S - X} \right)^n \quad (10-13)$$

紧塞装置摩擦力  $F$ , 后坐部分重量分力和摇架滑板摩擦力  $Q_0(f \cos \varphi - \sin \varphi)$ , 对两种驻退机是完全相同的。

#### 4. 流液孔的计算

和节制杆式驻退机一样, 在后坐正面问题计算中, 最后要确定驻退机流液孔  $a_x$  和短节制杆的截面  $\delta_x$  的变化规律。在选定了后坐制动图并进行了驻退后坐诸元的计算以后, 理想的后坐阻力和驻退后坐速度随后坐行程的变化规律是已知的。为了简化计算, 正面计算中仍把紧塞具摩擦力取为常数, 即  $F = v Q_0$ ,  $v = 0.3 \sim 0.5$ 。复进机力的变化规律  $P_f = (1 + v_f) A_0 p_{f0} \left( \frac{W_0}{W_0 - A_0 X} \right)^n$  仍旧可按照一般液体气压式复进机的要求适当地选择  $A_0$ ,  $p_{f0}$  和  $W_0$  等参量来实现。在各种尺寸参数  $P$ ,  $A_0$ ,  $A_p$ ,  $A_f$ ,  $A_{fj}$ ,  $\Omega_1$  确定以后(见后面所述), 就可根据应保证的驻退机液压阻力变化规律  $\phi_0 - X$  来确定流液孔的变化规律。由式(10-10) 求出  $\phi_0 - X$  的规律后, 令  $C = \frac{K\gamma}{20g}$  和由于  $A_x = A_p - a_x$ , 则式(10-11) 可写成

$$\begin{aligned} \frac{\phi_0}{C P^3 V^2} &= \frac{(A_f - A_p + a_x)^3}{a_x^2} + \frac{(A_f - A_p + a_x)^2}{P a_x} + \frac{K_1}{K} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \\ &= \frac{(A_f - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{3(A_f - A_p)^2}{a_x} + 3(A_f - A_p) + a_x + \frac{(A_f - A_p)^2}{P a_x} \\ &\quad + \frac{2(A_f - A_p)}{P} + \frac{a_x}{P} + \frac{K_1}{K} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \end{aligned}$$

其中  $a_x \left( 1 + \frac{1}{P} \right)$  的数值相对其它各项很小, 可以略去不计, 因而有

$$\begin{aligned} &\frac{(A_f - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{\left( 3 + \frac{1}{P} \right) (A_f - A_p)^2}{a_x} \\ &+ \left( 3 + \frac{2}{P} \right) (A_f - A_p) + \frac{K_1}{K} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} - \frac{\phi_0}{C P^3 V^2} = 0 \end{aligned} \quad (10-14)$$

式 (10-14) 是一个  $\frac{1}{a_x}$  的二次方程, 解之得

$$a_x = \frac{A_f - A_o}{\sqrt{\frac{1}{A_f - A_o} \left( \frac{\phi_o}{CP^3V^2} - \frac{K_1}{K} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^3} \right) - \left( 3 + \frac{2}{P} \right) + \left( 1.5 + \frac{1}{2P} \right)^2 - \left( 1.5 + \frac{1}{2P} \right)}} \quad (10-15)$$

### 5. 小活塞杆前内腔液体充满条件

前面公式的推导都是按小活塞杆内腔在后坐过程中始终充满液体来分析的。这在结构上是靠  $\Omega_1$  足够的大来保证的。和节制杆式驻退机的条件一样, 为保证前内腔充满, 应在后坐全过程中使  $p_3 > 0$ , 由式 (10-7) 知应使:

$$C \frac{(A_f - A_x)^3}{a_x^2} - \frac{P^2}{A_f} V^2 - \frac{K_1}{K} C \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^3} - \frac{A_f - A_{fj}}{A_f} P^2 V^2 + (1 + v_f) p_f > 0$$

将上式乘以  $A_o = PA_f$  得

$$C \frac{(A_f - A_x)^3}{a_x^2} P^3 V^2 + \frac{K_1}{K} C \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^3} P^3 V^2 - \frac{K_1}{K} C \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^3} A_o P^2 V^2 + (1 + v_f) p_f A_o > 0$$

对照式 (10-11), (10-12) 可认为:

$$C \frac{(A_f - A_x)^3}{a_x^2} P^3 V^2 + \frac{K_1}{K} C \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^3} P^3 V^2 + (1 + v_f) p_f A_o \approx \phi_o + P_f \approx R$$

于是不等式变为:

$$\phi_o + P_f \approx R > \frac{K_1}{K} C \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^3} A_o P^2 V^2$$

最后得前内腔的充满条件为

$$\Omega_1 > \sqrt{\frac{K_1}{K} C A_{fj}^3 A_o} \left( \frac{PV}{\sqrt{\phi_o + P_f}} \right)_{\max} \quad (10-16)$$

或

$$\Omega_1 > \sqrt{\frac{K_1}{K} C A_{fj}^3 A_o} \left( \frac{PV}{\sqrt{R}} \right)_{\max} \quad (10-17)$$

## 二、结构设计和正面问题计算中应注意的问题

### 1. 基本参量和结构尺寸的确定

为了减小整个驻退复进机的纵向长度, 面积比 (减速比)  $P$  宜取小一些, 储气腔中气体的压缩比  $m$  宜取大一些。但  $P$  太小会影响流液孔对后坐阻力控制的平稳性,  $m$  太大对减小结构尺寸不太明显而气体温度却增加很快。一般取  $K \geq 0.5$ ,  $m \approx 3$  比较合适。

为了保证紧塞的可靠性和便于选择紧塞结构和紧塞元件, 应使  $p_{1\max} \leq 300$  公斤/厘米<sup>2</sup>。工作压力太高不能保证紧塞, 容易损坏紧塞元件。

在选定了  $P$ ,  $m$  和  $p_{1\max}$  以后, 即可进一步确定驻退复进机的横向和纵向尺寸。可以认为

$$R_{\max} \approx A_o p_{1\max}$$

即

$$A_o = \frac{R_{\max}}{p_{1\max}}$$

又由于

$$P = \frac{A_o}{A_f} = \frac{\frac{\pi}{4}(D_T^2 - d_T'^2)}{\frac{\pi}{4}d_T^2} \approx \left(\frac{D_T}{d_T'}\right)^2 - 1$$

即

$$d_T'^2 = \frac{1}{1+P} D_T^2 \quad (10-18)$$

而

$$A_o = -\frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{1}{1+P}\right) D_T^2$$

故

$$D_T = \sqrt{\frac{4}{\pi} \frac{1+P}{P}} A_o \quad (10-19)$$

由式 (10-18), (10-19) 即可确定  $d_T'$  和  $D_T$ , 它们均应调整成标准尺寸。这时最好再对  $A_o$  按复进机初力  $P_{fo}$  和注气的可能性作一下核算。由复进机设计

$$P_{fo} > Q_o(\sin \varphi_{\max} + f \cos \varphi_{\max} + v) = \alpha Q_o$$

$$p_{fo} \approx \frac{P_{fo}}{A_o}$$

如果  $p_{fo}$  太大, 不利于野战条件下的注气, 应该适当加大  $A_o$ 。此外, 如果  $d_T'$  的尺寸太小, 不便于安排驻退杆内部的小活塞和短节制杆时, 也应适当加大  $A_o$ 。 $A_o$  的加大, 降低了最大工作压力  $p_{1\max}$ , 增加了液体量从而减小了每发温升, 这些都是有益的。

驻退复进机的纵向长度取决于储气腔的初长度和短节制杆的长度, 其余纵向尺寸可在绘制结构草图时确定。

储气腔中气体的初体积为

$$W_o = \frac{A_o \lambda_{\max}}{1 - \left(\frac{1}{m}\right)^{1/n}}$$

一般取多变指数  $n = 1.3$ , 故储气腔初长度为:

$$S' = \frac{W_o}{A_f} = \frac{R \lambda_{\max}}{1 - m^{-1/n}} \quad (10-20)$$

短节制杆的工作长度为

$$S_f = P \lambda_{\max} \quad (10-21)$$

短节制杆式驻退复进机的液压阻力系数  $K$  和  $K_1$  在选取时应比一般节制杆式驻退机

的小,例如85高炮取 $K=1.3$ ,  $K_1=5.0$ 。如果能根据实验测定的液压阻力系数值选择则最好。液压阻力系数小的原因,一般解释是因为流过流液孔 $a_x$ 以后仍然有压力 $p_2$ 存在,其流动损失不象流到真空中去那么大;另外,由于动力效应,经过流液孔后的高速液流冲击到游动活塞上的动量变化也抵销掉一部分储气腔内压力对游动活塞的作用,也就是说,在式(10-5) $p_1$ 的公式中,第三项实际上没有 $(1+v_f)p_f$ 那么大。总之,这种反后坐装置设计中适当参考现有类似结构的设计数据,合理的选择液压阻力系数 $K, K_1$ 是十分重要的。

## 2. 结构设计中应注意的问题

由于短节制杆式驻退机综合了通常的反后坐装置几个部件的作用,所以它内部结构比较复杂,因此在进行结构设计绘制结构草图时,应从工作确实可靠,使用检查方便,维护保养简单等多方面进行较细致的考虑。

驻退复进机中不需要专门的液量调节器,游动活塞的初始位置的移动可以自动的调整液体体积的变化。但是为了保证储气腔中气体的初体积在一定的范围之内,应使驻退机中加入标准量的液体,相应的检查方法,在结构分析一章中已有说明。在多发射击液体发热膨胀后,不可避免地使游动活塞向后移动。为了使游动活塞的位置变化不引起短节制杆初始位置的变化,在游动活塞与短节制杆底座之间置一弹簧。在弹簧力的作用下,保证了短节制杆的底座在射击前(不论游动活塞在什么位置)始终抵在小活塞的端面上。底座上的小孔是很重要的,小孔的直径不能太小,太小不便液体的流通,在快速射击时可能起不了保证节制杆初始位置的作用;小孔的直径也不能太大,太大则在后坐很短的时间中也会有节制杆相对于游动活塞的明显运动,从而改变了流液孔随行程变化的规律。在适当设计弹簧的基础上,底座上的小孔直径一般取为1毫米。在人工后坐时,由于后坐时间较长,在弹簧力作用下,液体会沿小孔进入底座与游动活塞的空间,因而复进时会出现短时复进不到位的现象,这时不要误认为复进能量不足。

装有半自动机或输弹机的火炮,往往复进时要求提供能量,这时控制复进速度就变得十分重要了。这种驻退复进机对复进速度有较大影响的零件是滑套在小活塞上的游动活塞环。它本身的重量,可移动的距离,开于其上的复进节制流液孔 $a_f$ 的面积以及它与驻退杆内壁的配合间隙等都会对复进运动产生影响。它的重量应尽可能轻,移动距离应尽可能短以减小惯性影响,确保复进一开始就可靠地将小活塞上的大孔关闭。在设计计算复进制动流液孔面积时,要考虑游动活塞环与节制杆内壁配合间隙的影响。

注液与注气孔的位置安排应注意的是既要便于勤务操作,又要避免损坏紧塞装置中的紧塞元件。有的注气孔在不能开在驻退杆轴端的情况下,开在紧塞具的外侧就是这个道理。

这种驻退复进机常采用不变的复进节制流液孔,它的复进末期制动性能不好。有的火炮要求有较高的平均复进速度,常数复进节制流液孔就要大一些,从而复进到位时复进速度仍然很高。此外,即使节制流液孔较小,由于后坐部分在复进获得最大速度以后的惯性,仍然会以较高速复进,复进节制流液孔起不了节制复进的作用,只是由于流过节制流液孔的液体不足以补充驻退杆活塞复进造成的空间,结果使 $p_1=0$ 而已。因此,一般情况下应该采用专门的复进缓冲器。美105毫米榴弹炮,155毫米榴弹炮没有采用复进缓冲器是因为它的复进速度较低,而且还在驻退筒的前端安装了呼吸器。



### 三、后坐反面问题的计算

#### 1. 火药气体作用时期

基本公式与节制杆式驻退机的相同

$$V_i = W_i - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{g}{2Q_0} (R_i + R_{i-1}) \Delta t_i \quad (10-22)$$

$$X_i = L_i - (L_{i-1} - X_{i-1}) - (W_{i-1} - V_{i-1}) \Delta t_i - \frac{g}{2Q_0} (2R_{i-1} + R_i) \Delta t_i^2 \quad (10-23)$$

$$R_i = \phi_{oi} + P_{fi} + F_i + Q_0(f \cos \varphi - \sin \varphi) \quad (10-24)$$

其中

$$\phi_{oi} = \frac{K\gamma}{20g} \left( A_i - A_x + \frac{a_{xi}}{P} \right) \frac{(A_i - A_x)^2}{a_{xi}^2} P^3 V_i^2 + \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fi}^3}{\Omega_1^2} P^3 V_i^2$$

$$P_{fi} = (1 + v_f) p_{fo} A_o \left( \frac{S}{S - X_i} \right)^n$$

$$F_i = F_o + v_o p_{fi} A_o$$

$$p_{fi} = \frac{K\gamma}{20g} \frac{(A_i - A_x)^3}{a_{xi}^2} \frac{P^2}{A_i} V_i^2 + \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fi}^3}{\Omega_1^2} \frac{P^2}{A_i} V_i^2 + (1 + v_f) p_{fo}$$

将各项代入式 (10-24) 并整理后得:

$$R_i = \frac{K\gamma}{20g} \left[ (1 + v_o)(A_i - A_x) + \frac{a_{xi}}{P} \right] \frac{(A_i - A_x)^2}{a_{xi}^2} P^3 V_i^2 + (1 + v_o) \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fi}^3}{\Omega_1^2} P^3 V_i^2 + (1 + v_o)(1 + v_f) p_{fo} \left( \frac{S}{S - X_i} \right)^n A_o + F_o + Q_0(f \cos \varphi - \sin \varphi) \quad (10-25)$$

#### 2. 惯性运动时期

仍以路程间隔  $\Delta X_i$  为自变量, 则

$$V_i^2 - V_{i-1}^2 = -\frac{g}{Q_0} (R_i + R_{i-1}) \Delta X_i$$

将式 (10-24) 代入化简得:

$$V_i^2 = \frac{V_{i-1}^2 - \frac{g}{Q_0} \Delta X_i (R_{i-1} + (1 + v_o) p_{fi} + F_o + Q_0(f \cos \varphi - \sin \varphi))}{1 + \frac{g}{Q_0} \Delta X_i B_{fi}} \quad (10-26)$$

$$\text{其中} \quad B_{fi} = \frac{K\gamma}{20g} \left[ (1 + v_o)(A_i - A_x) + \frac{a_{xi}}{P} \right] \frac{(A_i - A_x)^2}{a_{xi}^2} P^3 + (1 + v_o) \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fi}^3}{\Omega_1^2} P^3 \quad (10-27)$$

#### 四、短节制杆式驻退复进机的复进问题

复进基本公式推导的思路与后坐时的相同，此处不作详述。为了简化计算，考虑到复进节制流液孔面积  $a_f$  远小于后坐流液孔面积  $a_x$ ，因此认为驻退杆后腔的液体进入小活塞内腔没有压力降落，即认为  $p'_2 = p_2$ ，而将流液孔  $a_x$  的影响放在主流的液压阻力系数  $K$  中予以考虑。

##### ① 各腔的压力关系及其公式

主流回程共有两条通路，即总面积为  $a_{f0}$  的游动活塞环上的四个小孔及面积为  $a_{f1}$  的活塞环与驻退杆内壁的环形间隙面积。由于流体的流动条件不同，流过  $a_{f0}$  的液压阻力系数为  $K_k$ ，流过  $a_{f1}$  的液压阻力系数为  $K_s$ 。如果当成液体均通过活塞环上的小孔流过，则其相当流液孔面积为：

$$a_f = a_{f0} + \sqrt{\frac{K_k}{K_s}} a_{f1} \quad (10-28)$$

其证明如下：按伯努利方程

$$p_2 - p_1 = \frac{K_k \gamma}{20g} w_2^2 = \frac{K_s \gamma}{20g} w_1^2$$

故

$$w_1 = \sqrt{\frac{K_k}{K_s}} w_2$$

又由连续条件：

$$A_f d\xi' = a_{f0} w_2 dt + a_{f1} w_1 dt = \left( a_{f0} + \sqrt{\frac{K_k}{K_s}} a_{f1} \right) w_2 dt \quad (10-29)$$

由式 (10-29) 可以认为：全部液流  $A_f d\xi'$  是经过相当流液孔  $a_f = a_{f0} + \sqrt{\frac{K_k}{K_s}} a_{f1}$  以流速  $w_2$  流过的。

根据液流的连续条件，可以求出通过流液孔  $\Omega_1$  和  $a_f$  的流速  $w_3$  和  $w_2$ ：

$$A_f d\xi' = \Omega_1 w_3 dt$$

$$w_3 = \frac{A_{fj}}{\Omega_1} \frac{d\xi'}{dt} = \frac{A_{fj}}{\Omega_1} PU \quad (10-30)$$

$$A_f d\xi' = a_f w_2 dt$$

$$w_2 = \frac{A_f}{a_f} \frac{d\xi'}{dt} = \frac{A_f}{a_f} PU \quad (10-31)$$

根据伯努利方程，可求出压力差，并将式 (10-30)，(10-31) 代入：

$$\Delta p_1 = p_2 - p_1 = \frac{K_k \gamma}{20g} w_2^2 = \frac{K_k \gamma}{20g} \left( \frac{A_f^2}{\left( a_{f0} + \sqrt{\frac{K_k}{K_s}} a_{f1} \right)^2} P^2 U^2 \right) \quad (10-32)$$

$$\Delta p_2 = p_3 - p_1 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \omega_3^2 = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^2}{\Omega_1^2} P^2 U^2 \quad (10-33)$$

最后仍可根据游动活塞的受力（参考图 10-2），求出各腔压力的关系。此时游动活塞运动方向与后坐时相反，利用达朗贝尔原理，不计活塞的惯性力，有

$$(1 - v_f) p_f A_f = p_3 A_{fj} + p_2 (A_f - A_{fj})$$

即 
$$(1 - v_f) p_f A_f = \Delta p_2 A_{fj} + \Delta p_1 A_f + p_1 A_f$$

将式 (10-32)、(10-33) 代入得

$$\begin{aligned} p_2 &= -\Delta p_1 - \Delta p_2 \frac{A_{fj}}{A_f} + (1 - v_f) P_f \\ &= (1 - v_f) p_f - \frac{K_k \gamma}{20g} \frac{A_f^2}{a_f^2} P^2 U^2 - \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \frac{1}{A_f} P^2 U^2 \end{aligned} \quad (10-34)$$

同时可求出

$$p_2 = (1 - v_f) p_f - \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \cdot \frac{1}{A_f} P^2 U^2 \quad (10-35)$$

$$p_3 = (1 - v_f) p_f + \left( \frac{1}{A_{fj}} - \frac{1}{A_f} \right) \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} P^2 U^2 \quad (10-36)$$

## ② 复进合力的计算公式

后坐部分在复进运动方向上所受力的和，以复进合力表示，应为：

$$\begin{aligned} r &= -(1 - v_f) p_f A_f + p_1 A_o + p_3 A_{fj} + p_2 (A_f - A_{fj}) \\ &\quad - Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi) - F \end{aligned}$$

其中前四项为各腔压力作用在驻退杆上的力（见图 10-4）， $F$  为驻退杆紧塞装置的摩擦力。

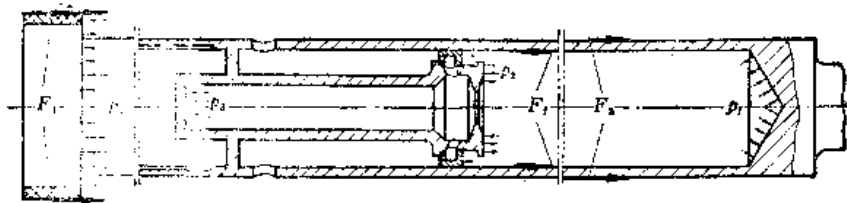


图10-4 复进时驻退杆的受力

$$F = F_1 + F_2 = F_o + v_o p_1 A_o$$

于是  $r = (A_o + A_f) p_1 + A_{fj} \Delta p_2 + A_f \Delta p_1 - (1 - v_f) p_f A_f - Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi) - F$

将式 (10-32)、(10-33)、(10-34) 代入，得：

$$\begin{aligned} r &= (1 - v_f) p_f A_o - \frac{K_k \gamma}{20g} \frac{A_f^2}{\left( a_{fo} + \sqrt{\frac{K_k}{K_f} a_{f1}} \right)^2} - A_o P^2 U^2 - \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \frac{A_o}{A_f} P^2 U^2 \\ &\quad - Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi) - F = P_{rh} - \phi_f \end{aligned} \quad (10-37)$$

其中  $P_{sh}$  相当于复进剩余力

$$P_{sh} = (1 - v_f) A_o p_f - Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi) - F \quad (10-38)$$

$\phi_f$  相当于复进时总的液压阻力

$$\phi_f = \left( \frac{K_k \gamma}{20g} \frac{A_f^3}{a_f^2} + \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \right) P^3 U^2 \quad (10-39)$$

### 五、复进正面问题——流液孔面积 $a_f$ 的确定

从式 (10-39) 的复进液压阻力公式可看出, 短节制杆式驻退复进机的复进运动相当于常数流液孔的复进制动问题。和过去对复进问题的处理一样, 可以把复进剩余力写成:

$$P_{sh} = P_{sh\lambda} e^{-a \frac{\xi}{\lambda}} \quad (10-40)$$

当  $\xi = 0$  时,  $P_{sh} = P_{sh\lambda}$ ,  $\xi = \lambda$  时,  $P_{sh} = P_{sho} = P_{sh\lambda} e^{-a}$ , 于是

$$a = \ln \frac{P_{sh\lambda}}{P_{sho}} \quad (10-41)$$

复进运动微分方程可以写为:

$$\frac{d(U^2)}{d\xi} = \frac{2g}{Q_o} P_{sh} - \frac{2g}{Q_o} f_f(a_f) U^2 \quad (10-42)$$

其中

$$f_f(a_f) = \frac{K_k \gamma}{20g} \frac{A_f^3}{a_f^2} P^3 + \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} P^3 \quad (10-43)$$

令  $\frac{2g}{Q_o} f_f(a_f) = P_H$ , 则微分方程为:

$$\frac{d(U^2)}{d\xi^2} - P_H U^2 = \frac{2g}{Q_o} P_{sh} \quad (10-44)$$

解此微分方程并代入边界条件, 可求出其特解:

$$U^2 = \frac{\frac{2g}{Q_o} P_{sh\lambda}}{P_H - \frac{a}{\lambda}} \left[ e^{-\frac{a}{\lambda} \xi} - e^{-P_H \xi} \right] \quad (10-45)$$

只要计算出  $P_{sh\lambda}$ ,  $a$ ,  $P_H$  和已知  $\lambda$ , 就可以对应于任意  $\xi$  得到复进速度  $U$ , 又对于某复进行程  $\xi$ , 可根据设计所需要的速度  $U$  用试算法求出  $P_H$ , 然后按公式 (10-43) 求出  $a_f$

$$a_f = \left( \sqrt{\frac{Q_o}{2g} \frac{20g}{K_k \gamma} \frac{P_H}{A_f^3} \frac{1}{P^3} - \frac{K_1}{K_k} \frac{A_{fj}^3}{A_f^3} \frac{1}{\Omega_1^2}} \right)^{-1} \quad (10-46)$$

此  $a_f$  应先考虑游动活塞环与驻退杆的间隙面积  $a_{f1}$  再按小孔数目分配  $a_f$  的面积, 求出小孔的直径并规整之。公式中的液压阻力系数设计时可试取  $K_k = 1.8$ ,  $K_1 = 2.0$ , 关

于  $\sqrt{\frac{K_k}{K_r}}$  可近似取稍大于 1。在有条件时,  $K_r$ 、 $K_k$ 、 $K_1$  等应由实验确定。

## 六、复进反面问题的计算

设计好复进节制液孔面积  $a_f = a_{f0} + \sqrt{\frac{K_k}{K_r}} a_{f1}$  后, 即可选择适当行程间隔  $\Delta \xi_i$ , 逐点进行较准确的复进反面问题的计算。

在复进行程间隔  $\Delta \xi_i$  中, 认为复进合力为常数并等于

$$r = \frac{r_i + r_{i-1}}{2} \quad (10-47)$$

则在此间隔  $\Delta \xi_i$  中可对复进运动微分方程积分:

$$U_i^2 = U_{i-1}^2 + \frac{g}{Q_0} (r_i + r_{i-1}) \Delta \xi_i \quad (10-48)$$

由 (10-37) 式知:

$$\begin{aligned} r_i &= P_{thi} - \phi_{fi} \\ &= (1 - v_f) p_{fi} A_0 - Q_0 (f \cos \varphi + \sin \varphi) - F_i - f_f(a_f) U_i^2 \\ &= (1 - v_f) p_{fi} A_0 - Q_0 (f \cos \varphi + \sin \varphi) - F_0 - v_0 (1 - v_f) p_{fi} \frac{A_0}{P} \\ &\quad + \frac{v_0}{P} f_f(a_f) U_i^2 - f_f(a_f) U_i^2 \\ &= \left(1 - \frac{v_0}{P}\right) (1 - v_f) p_{fi} A_0 - Q_0 (f \cos \varphi + \sin \varphi) - F_0 \\ &\quad - \left(1 - \frac{v_0}{P}\right) f_f(a_f) U_i^2 \end{aligned} \quad (10-49)$$

将式 (10-49) 代入式 (10-48) 得

$$U_i^2 = \frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2 + \frac{C_i}{A_i} \quad (10-50)$$

$$\text{其中:} \quad A_i = 1 + \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i \left(1 - \frac{v_0}{P}\right) f_f(a_f) \quad (10-51)$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i \left(1 - \frac{v_0}{P}\right) f_f(a_f) \quad (10-52)$$

$$C_i = \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i \left[ \left(1 - \frac{v_0}{P}\right) (1 - v_f) A_0 (p_{fi} + p_{f,i-1}) - 2Q_0 (f \cos \varphi + \sin \varphi) - 2F_0 \right] \quad (10-53)$$

与解一般复进反面问题一样, 可以列表计算出  $U-\xi$ ,  $r-\xi$ ,  $\phi_f-\xi$  和  $P_{th}-\xi$  等曲线。

## 七、液压缓冲器参加作用时的复进反面问题

复进到液压缓冲杆顶到驻退筒前端面时, 液压缓冲器还不能开始工作, 只有等到它

的工作腔真空消失后,才开始工作。

液压缓冲器相当于一个简单的沟槽式驻退机,它的液压缓冲阻力是:

$$\phi_{hs} = \frac{K_c \gamma}{20g} \frac{A_{hc}^3}{a_{hc}^3} U^2 = f(a_{hs}) U^2 \quad (10-54)$$

液压缓冲器参加工作时的复进合力计算公式只是在原公式中增加一项液压缓冲阻力,即

$$r_i = P_{shi} - \phi_{fi} - \phi_{hsi} \quad (10-55)$$

可得到与前面同样形式的反面问题计算公式:

$$U_i^2 = \frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2 + \frac{C_i}{A_i} \quad (10-56)$$

$$\text{其中,} \quad A_i = 1 + \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i \left[ \left( 1 - \frac{v_o}{P} \right) f_i(a_i) + f(a_{hs,i-1}) \right] \quad (10-57)$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i \left[ \left( 1 - \frac{v_o}{P} \right) f_i(a_i) + f(a_{hsi}) \right] \quad (10-58)$$

$$C_i = \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i \left[ \left( 1 - \frac{v_o}{P} \right) (1 - v_i) A_o (p_{ii} + p_{i,i-1}) - 2Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi) - 2F_o \right] \quad (10-59)$$

火炮在复进过程中,还可能要给半自动机和输弹机等提供能量,这些在复进反面问题中均要予以考虑。其计算公式须根据具体情况,运用上述分析方法进行推导。

## 第二节 活门式驻退复进机的设计

活门式驻退复进机也是火炮发展中的一种典型反后坐装置结构。它把驻退机与复进机合成一体,利用游动活塞将液体与气体隔开,利用弹簧控制下的活门打开程度来调整后坐流液孔的变化。它具有结构简单,阻力曲线不易出现波峰(变化较平缓)、容易实现变后坐,不需要液量调节器等优点。我国的59式100毫米高炮即采用这种结构的反后坐装置,在西方称之为圣·柴蒙德(St. Chamond)式反后坐装置。

活门式驻退复进机中液体压力对活塞工作面积所形成的压力,既包括了储气筒中的气体压力经过液体传递而作用于活塞上的那一部分压力,又包括了为克服液体流动阻力,特别是克服在弹簧控制活门处的流动阻力而作用于活塞上的那一部分压力,因此它把复进机与驻退机的作用合成一体。在后坐过程中活塞的后坐运动既通过液体的传递压缩储气筒中的气体将一部分后坐能量储存起来用于复进,又通过在活门流液孔处及其它流动损失将相当大的一部分后坐能量消耗掉,因此驻退杆兼起驻退杆和复进杆的作用,活塞面积既是驻退机活塞的工作面积,又是复进机活塞的工作面积。

从设计上看,对起复进机作用的那一部分的设计方法仍和一般复进机设计的方法相同。但是,对起驻退机作用的那一部分,即弹簧活门控制的流液孔设计,则有它独特的规律和特点,自然也就成为研究的重点。产生驻退机液压阻力的流液孔是靠弹簧控制的活门的打开高度形成的,而活门的打开高度又与活门的结构形状,活门前后的压力差,以及弹簧的初力和刚度有关。流液孔(即活门)开度不象其它驻退机那样与后坐行程有直接的函数关系,它主要是活门两侧压力差与弹簧刚度系数的函数。但是,当后坐速度高时,在活门前后形成较高的压力差,使活门开度加大形成较大的流液孔而不致有过高的

液压阻力，而当后坐速度降低后，活门前后压力差的减小又使得活门开度变小，仍可以保持较高的液压阻力。所以弹簧控制下的活门有一定的自动调整液压阻力变化的能力，可以使总的后坐阻力有较平稳的变化且不会出现波峰。因此活门式驻退复进机设计的核心问题是如何在确定好驻退复进机及活门结构尺寸下合理地选择弹簧的初力和刚度。或者说，它的正面问题是在确定了驻退复进机的结构尺寸条件下，按照所选定的理想后坐阻力规律设计活门弹簧的初力和刚度，而反面问题则是如何根据已有的弹簧初力和刚度在规定的射击条件下反算后坐的运动和受力的规律。此外，在计算分析中，活门式驻退复进机还有两个独自的特点：除了活门流液孔处的损失之外，液体流动的其它损失所形成的那一部分液压阻力相当可观而被作为单独考虑的一项；活门流液孔处的液压阻力系数不是常数而是随其开度大小而变化的量。

### 一、活门式驻退复进机设计中的基本方程式

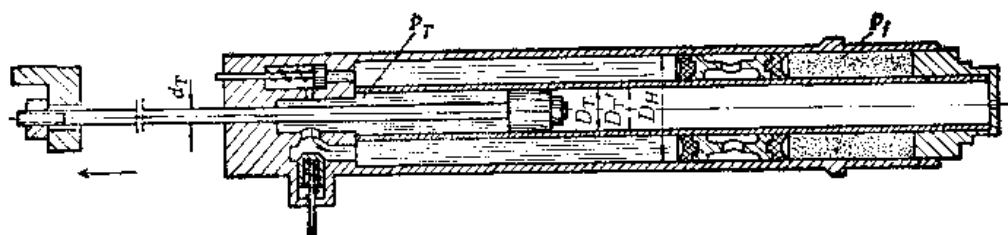


图10-5 活门式驻退复进机原理图

名称和符号：

直径或长度（单位：厘米）

$D_r$ ——储气（外）筒内径；

$D_T'$ ——驻退（内）筒外径；

$D_T$ ——驻退筒内径；

$d_T$ ——驻退（复进）杆直径；

$D$ ——活门孔口直径；

$d$ ——活门杆直径；

$h$ ——活门开度。

面积（单位：厘米<sup>2</sup>）

$A_f = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - D_T'^2)$  ——游动活塞工作面积；

$A_T = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_T^2)$  ——驻退杆活塞工作面积；

$a_s = \pi D h$  ——活门流液孔面积；

$a_n$  ——计算沿程损失或局部损失时所对应的液流截面积。

压力（单位：公斤力/厘米<sup>2</sup>）

$p_r$  ——作用于驻退杆活塞工作面积上的液体压力；

$p_l$  ——活门前的液体压力；

$p_2$ ——活门后的液体压力;

$p'_f$ ——游动活塞右侧的液体压力;

$p_f = p_{fo} \left( \frac{s}{s-x} \right)^n$ ——复进机(储气筒)气体压力;

$\Delta p_1 = p_r - p_1$ ——由于流动损失造成的活塞工作面积处与活门前液体压力之差;

$\Delta p_o = p_1 - p_2$ ——液体流过活门流液孔  $a_x$  的压力损失;

$\Delta p_2 = p_2 - p'_f$ ——由于流动损失造成的活门后与游动活塞一侧液体压力之差;

阻力或力(单位:公斤力)

$T_1$ ——驻退杆活塞紧塞具的摩擦力;

$T_2$ ——驻退杆紧塞具的摩擦力;

$T_3$ ——液流沿程损失和局部损失  $\Delta p_1$ ,  $\Delta p_2$  所造成的部分液压阻力的和;

$T_4$ ——游动活塞紧塞具的摩擦力;

$J$ ——游动活塞的惯性力;

$P_r, P_{ro}$ ——活门弹簧力及其初力。

### 1. 后坐阻力方程式

参考图10-5, 可写出活门式驻退复进机的后坐阻力为

$$R = A_T p_r + T_1 + T_2 + Q_o (f \cos \varphi - \sin \varphi) \quad (10-60)$$

由于

$$p_r = (p_r - p_1) + (p_1 - p_2) + (p_2 - p'_f) + p'_f$$

故

$$p_r = \Delta p_1 + \Delta p_o + \Delta p_2 + p'_f \quad (10-61)$$

其中, 活门流液孔  $a_x$  处的压力降  $\Delta p_o$  可根据连续条件和伯努利方程写成(仍采用混合单位);

$$\Delta p_o = \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_T^2}{a_x^2} V^2 \quad (10-62)$$

分析游动活塞的受力后, 运用达朗贝尔原理可写出

$$A_f p'_f = A_f p_f + T_4 + J$$

故

$$p'_f = p_f + \frac{T_4 + J}{A_f} \quad (10-63)$$

则作用于驻退活塞工作面积上的压力各组成部分可由下式表示

$$p_r = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_T^2}{a_x^2} V^2 + p_f + \frac{T_4 + J}{A_f} \quad (10-64)$$

将式(10-64)代入式(10-60), 并令  $T_3 = A_T(\Delta p_1 + \Delta p_2)$ , 可得后坐阻力方程式:

$$R = \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_T^2}{a_x^2} V^2 + A_T p_f + T_1 + T_2 + T_3 + \frac{T_4 + J}{A_f} A_T + Q_o (f \cos \varphi - \sin \varphi) \quad (10-65)$$

可见, 它与一般反后坐装置的后坐阻力方程并无很大差异。式中的第一项是活门造



成的液压阻力 $\phi_0$ ,  $A_T p_l$  相当于复进机力  $P_l$ ,  $T_3$  代表了液流沿程损失和局部损失形成的另一部分液压阻力, 其余各项则仍是摩擦阻力和后坐部分的重量分力。

液流沿程阻力和局部阻力可以根据水力学的计算公式 (后面介绍) 表示成:

$$T_3 = A_T(\Delta p_1 + \Delta p_2) = \sum_{n=1}^m \xi_n \frac{\gamma}{20g} \left( \frac{A_T}{a_n} \right)^2 V^2 \cdot A_T \quad (10-66)$$

其中  $\xi_n$ ——液流摩阻系数。

式 (10-66) 说明当结构尺寸和流动条件确定以后, 各项流动损失的总和正好与后坐运动速度平方成正比。

在活门式驻退复进机主要结构尺寸确定好以后, 考虑到活门流液孔液压阻力系数不是常数的特点, 可以将后坐阻力整理成如下形式:

$$R = A + B p_l + \left( C + D \frac{K}{a_z^2} \right) V^2 \quad (10-67)$$

其中:

$$A = T_1 + T_2 + \frac{T_4}{A_f} A_T \quad (\text{忽略惯性力 } J)$$

$$B = A_T$$

$$C = \sum_{n=1}^m \xi_n \frac{\gamma}{20g} \frac{A_T^3}{a_n^2}$$

$$D = \frac{\gamma}{20g} A_T^3$$

此式既是正面设计又是反面计算的后坐阻力公式。

## 2. 液体流动阻力的计算

在活门式驻退复进机中由于液体流动路径长, 截面突然变化多, 流动方向有较多的改变, 因此单独考虑了液体流动的沿程和局部损失的阻力这一项  $T_3$ 。在节制杆式驻退机设计中实际上是把流动损失并入了液压阻力系数  $K$  中, 相当于认为所有的损失都是在流液孔处降落的, 并不是没有考虑沿程和局部损失。因此, 有一些设计者, 在进行活门式驻退复进机设计时, 也有采用这种处理方法的。

关于液体流动损失  $\Delta p_l$  的计算是属于水力学的研究内容, 它根据不同流动的性质和方式而给出了计算流动损失的理论的、半理论半经验的或经验的公式。详细的研究可以查阅有关工程流体力学或水力学的教材, 此处只根据计算的需要罗列一下供参考的计算公式, 不作具体的推证和解释。

(1) 液体流动的沿程损失是实际液体沿某一等截面管道流动时, 由于内外摩擦 (液体的粘性) 所造成的沿一定流动长度的压力损失。

$$\text{对圆截面} \quad \Delta p = \lambda \frac{L}{D} \frac{\gamma}{20g} w^2 \quad (10-68)$$

$$\text{对任意截面} \quad \Delta p = \lambda \frac{L}{4R} \frac{\gamma}{20g} w^2 \quad (10-69)$$

其中:  $L$ ——管道长度;

$w$ ——液流在管道中的流动速度;

$D$ ——管道内径;

$R$ ——管道的水力半径,

$$R = \frac{\text{有效截面积}}{\text{润湿周长}}, \text{ 如管道为环形截面, 则 } R = \frac{1}{4}(D-d)$$

$\lambda$ ——沿程阻力系数, 它取决于液体的流动状态, 或取决于雷诺数  $Re$  的大小,

$$Re = \frac{Dw}{\nu} \quad (10-70)$$

$\nu$ ——液体的运动粘性系数, 对于斯切奥尔-M驻退液,

$$\nu = 0.1981 \text{ 厘米}^2/\text{秒} \text{ (斯托克斯)}$$

当  $Re \leq 2300$  时, 液流通常处于层流状态, 层流的沿程阻力系数

$$\lambda = \frac{Re}{64} \quad (10-71)$$

当  $2320 < Re \leq 10^5$  时, 流动处于紊流状态, 光滑管紊流的沿程阻力系数

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{1/4}} \quad (10-72)$$

驻退复进机中液流一般是处于光滑管紊流状态。

在计算沿程损失时, 考虑到不是所有液体都流经全程, 故取其平均值, 在内筒中取流动长度  $L = \frac{\lambda}{2}$  ( $\lambda$  指后坐长), 在外筒中取流动长度  $L = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{A_r}{A_f}$ 。在计算雷诺数时, 液流速度也可以取该截面处流速的平均值。这样处理的结果, 可以使沿程损失系数为常数值。

(2) 液流的局部损失是实际液体由于管道截面的突然变化和转折, 形成死水区或涡流区及液体的附加内摩擦带来的压力损失。

$$\text{截面突然扩大时} \quad \Delta p = \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \frac{\gamma}{20g} w_1^2 \quad (10-73)$$

$$\text{或} \quad \Delta p = \left(\frac{A_2}{A_1} - 1\right)^2 \frac{\gamma}{20g} w_2^2 \quad (10-74)$$

式中:  $A_1$ ——进口截面积;

$A_2$ ——出口截面积;

$w_1$ ——沿入口截面液体流速;

$w_2$ ——沿出口截面液体流速;

$$\text{截面突然收缩时} \quad \Delta p = \left(1 - \frac{A_1}{A_0}\right) \frac{\gamma}{20g} w^2 \quad (10-75)$$

式中:  $A_0$ ——进口截面积;

$A_1$ ——出口截面积;

$w$ ——沿出口截面液体流速。

液流突然转折时

$$\Delta p = \left( 0.946 \sin^2 \frac{\theta}{2} + 2.05 \sin^4 \frac{\theta}{2} \right) \frac{\gamma}{20g} w^2 \quad (10-76)$$

式中  $\theta$  为液流转折角度。

可以由连续方程导出任意计算截面  $a_n$  的液体流动速度  $w_n$  和后坐速度  $V$  的关系为

$$w_n = \frac{A_T}{a_n} V \quad (10-77)$$

因此任意一个压力损失可以表示为

$$\Delta p_n = \xi_n \frac{\gamma}{20g} \left( \frac{A_T}{a_n} \right)^2 V^2$$

其中  $\xi_n$  为摩擦阻力系数, 可根据情况由前述公式求得。

所有的压力损失可以写成

$$\Sigma \Delta p = \sum_{n=1}^m \xi_n \frac{\gamma}{20g} \left( \frac{A_T}{a_n} \right)^2 V^2 \quad (10-78)$$

其中  $m$  为所考虑流动损失的总数。

前面后坐阻力公式中的  $T_s$  即为:

$$T_s = A_T \Sigma \Delta p = \sum_{n=1}^m \xi_n \frac{\gamma}{20g} \frac{A_T^3}{a_n^2} V^2$$

上式说明, 在驻退机的结构尺寸一定的条件下, 液压损失阻力最终是与后坐速度  $V^2$  成正比的量:

$$C = \sum_{n=1}^m \xi_n \frac{\gamma}{20g} \frac{A_T^3}{a_n^2}$$

### 3. 活门的受力和平衡方程

在后坐过程中, 活门能在不同瞬间处于某一打开高度以形成一定的液孔  $a_z$  是靠作用于活门上的各种力不断地平衡来实现的。分析活门的受力和平衡, 就可以建立一个联系活门结构尺寸、弹簧初力、刚度系数与活门的开度或液压阻力的函数关系, 这是活门式驻退复进机所特有的关系式。参考图10-6, 取活门为对象, 忽略活门的惯性力, 在某一高度上所受的各力应平衡, 即:

$$P_t + \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) p_2 - \frac{\pi}{4} D^2 p_1 = 0$$

或

$$P_t = \frac{\pi}{4} D^2 \Delta p_o + \frac{\pi}{4} d^2 p_2 \quad (10-79)$$

其中:  $P_t$ ——活门处于某一开度时的弹簧力;

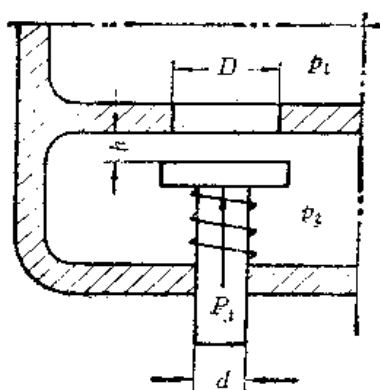


图10-6 活门的受力图

$\Delta p_o = p_1 - p_2 = -\frac{\phi_o}{A_T}$ ——活门流液孔的流动损失。

式(10-79)可以改写成各种不同的形式,从实用目的出发可将它写成用于正面问题计算和反面问题计算的两种形式。

正面问题的形式

$$P_s = -\frac{\pi}{4} D^2 \frac{\phi_o}{A_T} + \frac{\pi}{4} d^2 \left( p_l + \Delta p_s + \frac{T_s}{A_s} \right) \quad (10-80)$$

本公式可用以计算,在理想后坐阻力规律  $R-X$  条件下,根据相应的理想液压阻力规律  $\phi_o-X$  和复进机压力变化规律  $p_l-X$ ,按照活门平衡条件所应该保证的活门弹簧力随路程  $X$  的变化规律  $P_s-X$ 。简而言之,由它规定了对应于理想的后坐阻力规律  $R-X$  所应有的弹簧力的规律  $P_s-X$ 。

反面问题的形式

反面问题是在弹簧参数已定条件下的计算。我们知道弹簧的物理特性由下式确定:

$$P_s = P_{s0} + \eta h = P_{s0} + \eta \frac{a_s}{\pi D} \quad (10-81)$$

式中  $\eta$  为弹簧的刚度系数。

而实际的活门流液孔  $a_s$  的液压阻力为:

$$\Delta p_o = \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_T^2}{a_s^2} V^2$$

故弹簧活门的平衡方程变为:

$$P_{s0} + \eta \frac{a_s}{\pi D} = -\frac{\pi}{4} D^2 \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_T^2}{a_s^2} V^2 + \frac{\pi}{4} d^2 \left( p_l + \Delta p_s + \frac{T_s}{A_s} \right) \quad (10-82)$$

如令

$$a_o = \frac{\pi D}{\eta} \left[ P_{s0} - \frac{\pi}{4} d^2 \left( p_l + \Delta p_s + \frac{T_s}{A_s} \right) \right] \quad (10-83)$$

$$\gamma = \frac{\pi D}{\eta} \cdot \frac{\pi}{4} D^2 \frac{\gamma}{20g} \frac{A_T^2}{a_o^2} \quad (10-84)$$

$$\text{有} \quad \left(\frac{a_x}{a_0}\right)^3 + \left(\frac{a_x}{a_0}\right)^2 = vKV^2 \quad (10-85)$$

它是在已定结构尺寸和弹簧参数条件下, 根据活门平衡条件所联系起来的各参量之间的关系式, 也是反面问题计算的公式。在实际计算中我们常把系数  $a_0$  和  $v$  当作常数处理, 即略去  $\Delta p_2$  和  $\frac{T_4}{A_f}$  项, 并且取  $p_f = p_{f0} = \frac{p_{f1} + p_{f0}}{2}$ , 因为  $p_{f0}$  远较  $\frac{\pi}{4} d^2 \left( p_f + \Delta p + \frac{T_4}{A_f} \right)$  项为大, 这样的处理并不影响计算的准确性。式 (10-85) 定量地说明了弹簧控制的活门流液孔  $a_x$  与后坐速度  $V$  的关系, 它确实表明后坐速度越大, 流液孔的面积也越大的这种弹簧可起自动调节作用的特点。

## 二、驻退复进机主要参量和结构尺寸的确定

活门式驻退复进机结构尺寸确定的思路与普通复进机结构尺寸的确定大体相同, 此处仅介绍一些主要尺寸及参量确定的原则。其它则可参考现有结构在绘制草图时酌情确定。

### 1. 驻退机活塞工作面积和复进机初压 $p_{f0}$ 的确定

在后坐过程中, 由于驻退机活塞兼起复进机活塞的作用, 因此其最大工作压力是很高的。为了减小结构尺寸, 通常取紧塞装置所容许工作压力的上限, 即  $p_{Tmax}$  在 300 至 400 公斤/厘米<sup>2</sup> 之间。由于

$$R = A_T p_T + Q_0 (v + f \cos \varphi - \sin \varphi) \approx A_T p_T$$

可见在选定驻退机活塞最大工作压力  $p_{Tmax}$  之后, 即可确定活塞工作面积,

$$A_T = \frac{R_{max}}{p_{Tmax}} \quad (10-86)$$

由于活门式驻退复进机在复进时液流损失较大, 为保证可靠地复进到位, 通常取初力  $P_{f0} = (1.5 \sim 2.0) Q_0$ ,  $m = 2.5 \sim 3$ 。这样, 即可确定复进机的其它参数

$$p_{f0} = \frac{P_{f0}}{A_T} \quad (10-87)$$

$$W_0 = \frac{A_T \lambda}{1 - m^{-1/\sigma}} \quad (10-88)$$

$$s = \frac{\lambda}{1 - m^{-1/\sigma}} \quad (10-89)$$

在确定外筒尺寸时, 应考虑外筒与内筒所构成的空间能保证容纳气体的初体积  $W_0$ , 游动活塞所占体积和一部分液体的体积 (不使游动活塞与后盖相碰撞), 又应使外筒与内筒有大体相同的长度。

### 2. 活门结构尺寸的确定

活门的结构形式选定之后, 主要是确定直径  $D$  和  $d$ 。 $D$  愈小,  $p_1$  在活门上的作用面积愈小,  $d$  愈小,  $p_2$  在活门上作用面积愈大, 这样可以要求较小的活门弹簧的抗力  $P_s$ ,

可以减小弹簧的结构尺寸。但  $d$  应满足强度上的要求, 而  $D$  也不能过小, 它应使活门孔口所形成的面积  $\frac{\pi}{4} D^2$  远大于所要求的活门流液孔的最大面积  $a_{x\max}$ :

$$\frac{\pi}{4} D^2 > a_{x\max} = \pi D h_{\max}$$

或  $D > 4 h_{\max}$

美国工程设计手册中建议  $\frac{\pi}{4} D^2 \geq 5 a_{x\max}$ 。

### 三、活门式驻退复进机后坐正面问题的计算, 弹簧参数的选择

活门式驻退复进机正面问题的计算, 主要是在驻退复进机结构尺寸确定以后, 根据理想的后坐阻力规律来选择弹簧参数。

#### 1. 后坐制动图的选定和驻退后坐诸元的计算

按照正常的设计程序, 应该根据所设计火炮的特点选定制动图, 如果需实现变后坐, 则应在小射角选择某种野炮的制动图而在大射角选择某种固定式火炮的制动图。其驻退后坐诸元的计算方法完全相同。计算后即可得到理想的后坐阻力和驻退后坐的运动规律  $R-X$  和  $V-X$ , 作为进一步计算的依据。

#### 2. 求活门开度 $h$ 和后坐位移 $X$ 的关系

根据后坐阻力方程

$$R = A + B p_f + \left( C + D \frac{K}{a_x^2} \right) V^2$$

在确定了结构尺寸, 复进机力变化规律, 选定了后坐制动图并进行了驻退后坐诸元计算以后, 对应于每一后坐行程可按式

$$\frac{K}{a_x^2} = [R - (A + B p_f + C V^2)] \cdot \frac{1}{D V^2} \quad (10-90)$$

计算出相应的理想后坐阻力规律条件下对流液孔变化规律的要求即  $\frac{K}{a_x^2} - X$  的规律。

目前的活门结构形式, 可以近似地认为是一个弹簧控制下的平底节流阀。平底节流阀的阻力系数  $K'$  随阀的开度的关系如图10-7所示。

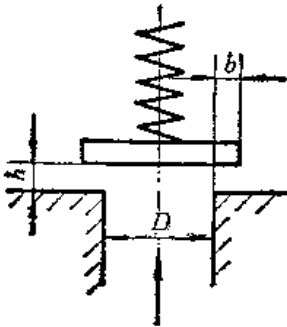
	$h/D$	0.1	0.12	0.14	0.16	0.20	0.25
	$b/D$						
	0.1	16.1	11.3	8.45	6.60	4.42	3.03
	0.15	16.3	11.5	8.65	6.80	4.62	3.23
	0.20	16.5	11.7	8.85	7.00	4.82	3.43
	0.25	16.7	11.9	9.05	7.20	5.02	3.63

图10-7 平底阀的阻力系数  $K'$

由阻力系数  $K'$  计算压力降  $\Delta p$  所用公式为

$$\Delta p = \frac{K' \gamma}{20g} w_D$$

式中  $w_D$  为液流通过管道  $D$  (面积为  $A_0 = \frac{\pi}{4} D^2$ ) 的流速。换算成通过流液孔  $a_x$  (面积为  $a_x = \pi D h$ ) 的流速时, 阻力系数应是

$$K = K' \frac{a_x^2}{A_0^2} \quad (10-91)$$

对应于一定的活门开度  $h$ , 阻力系数和流液孔面积的平方比有一定的换算关系, 因此可以作出  $\frac{K}{a_x^2} - h$  曲线 (图 10-8)。将其与  $\frac{K}{a_x^2} - X$  的曲线联系起来, 就可以得到后坐正面问题计算所要求的活门开度  $h$  随后坐行程  $X$  变化的  $h - X$  关系。液压阻力系数是标志液体流动损失的重要参数, 特别是在活门式驻退复进机的条件下, 它影响活门开启的规律, 因此必须尽可能取得与实际相符。由于活门处液流情况比较复杂, 结构和尺寸上的微小变化都可能对阻力系数产生影响, 因此在条件许可的情况下, 应该在活门结构尺寸初步确定后, 在不同开度下, 用实验测出它的液压阻力系数, 计算实际的  $\frac{K}{a_x^2} - h$  曲线, 进而得到理想的  $h - X$ 。

在选定了后坐制动图, 确定了理想的后坐阻力变化规律  $R - X$  以后, 考虑到活门处液压阻力系数  $K$  随开度变化的特点, 最后得到了理想的活门开度随后坐行程的变化规律  $h - X$ 。它相当于节制杆式驻退机的理想流液孔  $a_x - X$  的变化规律。但是活门式驻退复进机的活门开度随后坐行程的变化规律不象节制杆式驻退机那样单纯靠几何关系来实现, 而是由活门弹簧来调节的。因此理想的后坐阻力规律  $R - X$  最终是靠合理地选择活门弹簧参数来得到的。

如前所述, 由式 (10-80) 可以计算出在理想的后坐阻力规律  $R - X$  条件下所应有的弹簧力对后坐行程的变化规律  $P_r - X$ 。把它与前面的  $h - X$  相联系, 就可以知道从理想条件下对应某一个后坐长度  $X$ , 所应具有弹簧力  $P_r$  和所应有的活门开度  $h$ , 即可以得到理想的弹簧力的特性线  $P_r - h$  (如图 10-9 所示)。一般情况下  $P_r - h$  是一条

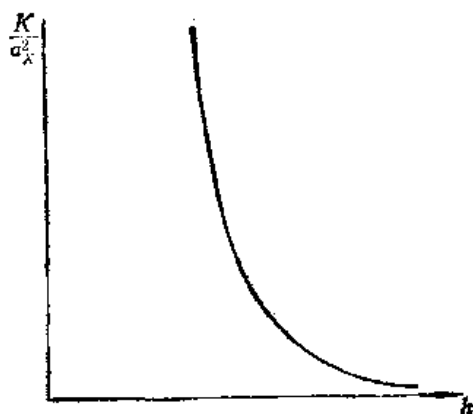


图10-8  $\frac{K}{a_x^2} - h$  曲线

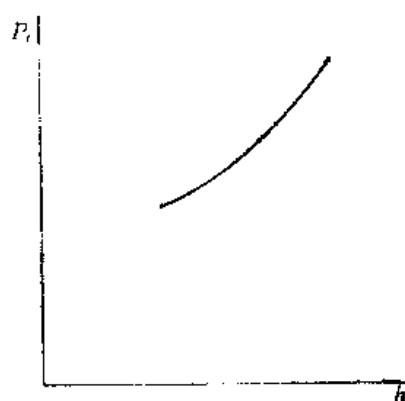


图10-9  $P_r - h$  曲线

曲线, 最大开度  $h_{\max}$  和最大弹簧力  $P_{r\max}$  在最大后坐速度  $V_{\max}$  处, 随着后坐速度的不断降低, 活门的开度和弹簧力均单调的递减, 但是并不成线性规律。对于实际弹簧, 弹簧力随活门开度 (即弹簧的压缩高度) 是按线性变化的, 即

$$P_r = P_{r0} + \eta h \quad (10-92)$$

其中  $\eta$  为弹簧刚度系数。

所以, 设计者的任务就是如何选定弹簧的初力  $P_{r0}$  和刚度系数  $\eta$  使得到的力与开度的关系与理想的规律尽可能一致。如果得到的弹簧初力太大, 而刚度又太小, 应适当地减小弹簧的初力  $P_{r0}$  并使  $P_{r\max}$  和对应的最大开度  $h_{\max}$  尽可能保持不变, 这就不致于使调整后的最大后坐阻力太大, 而  $P_{r\max}$  与  $P_{r0}$  的比值应接近或略小于 2。

现有的活门式驻退复进机控制活门的弹簧, 均要求簧力较大, 以使结构紧凑, 因此在口径较大的火炮上一般都采用碟形弹簧。如 59 式 100 毫米高炮用一组 14 片厚 3.5 毫米, 外径 60 毫米, 内径 30 毫米的碟形弹簧, 在射角  $\varphi = 85^\circ$  条件下活门弹簧初力  $P_{r0} = 458$  公斤力, 刚度系数  $\eta = 125.9$  公斤/毫米。

上面介绍的弹簧参量确定方法, 还没有经过更多实践的检验, 仅供设计时的参考。最终确定的弹簧参量, 应该在样品炮上进行试验, 并对实测驻退复进机压力, 后坐运动曲线, 活门开启规律进行分析, 以进一步修改设计。

实际的射击试验表明, 活门式驻退复进机在后坐开始阶段, 有一个阻力尖峰。它主要是由于液体、活门及游动活塞的惯性引起的, 它们都会使各部分的压力有一个短暂的跃升, 这些是正面设计所没有考虑的。为了减小阻力尖峰, 在设计活门和游动活塞时, 应该在强度足够的情况下, 尽量减轻活门的重量。

由上可见, 用弹簧控制的活门式驻退复进机不可能完全实现预定的后坐制动图, 但由于它在工作性能和结构简单方面的独特优点, 因此仍然是一种比较好的反后坐装置。

#### 四、活门式驻退复进机后坐反面问题的计算

后坐反面问题是在确定了结构尺寸和弹簧参数以后, 根据选取的特定工作条件 (如装药号、温度、射角等) 下, 反算实际的后坐阻力规律和后坐运动诸元。

如前所述在有确定的结构尺寸和弹簧参数以后, 经过适当的简化, 可把  $a_0$  和  $v$  当作常数处理, 因而可以利用式 (10-83), (10-89) 得到  $a_0$  和  $v$ 。又知活门液孔  $a_x$  与活门开度  $h$  及液压阻力系数  $K$  有  $a_x = \pi D h$  及式 (10-91) 的关系, 因此对特定结构条件下, 对应于一个  $a_x$  即可按式 (10-85) 求得一个  $V^2$ , 根据这些数据可以作成  $a_x - V^2$  曲线 (如图 10-10 所示)。在进行反面问题计算之前先作出此曲线。那么, 只要知道某时刻的后坐速度  $V$  值, 即可在此  $a_x - V^2$  曲线上找到按实际弹簧平衡下活门的液孔  $a_x$  的大小, 并且可以从而求出相应的后坐阻力  $R$  的大小。现在简述后坐反面问题计算程序如下:

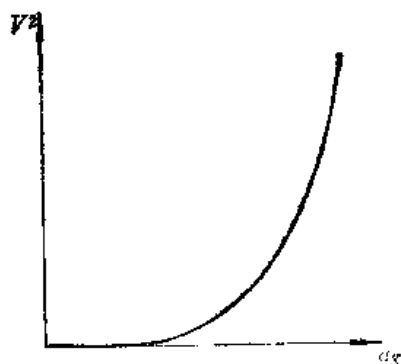


图10-10  $a_x - V^2$  曲线



1. 计算自由后坐诸元, 求出  $W-t$ ,  $L-t$
2. 计算  $a_x$ 、 $v$ , 由活门平衡方程

$$\left(\frac{a_x}{a_0}\right)^3 + \left(\frac{a_x}{a_0}\right)^2 = \rho K V^2$$

作出  $a_x-V^2$  曲线。

3. 第一、二时期 (膛内期及火药气体后效期) 的反面问题计算

可以取时间为变量, 在微小时间间隔  $\Delta t_i$  内认为后坐阻力  $R$  是常数并且等于  $R_{i-1}$ , 则有下列计算公式

$$V_i = W_i - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{g}{Q_0} R_{i-1} \Delta t_i$$

$$X_i = L_i - (L_{i-1} - X_{i-1}) - (W_{i-1} - V_{i-1}) \Delta t_i - \frac{g}{Q_0} R_{i-1} \frac{\Delta t_i^2}{2}$$

$$R_i = A + B p_{ji} + \left( C + D \frac{K_i}{a_{xi}^2} \right) V_i^2$$

在计算后坐阻力时, 公式中的液压阻力系数  $K_i$  也是随  $a_{xi}$  而变化的。

为使反面问题计算准确, 可以作第二次逼近, 这时后坐阻力  $R = \frac{R_i + R_{i-1}}{2}$  再代入上述公式计算一遍, 即可转入下一点的计算。

4. 第三时期 (后坐惯性时期) 的后坐反面问题计算  
一般仍取时间  $t$  为变量, 此时的计算公式为

$$V_i = V_{i-1} - \frac{g}{Q_0} R_{i-1} \Delta t_i$$

$$X_i = X_{i-1} + V_{i-1} \Delta t_i - \frac{g}{Q_0} R_{i-1} \frac{\Delta t_i^2}{2}$$

$$R_i = A + B p_{ji} + \left( C + D \frac{K_i}{a_{xi}^2} \right) V_i^2$$

## 五、复进问题

活门式驻退复进机在复进时后坐活门关闭, 液体只能推开复进活门推动驻退杆活塞使后坐部分复进。复进活门的开度可以在射击间调整。但是, 在整个复进过程中只能保持不变的开度, 因此它是一个在复进全长上节制漏口为常数的复进节制器。这种节制器结构简单, 但是复进节制性能不好。如果复进活门开度太小, 则复进速度太低, 满足不了完成机构动作的要求, 也不利于缩短复进时间; 如果复进活门开度太大, 复进速度太高, 又将带来复进终了时的冲击问题。另外, 由于复进活门只能直接节制游动活塞的运动, 而不能有效地控制后坐部分在惯性作用下的运动, 因此在采用这种活门式常数流液孔的复进节制器的同时, 还要另设在复进终了段一段长度上作用的缓冲器。常数活门流液孔面积的确定及复进运动和受力的计算方法与其它反后坐装置的基本上相同, 此处不作详述。

### 第三节 变后坐的节制杆式驻退机的设计特点

#### 一、火炮变后坐的目的

在一些较大口径，射角变化大的火炮上采用变后坐，是为了解决降低火线高与加长后坐长所出现的矛盾。在一定意义上，变后坐也是为解决火炮威力与机动性矛盾所采取的一种措施。随着火炮口径及初速的加大，为了保证在战斗全重不太大的情况下，小射角射击时火炮的稳定性，除了采用炮口制退器以外，最直接的办法是加大小射角时的后坐长度来减小后坐阻力值。目前，一些大威力火炮的后坐长度（小射角时）均在1米以上，有的长达1.8米。但是，火炮的火线高却不能随口径的加大而过分地提高，而且在总体布置允许的情况下还应该尽可能地降低，以利于提高火炮的稳定性，便于火炮的隐蔽和炮手的装填操作。低的火线高和大的后坐长度势必造成大射角射击时炮尾碰地。特别是目前对地面野战火炮的最大射角已要求超过 $70^\circ$ 。当火炮安装于自行车体上时，更不能容许大射角时有大的后坐长度。除了在旧式火炮上为了避免火炮大射角射击时炮尾碰地，在构筑阵地时，需要专门挖出后坐坑之外，大多数火炮是采用变后坐长的办法来解决这个问题的，即在大射角时适当加大后坐阻力值减短后坐长度来避免炮尾碰地。因为在大射角射击时，火炮的稳定性是有保证的，所以适当提高后坐阻力值对于炮架来说是允许的。如59-130 J，59-100 G均采用变后坐的反后坐装置。当火炮的最大射角和火线高确定以后，在确定了炮尾端面与耳轴的距离及炮尾下方斜切角度后，可由几何计算得到在最大射角时炮尾不碰地的后坐长度 $\lambda_k$ 。

有两种方式实现后坐长度的变化（见图10-11），第一种方式是只在部分中间射角范围内进行后坐长度的变化，而在射角较小的一段保持不变的后坐长度 $\lambda_g$ ，在射角大的一段保持不变的短后坐 $\lambda_k$ ；第二种方式是在最小射角到最大射角的整个射界内由 $\lambda_g$ 到 $\lambda_k$ 连续地进行后坐长度的变化。现有火炮绝大多数是按第一种方式变后坐的。表10-1列出了有关火炮变后坐的一些数据，供设计变后坐时参考。

地面炮中常用的是节制杆沟槽式变后坐长驻退机，西方称为菲娄克斯（Filloux）式驻退机。在结构分析一章中所介绍的59-130 J等驻退机即属于这种结构。此处仅以这种类型驻退机为例，简述其流液孔设计的一些特点。

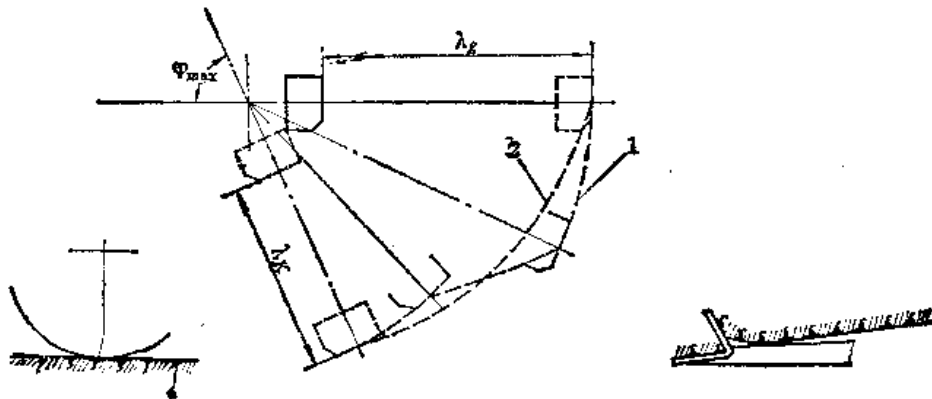


图10-11 变后坐原理图

1—第一种方式；2—第二种方式。

表 10-1

火炮名称	火线高 $H$ (毫米)	长后坐长 $\lambda_g$ (毫米)	短后坐长 $\lambda_k$ (毫米)	$\lambda_k/\lambda_g$	长后坐射角	短后坐射角
苏 37-152JL	1515	1050~1250	875	0.70~0.83	$0^\circ \sim 30^\circ$	$48^\circ \sim 65^\circ$
59-130J	1380	1250	775	0.62	$-2^\circ 30' \sim 20^\circ$	$34^\circ \sim 45^\circ$
59-100G	1365~1660	975	650	0.67	连续变化	
M198-155L		1651	1270	0.77	$-4.2^\circ \sim 28^\circ$	$45^\circ \sim 72^\circ$
FH70-155L	1525	1400	1000	0.71		
GC45-155L	16	1550	1041	0.67		

## 二、流液孔沟槽面积的确定

变后坐长的驻退机需进行长后坐 ( $\lambda = \lambda_g$ ) 和短后坐 ( $\lambda = \lambda_k$ ) 两组后坐正面问题的计算, 求出两组驻退后坐诸元及两组流液孔的变化规律。

通常长后坐的后坐阻力变化规律与一般野炮相同, 以保证极限稳定角  $\varphi_s$  时的火炮稳定作为主要条件来选定后坐制动图; 而短后坐的后坐阻力变化规律则应按固定式火炮的后坐制动图来选取。在此基础上只要设计好了复进机并确定了驻退机的主要结构尺寸, 就可以分别计算出相应于后坐阻力变化规律的流液孔变化规律, 如图 10-12 所示的  $a_{xg}-X$  和  $a_{xk}-X$  曲线。

节制杆上的长、短沟槽的截面积, 应该按上述流液孔的变化规律来确定。短后坐时, 只是短沟槽打开, 因此它的截面积就是短后坐流液孔的面积  $a_{xk}$ 。长后坐时, 长、短沟槽同时打开, 因此它的截面积只应该是长、短后坐流液孔面积之差:  $\Delta a_x = a_{xg} - a_{xk}$ 。

沟槽式节制杆主要是靠变化沟槽的深度  $h_g$  及  $h_k$  来实现流液孔的变化。因此, 在确定了长、短沟槽的宽度后 (为了保证相对转动时长沟槽的确实开闭, 沟槽不应占据太宽的边长), 即可计算深度的变化规律  $h_g-X$  和  $h_k-X$  (参看图 10-13)。

以短沟槽为例

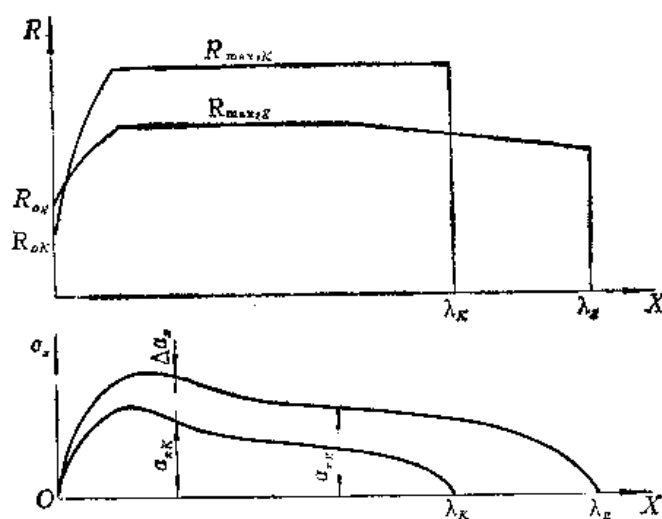


图10-12 变后坐长流液孔的变化规律

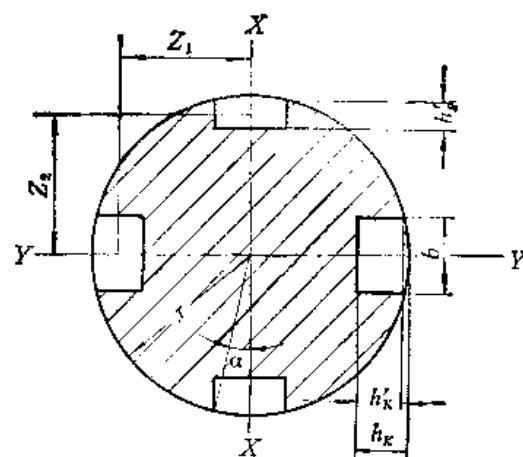


图10-13 沟槽式节制杆断面图

$$a_{xk} = nbh'_k + nF_c \quad (10-93)$$

式中:  $n$ ——短沟槽数;

$b$ ——短沟槽宽;

$F_c$ —— $b$ 所对应的弓形面积,

$$F_c = \frac{1}{2} r^2 2\alpha - \frac{1}{2} r^2 \sin 2\alpha \quad (10-94)$$

最后可得短沟槽的深度计算公式:

$$h_k = h'_k + r(1 - \cos \alpha) = \frac{a_{xk} - nF_c}{nb} + r(1 - \cos \alpha) \quad (10-95)$$

同理, 长沟槽的深度 (如  $n$  与  $b$  均与短沟槽相同):

$$h_g = \frac{\Delta a_x - nF_c}{nb} + r(1 - \cos \alpha) \quad (10-96)$$

将计算出的  $h_k-X$ ,  $h_g-X$  的规律绘成沟槽的轮廓图 (见图10-14), 再按第七章所述的方法对它进行调整, 最后进行反面问题计算, 检验沟槽调整的合理性。需要注意的是, 应先对短沟槽进行调整和反面问题计算, 只有经过反面问题计算, 短沟槽的变化规律完全确定以后, 才可以计算  $\Delta a_x$ , 调整长沟槽的深度, 进行长后坐反面问题的计算。

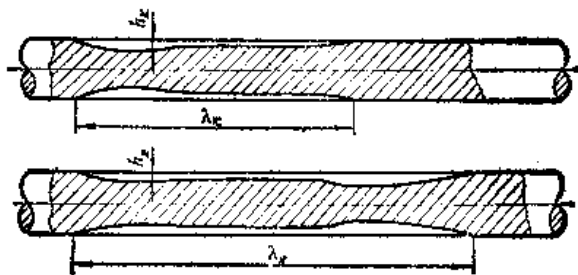


图10-14 长、短沟槽轮廓图

### 三、节制杆稳定性校核

用第七章介绍的公式计算稳定性所允许的极限载荷  $P_i$ 。但公式中杆的截面惯性矩应考虑沟槽的存在 (参看图10-13), 对  $X-X$  轴及  $Y-Y$  轴的惯性矩分别为:

$$I_{x-x} \approx -\frac{\pi}{4} r^4 - 2 \frac{b^3 h'_g}{12} - 2 \left( bh'_k Z_1^2 + \frac{bh_k'^2}{12} \right) \quad (10-97)$$

$$I_{y-y} \approx -\frac{\pi}{4} r^4 - 2 \frac{b^3 h'_k}{12} - 2 \left( bh'_g Z_2^2 + \frac{bh_g'^2}{12} \right) \quad (10-98)$$

应选择几个断面, 计算  $I_{x-x}$ ,  $I_{y-y}$  并取其中最小惯性矩数据代入稳定性公式进行校核。

### 第四节 活门式液压缓冲器的计算

在一些采用短节制杆式驻退复进机或活门式驻退复进机的火炮上, 为了可靠地节制

复进，还安装有活门式复进液压缓冲器。它在复进到位前的一段距离上起作用，对复进再提供一个液压阻力 $\phi_{\text{液}}$ ，以避免复进到位时可能产生的冲击。59-100G 等火炮上就采用了复进液压缓冲器。这种液压缓冲器的流液孔是靠弹簧控制的活门来调节的，此处简要介绍其液压阻力的计算方法。

### 一、活门式液压缓冲器的动作

当火炮的后坐部分复进至到位前 200 毫米时，炮尾开始碰到缓冲杆，推动缓冲杆一起复进。缓冲杆在待工作状态时，在弹簧作用下缓冲杆伸在外面，这伸出的那一部分体积就形成了活塞前方的真空。因此在相当一段行程上，缓冲杆活塞的移动并不挤压前方的液体而只是排除其前方的真空，这段行程称为缓冲第一阶段。设缓冲全行程为  $L$ ，则第一阶段的行程  $l_1$  可由下式求得：

$$\frac{\pi}{4} D^2 l_1 = \frac{\pi}{4} d^2 L$$

故

$$l_1 = \left( \frac{d}{D} \right)^2 L \quad (10-99)$$

式中：  $D$ ——缓冲器活塞直径；

$d$ ——缓冲杆直径。

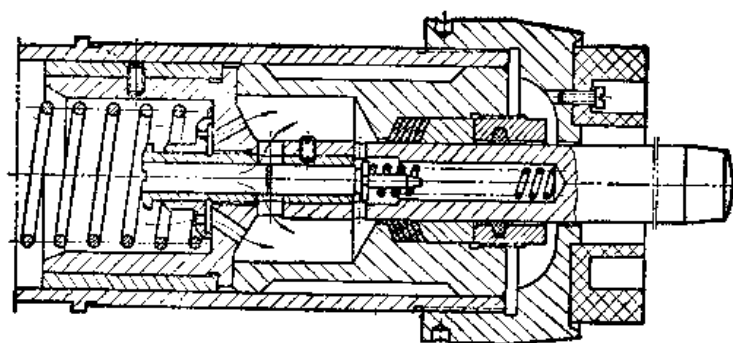


图10-15 液压缓冲器的动作

在这段行程中，只有弹簧力  $P_{\text{弹}}$  及其紧塞具的摩擦力  $F_{\text{摩}}$  起作用。活塞前方真空消失后，缓冲器的工作进入第二阶段，挤压液体，关闭活塞头上的外活门，同时在液体压力作用下推动内活门压缩弹簧，打开液体经导管进入活塞后腔的通道。此时液体有两条由活塞前方进入活塞后方的液流，一条是沿外活门上的两个小孔，另一条是内活门所打开的活塞杆上的两个通孔。从图上可以看出，外活门上小孔形成的流液孔  $a_0$  的面积是不变的，而内活门的打开高度则随活塞前方液体压力  $p$  在弹簧控制下而变化，因此它所开启的通孔面积  $a_p$  是变化的。压力  $p$  越高，弹簧的压缩越大，通孔开启的面积  $a_p$  也越大，压力就不容易再升高。反之  $p$  越小，开启面积  $a_p$  也越小，压力也不容易再降低。可见内活门起了调节缓冲器中压力的作用，以保证缓冲器能较平稳的工作。

### 二、活门式缓冲器阻力的计算公式

缓冲器工作的第一阶段 ( $0 \rightarrow l_1$ )，只有弹簧及紧塞具摩擦力起作用，因此

$$R_{h_0} = P_{h_0} + KX + F_{h_0} \quad (10-100)$$

式中:  $P_{h_0}$ ——缓冲器弹簧初力;

$K$ ——缓冲弹簧刚度系数。

缓冲器工作的第二阶段 ( $l_1 \rightarrow L$ ), 液压阻力  $\phi_{h_0}$  参加工作, 因此

$$R_{h_0} = \phi_{h_0} + P_{h_0} + KX + F_{h_0} \quad (10-101)$$

可用伯努利方程导出缓冲器活塞前方的液体压力  $p$

$$p = \frac{K_e \gamma}{20g} w^2 \quad (10-102)$$

式中  $w$  为通过不变孔  $a_0$  及调节孔  $a_p$  的流速。

不变孔  $a_0$  的面积应包括缓冲器活塞与筒壁间隙所形成的面积, 它与两个小孔面积相比是相当大的。

调节孔  $a_p$  的面积由内活门的打开高度  $y$  确定, 为简化计算, 可认为

$$a_p = \pi d_1 y \quad (10-103)$$

式中  $d_1$  为内活门直径。

而打开高度  $y$  又取决于弹簧力与液体压力的平衡条件, 即

$$pf = P_0 + K_2 y \quad (10-104)$$

式中:  $f$ ——内活门截面积;

$P_0$ ,  $K_2$ ——内活门弹簧的初力和刚度系数。

由式 (10-103), (10-104) 消去  $y$ , 有

$$p = \frac{K_2 a_p}{f \pi d_1} + \frac{P_0}{f} \quad (10-105)$$

而由式 (10-102) 并根据液流连续条件  $\left( w = \frac{A}{a_0 + a_p} U \right)$ , 可得

$$p = \frac{K_e \gamma}{20g} w^2 = \frac{K_e \gamma}{20g} \left( \frac{A}{a_0 + a_p} \right)^2 U^2 = C \left( \frac{A}{a_0 + a_p} \right)^2 U^2 \quad (10-106)$$

式中:  $A$ ——缓冲器活塞工作面积,

$$A = \frac{\pi}{4} D^2$$

$U$ ——复进速度,

$$C = \frac{K_e \gamma}{20g}$$

由式 (10-105), (10-106) 可得调节孔  $a_p$  与复进速度  $U$  的关系式:

$$a_p^3 + \alpha a_p^2 + \beta a_p + \gamma = \mu U^2 \quad (10-107)$$

式中:

$$\alpha = 2a_0 + \frac{P_0 \pi d_1}{K_2}$$

$$\beta = a_c^2 + 2a_c \frac{P_o \pi d_1}{K_2}$$

$$\gamma = a_c \frac{P_o \pi d_1}{K_2}$$

$$\mu = \frac{f \pi d_1}{K_2} C A^3$$

当结构及弹簧参量已知时, 这些系数均为常数。因此可以直接用式 (10-107) 画出调节孔面积与复进速度的关系曲线  $a_p-U^2$ 。

最后可得到缓冲第二阶段的阻力公式:

$$R_{hs} = \frac{K_c \gamma}{20g} \frac{A^3}{(a_c + a_p)^2} U^2 + P_{hs0} + KX + F_{hs} \quad (10-108)$$

液压阻力系数  $K_c$  亦应由实验测定。

在进行复进反面问题计算时, 当复进进入缓冲第二阶段时, 即将式 (10-108) 加入复进运动微分方程的阻力项中。通常液压缓冲器在火炮上设置两个, 故阻力应为  $2R_{hs}$ 。在反面问题计算中, 当知道了上一点的  $U_i^2$  以后, 可由  $a_p-U^2$  曲线查出  $a_{pi}$  作为  $a_p$  的第一次近似值, 代入计算  $R_{hs}$ 。在求出  $U_{i+1}^2$  的第一次近似值后, 还需再近似计算一次, 才能算得较准确的  $U_{i+1}^2$  值。

## 第五节 沟槽式液压缓冲器的计算

在火炮设计中可能用到的另一种缓冲器是沟槽式液压缓冲器。在 59-57 G 上, 这种缓冲器用来缓冲闩体支架的后坐运动。它以开在缓冲器壁上的沟槽作为缓冲器的流液孔, 这种沟槽的深度是不变的, 而以宽度的变化来适应缓冲的需要。作为一个单独的液压缓冲器, 它既可以用在火炮上, 也可以用在其它需要缓冲的机械上。它的计算公式, 有不同于其它反后坐装置液压机构计算的一些特点。计算公式的推导是以下述条件为基础的:

1. 被缓冲的物体以一定速度冲击到缓冲器上, 并在一定行程上使速度降至零。在整个缓冲过程中, 物体的质量不变。

2. 物体在缓冲过程中, 除液压缓冲器提供的阻力外, 没有其它附加外力作用于物体上。

如果缓冲器工作时不完全符合上述条件, 则应对计算公式加以补充。

### 一、沟槽式液压缓冲器的结构原理

沟槽式液压缓冲器的结构如图 10-16 所示, 缓冲器筒壁 (或衬筒) 上开有两条或三条沟槽, 沟槽深度不变, 宽度按直线规律由大到小地变化, 通常它是由两段直线组成的折线形成的。由于沟槽的宽度沿长度的变化是线性的, 所以缓冲器流液孔沿缓冲行程的变化, 可以用解析式表达出来。

按图 10-16 取的坐标原点, 则对应于第一段直线, 沟槽的宽度可写成,

$$b_x = b_0 - \frac{X}{\lambda}$$

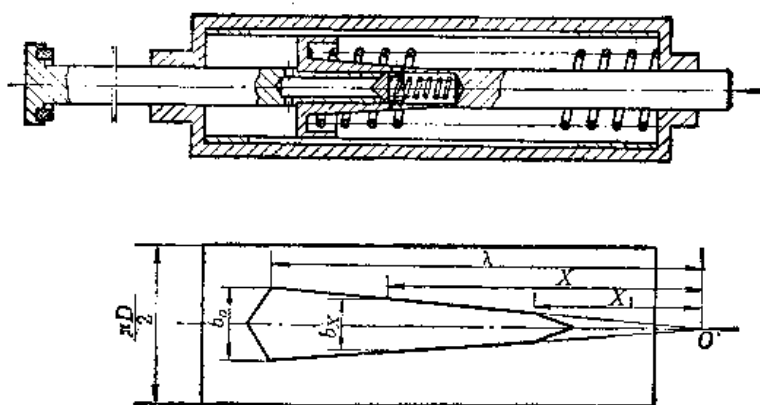


图10-16 沟槽式液压缓冲器原理

而相应的流液孔面积（当沟槽的深度为  $h$  时）

$$a_h = b_x h = b_0 h - \frac{X}{\lambda} = a_0 - \frac{X}{\lambda} \quad (10-109)$$

式中  $a_0 = b_0 h$  为缓冲开始时的流液孔面积。

重量为  $Q_h$  的物体，以速度  $U_{max}$  冲击到缓冲杆上时，缓冲杆活塞挤压其后方的液体，使它经沟槽形成的流液孔流到活塞前方，产生液压阻力，减缓了物体的运动速度。在速度减小的同时，流液孔面积也不断减小，直至流液孔为零时物体的运动速度为零。活塞后面的弹簧是缓冲杆的回动弹簧。为了使缓冲杆尽快在弹簧作用下回复原位，缓冲杆中有一个单向活门，以增加回动的液流通路。由于弹簧力很小，在缓冲时它与液压阻力相比可以忽略不计。

## 二、缓冲器液压阻力公式的推导

根据液流连续条件和伯努利方程，可写出对应于  $X$  行程时，缓冲器液压阻力的公式：

$$\phi_{ho} = \frac{K_h \gamma}{20g} \frac{A_h^3}{a_h^2} U^2 \quad (\text{混合单位}) \quad (10-110)$$

式中：  $A_h = \frac{\pi}{4} (D_h^2 - d_h^2)$  ——缓冲器工作面积；

$D_h$  ——缓冲筒内径；

$d_h$  ——缓冲杆直径。

将式 (10-109) 代入，得

$$\phi_{ho} = \frac{K_h \gamma}{20g} A_h^3 \left( \frac{\lambda}{a_0} \right)^2 \frac{U^2}{X^2} \quad (10-111)$$

根据动能定理和前述没有附加外力的条件，可知在  $X$  处物体的动能，应被  $X$  以后的一段行程上缓冲器液压阻力所作的功抵销，即

$$\frac{Q_h}{2g} U^2 = \int_0^x \phi_{ho} dX \quad (10-112)$$



将式 (10-112) 代入式 (10-111), 有

$$\phi_{ho} = \frac{K_h \gamma}{20g} A_h^3 \left( \frac{\lambda}{a_o} \right)^3 - \frac{2g}{Q_h} \frac{\int_0^x \phi_{ho} dX}{X^2}$$

令常系数 
$$N = \frac{K_h \gamma}{20g} A_h^3 \cdot \frac{\lambda}{a_o^3} - \frac{2g}{Q_h}$$

则有 
$$X^2 \phi_{ho} = N \lambda \int_0^x \phi_{ho} dX \quad (10-113)$$

解此方程, 就可以得到缓冲器液压阻力对  $X$  的解析表达式。将其微分, 有

$$X^2 d\phi_{ho} + 2X \phi_{ho} dX = N \lambda \phi_{ho} dX$$

分离变量

$$\frac{d\phi_{ho}}{\phi_{ho}} = \frac{N \lambda dX}{X^2} - \frac{2dX}{X}$$

积分可得通解

$$\phi_{ho} = \frac{c}{X^2 e^{\frac{N\lambda}{X}}} \quad (10-114)$$

根据动能定理

$$\begin{aligned} \frac{Q_h}{2g} U_{\max}^2 &= \int_0^\lambda \phi_{ho} dX = \int_0^\lambda \frac{c}{X^2 e^{\frac{N\lambda}{X}}} dX \\ &= \frac{c}{N\lambda} \int_0^\lambda e^{-\frac{N\lambda}{X}} d\left(-\frac{N\lambda}{X}\right) = \frac{ce^{-N}}{N\lambda} \end{aligned}$$

故积分常数

$$c = N\lambda e^N \frac{Q_h}{2g} U_{\max}^2 \quad (10-115)$$

为了便于后面的研究, 用平均液压阻力  $\phi_{pj\lambda}$  来表示缓冲开始时的动能,

$$\phi_{pj\lambda} = \frac{Q_h}{2g} U_{\max}^2 \quad (10-116)$$

则

$$c = N\lambda^2 e^N \phi_{pj\lambda} \quad (10-117)$$

将其代入式 (10-114), 最后得

$$\phi_{ho} = N \left( \frac{\lambda}{X} \right)^2 e^{-N \left( \frac{\lambda}{X} - 1 \right)} \phi_{pj\lambda} \quad (10-118)$$

式 (10-118) 是缓冲器液压阻力对行程  $X$  的解析表达式。只要按式 (10-116) 先求出缓冲器液压阻力的平均值, 对于任意  $X$  都可得到对应的  $\phi_{ho}$ 。

### 三、缓冲器液压阻力公式的讨论

既然  $\phi_{hc}$  对  $X$  有解析表达式, 则可用数学分析的方法对  $\phi_{hc}$  的规律进行研究。

#### 1. 最大值出现的位置

将式 (10-118) 对  $X$  微分

$$\begin{aligned}\frac{d\phi_{hc}}{dX} &= \left[ N \left( \frac{\lambda}{X} \right)^2 e^{-N \left( \frac{\lambda}{X} - 1 \right)} N \frac{\lambda}{X^2} + e^{-N \left( \frac{\lambda}{X} - 1 \right)} N \left( -\frac{2\lambda^2}{X^3} \right) \right] \phi_{pj\lambda} \\ &= N e^{-N \left( \frac{\lambda}{X} - 1 \right)} \left( \frac{\lambda}{X} \right)^2 \left[ N \frac{\lambda}{X^2} - \frac{2}{X} \right] \phi_{pj\lambda}\end{aligned}$$

当  $\frac{N\lambda}{X} = 2$  时, 即  $X = 0.5N\lambda$  时,  $\phi_{hc}$  有根值, 并且可以证明 (从略) 它就是最大值。将  $X = 0.5N\lambda$  代入式 (10-118), 得

$$\phi_{hc\max} = \frac{4}{N} e^{N-2} \phi_{pj\lambda} \quad (10-119)$$

#### 2. 最大值最小的条件

由式 (10-119) 可知, 只要根据  $Q_h$ ,  $U_{\max}$  和  $\lambda$  求出  $\phi_{pj\lambda}$ , 又根据结构参量  $K_h \gamma$ 、 $A_h$ 、 $a_0$  求出  $N$ , 就可以得到在这些特定条件下的缓冲器液压阻力的最大值  $\phi_{hc\max}$ 。然而其中的  $a_0$  是流液孔的起始面积, 它的大小是待确定的。在其它参量不变的条件下, 它的大小影响着  $N$  亦即影响着  $\phi_{hc\max}$  的大小。因此, 可以按  $\phi_{hc\max}$  最小的条件来确定起始流液孔面积  $a_0$  的大小。将  $\phi_{hc\max}$  对  $N$  微分, 有

$$\frac{d\phi_{hc\max}}{dN} = -\frac{4}{e^2} \left( \frac{N e^N - e^N}{N^2} \right) \phi_{pj\lambda}$$

当  $N = 1$  时,  $\phi_{hc\max}$  有极值, 可以证明 (从略) 它就是最小值。

将  $N = 1$  代入式 (10-119), 有

$$\phi_{hc\max} = \frac{4}{e} \phi_{pj\lambda} = 1.47 \phi_{pj\lambda} \quad (10-120)$$

它出现在  $X_m = 0.5\lambda$  处。

将  $N = 1$  代入式 (10-118), 有

$$\phi_{hc} = \left( \frac{\lambda}{X} \right)^2 e^{1 - \frac{\lambda}{X}} \phi_{pj\lambda} = \alpha_x \phi_{pj\lambda} \quad (10-121)$$

式中

$$\alpha_x = \left( \frac{\lambda}{X} \right)^2 e^{1 - \frac{\lambda}{X}}$$

它的数值见表10-2。

显然, 缓冲开始时  $X = \lambda$ , 缓冲液压阻力

$$\phi_{h00} = \phi_{pj\lambda}$$

### 3. 起始流液孔面积

根据最大缓冲液压阻力最小的条件, 将前述  $N$  值代入  $N=1$  式, 有

$$\frac{K_h \gamma}{20g} A_h^3 \frac{\lambda}{a_o^2} \frac{2g}{Q_h} = 1$$

故

$$a_o = A_h \sqrt{\frac{K_h \gamma A_h \lambda}{10 Q_h}} \quad (10-122)$$

式 (10-122) 采用混合单位, 应注意其中  $\lambda$  的单位为米。

### 4. $N=1$ 时缓冲运动速度的计算公式

由动能定理可知

$$\begin{aligned} U^2 &= \frac{2g}{Q_h} \int_0^X \phi_{hc} dX = \frac{2g}{Q_h} \int_0^X \left( -\frac{\lambda}{X} \right)^2 e^{1-\frac{\lambda}{X}} \phi_{pi\lambda} dX \\ &= \frac{2g}{Q_h} \lambda \phi_{pi\lambda} \int_0^X e^{1-\frac{\lambda}{X}} d\left(1 - \frac{\lambda}{X}\right) = \frac{2g}{Q_h} \lambda \phi_{pi\lambda} e^{1-\frac{\lambda}{X}} \end{aligned} \quad (10-123)$$

故

$$U = \sqrt{\frac{2g}{Q_h} \lambda \phi_{pi\lambda}} e^{0.5-\frac{\lambda}{2X}} = e^{0.5-\frac{\lambda}{2X}} U_{\max} = \beta_x U_{\max} \quad (10-124)$$

式中:  $\beta_x = e^{0.5-\frac{\lambda}{2X}}$ , 它的数值见表10-2。

表 10-2

$\frac{x}{\lambda}$	$\frac{6}{6}$	$\frac{5}{6}$	$\frac{4}{6}$	$\frac{3}{6}$	$\frac{2}{6}$	$\frac{1.5}{6}$	$\frac{1}{6}$	$\frac{0.5}{6}$
$\alpha_x$	1.0	1.180	1.364	1.471	1.217	0.796	0.242	0.024
$\beta_x$	1.0	0.905	0.779	0.606	0.368	0.223	0.082	0.004

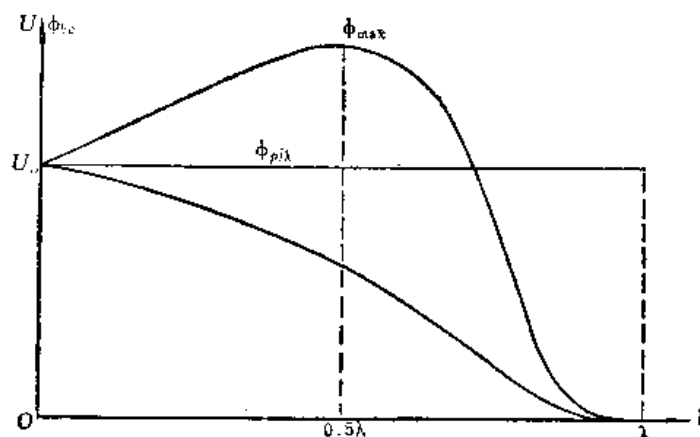


图10-17 一段式沟槽的  $\phi_{hc}$ ,  $U$  曲线

归纳前面对缓冲器液压阻力的讨论可知, 在确定了缓冲器的结构尺寸  $A_h$  和缓冲行程  $\lambda$  后, 应该按  $N=1$ , 即最大缓冲液压阻力最小的条件确定起始流液孔面积  $a_o$ 。这样整

个缓冲行程上液压阻力和缓冲速度的变化规律完全确定, 即

$$\phi_{hs} = \alpha_x \phi_{pj}, \quad U = \beta_x U_{\max}$$

$\phi_{hs}$  与  $U$  随行程变化的曲线见图10-17。

#### 四、两段式沟槽液压缓冲器的设计

从前面研究的一段式沟槽的结果看来, 在缓冲行程的末期大约  $0.7\lambda$  以后, 缓冲液压阻力  $\phi_{hs}$  迅速下降, 因而这一段缓冲长度利用率不高。应该适当减小流液孔面积, 使缓冲器液压阻力尽可能保持在平均液压阻力附近, 以充分利用有限的缓冲行程。通常沟槽式液压缓冲器都使其沟槽由两段折线组成 (见图10-18)。

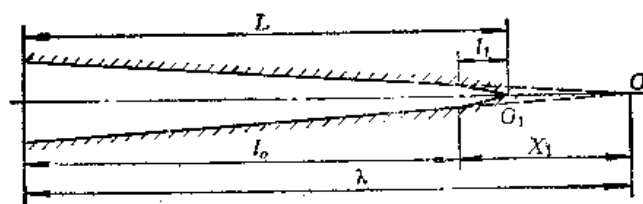


图10-18 两段式沟槽简图

##### 1. 当转折点为 $X_1$ 时, 第二段沟槽长度 $l_1$ 的确定

转折点为  $X_1$  时有速度  $U_{x_1}$ , 此时动能

$$E_{x_1} = \frac{Q_h}{2g} U_{x_1}^2 = \frac{Q_h}{2g} U_{\max}^2 \left( \frac{U_{x_1}}{U_{\max}} \right)^2 = \beta_{x_1}^2 E_{\max} = e^{\left(1 - \frac{\lambda}{X_1}\right)} E_{\max} \quad (10-125)$$

如果第二段长度为  $l_1$ , 则当  $N_1 = 1$  时, 此段的最大缓冲液压阻力

$$\phi_{hs\max_1} = 1.47 \frac{E_{x_1}}{l_1} = 1.47 \phi_{pj} l_1 \quad (10-126)$$

而第一段最大缓冲液压阻力

$$\phi_{hs\max} = 1.47 \frac{E_{\max}}{\lambda} = 1.47 \phi_{pj} \lambda$$

从较好的受力考虑, 应使第二段最大缓冲液压阻力与第一段的相等, 即

$$\phi_{hs\max_1} = \phi_{hs\max}$$

或

$$\phi_{pj} l_1 = \phi_{pj} \lambda$$

也就是

$$\frac{E_{\max}}{\lambda} = \frac{E_{x_1}}{l_1}$$

故

$$l_1 = \lambda \frac{E_{x_1}}{E_{\max}} = \beta_{x_1}^2 \lambda = e^{1 - \frac{\lambda}{X_1}} \lambda \quad (10-127)$$

此时缓冲的总长度

$$L = \lambda - X_1 + l_1 = \lambda \left(1 + e^{1 - \frac{\lambda}{X_1}}\right) - X_1 \quad (10-128)$$

##### 2. 缓冲总长度 $L$ 最小的条件

将  $L$  对  $X_1$  微分, 有极值时  $\frac{dL}{dX_1} = 0$ , 由

$$\frac{dL}{dX_1} = \lambda e^{1 - \frac{\lambda}{X_1}} \left( -\frac{\lambda}{X_1^2} - 1 \right) = 0 \quad (10-129)$$

即

$$e^{1 - \frac{\lambda}{X_1}} = \left( \frac{X_1}{\lambda} \right)^2$$

可解得

$$X_1 = 0.285\lambda$$

它说明, 两段折线的转折点  $X_1$  不应是任意取的, 为使缓冲总长度  $L$  最小, 应在  $X_1 = 0.285\lambda$  处转折。此时:

$$l_1 = \lambda e^{\left(1 - \frac{\lambda}{X_1}\right)} = 0.082\lambda \quad (10-130)$$

$$L = \lambda \left( 1 + e^{1 - \frac{\lambda}{X_1}} \right) - X = 0.797\lambda \quad (10-131)$$

用两段折线的沟槽, 在同样最大缓冲液压阻力的条件下, 缓冲行程可以缩短20%。反之, 在同样缓冲行程条件下, 最大缓冲液压阻力可以减小20%, 改善了火炮或其它机构的受力。同时, 两段折线沟槽在  $L$  长度上的平均缓冲液压阻力  $\phi_{pjL}$ , 也进一步接近于最大缓冲液压阻力值  $\phi_{h\sigma\max}$ 。二者的比值

$$\frac{\phi_{h\sigma\max}}{\phi_{pjL}} = \frac{1.47\phi_{pj\lambda}}{-\frac{\lambda}{L}\phi_{pj\lambda}} = -\frac{1.47 \times 0.797\lambda}{\lambda} = 1.17 \quad (10-132)$$

### 3. $N=N_1=1$ 的证明

第二段沟槽的相应公式, 都是在  $N_1=1$  的条件下进行的, 现在来证明  $N=N_1=1$  是成立的。由于

$$N = \frac{K_h \gamma}{20g} A_h^3 \frac{\lambda}{a_o^3} \frac{2g}{Q_h}$$

$$N_1 = \frac{K_h \gamma}{20g} A_h^3 \frac{l_1}{a_{x_1}^3} \frac{2g}{Q_h}$$

故

$$\frac{N_1}{N} = \left( \frac{a_o}{a_{x_1}} \right)^3 \frac{l_1}{\lambda}$$

而

$$a_{x_1} = a_o \frac{X_1}{\lambda}$$

则

$$\frac{N_1}{N} = \left( \frac{\lambda}{X_1} \right)^3 \frac{l_1}{\lambda} = \left( \frac{\lambda}{0.285\lambda} \right)^3 \frac{0.082\lambda}{\lambda} = 1$$

所以

$$N=N_1=1$$

这就是说当  $\phi_{h\sigma\max}$  出现最小值时, 只要取  $X_1=0.285\lambda$ , 第二段的  $\phi_{h\sigma\max_1}$  也必然是最小值, 而且  $\phi_{h\sigma\max} = \phi_{h\sigma\max_1}$ 。

### 4. 两段式沟槽的计算步骤

① 已知:  $Q_h$ 、 $U_{\max}$ 、 $A_{h_0}$

② 根据结构及允许受力条件确定实际缓冲行程  $L$

$$L = \frac{Q_h U_{\max}^2}{2g \phi_{pjL}}$$

$$\phi_{hc\max} = 1.17\phi_{piL}$$

③ 按  $N=1$  的条件计算起始流液孔面积  $a_0$ 。

$$a_0 = A_h \sqrt{\frac{A_h K_h \gamma \lambda}{10 Q_h}} \quad (\text{采用混合单位})$$

式中  $K_h$  取 1.5,

$$\lambda = \frac{L}{0.797}$$

在确定了沟槽深度  $h$  和条数  $n$  后, 则得沟槽的起始宽度  $b_0 = \frac{a_0}{nh}$

④ 第二段沟槽长:  $l_1 = 0.082\lambda = 0.103L$

⑤ 分段利用表 10-2 计算出液压阻力  $\phi_{hc}$  和速度  $U$ :  $\phi_{hc} = \alpha_x \phi_{pi\lambda}$ ,  $U = \beta_x U_{\max}$

⑥ 绘出  $\phi_{hc}-X$ ,  $U-X$  曲线, 见图 10-19。

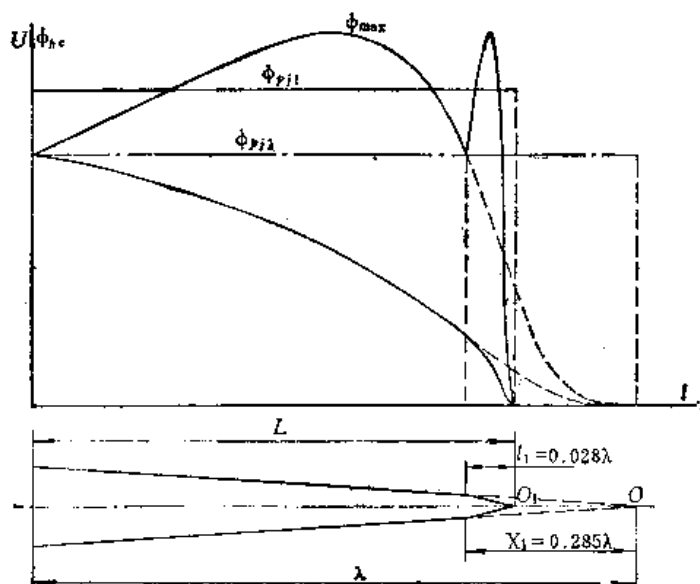


图 10-19 两段式沟槽的  $\phi_{hc}$ 、 $U$  曲线

## 第六节 复进全程为常数流液孔的复进节制器计算

在一些小口径高射炮及一些旧式小口径地面炮上, 为了简化结构曾采用复进全程为常数流液孔的复进节制器 (见图 10-20)。此外, 液体气压式输弹机在输弹时, 它的动作

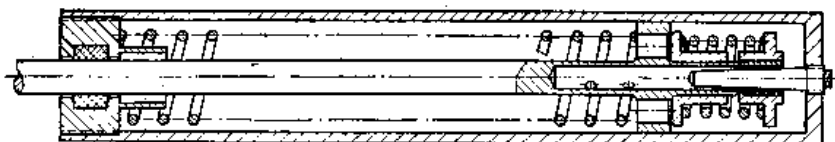


图 10-20 复进全程为常数流液孔的复进节制器原理图

过程也相当于一个有常数流液孔的复进制动过程 (例如 59-100 G 输弹机)。由于复进节制流液孔为常数, 故便于用解析法解复进运动微分方程。此处简单介绍它的计算方法, 供设计时参考。

### 一、复进运动诸元计算

由于只有复进节制器提供液压阻力，故复进运动微分方程为：

$$\frac{Q_0}{2g} \frac{d(U^2)}{d\xi} = P_{sh} - \phi_f = P_{sh} - \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_f^3}{a_{fo}^2} U^2 \quad (10-133)$$

式中：\$A\_f\$——复进节制器工作面积，

\$a\_{fo}\$——常数流液孔面积。

为了便于数学运算，对复进剩余力写成如下的解析函数：

$$P_{sh} = P_{sh\lambda} - \frac{P_{sh\lambda} - P_{sho}}{\lambda^m} \xi^m \quad (10-134)$$

其中指数 \$m=0.5\sim 0.7\$ 时可使之与实际复进剩余力曲线较好地重合，将式 (10-134) 代入式 (10-133) 可得

$$\frac{dU^2}{d\xi} = P_{sh}' - \varepsilon \xi^m - P_{ff} U^2 \quad (10-135)$$

式中：

$$P_{sh}' = \frac{2g}{Q_0} P_{sh\lambda}$$

$$\varepsilon = \frac{2g}{Q_0} \frac{P_{sh\lambda} - P_{sho}}{\lambda^m}$$

$$P_{ff} = \frac{2g}{Q_0} \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_f^3}{a_{fo}^2}$$

它是一阶非齐次线性微分方程：

$$\frac{dU^2}{d\xi} + P_{ff} U^2 = P_{sh}' - \varepsilon \xi^m$$

它的通解是

$$\begin{aligned} U^2 &= e^{-\int P_{ff} d\xi} \left[ \int (P_{sh}' - \varepsilon \xi^m) e^{\int P_{ff} d\xi} d\xi + c \right] \\ &= \frac{P_{sh}'}{P_{ff}} - \varepsilon e^{-P_{ff}\xi} \int \xi^m e^{P_{ff}\xi} d\xi + c e^{-P_{ff}\xi} \end{aligned} \quad (10-136)$$

$$\text{令 } f(P_{ff}\xi) = \xi^{-(m+1)} \int \xi^m e^{P_{ff}\xi} d\xi = \frac{1}{m+1} + \frac{P_{ff}\xi}{m+2} + \frac{(P_{ff}\xi)^2}{(m+3)2!} + \frac{(P_{ff}\xi)^3}{(m+4)3!} + \dots$$

$$\text{则 } U^2 = \frac{P_{sh}'}{P_{ff}} - \varepsilon \xi^{m+1} e^{-P_{ff}\xi} f(P_{ff}\xi) + c e^{-P_{ff}\xi} \quad (10-137)$$

当 \$\xi = 0\$ 时，\$U = 0\$，代入式 (10-137) 可求得积分常数

$$c = -\frac{P_{sh}'}{P_{ff}}$$

最后得到复进速度 \$U\$ 对应于复进行程 \$\xi\$ 的解析表达式：

$$U^2 = \frac{P_{sh}'}{P_{ff}} (1 - e^{-P_{ff}\xi}) - \varepsilon \xi^{m+1} e^{-P_{ff}\xi} f(P_{ff}\xi) \quad (10-138)$$

其中函数 \$e^{-P\_{ff}\xi}\$ 及 \$f(P\_{ff}\xi)\$ 可查附表，只要事先求得 \$P\_{sh}'\$、\$\varepsilon\$ 和 \$P\_{ff}\$，即可利用式 (10-138) 及查附表计算得对应于任意复进行程 \$\xi\$ 上的复进速度 \$U\$ 值。

## 二、常数流液孔面积 $a_{fo}$ 的计算

如果复进的制动完全靠常数流液孔  $a_{fo}$ , 则应使其满足复进到位 ( $\xi = \lambda$ ) 时, 复进速度接近于零。通常设计中要求  $U_\lambda = 0.1 \sim 0.15$  米/秒。计算时可先按  $\xi = \lambda$  时,  $U = 0$  的条件求出  $a_{fo}$ , 然后将其略加大一些来得到。为此, 将式 (10-138) 写成

$$\frac{P'_{sh\lambda}}{P_{ff}}(1 - e^{-P_{ff}\lambda}) = \varepsilon \lambda^{m+1} e^{-P_{ff}\lambda} f(P_{ff}\lambda)$$

$$\text{或} \quad \frac{P'_{sh\lambda}}{\varepsilon \lambda^m} = \frac{P_{ff}\lambda}{e^{P_{ff}\lambda} - 1} f(P_{ff}\lambda) \quad (10-139)$$

$$\text{令} \quad F(P_{ff}\lambda) = \frac{P_{ff}\lambda}{e^{P_{ff}\lambda} - 1} f(P_{ff}\lambda)$$

函数  $F(P_{ff}\lambda)$  见书后附表。将  $\varepsilon$  及  $P'_{sh\lambda}$  代入式 (10-139) 得

$$\frac{P'_{sh\lambda}}{P_{sh\lambda} - P_{sho}} = F(P_{ff}\lambda) \quad (10-140)$$

式 (10-140) 之左方各值均为已知, 用此式可求出函数  $F(P_{ff}\lambda)$  的值。查表中对应于函数  $F(P_{ff}\lambda)$  的值反求出  $P_{ff}\lambda$ , 然后进一步求出  $P_{ff}$  的数值。

$$\text{因为} \quad P_{ff} = \frac{2g}{Q_o} \frac{K\gamma}{20g} \frac{A_j^3}{a_{fo}^2}$$

$$\text{所以} \quad a_{fo} = \sqrt{\frac{K\gamma}{10Q_o} \frac{A_j^3}{P_{ff}}} \quad (10-141)$$

$a_{fo}$  应根据实际结构尺寸进行调整。最后的  $a_{fo}$  的面积确定后, 即可求出实际  $P_{ff}$  值由式 (10-138) 进行运动诸元并进而进行液压阻力的计算, 然后绘出  $P_m-\xi$ 、 $\phi_f-\xi$ 、 $U-\xi$  曲线。

有的火炮上要求一定的复进到位速度  $U_\lambda$ , 因此当  $\xi = \lambda$  时, 应有:

$$U_\lambda^2 = \frac{P'_{sh\lambda}}{P_{ff}}(1 - e^{-P_{ff}\lambda}) - \varepsilon \lambda^{m+1} e^{-P_{ff}\lambda} f(P_{ff}\lambda) \quad (10-142)$$

这时只能用试算法计算, 即先任选一个  $a_{fo}$  求出  $P_{ff}$  代入式 (10-142) 计算  $U_\lambda$ , 看它是否符合设计要求, 然后适当加大或减小  $a_{fo}$  的值再计算  $P_{ff}$  和  $U_\lambda$ , 直到符合设计要求为止。



## 第十一章 火炮的前冲原理和前冲机的设计

早在第一次世界大战前后,就有过将前冲原理应用于火炮上的研究和实践。第二次世界大战后,各国对前冲原理在火炮上的应用研究更为重视。不少国家在他们的小口径自动炮(高炮、航炮、舰炮)上都有不少的尝试并在装备使用中证明了它的优越性。与此同时,在地面反坦克火炮和压制火炮上也作了大量的试验及装备的研究,有的火炮已经定型和拟装备部队。特别是将前冲原理与可压缩(弹性)液体的采用相结合,对地面火炮结构和性能变化的影响将是甚为可观的,受到各方面的重视。

从实质上讲,前冲炮只是弹性炮架火炮的一种特殊的结构形式,而实现前冲原理的前冲机也只是一种特殊形式的反后坐装置。前冲原理以及前冲机设计的研究自然也成为本课程的一个组成部分。本章中,我们仅较详细地研究地面火炮上前冲原理和前冲机设计的问题。关于在小高炮上的应用在《火炮自动机设计》中有较详细的说明。

### 第一节 前冲原理及它在地面火炮上应用的优点

#### 一、前 冲 原 理

前冲火炮在发射时后坐部分运动循环的方式与一般后坐火炮有很大的不同,图11-1为两种火炮射击循环的对比简图。发射前,前冲炮的后坐部分被卡在后方位置,前冲机中的气体处于被压缩的较高压力状态。射击时,首先解脱卡锁,后坐部分在前冲机力的作用下向前加速运动。在到达一定的前冲位置或前冲速度时,击发机构动作使装药点火。火药气体对后坐部分的作用力起初是使前冲运动停止,然后使后坐部分加速向后后坐。后坐部分的后坐运动压缩前冲机中的气体,储存下一次发射所需的前冲能量。当火药气体的作用力小于前冲机的阻力及后效期结束以后,后坐减速运动,直至超过卡锁一定距离后,后坐停止。这时,在前冲机力的作用下,经过很短行程的复进,直到后坐部分被卡锁卡住为止。这就完成了一次射击的前冲后坐循环,并作好了下一次发射的准备。

前冲炮这种发射循环的主要特点是充分地利用了前冲机所储存的能量(亦即上一发的后坐动能),使得前冲炮的运动和受力与一般后坐火炮有了极大的不同。在解脱卡锁后,前冲机所储存的能量几乎全部用来使后坐部分加速达到最大前冲速度,使得后坐部分获得相当大的前冲动量。击发点火以后,炮膛合力对后坐部分作用的冲量的相应的一部分(差不多是全冲量的一半)被此动量所抵销。结果,剩下的炮膛合力冲量所能达到的最大后坐速度将被大大地减小。它可表示成

$$\frac{Q_0}{g} W'_{\max} = \int_0^{t_g + \tau} P_{tr} dt - \frac{Q_0}{g} U_{\max} \approx -\frac{1}{2} I_h = -\frac{1}{2} \frac{Q_0}{g} W_{\max}$$

这个后坐速度所具有的后坐动能只恰够压缩前冲机使后坐部分回复到挂卡位置并储存好下一发前冲的能量。由于后坐最大速度被减小,从而后坐动能亦被减小。在相同的后坐条件下,火炮的受力将仅是一般后坐火炮的1/4。

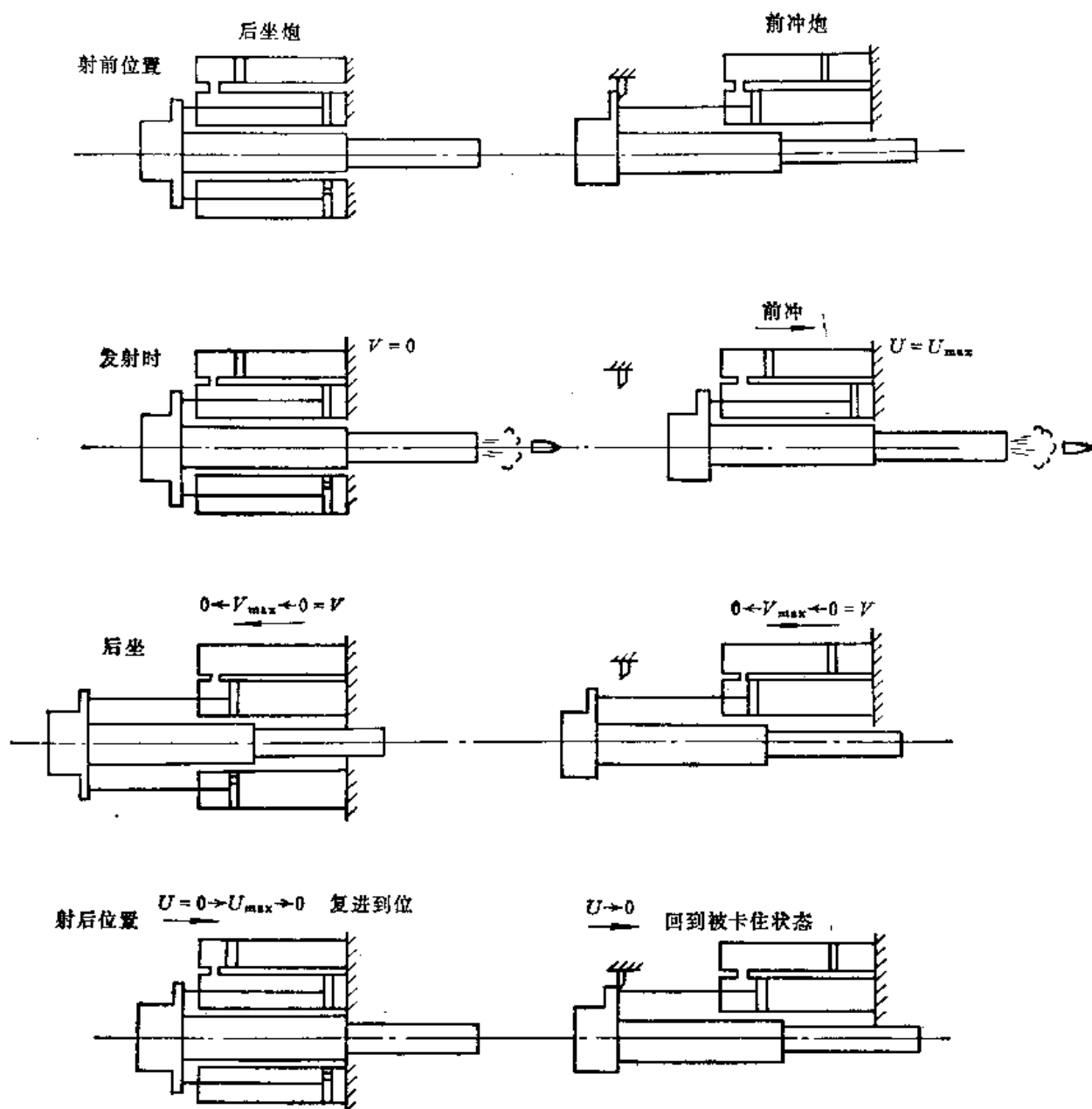


图11-1 两种火炮射击循环的对比

为了对前冲原理的这一突出的特点有一个明确的数量概念，此处用前冲机力是常数的前冲后坐运动与后坐阻力是常数的一般后坐运动来进行说明和比较。

后坐阻力是常数的后坐是大家所熟知的固定式火炮第一类制动图的情况。根据过去的分析可知，炮膛合力全冲量 $I_h$ 应在后坐全过程 $T_h$ 中被常数后坐阻力 $R_h$ 所提供的全冲量所抵销，

$$R_h T_h = I_h$$

或

$$R_h = \frac{I_h}{T_h} \quad (11-1)$$

如果后坐长度是 $\lambda$ ，则可以近似地认为：

$$\lambda = \frac{g R_h T_h^2}{2 Q_0}$$

其中  $\frac{gR_h}{Q_0}$  是在常数阻力  $R_h$  作用下后坐部分的减速度值。

故有 
$$T_h = \frac{2\lambda Q_0}{gI_h} \quad (11-2)$$

及 
$$R_h = \frac{gI_h^2}{2\lambda Q_0} \quad (11-3)$$

在弹道条件和炮口制退器效率一定的条件下, 炮膛合力全冲量  $I_h$  是一定的。在已知后坐部分重量  $Q_0$  和规定了后坐长度  $\lambda$  之后, 即可利用上两式估算所需的不变后坐阻力值  $R_h$  和所经历的后坐时间  $T_h$  值。这时火炮受力的大小也等于  $R_h$ 。

一种理想的前冲后坐循环是这样的: 在整个前冲后坐过程中前冲机力  $R_q$  是一个常数, 且没有任何附加摩擦力, 前冲行程恰好等于后坐行程。在这种理想的条件下, 如果前冲后坐总时间是  $T_{qh}$ , 则也应有

$$\int_0^{T_{qh}} R_q dt = R_q T_{qh} = I_h$$

或 
$$R_q = \frac{I_h}{T_{qh}} \quad (11-4)$$

为了与后坐火炮相比较, 取相同的后坐长  $\lambda$ , 可以设想, 在此长度上, 前冲 (或后坐) 所需的时间只是总时间的一半, 即  $T_{qh}/2$ , 而

$$\lambda = \frac{gR_q}{2Q_0} \left( \frac{T_{qh}}{2} \right)^2 = \frac{gR_q T_{qh}^2}{8Q_0}$$

其中  $\frac{gR_q}{Q_0}$  是在前冲机力作用下的后坐部分运动加 (减) 速度值。

故有 
$$T_{qh} = \frac{8Q_0}{g} \frac{\lambda}{I_h}$$

及 
$$R_q = \frac{g}{8Q_0} \frac{I_h^2}{\lambda} \quad (11-5)$$

比较 (11-3)、(11-5) 可知在理想的前冲后坐运动循环条件下, 在相同的后坐长度上, 前冲原理火炮和一般后坐火炮的后坐阻力相比相差达四倍, 即  $R_h/R_q = 4$ 。也就是火炮的受力将减小四分之三。

实际的前冲后坐运动中, 前冲机力是由弹性介质提供的, 不可能是常数, 又不可避免的存在着摩擦及流动损失, 所以在前冲时后坐部分所受的前冲合力要比前冲机提供的力小, 在后坐时后坐部分所受的后坐阻力要比前冲机力大。这说明实际的前冲原理火炮使火炮受力减小的程度并没有理想的那么大。

前冲机的效率  $\eta_q$  定义为: 由于前冲原理的采用, 在相同后坐长度上, 和后坐火炮相比, 使火炮受力减小的百分数, 即:

$$\eta_q = \frac{R_{h\max} - R_{q\max}}{R_{h\max}} \times 100\% \quad (11-6)$$

显然, 理想前冲原理火炮的前冲机效率

$$\eta_q = \frac{4R_q - R_q}{4R_q} \times 100\% = 75\%$$

实际的前冲机效率  $\eta_q < 75\%$ 。

## 二、前冲原理在火炮上应用的优点

归纳起来,前冲原理在火炮上应用有下述优点:

1. 大幅度地减小和改善了火炮在发射时的受力。前冲炮不仅受力小,而且在前冲和后坐运动中始终只承受向后方向的力,因而还极大的改善了火炮射击时的稳定性,减小了火炮驻锄或驻桩的面积,简便了火炮射击准备的操作。

2. 极大的缩短了射击循环的时间。由于一般后坐火炮复进时间 $T_r$ 远大于后坐时间 $T_h$ (10倍以上),而由式(11-2)与(11-4)比较可知 $T_{qh} = 4 T_h$ ,因此射击循环时间被极大的缩短了。这对于自动炮来说,就可以大幅度地提高火炮的射击频率。

3. 可以大幅度地降低火线高。由于后坐部分射前处于后方位置,保证挂卡所需的超卡量的长度有限,因而最大射角要求炮尾后方留出的长度也有限,大幅度降低火线高仍可以保证大射角后坐不碰地。这还进一步改善了火炮射击的稳定性和加大了火炮的直射距离。

4. 可能全面地改变火炮的总体结构。由于后坐稳定性比较有保证,就有可能使火炮采用大架前伸、火炮后坐盘落地、全炮绕坐盘支点 $360^\circ$ 旋转的新结构型式。这不仅使火炮后方有较空阔的区域便于炮手装填操作,又可以大大的减短火炮行军的全长。

5. 弹丸可获较高初速、炮口冲击波较小。由于弹丸出炮口时,炮身处于最前方位,其后坐速度远低于一般后坐火炮在弹丸出炮口时的后坐速度,在相同的相对速度条件下,弹丸有较高的绝对速度。同时在炮手区域的冲击波超压值,也因炮身处于较前方而比一般后坐火炮为小。

前冲炮的这些优点是十分突出的,因此它吸引着人们较长期地对它进行理论与实践的研究,并努力地进行各种样炮的研制。

## 三、前冲原理在地面火炮上应用需解决的基本问题

前冲原理在地面火炮上应用存在着不少复杂的问题,它使得前冲炮的结构复杂化,不便于掌握和操作使用。这是一些国家定型的地面前冲炮长期不能列入制式装备的原因。归纳起来,主要是如下一些问题:

### 1. 前冲炮应能适应大射角的变化

地面火炮特别是榴弹炮要求较大的射角变化。这将引起后坐部分在运动方向上重量分力的极大变化,而它的变化将极大地影响前冲有效力的变化。设以液体气压式前冲机为例,在不考虑液体流动造成的损失而只考虑摩擦影响时,前冲和后坐时的前冲有效力 $P_{iq}$ 分别为:

$$P_{iq} = (1 - v)P_q - Q_0 f \cos \varphi - Q_0 \sin \varphi$$

$$P_{iq} = (1 + v)P_q + Q_0 f \cos \varphi - Q_0 \sin \varphi \quad (11-7)$$

其中  $P_q$ ——前冲机力;

$v$ ——前冲机中紧塞装置的相当摩擦系数;

$f$ ——摇架滑板的摩擦系数。

为了进一步说明问题,不妨完全忽略摩擦力,则前冲与后坐时的有效力均相等,

$$P_{\text{eq}} = P_q - Q_o \sin \varphi \quad (11-8)$$

显然, 射角  $\varphi$  越大前冲有效力越小。我们知道, 不论在什么射角下都要求前冲有效力在运动循环中提供足够的冲量抵销掉炮膛合力的全冲量, 即:

$$\int_0^{T_{qh}} (P_q - Q_o \sin \varphi) dt = I_h$$

其中由于  $Q_o \sin \varphi$  项的存在, 说明射角越大就越要求加长前冲时间  $T_{qh}$  和行程  $\lambda$ , 以抵销掉全冲量  $I_h$  完成正常的运动循环。这就要求地面前冲炮能随着射角的变化自动地调整前冲击发行程, 使射角越大时, 前冲击发行程越长。

这个问题在大多数地面前冲炮上是靠定速击发的方式来解决的。在装药号数 (亦即  $I_h$ ) 一定的条件下, 对于各个不同射角, 只有在达到了相同的前冲速度时, 才可以使火炮击发。这样就可以实现正常的运动循环。这是因为, 前冲速度  $U_m$  的不变保证了前冲动量的不变, 按照一般规律, 应有,

$$\frac{Q_o}{g} U_m = -\frac{1}{2} I_h \quad (11-9)$$

这个动量是前冲有效力提供的,

$$\frac{Q_o}{g} U_m = \int_0^{T_{qh}} \frac{1}{2} (P_q - Q_o \sin \varphi) dt = -\frac{1}{2} \int_0^{T_{qh}} (P_q - Q_o \sin \varphi) dt \quad (11-10)$$

比较这两式可知, 正好

$$\int_0^{T_{qh}} (P_q - Q_o \sin \varphi) dt = I_h \quad (11-11)$$

这就证明了, 不论射角如何变化, 只要实现了定速击发, 就自动调整了前冲运动循环的时间和行程, 保证了正常的运动循环。式 (11-11) 还说明这种定速击发的方式还能自动调整由于温度变化造成前冲机力  $P_q$  变化的影响, 依旧保证正常的运动循环。

## 2. 前冲炮应能适应多种装药的变化

地面火炮特别是榴弹炮装药号的变化多, 这就引起了炮膛合力全冲量  $I_h$  的多种数值。在不变的前冲机结构条件下, 要保证正常的运动循环, 须在小号装药时使前冲时间和行程变小, 在大号装药时使前冲时间和行程变大。这个问题, 在前冲炮采用了定速击发方式以后, 只要对应不同的装药号  $n$ , 调整相应的击发速度  $U_{mn}$  即可, 即使

$$U_{mn} = \frac{g}{2Q_o} I_{hn}$$

## 3. 前冲炮要求有专门的卡锁装置

前冲炮的后坐部分射前 (平时) 位置是处于后方的, 这主要是靠卡锁来使它保持静止不动。此时, 前冲机处于最大压缩状态,  $P_q$  力最大, 它将是后坐部分重量的几倍并完全作用在卡锁上。这就要求卡锁机构有足够的强度和刚度, 在一次运动循环后能承受较大的复进到位速度的冲击, 确实可靠地将后坐部分卡住, 又要求在发射时能轻便的使卡锁解脱。

## 4. 迟发火及瞎火时的安全措施

虽然一般的弹药在点火后有较稳定的点火延迟时间, 它可以通过实验测量得到, 但是难免由于生产、储存、运输、气候等等原因产生迟发火和瞎火的现象。

当迟发火时, 后坐部分将在前冲机力作用下继续加速前冲, 前冲速度超过原定击发

速度才能完全点火。这时由于前冲的动量已超过了炮膛合力全冲量的一半，因而后坐速度比正常为小，它已不足以克服前冲有效力使后坐长度超过挂卡的位置，这就不能实现正常的运动循环。这个问题可以用切断前冲机力的办法来解决。当到达击发速度而因迟发火继续前冲时，可在结构上采取措施将前冲机力切断，使后坐部分只能惯性前冲。此时速度将基本不变，待完全点火后，仍可获得正常的后坐速度，而且只有后坐到切断前冲机力的那一点才正式又由前冲机提供阻力。这就保证了不论是正常发火或迟发火都能有正常的运动循环。

当瞎火时，会出现更为严重的问题。如果没有切断前冲机力的措施，后坐部分将一直在前冲机力作用下向前加速运动，并以最大速度直接撞击到摇架上，极大的前冲能量将形成极大的撞击力会使火炮破坏或前翻。为了保证瞎火时火炮的安全，应该在前冲机中设置前（瞎火）缓冲器，以便在一段缓冲长度上提供阻力使前冲运动停止。这可控制火炮受到的向前作用力不太大，在大架前置的情况下，火炮不会前翻或损坏。

### 5. 操作失误时的安全措施

由于机构动作的偶然失灵，或在装定了小号装药的击发速度而操作时误装填了大号装药，这时可能出现前冲速度不足造成有较大的剩余炮膛合力的冲量使火炮后坐（如果在卡锁位置造成了击发，将有与后坐火炮相同的后坐速度）。在有限的结构允许的超卡长度上仅靠前冲机提供的阻力不足以消耗掉全部的后坐动能。结果仍可能使后坐部分以极大的后坐速度与摇架相撞。这个撞击力也会很大以致使火炮后翻或破坏。为了保证操作失误时火炮的安全，应该在前冲机中设置操作失误（后）缓冲器，以便在过卡后的一段超卡范围内，提供附加的后坐阻力使后坐运动逐渐停止，而且火炮受的后坐力不致太大。

### 6. 复进制动问题

超卡以后的复进如果没有相应的节制措施，也将象前冲运动一样迅速地加速。超卡量越大，复进挂卡时的速度越高，甚至可能达到 $3\sim 4$ 米/秒的速度。这样大的复进能量全部撞击在卡锁机构上势必使其破坏。即使卡锁机构的强度足够，极大的向前挂卡力也将传给火炮并推动全炮前移，使得驻锄或驻桩对地面的固定松动，影响下一发射击的静止性和精度。为了无论超卡量多少，都能有一致而较小的复进挂卡速度，应该在前冲机中采取复进制动的措施。

### 7. 后坐部分的后拉问题

当火炮迟发火或瞎火以后，后坐部分最终均在前缓冲器的作用下停止于最前方位置。为了使下一发正常的发射，必须克服前冲机力，将后坐部分拉回到挂卡位置。由于前冲机力很大，后坐部分所需移动的距离很长，必须在火炮上安装专门的后拉器或采取可靠迅速的后拉措施。

综上所述，要将前冲原理在地面火炮上良好地运用，必须在设计好火炮前冲机的同时，设计一般地面后坐火炮所没有的卡锁机构、定速击发和装定机构、前缓冲器、后缓冲器、复进制动器和后拉器等等。这就不可避免的使得前冲机的结构变得十分复杂，给训练操作和勤务使用带来很多不便。特别是在全装药最大射角所需的正常前冲后坐行程之外，还要留出相当长的前缓冲行程和后缓冲行程。这就要求结构上必须保证的后坐部分运动长度实际上比一般后坐火炮的长得多，因而使得摇架和起落部分的长度长、重量

大，给平衡机和高低机的设计带来困难。这些也是前冲炮的不足之处。

值得一提的是，当前冲原理用于加农炮时，它在直接瞄准时的命中精度可能低于一般后坐加农炮。这是因为弹丸出炮口时正是后坐部分处于最前方位置的时候，在这以前由于火炮受有前冲时的向后作用力以及后坐部分质量的大幅度向前位移，火炮已产生了复杂的振动。另外，又由于每发炮弹点火延迟时间的一定散布和每次发射地面驻锄或驻桩固定条件的变化，使得在弹丸出炮口时，炮身的振动角位移及角速度有较大的随机性。这就不可避免地影响了前冲炮的主靶精度。虽然在采取一定措施的情况下，可以使前冲炮的精度控制在一定范围内，但是总比一般后坐加农炮的精度略差。

## 第二节 前冲机的结构和动作

目前各国地面前冲炮尚处于研究发展阶段，其结构尚未完全定型或标准化，难于分类和详述。一般按所使用的弹性介质可将前冲机分为弹簧式、液体气压式及弹性液体式等三种类型；按前冲击发方式可以分为定点击发和定速击发两种方式。定速击发的前冲机中，控制击发的信号可以由液压速度传感器利用机械传动或测速电机利用电信号来发生。

### 一、几种前冲机结构简介

#### 1. 美155毫米前冲炮的前冲机

美军在105毫米和155毫米两种口径火炮上均发展了前冲炮。它们前冲机的结构大同小异，图11-2是155毫米榴弹炮的液体气压式前冲机原理图。它是一种筒推式液体气压式带液压速度传感器的前冲机。储气筒在炮身上方，工作筒在炮身下方连同炮身一起构成后坐部分。解脱卡锁后，储气筒中气体膨胀，液体通过炮身套箍上的通路流经速度传感器进入工作筒。由于工作筒中的活塞杆以其后端固定在摇架上，因此只能推压工作筒前壁带动后坐部分前冲。定速击发信号可由液压速度传感器发出。在工作筒前端固定的节制杆上开有变深度沟槽，其前端起后缓冲的作用，其后端起前缓冲的作用。

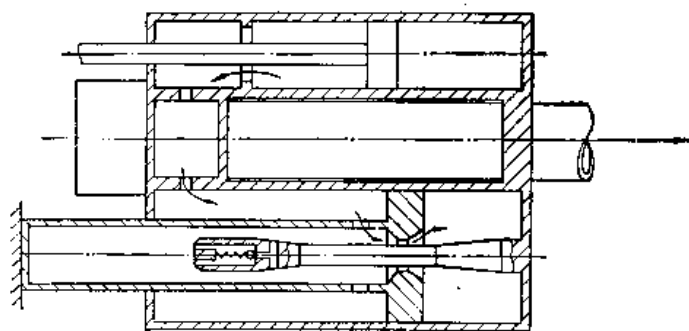


图11-2 美155毫米前冲炮前冲机原理图

#### 2. 100毫米滑膛前冲炮的前冲机

图11-3所示为100毫米滑膛前冲炮前冲机原理图。它是一种杆推式定点击发的液体气压式前冲机。工作筒与储气筒构成摇架的框架。两个工作筒上下对称排列以使炮身受力求对称。储气筒在最上方，其中没有游动活塞，气体靠少量的液体密封。储气筒中的单向活门是为了提供后坐时的附加阻力而设置的。工作筒中前端有带小孔的滑阀式前缓冲器，活塞头后端上的凸起台是起后缓冲作用的。如图所示的状态是火炮处于挂卡时的位置。如果后坐超卡以后复进时，工作筒后方的单向活门关闭，液体只能沿环形通道进入活塞头上的环形间隙，再经过其上直径很小的孔最后流入活塞后方推动活塞杆使后坐部

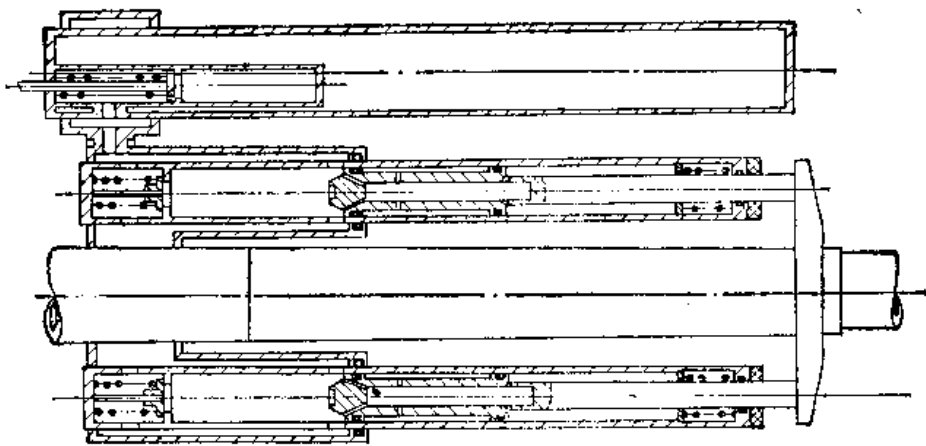


图11-3 100滑前冲机原理图

分复进挂卡，这就实现了它的复进制动。

### 3. 弹性液体的前冲机

美国正在研究弹性液体式的前冲机，图11-4是它的一种结构原理图。

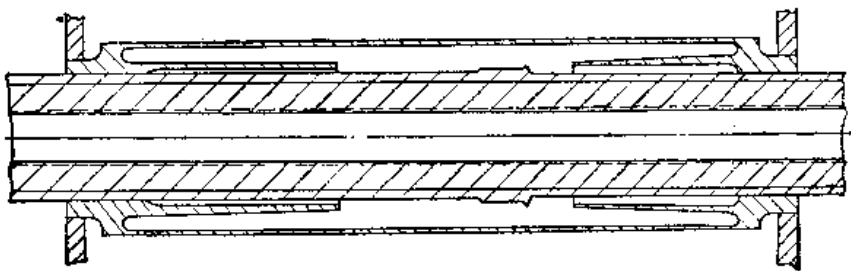


图11-4 弹性液体式前冲机原理

## 二、典型前冲机的结构和动作介绍

我们以130Q所用的前冲机作为典型对它的结构和动作作较详细的介绍。130Q前冲加农炮如图11-5所示。它所采用的是杆拉式带液压速度传感器的液体气压式前冲机（见图11-6）。它主要由储气筒和工作筒两大部分组成，它们与摇架前后套箍构成框架式结构，形成了火炮摇架的一个组成部分。整个前冲机构由卡锁机构，前冲机工作机构，定速击发机构，前缓冲器，后缓冲器等各部分组成。

卡锁机构应保证平时后坐部分牢固可靠的处于挂卡位置，击发时能迅速灵活的解卡，后坐过卡后能确实准确的挂卡。卡锁机构的结构及动作如图11-7所示。它由卡锁、卡锁轴、四连杆、稳定弹簧、卡锁定位和解脱机构组成。卡锁与上连杆通过花键与卡锁轴连成一体；下连杆与扇形板做成一体，它的运动受定位锁的限制；中连杆上有弹簧柱栓，可将一端固定在下连杆轴上的弹簧力传给中连杆。在挂卡状态时，由于定位销的限制（图11-7a），下连杆不能顺时针转动，中连杆处于垂直状态。作用于卡锁上的前冲机力通过上、中、下连杆的传递基本上作用于下连杆的轴上，而在定位销上受的力并不太大。这样，即使后坐部分复进挂卡时对卡锁有较大的撞击力，整个机构也有足够的强度。此时，稳定弹簧的拉紧力正好是使四连杆的转动确保挂卡状态。解脱卡锁时，只要向下压下解脱拉杆，即可通过拨动子将定位销拨向后方，







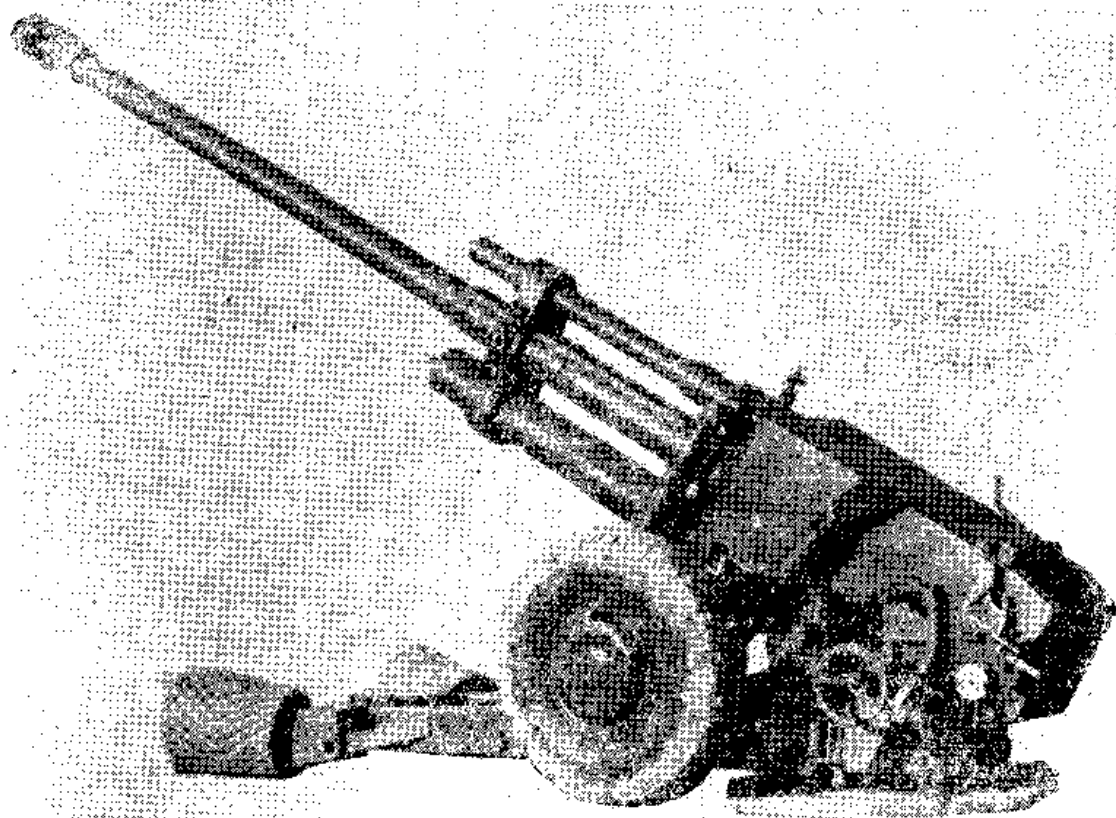


图11-5 130Q 前冲加农炮

使得销的一端让开了与下连杆一体的扇形板（图11-7 b）。在前冲机力的作用下，使卡锁带动下连杆顺时针转动，当稳定弹簧的轴线越过下连杆与中连杆的连接销轴时，它的拉紧力帮助上、下连杆转动，使得卡锁快速解脱，后坐部分无卡滞的前冲。由于弹簧的拉紧作用保持着卡锁始终处于抬起状态，以便卡锁不妨碍后坐部分的后坐过卡。当后坐部分在发射后后坐过卡时，炮尾上卡锁座的后斜面推压卡锁的后凸起，使卡锁向下转动，中连杆又将转回垂直位置。这时弹簧的轴线越过连接销轴线使扇形板迅速回位，而且不论解脱拉杆是否仍处于压下状态，定位销均在其回位弹簧的作用下迅速弹回，使得卡锁保持于等待挂卡的位置。这就保证了后坐部分在到位后确实挂卡。

前冲机工作机构实质上是一个贮气筒与工作筒分开的带游动活塞的复进机。贮气筒的直径较大，用游动活塞将氮气与液体隔开，可以容许有较多的贮气空间，使得在活塞工作行程范围内气体体积的相对变化量不大，只有较小的压缩比，以便提高前冲机的效率。摇架的后套箍是中空的，它保证了下方的贮气筒与上方工作筒中液体的连通。工作筒中带活塞的活塞杆后端固定在炮尾的卡锁座上，活塞杆运动即可带动整个后坐部分作前冲运动。

前缓冲器与后缓冲器均同心地安排在工作筒的后方。前缓冲器是变宽度沟槽的结构如图11-8所示。前缓冲杆平时在弹簧及液体压力作用下伸出于工作筒的后端，它的前端活套着带纵向通孔的铜质活塞套。活塞套与带有变宽度沟槽的前缓冲筒相配合。当瞎火或迟发火时间太长时，后坐部分运动超过正常的前冲行程后，炮尾上的卡锁座即撞上了前缓冲杆的后端。活塞套在液压作用下向后运动，纵向通孔被关闭，前缓冲筒中的液

体只能由筒上的变宽度沟槽形成的流液孔流到活塞后方，并经后缓冲器本体上的通孔将液体排出。活塞前方形形成的高压有效地消耗了后坐部分前冲的动能，最后炮尾撞击到摇架后套箍端面上的橡胶垫上，使整个后坐部分停留在前方位置。

后缓冲器本体前伸于工作筒的后方。它的外径是由小到大变化的，在活塞的后方拧有节制环。当超卡一定距离以后（超过了正常的超卡范围，此处为100毫米），节制环即套进了后缓冲器本体上形成了很小的环形流液孔。当继续后坐时，节制环后方的液体只有从此流液孔流入活塞内腔，再推开活塞头上的单向活瓣沿，活塞与工作筒壁形成的间隙，回流进入储气筒（图11-9）。由于液体流动的损失很大，在活塞后方液体的高压形成了较大的后坐阻力，保证了在偶然原因或操作失误情况下，后坐过卡速度很大时，仍能在一定的超卡长度上，使后坐停止下来。

复进制动器是与活塞制成一体的。活塞本体的长度较长，它大体上与结构所允许的超卡行程有相同的长度（350毫米），见图11-10。起复进制动作用的是在活塞筒体上开的极小的孔。当后坐部分过卡以后，活塞的后密封环越过了工作筒上与外腔连通的通孔。继续后坐时，如前所述，活塞后方的液体只有推开活瓣，沿活塞筒与工作筒壁之间的间隙才能流入外腔并向下流入储气筒。后坐终止以后，为了使后坐部分复进，由储气筒通过工作筒外腔进入的液体，此时由于单向活瓣已关闭，只能经过活塞筒上的小孔才能进入活塞后方，推动活塞拉动后坐部分复进。由于小孔很小，不论后坐长度多么长，前冲机力多么大，在达到一定复进速度后（0.2~0.3米/秒），小孔上的压力降落都足以抵销掉前冲剩余力，使其始终大体保持这样小的复进速度，直到挂卡位置。

液压定速击发控制装置包括：安装在储气筒后方的液压速度传感器，安装在摇架上的速度装定机构和安装在摇架上的击发传动机构。图11-11（见238页插图）是它的结构图。

液压速度传感器是液体流速与力的转换机构，它由导流筒、空心活塞和推杆所组成。在前冲时由储气筒进入工作筒的液体都必须经过导流筒，因此根据液体的不可压缩性，前冲运动速度与流过导流筒中液体的速度成正比。由导流筒导入空心活塞的液体，首先被空心活塞将其流动方向改变 $180^\circ$ ，然后再由侧孔排出，经过摇架后套箍的通道流入工作筒。液体在空心活塞中，速度方向改变所导致的流体动量的变化产生了轴向力，此力的大小是液体在导流筒中流速的函数，大体上与速度的平方成正比。显然，随着前冲速度由零逐渐增大，空心活塞作用于推杆上的推力也迅速地加大。至于推杆何时才能向前运动，则主要是靠限力机构确定的。

限力机构由限力弹簧筒及弹簧、带滚轮的限力杠杆，带叉形尾的扇形板，由齿条带动的限力支点移动杆及带齿轮的速度装定手轮所组成。在射击前，根据装药号转动装定手轮对到相应的装定刻度。这时齿轮带动齿条拉动移动杆使限力支点处于相应的位置，支点的移动调整了弹簧力臂与滚轮力臂大小比值，它实际上确定了为解脱扇形板而应作用在速度传感器推杆上力的大小。只要相应于某种装药适宜的前冲击发速度装定好刻度，则前冲运动达到此速度时，速度传感器作用于推杆上的推力，正好可以推动双臂杠杆，解脱由限力弹簧通过滚轮加于扇形板斜面上的约束。当滚轮被抬起进入扇形板的圆弧面时，它就对扇形板的转动不再提供约束，这时击发传动机构就开始动作了。

击发传动机构是由双臂杠杆、击发杠杆、单向拨动器、击发顶杆、带撞杆的转动轴和击发板所组成。只要空心活塞的推杆克服了所限制的力，它就不再受阻碍的向前运动。

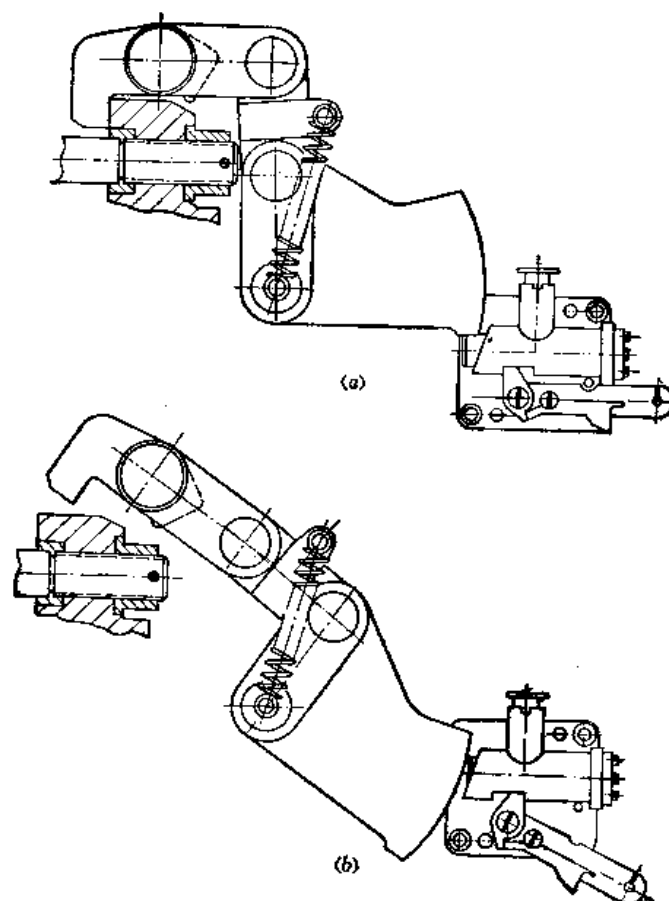


图11-7 卡锁机构及其动作

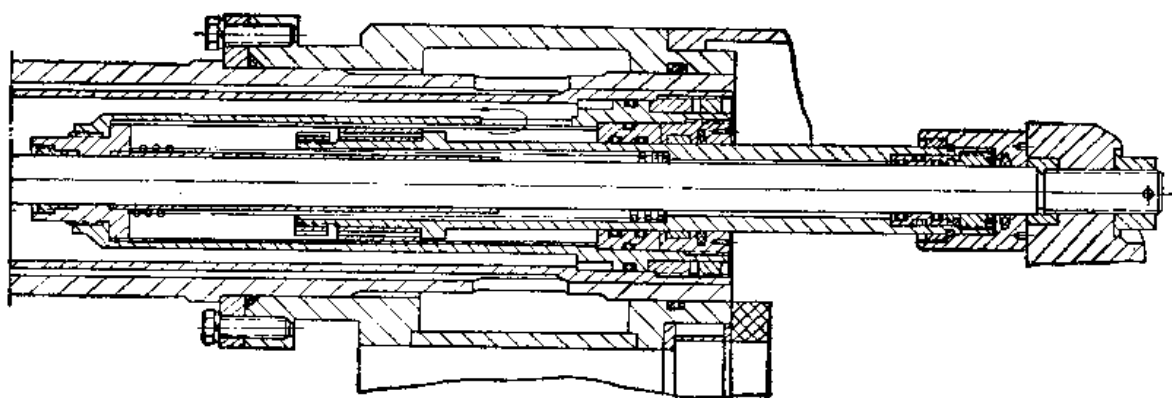


图11-8 前缓冲器的动作

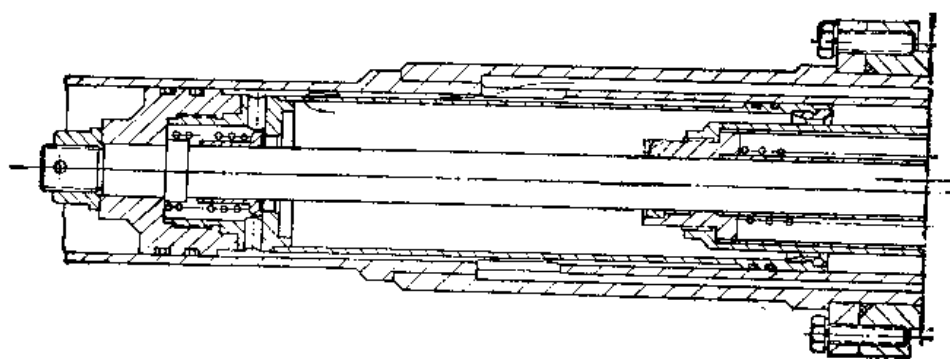


图11-9 后缓冲器的动作

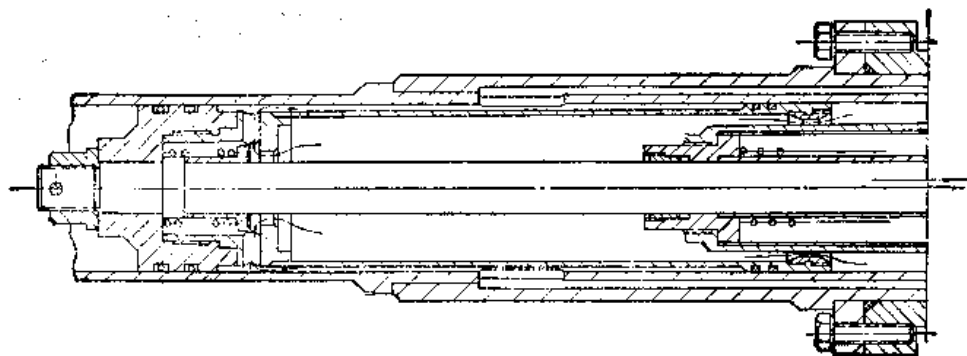


图11-10 复进制动器的动作

空心活塞又由于在前移中减小了侧孔面积而加大了活塞内、外液体的压力差，因而更加有力的向前运动。它使得双臂杠杆带动击发拉杆，使拨动器通过顶杆转动击发板轴。由于击发板很长，无论前冲运动中炮尾在什么位置，击发板都能推动在炮尾上的击发推杆，使击针击发底火。

在击发动作完成后，空心活塞的侧孔被完全关闭，液体不再向工作筒补充。这时前冲机力即被自行切断，后坐部分只能保持大体按所装定的击发速度惯性前冲。这就适当地调整了点火延迟的影响。此后，后坐部分在炮膛合力的作用下，迅速减速并使前冲停止。此后，开始加速后坐，先使由于切断前冲机力造成的工作筒中的真空消失，然后活塞挤压液体由工作筒向储气筒回流。此时空心活塞在内外压力差的作用下，又被推回原位并打开全部的侧孔。但是这时由于单向活门的作用，不能由导流筒流回储气筒的液体腔，只能推开后坐活门，由另一条通路进入液体腔。当空心活塞回复原位时，推杆也由于它本身结构上的特点，在液体压力作用下缩回储气筒。

由于整个前冲机各方面考虑十分完善，因此该前冲炮曾经过数百发各种射击试验（包括瞎火及失误），证明各种机构工作可靠，液压定速击发性能良好，比较稳定一致，卡锁机构也十分完善。总之，这种定速击发的液体气压式前冲机是比较成熟的。

### 第三节 液体气压式前冲机运动方程的推导，前冲炮的运动和受力

和研究一般反后坐装置的设计一样，研究前冲机也离不开分析发射时后坐部分的受力和运动以及由此带来的全炮受力。此处我们以液体气压式前冲机为研究对象进行典型分析。

#### 一、液体气压式前冲机运动方程的推导

液体气压式前冲机原理简图及前冲后坐的一般规律如图11-12所示。

##### 1. 运动循环的分期

通常为了便于分析，考虑到运动中不同阶段的特点，把整个运动循环分成六个时期，即

前冲加速时期 ( $t_0 \rightarrow t_1$ )：解脱卡锁后，后坐部分在前冲机力的作用下，克服重量分力和摩擦，前冲速度由零加速直至击发点（或点火点）达到最大前冲速度  $U_m$  的时期是前冲加速时期。由于点火延迟（尽管只有几毫秒至十几毫秒），击发点并不是点火点。只有

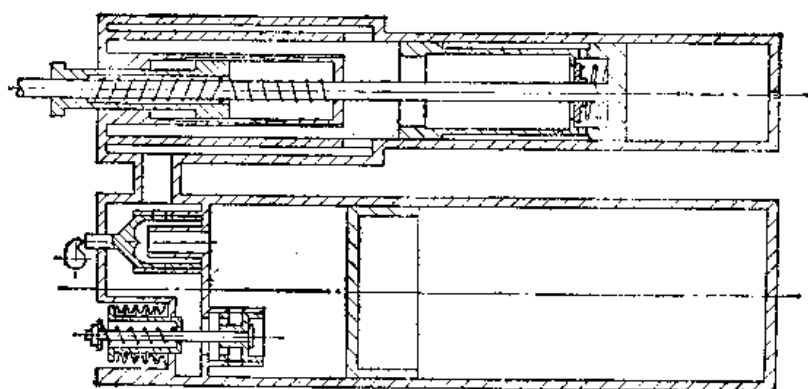


图11-12 液体气压式前冲机原理图

开始点火产生膛合力才会有减速运动，因此最大前冲速度应该在点火点产生。但是有的前冲机的机构在达到击发点时即切断了前冲机力，则最大前冲速度出现在击发点。为简单统一起见，我们以点火点作为时期的划分点。

前冲减速时期 ( $t_1 \rightarrow t_2$ ): 点火后膛合力迅速上升，它所提供的后坐冲量在几毫秒内 (大约是弹丸膛内运动的一半时间左右)，即足以使前冲运动停止。这一阶段即属于前冲减速时期。

后坐加速时期 ( $t_2 \rightarrow t_3$ ): 由前冲終了至弹丸出炮口的一段时间规定为后坐加速时期。此时在膛合力作用下克服前冲机力及其它阻力，使后坐部分速度由零向后加速后坐到达炮口点的速度  $U_0$ 。

火药气体后效期 ( $t_3 \rightarrow t_4$ ): 弹丸出炮口以后，由于带或不带炮口制退器的原因，后坐速度可能继续加速 (不带炮口制退器) 然后当膛合力小于前冲机力后减速，也可能 (带炮制退器) 开始迅速减速。这一时期以火药气体后效时期作为时间的划分。

后坐惯性时期 ( $t_4 \rightarrow t_5$ ): 火药气体后效期终止至后坐终止  $U_5 = 0$  的一段时期。这一时期后坐部分所具有的后坐动能在前冲机力及其它阻力的阻滞下被完全消耗，后坐速度递减至零。在这一阶段中，后坐部分越过卡锁一定距离  $\lambda = -\xi_0$ ，保证足够的超卡量。

复进时期 ( $t_5 \rightarrow t_6$ ): 后坐部分在前冲机力作用下，向前运动消除超卡行程，直至挂卡位置的运动阶段是复进时期。这一阶段由于复进制动液孔的作用，运动速度较低，时间略长。

## 2. 运动微分方程的推导

取后坐部分为对象，考查它的受力，可以写出前冲、后坐的运动微分方程：

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 \xi}{dt^2} = P_{sq} - P_{pt} \quad (11-12)$$

式中  $\xi$  ——从卡锁位置计起的前冲行程 (或后坐时至卡锁点的距离)，向前为正；

$P_{pt}$  ——膛合力。在前冲加速时期，后坐惯性时期和复进时期  $P_{pt} = 0$ ；

$P_{sq}$  ——前冲有效力，它的大小因运动时期的不同而不同。

在前冲加速和前冲减速时期，前冲有效力可写成：

$$P_{sq} = (1 - v_1) p_s A_q - Q_0 (f \cos \varphi + \sin \varphi) \quad (11-13)$$

式中  $v_1$  ——活塞杆及活塞紧塞装置的相当摩擦系数，它可以通过计算或实测得到；

$p_3$ ——作用于活塞上的液体压力 (单位 公斤力/厘米<sup>2</sup>);

$A_q$ ——前冲机活塞工作面积 (单位 厘米<sup>2</sup>);

$f$ ——摇架导轨的摩擦系数。

液体的压力由游动活塞一侧的  $p_1$  到作用于前冲机活塞上的压力  $p_3$ , 中间虽然经过了大量的沿程与局部损失, 但均与前冲速度的平方  $U^2$  成正比。又考虑到前冲和后坐时的流液孔为常数 (此流液孔是整个流动通道的最小截面, 对于 130Q 的前冲机, 它的前冲流液孔正好是导流筒及空心活塞上侧孔的面积), 因此可以写成 (仍采用混合单位):

$$\Delta p = p_1 - p_3 = \frac{K_q \gamma}{20g} \cdot \frac{A_q^2}{a_q^2} U^2 \quad (11-14)$$

或 
$$p_3 = p_1 - \frac{K_q \gamma}{20g} \cdot \frac{A_q^2}{a_q^2} U^2 \quad (11-15)$$

式中  $K_q$ ——把全部沿程与局部损失都当成在流液孔  $a_q$  处降落的相当液压阻力系数 (可以想象它比一般液压阻力系数为大);

$a_q$ ——前冲流液孔, 前冲时的最小液流截面积 (单位 厘米<sup>2</sup>);

$\gamma$ ——驻退液的重度 (单位 公斤力/分米<sup>3</sup>);

$U$ ——前冲速度 ( $U = \frac{d\xi}{dt}$ , 单位 米/秒);

$p_1$ ——游动活塞一侧的液体压力 (单位 公斤力/厘米<sup>2</sup>)。

对于储气筒中的游动活塞, 在忽略了惯性力以后, 有

$$A_u p = A_u p_1 + F_u$$

其中  $A_u$ ——游动活塞的工作面积;

$F_u$ ——游动活塞的紧塞装置摩擦力, 它与储气筒中气压  $p$  成正比 (可写成  $F_u = v_2 A_u p$ );

$v_2$ ——游动活塞紧塞装置的相当摩擦系数。

于是有 
$$p_1 = (1 - v_2) p \quad (11-16)$$

而储气筒中气体的压力

$$p = p_k \left( \frac{W_k}{W_k + A_q \xi} \right)^n = p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n \quad (11-17)$$

其中  $p_k$ ——卡锁位置时储气筒中气体的初压;

$W_k$ ——卡锁位置时储气筒中气体的初体积;

$S_k$ ——卡锁位置时储气筒中气体初体积的相当长度 ( $S_k = \frac{W_k}{A_q}$ );

$n$ ——多变指数, 根据实验可取  $n = 1.3$ 。

将前面各式代入式 (11-13) 中, 最后得到前冲时的前冲有效力

$$P_{iq} = (1 - v_1) A_q \left[ (1 - v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n - \frac{K_q \gamma}{20g} \cdot \frac{A_q^2}{a_q^2} U^2 \right] - Q_0 (f \cos \varphi + \sin \varphi) \quad (11-18)$$

在前冲机的结构尺寸及有关参数确定以后, 前冲有效力只是  $\xi$ ,  $U$  及  $\varphi$  的函数。

后坐时流动中压力梯度和摩擦阻力方向改变了, 按照上面的思路, 同样可以得到后坐时的前冲有效力



$$P_{sq} = (1 + v_1) A_q \left[ (1 + v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k - \xi} \right)^n + \frac{K_h \gamma}{20 g} - \frac{A_q^2}{a_h^2} U^2 \right] + Q_o (f \cos \varphi - \sin \varphi) \quad (11-19)$$

其中  $K_h$  ——后坐时把各种流动损失当作全部在流液孔  $a_h$  上降落的后坐液压阻力系数;  
 $a_h$  ——后坐流液孔, 后坐时的最小液流截面。它通常就是后坐活门处液流通道的截面的大小。

在复进时, 作用在活塞上的液体压力, 还要因液体流过活塞头上的复进节制流液孔  $a_f$  的降落而变得很小。因此, 这时的前冲有效力应为:

$$P_{sq} = (1 - v_1) A_q \left[ (1 - v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n - \frac{K_f \gamma}{20 g} - \frac{A_q^2}{a_f^2} U^2 \right] - Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi) \quad (11-20)$$

其中  $K_f$  ——复进节制流液孔的液压阻力系数;

$a_f$  ——复进节制流液孔的面积。

将式 (11-18)、(11-19)、(11-20) 分别代入 (11-12) 即可得到用于各个不同时期的前冲、后坐式复进运动的微分方程式。应注意的是当前冲机力被切断时各式中中括弧内的量均为零, 因此只有

$$P_{sq} = -Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi)$$

或

$$P_{sq} = Q_o (f \cos \varphi - \sin \varphi)$$

整个运动循环的计算, 由于前冲有效力  $P_{sq}$  或者炮膛合力  $P_{pr}$  的变化规律不同, 最好按前述各个时期分段进行。这些计算完全可以运用过去学过的后坐复进运动正反面计算的知识来完成, 当然它是十分繁杂的。最好的办法还是利用电子计算机来作计算, 可查找有关这方面的程序作参考。

关于前缓冲时及后缓冲时后坐部分的运动微分方程, 其推导思路与前面的叙述大同小异, 可以在设计时根据所用结构的具体情况自行推导。

### 3. 运动循环中的运动和受力分析

当没有炮膛合力  $P_{pr}$  作用时, 为了求解运动和受力, 只需利用龙格-库塔法解一阶微分方程组。现以前冲加速时期的运动为例:

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{g}{Q_o} \left\{ (1 - v_1) A_q \left[ (1 - v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n - \frac{K_f \gamma}{20 g} - \frac{A_q^2}{a_f^2} U^2 \right] - Q_o (f \cos \varphi + \sin \varphi) \right\} \quad (11-21)$$

$$\frac{d\xi}{dt} = U$$

利用电子计算机, 根据初条件  $t = 0$ ,  $U = \xi = 0$ , 求解出  $U-t$ ,  $\xi-t$  以及  $P_{sq}-t$  的变化规律。

在弹丸处于膛内运动时期, 即前冲减速和后坐加速时期, 炮膛合力  $P_{pr}$  可按已知的公式

$$P_{pr} = \frac{1}{\varphi} \left( 1 + 0.5 - \frac{\omega}{g} \right) s p$$

来计算。其中  $p$  是内弹道的平均压力，它可以根据内弹道计算所求得的压力与时间的表格函数关系，对应于所计算的时间  $t$ ，用三点插值的方法求得。此时所需求解的一阶微分方程组，以前冲减速时期为例：

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} = & -\frac{g}{Q_0} \left\{ (1 - v_1) A_0 \left[ (1 - v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n - \frac{K_a \gamma}{20 g} \frac{A_a^2}{a_a^2} U^2 \right] \right. \\ & \left. - Q_0 (f \cos \varphi - \sin \varphi) - P_{pr} \right\} \\ \frac{d\xi}{dt} = & U \end{aligned} \quad (11-22)$$

仍然可以利用龙格-库塔法在电子计算机上按初条件  $t = t_1, U = U_1, \xi = \xi_1$  解出  $U-t, \xi-t, P_{pr}-t$  的变化规律。

弹丸膛内运动时期，也可以直接求解内弹道微分方程组得到对于时间  $t$  的平均压力  $p$ ，同时解微分方程组 (11-22)。这种方法可同时得到内弹道和前冲后坐运动计算的结果而且比较严格准确，但占用计算机内存及机时较多，此处不予详述。

关于火药气体后效期，炮膛合力  $P_{pr}$  仍按指数的变化规律计算，即

$$P_{pr} = \chi P_g e^{-t/b}$$

此时应求解的微分方程组是：

$$\begin{aligned} \frac{dU}{dt} = & \frac{g}{Q_0} \left\{ (1 + v_1) A_0 \left[ (1 + v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n + \frac{K_a \gamma}{20 g} \frac{A_a^2}{a_a^2} U^2 \right] \right. \\ & \left. + Q_0 (f \cos \varphi - \sin \varphi) - P_{pr} \right\} \\ \frac{d\xi}{dt} = & U \end{aligned} \quad (11-23)$$

这样，无论是用手算还是用电子计算机都可以分时期算出整个运动循环的后坐部分的运动规律和受力规律  $U-t, \xi-t$  和  $P_{pr}-t$ 。值得注意的是，各个时期的前冲有效力恰恰也就是前冲炮本身在各个时期所受的作用力（和后坐炮的后坐阻力  $R$  和复进合力  $r$  一样），这个力都过后坐部分质心，并且都指向火炮的后方。

在前冲加速时期与复进第一时期的运动情况完全相同，前冲有效力相当于复进合力。后坐部分加速向前运动，它的惯性力过后坐部分质心，与加速度方向相反，其大小正好是前冲有效力  $P_{sq}$ 。

在前冲减速时期，由于炮膛合力的作用，后坐部分作减速运动，惯性力过后坐部分质心，方向向前，其大小可由如下运动方程表示

$$\left| \frac{Q_0}{g} \frac{d^2 \xi}{dt^2} \right| = |P_{sq} - P_{pr}|$$

如取全炮作对象，用达朗贝尔原理，考虑了运动部分的惯性力，则将炮膛合力与惯性力合并简化可得到一个动力偶矩  $P_{pr} \cdot e$  和一个过后坐部分质心，方向向后的大小等于前冲有效力  $P_{sq}$  的力。

后坐的各个时期，火炮的受力与一般后坐火炮的受力分析方法完全相同，此时的前冲有效力  $P_{sq}$  就是后坐阻力  $R$ 。

复进时期的运动与常数复进节制流液孔的复进制动规律相当，它也有复进加速时期

和复进减速时期。复进加速时期火炮受向后力的作用，减速时期火炮受向前力的作用。但这时大部分的前冲有效力  $P_{sq}$  都很小，对火炮受力的影响不太大。

总之，前冲炮在整个射击循环中基本上一直受一个大小变化不大的向后的作用（如果没有切断前冲机力的话），这是与一般后坐火炮在受力上有极大区别的地方。一般后坐火炮在复进减速时期受有向前翻转的作用力，因而在一个射击循环中受到的是交变力的作用。因此一般后坐的自动炮在连发射击时有较大幅度的振动。相反，利用前冲原理的火炮，在连发射击中（特别是浮动原理的自动炮）就可以极大的减小火炮的振动，从而有效地提高火炮的连发精度。

#### 4. 定点击发方式与定速击发方式的比较

从结构的简化上看，定点击发方式在结构上较易实现，而定速击发必须采取一定的定速措施而使结构复杂起来。但从对地面火炮有更好的适用性来看，采用定速击发方式是比较合适的。

定点击发的主要问题是既不能适应较大射角的变化，又不能适应多种装药号的变化，使得它在地炮上的应用受到了很大的限制。

如果在小射角时，定点击发设计得有比较满意的运动循环的话，那么在大射角时，由于后坐部分重量分力的加大而使前冲有效力减小，即

$$P_{sq} = (1 - v_1) A_0 \left[ (1 - v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n - \frac{K_k \gamma}{20g} - \frac{A_k^2}{a_k^2} U^2 \right] - Q_0 f \cos \varphi - Q_0 \sin \varphi$$

于是到达定点击发点的最大前冲速度  $U_1$  将较大的减小（见图 11-13）。由于前冲动量的不足，在同样的弹道条件下必然使得后坐最大加速度加大。这时，正好因重量分力的影响减小了前冲有效力（即后坐阻力），即

$$P_{sq} = (1 + v_1) A_0 \left[ (1 + v_2) p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n + \frac{K_k \gamma}{20g} - \frac{A_k^2}{a_k^2} U^2 \right] + Q_0 f \cos \varphi - Q_0 \sin \varphi$$

这就势必造成很大的超卡量，以致为结构所不能容许。

当装药号变化很多时，如果全装药在定点击发时有较满意的运动循环，那么在小号装药射击时，由于定点击发所确定的不变的前冲动量将抵销过多的炮膛合力全冲量，以致得不到一定的后坐速度使得后坐不足，不能超卡（如图 11-14）。这样，后坐部分由于未能被卡锁挂住将二次前冲而被前缓冲器缓冲停留在最前方位，从而保证不了正常的运动循环。

由于定点击发方式存在的这些问题使得它只能适用于射角变化不大并采用定装药射击的反坦克火炮上。如果这些定装式炮弹因弹种不同而有不同弹道性能时（如配有榴弹、普通穿甲弹和脱壳穿甲弹等），则应该根据各弹种的炮膛合力全冲量分别选用相应的击发点位置，并在射击前装定好。

目前的压制火炮有向加农炮与榴弹炮合一方向发展的趋势。它的身管可能长于四十倍口径，当用超级装药或最大号装药射击时，使弹丸具有较大的初速因而弹道具有加农炮的性质。同时，它又可以采用多级变装药和很大的高低射界（一般在  $-5^\circ$  至  $+70^\circ$  之间），

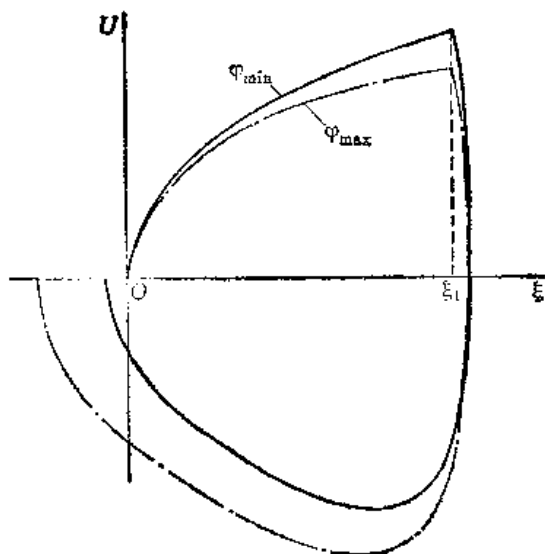


图11-13 定点击发时随射角变化的运动循环

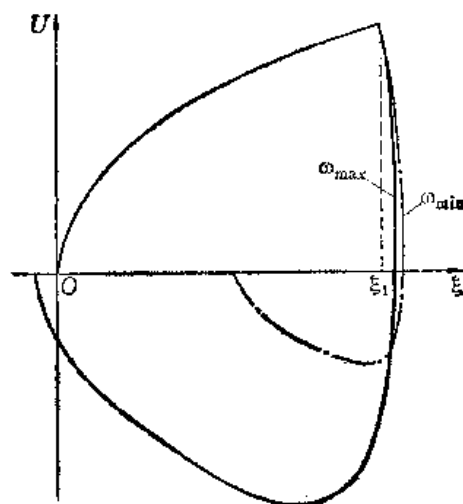


图11-14 定点击发时随装药变化的运动循环

可以获得较多的初速变化。它既可进行高射界射击又可进行低射界射击；既有较小的最小射程又有较宽的射程重叠量，因而又具有榴弹炮的性质。对这种地面压制火炮采用定点击发方式显然是不适宜的，必须采取定速击发的方式。

只要将定速击发机构与切断前冲机力的措施相结合，就可以控制同一装药在不同射角射击时有大体相同的超卡量，因而有较稳定一致的运动循环。图 11-15 是 130 Q 用全装药在各种射角时的前冲后坐运动循环图，可以看到它们的超卡量大体是相同的。

对于有不同炮膛合力全冲量的各级装药，应选择不同的前冲击发速度。在射击前装定好相应的击发速度，就可以保证正常的运动循环并且有大体相同的超卡量。图 11-16 是 130 Q 的各级装药在  $0^\circ$  射角时的前冲后坐运动循环图，可以看到它们的超卡量也是大体相同的。

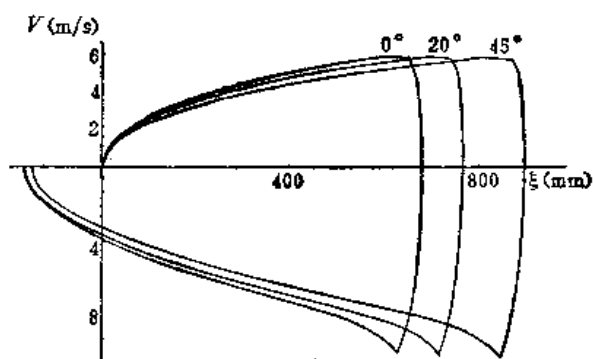


图11-15 定速击发时随射角变化的运动循环

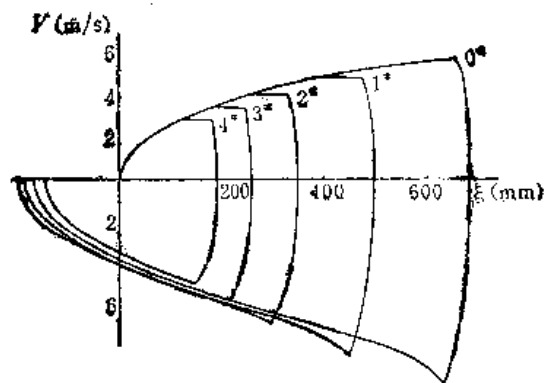


图11-16 定速击发时随装药变化的运动循环

定速击发的方式还可以自动调节液体气压式前冲机中的气体由于气温变化而造成的初压（卡锁处气体压力） $p_k$  变化对前冲机工作的影响。因为  $p_k$  的降低虽然减小了前冲有效力的大小，但是定速击发可以自动调节使前冲行程和时间加长获得必要的前冲动量，同时也自动的加长了因后坐阻力降低而需要的后坐长度。

采用液体气压式前冲机在火炮受力上还有一定的优点, 即使后坐流液孔是常数也有这样的优点。主要是在后坐时可以得到大体不变的前冲有效力(后坐阻力)。液体气压式前冲机, 在前冲运动中, 由于液体的流动损失较大及其它摩擦力的影响, 使得前冲有效力减小较快, 固其规律是不理想的(见图11-17), 特别是在大射角时要想在较高的前冲速度上再继续加速需要较长的前冲行程。但是, 在后坐时, 与前冲机力由小到大变化的同时, 后坐速度是由大到小的变化。随着 $\xi$ 的减小, 前冲有效力 $P_{\text{eq}}$ 中的前冲机力部分 $A_q p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n$ 由小变大, 而它的液压阻力部分 $\frac{K_h \gamma}{20g} - \frac{A_h^3}{a_h^2} U^2$ 则随速度由大变到小。两者的叠加使前冲有效力保持大体不变, 它虽然比前冲时的有效力为大, 但由于后坐时接近常数, 对提高前冲机的效率是有益的。

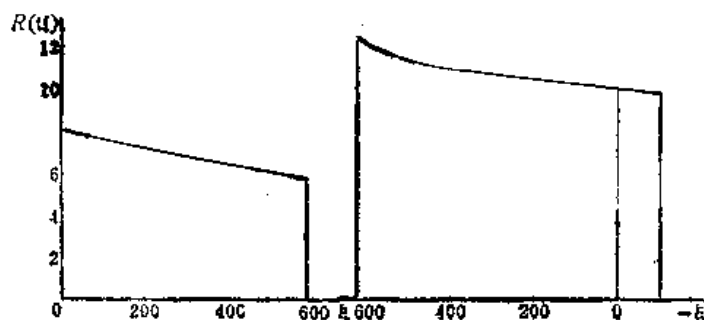


图11-17 液体气压式前冲机的火炮在运动循环中的受力

的变化。随着 $\xi$ 的减小, 前冲有效力 $P_{\text{eq}}$ 中的前冲机力部分 $A_q p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi} \right)^n$ 由小变大, 而它的液压阻力部分 $\frac{K_h \gamma}{20g} - \frac{A_h^3}{a_h^2} U^2$ 则随速度由大变到小。两者的叠加使前冲有效力保持大体不变, 它虽然比前冲时的有效力为大, 但由于后坐时接近常数, 对提高前冲机的效率是有益的。

#### 第四节 液体气压式前冲机设计中应注意的问题

口径较大的地面火炮, 一般采用液体气压式前冲机。在选定了液体气压式前冲机的结构型式以后, 应该综合考虑各方面的因素, 确定好前冲机的一些主要尺寸和参量。这主要是: 最大前冲工作行程 $\xi_{sm}$ , 前缓冲行程 $\xi_{qh}$ , 最大超卡量 $\xi_{sm}$ , 前冲机的初力 $P_{qk}$ 及初压 $p_k$ , 前冲机正常工作行程范围内的压缩比 $m$ , 前冲流液孔面积 $a_q$ 和后坐流液孔面积 $a_h$ 等等。此处仅给出确定这些参量时应考虑的一般原则, 设计时应该根据火炮的具体情况通过大量试算分析比较来最后确定。

##### 一、最大前冲工作行程 $\xi_{sm}$ , 前缓冲行程 $\xi_{qh}$ , 最大超卡量 $\xi_{sm}$

1. 最大前冲工作行程主要是从控制火炮受力和考虑摇架纵向长度这两方面的因素来确定的。最大前冲工作行程越长, 火炮受的力越小。但是由于前冲原理已大幅度地减小了火炮的受力, 火线高也可大幅度的降低, 在总体布置时只要能保证( $0^\circ$ 射角)火炮后坐时的稳定性并在此范围内控制火炮的受力就行了。因此, 最大前冲工作行程应该主要从摇架结构安排的可能性来考虑。后坐部分整个可能的运动行程是最大前冲工作行程, 前缓冲行程及最大超卡量的总和:

$$L = \xi_{sm} + \xi_{qh} + \xi_{sm}$$

这一总长度虽可略比一般后坐火炮的最大后坐长长一些, 但也不宜过多, 否则前冲机工作筒将太长, 摇架纵向长度也过长, 不利于平衡机的设计和全炮重量的减轻。

应注意的是, 此最大工作行程并不是全装药 $0^\circ$ 射角时的前冲行程, 而应是全装药最大射角时的前冲行程。这就可以保证在任何正常射击条件下(迟发火除外)都不致在前冲尚未击发的过程中碰上前缓冲器, 从而使得前冲速度降低, 不足以抵销原定的膛合

力的冲量,使后坐过度超卡。

2. 前缓冲的工作行程  $\xi_{qh}$  应根据后坐部分以最大前冲速度冲击到前缓冲器上时,能在此行程上得到较好的缓冲,不致于使火炮受到太大的向前作用力以致造成火炮的损坏或前翻来考虑。前冲炮一般采取大架前伸的结构。它有足够的前缓冲时的稳定性,因而此力可以是最大后坐力的二倍或更多,这才能使前缓冲工作行程不致太长。但是,此力是作用于全炮的,要据此来校核各传力部件的强度,例如高低机齿轮或滚珠丝杠的强度等。或者在传力结构中安置一定的弹簧缓冲元件。一般前缓冲行程  $\xi_{qh}$  占工作全长  $L$  的  $1/7$  左右。

3. 最大超卡量应包括允许的正常超卡量和后缓冲行程。在正常的超卡范围内,例如  $\xi_s \geq -100$  毫米,应不使后缓冲器起作用,这可以保证整个后坐过程中火炮始终受有均匀一致的后坐力。然后再安排一定的后缓冲长度。此长度以选得长一些为好,因为在某些操作失误(尽管可能性极小)情况下,火炮的工作条件可能极端恶化。例如在装定最小号装药的击发速度上发射了最大号装药,这时后坐部分可能得到与一般后坐火炮差不多的后坐最大速度,但是恰恰这时所能允许的后坐长度又很小,以致在后缓冲器的作用下可能产生甚至比一般后坐火炮还要大的后坐阻力。因此适当的多安排一些后缓冲行程是适宜的,一般应使最大超卡量是最大前冲行程的  $1/2 \sim 2/5$ 。即使这样,当后缓冲器被迫起作用时,也将破坏火炮的后坐静止性和稳定性。

表 11-1 给出了一些前冲炮的有关数据,供设计时参考。

表 11-1 某些前冲炮的结构参数

	$L$ (毫米)	$\xi_{zm}$ (毫米)	$\xi_{qh}$ (毫米)	$\xi_{sm}$ (毫米)	$p_k$ (公斤力/ 厘米 <sup>2</sup> )	$P_{qk}$ (公斤力)	米
美XM204 105毫米前冲炮	~2032	1270	254	508			
100II2-2B 100毫米前冲炮	1200	700	120	400			
130Q 130毫米前冲炮	1350	780	220	350	85	8798	1.224
日政-2 105毫米前冲炮		715		200	115	1593	1.232

## 二、前冲机的初力 $P_{qk}$ 及初压 $p_k$

在选定了最大前冲工作行程  $\xi_{zm}$  以后,即可按照在最大射角的此工作行程上,为抵销全装药炮膛合力全冲量的相当部分所需要的最大前冲速度来设计前冲机的初力  $P_{qk}$ 。由于涉及的因素是多方面的,此前冲机的初力  $P_{qk}$  只能是一个大体的估算值,只有在整个前冲机的设计完成后,才能靠调整初压  $p_k$  来最后获得适宜的前冲机初力。

通常全装药时的最大前冲速度选定为全装药条件下最大自由后坐速度  $W_m$  (或  $W_{KT}$ ) 的  $1/3$  至  $2/5$ , 即:

$$U_m = U_1 = \left( \frac{1}{3} \sim \frac{2}{5} \right) W_m \text{ (或 } W_{KT} \text{)}$$

也就是说应使前冲机力在最大工作行程  $\xi_{zm}$  上给后坐部分提供必须的前冲动能:

$$E_{qm} = \frac{Q_o}{2g} U_m^2$$

此动能应是前冲机力在克服了最大射角时后坐部分重量分力、摩擦力和液体流动损失后

的前冲有效力对后坐部分做功得到的。如果认为前冲有效力随着前冲行程的增加而逐渐减小, 到最大行程时已被减小到只是开始的  $\frac{1}{2}$ , 则有

$$E_{qm} = \frac{1+0.5}{2} [P_{qk} - Q_0(f \cos \varphi_{\max} + \sin \varphi_{\max})] \xi_{2m}$$

这就大体上可以估计出前冲机初力  $P_{qk}$  的大小。

前冲机的初压象液体气压式复进机一样, 应考虑到采取什么方式进行注气。为了减小储气筒及整个前冲机的结构尺寸, 应该选取较大的  $p_k$ 。在确定好  $p_k$  以后, 即可以估计出前冲机活塞的工作面积  $A_q$ 。

$$A_q = \frac{P_{qk}}{p_k} \quad (11-24)$$

### 三、前冲机的压缩比 $m$

为了在整个运动循环中使火炮受力变化不大以提高前冲机的效率 and 在前冲的整个行程上能较一致的加速, 应该使前冲机的压缩比  $m$  尽可能的小。前冲机的压缩比  $m$  是储气筒中气体在卡锁时的压力  $p_k$  与最大前冲工作行程处的压力  $p_{2m}$  的比值:

$$m = \frac{p_k}{p_{2m}} = \left( \frac{S_k}{S_k + \xi_{2m}} \right)^n = \left( \frac{W_k}{W_k + A_q \xi_{2m}} \right)^n \quad (11-25)$$

但是压缩比  $m$  越小, 所需气体初体积  $W_k$  越大, 势必加大储气筒的尺寸, 这在结构上也受到一定的限制, 因此建议将  $m$  取在 1.1~1.3 之间 (见表 11-1)。

### 四、前冲液流孔面积 $a_q$ 和后坐流液孔面积 $a_h$

由于液体气压式前冲机结构上的特点, 在运动过程中, 液体要经过多次转折和流经较长的路径, 这势必造成相当大的流动损失。此流动损失与流速的平方成正比, 前冲速度越高, 流动损失越大。恰好这时又是前冲机力越小的时候, 结果前冲有效力所剩无几, 不利于在有限的前冲长度上继续加速。因此在整个流动路径上应使液流截面尽可能的大, 转折不要过多, 尽量磨去棱角, 而且通道中的最小截面 (即前冲流液孔  $a_q$ ) 越大越好。采用定速击发方式的带液压速度传感器的液体气压式前冲机就取导流筒的截面为前冲流液孔。

至于后坐流液孔面积  $a_h$ , 由于整个前冲机结构尺寸均已确定, 因此它通常由后坐活门所能打开的面积来确定。它的大小应以后坐时的液压阻力与前冲机力叠加以后的前冲有效力 (后坐阻力) 大体保持不变为原则。后坐流液孔面积  $a_h$  越小, 液压阻力  $\frac{K_h \gamma}{20g}$ 。

$\frac{A_q^3}{a_h^3} U^2$  就越大。在后坐开始时, 前冲机力  $A_q p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi_2} \right)^n$  是最小的, 如果它们的和接近或略超过超卡后的前冲机力  $A_q p_k \left( \frac{S_k}{S_k + \xi_s} \right)^n$  (此时  $U_s = 0$ , 因而液压阻力亦为零) 就比较理想。这说明  $a_h$  不是越大越好, 而应适当选择。

对于设计者来说, 比较困难的是如何尽可能准确地选定液压阻力系数  $K_q$  和  $K_h$ 。前冲的液压阻力系数  $K_q$  实际上是前冲流液孔的流动损失, 液压速度传感器多次改变液流方向和截面大小造成的流动损失以及其它流动路径上的局部和沿程损失的总和。因而  $K_q$  就是一个把所有损失都当成集中地损失在前冲流液孔  $a_q$  处的一个相当的前冲液压阻

力系数。显然, 它的数值比一般要大很多。同理,  $K_h$  也是把后坐时所有流动损失都当成集中的损失于后坐液孔  $a_h$  处的一个相当的后坐液压阻力系数。从理论上讲, 所有这些局部损失或沿程损失均可以利用水力学的经验公式和计算表逐项进行计算, 然后综合起来换算成相当的前冲和后坐的液压阻力系数。但是计算的结果往往与实际相差甚远。最好的办法还是通过实验测出工作筒活塞处的液体压力  $p_3$  随速度  $U$  的变化及游动活塞一侧液体压力  $p_1$  随速度  $U$  的变化, 得出实测的液压阻力系数值。

$$\Delta p = p_1 - p_3 = \frac{K_q \gamma}{20g} - \frac{A_q^2}{a_q^2} U^2 \quad (11-26)$$

$$\Delta p = p_3 - p_1 = \frac{K_h \gamma}{20g} - \frac{A_h^2}{a_h^2} U^2 \quad (11-27)$$

当没有设计好结构因而不具备实验条件时, 可参考现有前冲炮的有关数据, 适当选取作初步估算。130Q 的  $K_q=12$ ,  $K_h=5.0$ 。

### 第五节 液压速度传感器及限力机构设计简介

定速机构所用的液压速度传感器及限力机构虽然在结构上有较大的差异, 但在工作原理上是相同的。此处以 130Q 的液压速度传感器和限力机构为例说明它们的一般设计方法。

#### 一、液压速度传感器的受力分析和实验结果

液压速度传感器是一个发力机构。由导流筒进入空心活塞的液体, 由于被  $180^\circ$  的改变流动方向, 因而使空心活塞受到液体在轴向上的推力, 此推力随液流速度的变化关系如何是我们所关心的。

##### 1. 空心活塞的受力分析

为了尽量减小流动损失, 空心活塞构成的液流截面和侧孔的面积均做成与导流筒的截面面积相等。即在液体沿导流筒进入活塞内腔并最后由侧孔流出的过程中, 液流速度保持不变而只是改变了流动方向。设导流筒截面积为  $A_d$ , 空心活塞出口及侧孔面积均为  $A_e$ , 它们均相等且为  $A_d = A_e = A$ 。

取空心活塞及推杆作为受力对象(图 11-18), 可见作用于系统上的力是由活塞两侧静压力差  $\Delta p$  所形成的力  $F_1$ , 液体流动方向改变  $180^\circ$  引起的对活塞的动压作用  $F_2$ , 凸轮对推杆的约束力  $P$  (它等于空心活塞的推力) 及推杆上紧塞元件的摩擦力  $F$  等所组成, 写成平衡方程有

$$P = F_1 + F_2 - F$$

分析可知:

$$\begin{aligned} F_1 &= 2A\Delta p = 2A \frac{K_q \gamma}{20g} V^2 \\ F_2 &= \frac{m\Delta V}{\Delta t} = \frac{AV\Delta t \gamma 2V}{10g\Delta t} \\ &= 2A \frac{2\gamma}{20g} V^2 \end{aligned}$$

其中:  $2A$ ——空心活塞的总截面积 ( $2A = A_d + A_e$ );

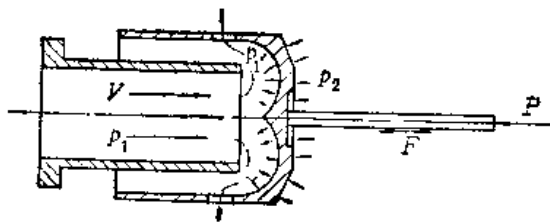


图11-18 空心活塞受力分析



$K_0$ ——流过侧孔截面  $A$  的液压阻力系数;

$\gamma$ ——液体的重度;

$V$ ——液体在导流筒中及空心活塞中流动的速度。

由于流动方向改变  $180^\circ$ , 液流截面积不变, 故上式中液流速度的变化量

$$\Delta V = V - (-V) = 2V$$

为了便于计算, 公式中所采用的是反后坐装置设计常用的混合单位, 最后有

$$P = \frac{2(K_0 + 2)A}{20g} V^2 - F = \frac{\xi\gamma}{20g} AV^2 - F \quad (11-28)$$

式 (11-28) 说明, 作用于凸轮上的空心活塞的推力  $P$  当摩擦力  $F$  很小时, 与导流筒的截面积  $A$  和流速的平方  $V^2$  成正比。我们称  $\xi$  为相当推力系数, 它比一般常数流液孔的液压阻力系数  $K$  大很多,

$$\xi = 2(K_0 + 2)$$

## 2. 空心活塞推力的实测结果

130Q 导流筒及空心活塞内腔截面积为  $A = 40.7 \text{ cm}^2$ , 所测到的实际液流速度  $V$  与推力  $P$  的关系曲线如图 11-19 中的虚线所示。与理想化后取推力系数  $\xi = 9.8$  按式 (11-28) 所得的曲线 (图中的实线) 比较相近。这说明推力确实与流动速度的平方成正比, 而且流过侧孔时的液压阻力系数  $K_0$  也是很大的。空心活塞的推力是流动动量的改变及液体压力降落两个因素的合成结果。

只要有了推力系数  $\xi$  的较准确的值, 就可以有把握的掌握推力  $P$  与液流速度 (因而与前冲速度  $U = \frac{A}{A_q} V$ ) 的变化规律, 从而可据以进一步设计限力机构和速度装定机构。

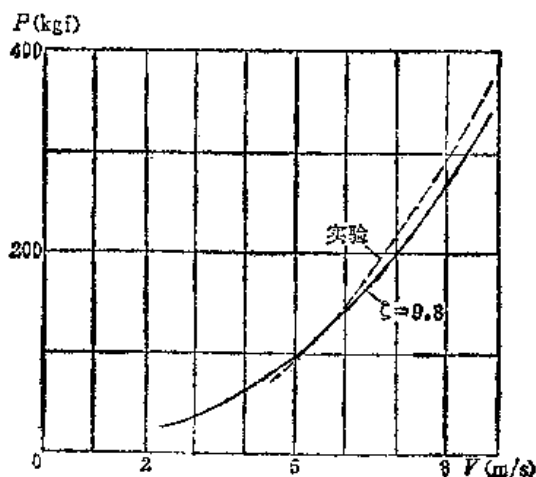


图11-19 推力随速度变化的关系

## 二、限力机构的受力分析与实验测定

### 1. 限力机构的受力分析

130Q 的限力机构原理如图 11-20 所示。主要的问题是合理的选定限力支点的调节范围和限力弹簧力的大小。限力支点的可调范围应尽可能的大, 从而可较准确地获得需要的前冲击发速度  $U_1$ , 保证运动循环的一致性和提高射击精度。在计算好限力弹簧的弹簧力  $P_T$  以后, 应在结构上保证它有一定的可调范围, 以便于调整计算与实际的误差。

根据图上所标的尺寸和角度, 通过对各传力构件的受力分析和简单的归纳可得到:

$$P = \frac{l_2 \cos \alpha}{l_1} - \frac{l_4 \cos 45^\circ}{l_3} \cdot \frac{(l_5 - x)}{(x - \Delta l) \cos 45^\circ} P_T \quad (11-29)$$

其中  $P$  为解脱限力机构所必须的空心活塞杆的推力。

在设计时, 可以利用这个公式, 在适当地调整各传力构件的尺寸  $l_i$  以后, 根据空心活塞所需推力  $P$  的变化范围 (亦即各号装药前冲击发速度  $U_1$  的变化范围) 确定限力弹簧  $P_T$

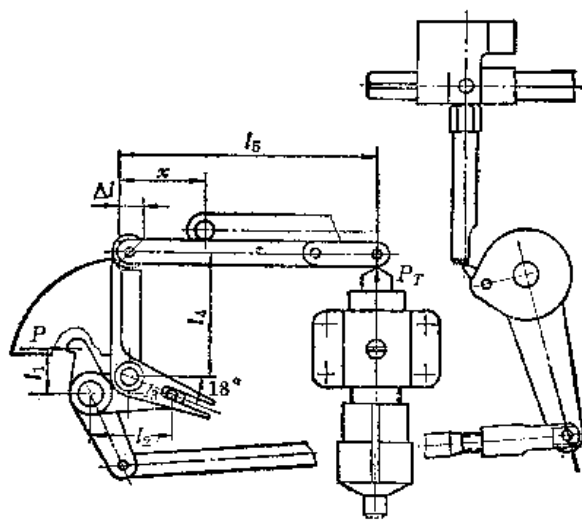


图11-20 限力机构原理

的大小和支点可调范围  $x$  的大小。

130Q限力机构各部分的实际值是： $P_T=24$  公斤力， $l_1=36$  毫米， $l_2=60$  毫米， $l_3=31.6$  毫米， $l_4=99$  毫米， $l_5=200$  毫米， $\alpha=18^\circ$ ，因而式 (11-29) 可简化为

$$P = 119.2 \frac{200 - x}{x - 19}$$

按此式计算出的，对应于不同支点位置（装定号）所需解脱的推力值见表11-2。

表11-2 计算与实测推力值的比较

装 定 号	13	25	35	45	55
$x$ (毫米)	126	106.5		85	66
实测击发速度 $U_1$ (米/秒)	3.9	4.18	4.57	5.06	5.60
计算推力 $P$ (公斤力)	82.4	127.4		243.4	339.8
实测推力 $P''$ (公斤力)	89.9	131.0	171.6	227.0	312.4
空心活塞计算推力 $P'$ (公斤力)	220.2	252.9	302.3	370.6	454.0

## 2. 实验测定的结果

通过实验得到对应不同装药号所需要的解脱推力  $P''$  列于表 11-2 中，可见它与计算结果是十分一致的。

在 130Q 的实际前冲试验中，还可以测得对应于不同装药号的实际击发速度  $U_1$ ，根据前面实测的推力系数  $\xi=9.8$  的结果，可以利用下式

$$\begin{aligned}
 P' &= \frac{\xi \gamma}{20g} A V^2 = \frac{\xi \gamma}{20g} A \left( \frac{A_g}{A} \right)^2 U_1^2 = \frac{9.8 \times 1.1}{196} \cdot 40.7 \left( \frac{103.5}{40.7} \right)^2 U_1^2 \\
 &= 14.48 U_1^2
 \end{aligned} \tag{11-30}$$

求得空心活塞上的实际推力  $P'$ ，它的结果亦列于表 11-2 中。

按式 (11-30) 所算得的空心活塞可能提供的推力  $P'$  大约比解脱约束所需的推力  $P$  均匀的大 130 公斤左右。如果将 (11-30) 与 (11-28) 比较就可以看出，这个差值显然是用来克服作用于推杆上的其它常数阻力  $F$  的。130Q 为了能使推杆在火炮每次射击后自动恢复原位，它的结构比较复杂（见图11-11），所用的O形紧塞圈比较多，因此这个常数阻力是比较大的。这也是在设计定速击发机构中要注意的事项之一。

## 第十二章 火药气体作用系数和炮口装置

当弹丸飞出膛时,膛内的高温、高压火药气体被突然释放,在膛口外急剧膨胀,超越并包围弹丸,形成气动力结构异常复杂的炮口流场。弹丸穿越这个流场时,继续受到火药气体的作用,直至穿出并开始外弹道自由飞行为止。通常,称此阶段为对弹丸的后效作用时期。与此同时,火药气体从膛或炮口装置内继续向外排出,对火炮仍提供反作用力,直至膛内压力接近外界大气压强为止。通常,称此阶段为对炮身的后效作用时期。其总时间远大于对弹丸的后效作用时期,在火炮及弹道学中又称之为火药气体后效期。在后效期,火药气体对炮身提供的反作用冲量约占火炮后坐总冲量的五分之一左右。准确地计算后效期膛内气流参数的变化规律(称为膛流空规律)和膛合力的变化规律对火炮受力与后坐运动,对膛口外环境及中间弹道计算都有重要意义,历来是各国兵器研究的一个重要方面。

炮口装置,做为炮身的一个组成部分,是控制后效期火药气体流量分配、气流方向和气流速度的排气装置。常用的有炮口制退器、炮口助退器、炮口偏流器、炮口消焰器及抽气装置等。由于用途的不同,其结构与作用原理也不同。在火炮技术的发展过程中,为了解决威力与机动性、技术性能与勤务使用的矛盾,炮口装置一直起着重要的作用,成为火炮的主要部件之一。

此外,伴随火药气体流入大气环境,在炮口附近还将形成炮口冲击波、噪声和炮口焰等,其影响区域可波及100倍口径外的远场,构成了对环境的严重威胁,危害炮手身体,破坏装备及建筑设施,妨碍勤务使用。随着火炮威力的不断提高,上述矛盾更趋严重。

因此,在进行火炮系统的设计时,仅仅了解后效期炮身与炮口装置的受力计算显然是不够的,还需要研究炮口物理现象的发生与发展机理以及控制各种有害因素的方法,以便有效地发挥火炮的战术技术性能。近年来,由于测量手段与计算机科学的发展,对炮口气流现象的认识与研究也不断深入,同各种有害因素斗争的手段逐渐增多。所有这些,都为火炮设计方法的改进创造了条件。

本章学习的内容包括:气体动力学的有关知识;后效期膛合力与火药气体作用系数的计算;炮口制退器、偏流器、助退器的设计计算;炮口气流现象;炮口冲击波、噪声的控制及炮口冲击波超压场的计算;炮口焰及其抑制。

### 第一节 气体动力学的有关知识

在现有的后效期膛流空与炮口装置理论中,均将问题简化为一元准定常流来研究。为了给没有系统学习过“气体动力学”课程的读者补充必要的基础,本节主要介绍与一元准定常流有关的气体动力学知识。

一般来说,膛内气流的任一截面处的状态参数是随时间不断变化的。例如, $p(x, t)$ ——压强; $T(x, t)$ ——温度; $\rho(x, t)$ ——密度; $V(x, t)$ ——速度; $x$ ——

以膛底为原点的该截面坐标； $t$ ——时间。这种气流称为一元非定常流。

如果任一截面的气体状态参数不随时间 $t$ 变化，即 $\frac{\partial A}{\partial t} = 0$ （ $A$ 表示 $p$ 、 $\rho$ 、 $T$ ...），则这种气流称为一元定常流。一元定常流比较简单，理论也较成熟，在解决工程问题时，常常简化为这种模型。例如，火箭发动机稳定燃烧阶段的气流计算就是这样处理的。在解决炮膛流空问题时，情况较之复杂得多。由于膛内及炮口装置内各截面之气体状态参数随时间连续变化，并不存在任何稳定阶段，所以直接当做定常流就无效了。但是，研究与分析表明，后效期膛内气体参数对时间的变化率 $\frac{\partial A}{\partial t}$ （称为当地导数）与 $V \cdot \frac{\partial A}{\partial x}$ （称为迁移导数）相比较小，可以略去，因而对于某一瞬时 $t$ 而言，可以当做定常流处理。为了说明这个问题，取气流速度 $V(x, t)$ 。加速度 $\frac{dV(x, t)}{dt}$ （称为全加速度或物质加速度）应等于：

$$\frac{dV(x, t)}{dt} = \frac{\partial V(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial V(x, t)}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x}$$

即由当地加速度 $\frac{\partial V}{\partial t}$ 与迁移加速度 $V \frac{\partial V}{\partial x}$ 两部分组成。 $\frac{\partial V}{\partial t}$ 表示任一截面处气体微团之速度随时间的变化率，而 $V \frac{\partial V}{\partial x}$ 表示一微团从一个截面移到另一截面时速度之变化率。

如果 $\frac{\partial V}{\partial t} = 0$ ，表示气流中任一截面的速度都不随时间变化，说明它是定常流；而如果

$\frac{\partial V}{\partial t}$ 虽然具有有限值，但与 $V \frac{\partial V}{\partial x}$ 相比较小可以略去时，则 $\frac{dV}{dt} = V \frac{\partial V}{\partial x}$ ，那么就等于

消去了对 $t$ 的偏导数项，得出的方程与定常流的没有区别。不过，此时 $\frac{\partial A}{\partial t} \neq 0$ ，即气流参数随时间仍做较为缓慢的变化，不能忽略。为了解决这个问题，往往在对固定坐标 $x$ 或用容器的平均参数来解对时间的变化规律。而这同样避免了两个自变量。这种将非定常流在某瞬时 $t$ 做为定常流来处理的方法称为准定常方法。准定常假设是研究后效期炮膛气流问题的第一个简化假设。此外，还利用了与工程气体动力学相同的其它简化假设：

第二、当炮膛及炮口装置有面积变化时，一元流理论仍适用。对于气体径向分速及沿管道截面气流参数不均匀性之影响用相应的系数加以修正；

第三、忽略气流通过膛壁与外界之热交换（称为绝热流），忽略气体粘性引起的摩擦，于是气流是等熵的。由此引起的误差亦通过系数修正之；

第四、火药气体看做是完全气体，忽略体积力。

基于以上假设，就可以直接应用气体动力学的一元定常等熵流理论了。同时，几个基本物理定律仍然是推导公式的出发点，这些定律是：质量守恒定律、牛顿第二运动定律或动量守恒定律、热力学第一、二定律或能量守恒定律以及气体状态方程。下面，我们简要地介绍一下有关的理论。

## 一、连续方程

连续方程是把质量守恒定律应用于气体运动得到的数学关系式。

取气体微元质量  $\delta m = S\rho\delta x$ , 由质量守恒方程  $\frac{d(\delta m)}{dt} = 0$ , 得

$$\delta x \frac{d}{dt}(S\rho) + S\rho \frac{d}{dt}(\delta x) = 0$$

由全导数定义

$$\frac{d}{dt}(S\rho) = \frac{\partial}{\partial t}(S\rho) + V \frac{\partial}{\partial x}(S\rho)$$

及

$$\frac{d}{dt}(\delta x) = \delta V = \frac{\partial V}{\partial x} \delta x$$

代入整理后得一元非定常流的连续方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(S\rho) + \frac{\partial}{\partial x}(S\rho V) = 0 \quad (12-1)$$

连续方程的几种特殊形式:

1. 一元等截面非定常流:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V) = 0 \quad (12-2)$$

2. 一元定常流:

$$\frac{\partial}{\partial x}(S\rho V) = 0, \quad G = S\rho V = \text{常数} \quad (12-3)$$

式中  $G$ ——秒流量, 是单位时间内通过管道横截面  $S$  之气体质量。

## 二、动量方程

动量方程是牛顿第二运动定律用于气体运动的数学关系式。

在图 12-1 中, 取横截面积为  $S(x)$ , 宽度为  $\delta x$  之气体微元为对象。作用于其上的力是:

1. 因气体弹性引起的内力  $\delta P$

$$\begin{aligned} \delta P &= \left[ S\rho + \frac{\partial}{\partial x}(S\rho)\delta x \right] - S\rho \\ &= \frac{\partial(S\rho)}{\partial x} \delta x \end{aligned}$$

2. 管壁作用于微元之外力  $\delta N$

$$\delta N = p \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right) \delta x$$

很明显,  $\delta P$  取决于气流的压力梯度  $\frac{\partial(S\rho)}{\partial x}$ , 而  $\delta N$  取决于气体压强和管截面积之变化率。

由牛顿第二运动定律:

$$\frac{d(V\delta m)}{dt} = \delta N - \delta P \quad (12-4)$$

将  $\delta m$ 、 $\delta N$  及  $\delta P$  代入, 经过整理后得到微分形式的动量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(S\rho V) + \frac{\partial}{\partial x}(S\rho V^2 + S\rho p) = p \frac{\partial S}{\partial x} \quad (12-5)$$

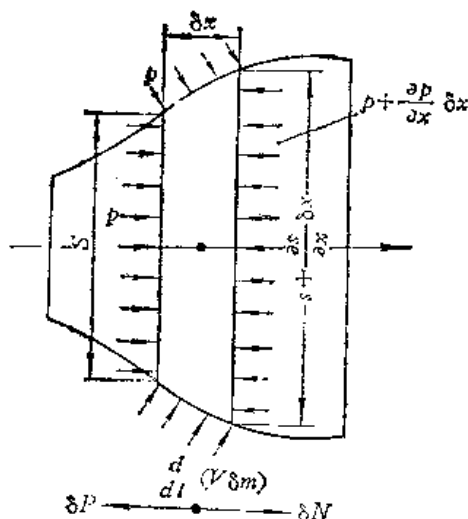


图12-1 气体微元及受力图

或 
$$\frac{\partial G}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} = \frac{\partial N}{\partial x} \quad (12-6)$$

式中,  $F = GV + Sp$ —— $S$  截面的气流总反力。其中,  $GV$  是单位时间气体的动量, 是气体速度引起的弹性力, 常称动压力;  $Sp$  是该截面气体静压强引起的, 常称静压力。

$$N = \int p \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right) dx \text{——气体静压作用于管壁产生的反作用力之轴向分力, 简称管壁轴向反力。对于等截面管道, 因 } \frac{\partial S}{\partial x} = 0, \text{ 故 } N = 0。$$

动量方程的几种特殊形式:

1. 一元等截面非定常流 ( $S = 0$ ):

$$-\frac{\partial}{\partial t}(\rho V) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho V^2 + p) = 0 \quad (12-7)$$

2. 一元变截面定常流 ( $\frac{\partial G}{\partial t} = 0$ ):

$$-\frac{\partial}{\partial x}(SpV^2 + Sp) = p \left( \frac{\partial S}{\partial x} \right)$$

即 
$$dF = dN \quad (12-8)$$

于是, 
$$\frac{dF}{dS} = p \quad (12-9)$$

以上二式的物理意义是, 管壁轴向反力  $N$  等于气流总反力的变化量

$$N = \int_{S_1}^{S_2} p dS = F_2 - F_1$$

这样, 
$$F_2 = F_1 + N \quad (12-10)$$

这说明, 当管道截面  $S_1 = S_2$  时, 管壁轴向反力  $N = 0$ , 气流总反力  $F_1 = F_2 = \text{常数}$ , 即

$$p + \rho V^2 = \text{常数} \quad (12-11)$$

只有当管道截面  $S_1 \neq S_2$  时才会产生管壁轴向反力。

此外, 还可导出动量方程的其它形式。

由质量守恒方程 
$$-\frac{d(\delta m)}{dt} = 0$$

及方程 (12-4) 
$$\delta m \frac{dV}{dt} = \delta N - \delta P$$

因为 
$$\delta m = S \rho \delta x$$

及 
$$\delta P - \delta N = S \frac{\partial p}{\partial x} \delta x$$

代入上式化简后得 
$$\rho \frac{dV}{dt} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

而 
$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x}$$

于是, 
$$\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (12-12)$$

该式为欧拉形式的运动方程, 它与式 (12-4) 等价。对于定常流, 有

$$V \cdot \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

或者,

$$d\left(\frac{V^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} = 0$$

此方程称为伯努利方程。

若考虑气流所做的机械功  $l_E$  及摩擦功  $l_f$ , 可得一般形式的伯努利方程:

$$d\left(\frac{V^2}{2}\right) + \frac{dp}{\rho} + dl_E + dl_f = 0 \quad (12-13)$$

### 三、能量方程

能量方程是热力学第一定律应用于气流得到的数学表达式。根据热力学第一定律, 所选取的气体微元内能的变化与对外界做功之和等于微元热量的增量, 即

$$dq = du + p dv$$

式中,

$q$  ——单位质量气体之热量;

$u$  ——比内能, 单位质量气体之内能;

$v = \frac{1}{\rho}$  ——质量比容, 单位质量气体之体积。

由

$$d(pv) = p dv + v dp$$

得

$$dq = d(u + pv) - v dp$$

引入新的热力学参数  $h = u + pv$ , 称为比焓, 为单位质量气体之热焓。

于是,

$$dq = dh - v dp \quad (12-14)$$

该式是微分形式的能量方程。

将 (12-13) 式代入 (12-14) 式, 得到更一般形式的能量方程

$$dq = dh + d\left(\frac{V^2}{2}\right) + dl_E \quad (12-15)$$

该式中未包含摩擦功  $dl_f$  项, 是因为它可以转换为  $dq_f$  的热量形式, 而  $dq_f = dl_f$ , 分别在方程两侧抵消。

(12-15) 式表示, 气体微元热量的增量等于气体比焓及比动能之变化量与机械功之总和。

对于绝热过程,  $dq = 0$ , 则能量方程为

$$dh + d\left(\frac{V^2}{2}\right) + dl_E = 0$$

若又无机械功时

$$dh + d\left(\frac{V^2}{2}\right) = 0$$

或

$$h + \frac{V^2}{2} = h_0 \quad (12-16)$$

式中,  $h_0$  ——  $V = 0$  时的比焓, 称为滞止比焓。气体动力学中规定,  $V = 0$  时之气体状态参数称为滞止参数或总参数, 习惯以下脚标 '0' 表示, 如  $T_0$ 、 $p_0$  等称为总温及总压等。

式 (12-16) 表明, 传递给气体的热能是以热焓的形式出现的。从热力学理论可知, 对于完全气体, 比内能  $u$  及比焓  $h$  是温度  $T$  的单值函数, 有

$$du = C_v dT$$

$$dh = C_p dT$$

式中,  $C_v$ 、 $C_p$ ——称为定容比热及定压比热。它们取决于气体的性质。其比值则是另一个更为重要的气体参数, 称为比热比或绝热指数, 用符号  $k$  表示, 即

$$k = \frac{C_p}{C_v}$$

与比热一样,  $k$  取决于气体的性质, 主要是气体的分子结构。对于一种气体,  $k$  为常数, 但在温度及压强较高时,  $k$  值也有变化。图 12-2 是实测的各种气压下空气之  $k-T$  曲线。

火药气体成分比较复杂, 但双原子气体占有较多成分, 其  $k$  值的变化可参考上图。一般认为, 在武器的内弹道与中间弹道时期, 火药气体之比热比可在 1.20~1.35 之间变化。准确地选取  $k$  值对于解火药气流问题显然是很重要的。

由比焓定义  $h = u + pv$

根据完全气体状态方程  $pv = RT$

得  $h = u + RT$

或  $\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$

将  $C_v$  及  $C_p$  代入, 得

$$C_p = C_v + R \quad \text{称为迈耶公式}$$

此外,

$$C_v = \frac{R}{k-1} \quad \text{及} \quad C_p = \frac{k}{k-1} R$$

这些公式在下面的推导中都很有用。

#### 四、一元定常等熵流的几个重要关系式

除了静参数  $p$ 、 $\rho$ 、 $T$ 、 $h$  及滞止参数  $p_0$ 、 $\rho_0$ 、 $T_0$ 、 $h_0$  以外, 气体动力学中还有一种重要的参数, 称为临界参数, 用上标 '\*' 注明。我们知道, 音速  $a$  是弱扰动传播的速度, 已经证明

$$a^2 = \left( \frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_{**} = kRT$$

而气流在临界截面的速度恰好等于该截面气体之音速, 即

$$a^{*2} = kRT^*$$

我们还定义两个无量纲参数  $M$  及  $\lambda$ :

$$M \text{ (马赫数)} = \frac{V}{a}$$

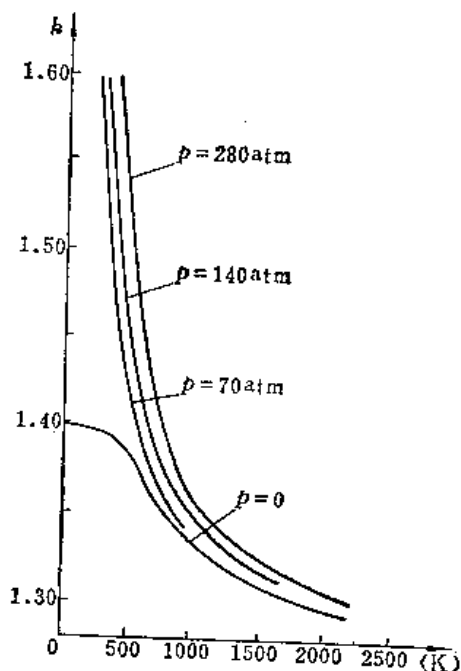


图12-2 空气的比热比随温度变化曲线



$$\lambda \text{ (速度系数或}\lambda\text{数)} = \frac{V}{a^*}$$

$M$ 数是某截面气流速度与该截面音速之比, 而 $\lambda$ 数是某截面气流速度与临界截面音速之比。在火炮气流问题中, 用 $\lambda$ 数代表无量纲的气流速度使用起来十分方便。下面, 我们推导一元定常等熵流中气体参数随 $\lambda$ 之变化关系。

由能量方程 (12-16), 将  $h = C_p T$  代入得

$$\frac{T_o}{T} = 1 + \frac{V^2}{2 C_p T}$$

因为  $\frac{V^2}{2 C_p T} = \frac{k-1}{2} M^2$  所以  $\frac{T_o}{T} = 1 + \frac{k-1}{2} M^2$

在临界截面:  $M=1$ ,  $V=a^*$ ,  $T=T^*$

于是, 
$$\frac{T_o}{T^*} = \frac{k+1}{2}$$

又由完全气体状态方程  $p/\rho = RT$

及等熵方程  $p/\rho^k = \text{常数}$

代入得

$$\left. \begin{aligned} \frac{p_o}{p^*} &= \left( \frac{2}{k+1} \right)^{-\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\rho_o}{\rho^*} &= \left( \frac{2}{k+1} \right)^{-\frac{1}{k-1}} \end{aligned} \right\} \quad (12-17)$$

上面一组是表示滞止参数与临界参数间的关系式。

由  $M^2 = \left( \frac{V}{a^*} \right)^2 \left( \frac{a^*}{a} \right)^2 = \frac{2}{k+1} \lambda^2$ , 可以导出滞止参数与静参数间的关系式:

$$\left. \begin{aligned} \frac{T}{T_o} &= 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \\ \frac{p}{p_o} &= \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{k}{k-1}} \\ \frac{\rho}{\rho_o} &= \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \end{aligned} \right\} \quad (12-18)$$

对于  $S$  截面气流总反力  $F = GV + Sp$  用包含  $\lambda$  的关系式代入。由  $p = \rho RT$

用  $a^{*2} = \frac{2k}{k+1} RT_o$ ,  $\rho = \frac{G}{SV}$  及  $V = \lambda a^*$  代入上式得

$$p = \frac{k+1}{2k} \frac{Ga^*}{S} \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2}{\lambda} \quad (12-19)$$

将式 (12-19) 代入  $F$  式并做简单的代数运算后变为

$$F = \frac{k+1}{2k} Ga^* \left( \lambda + \frac{1}{\lambda} \right)$$

对于临界截面:  $\lambda = 1$

$$F^* = \frac{k+1}{k} Ga^* \quad (12-20)$$

$F^*$  称为临界截面的气流总反力。

如果定义  $K = \frac{\lambda + \lambda^{-1}}{2}$  为喷管反作用系数, 则

$$F = F^* K \quad (12-21)$$

$K$  表示喷管某截面气流总反力与临界截面气流总反力之比。

### 五、喷管中的气流参数

图 12-3 是一个带有收缩-扩张段的拉伐尔喷管。我们分析气流参数与喷管截面积的函数关系。

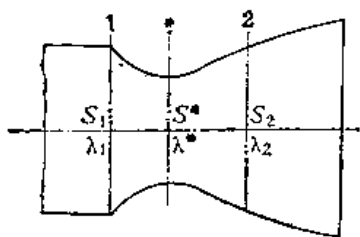


图12-3 拉伐尔喷管图

用式 (12-19) 除以式 (12-18) 第二式

$$\frac{Ga^*}{p_0} \cdot \frac{k+1}{2k} = S\lambda \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} = \text{常数}$$

这是因为, 对于等熵流  $G$ 、 $a^*$  及  $p_0$  都是常数的缘故。由此, 直接得到了气流速度与截面积的关系  $S(\lambda)$  式:

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \left( \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_2^2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (12-22)$$

对于临界截面  $S = S^*$ ,  $\lambda = 1$ , 有

$$\frac{S^*}{S} = \left( \frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \lambda \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \quad (12-23)$$

采用先收缩再扩张的管道形式是为了将气室内的亚音速气流变为超音速出口气流, 从而获得较大的推力 (气流总反力)。而中间的最小截面就是临界截面, 我们证明如下:

令  $v = \frac{S_1}{S_2}$  称为面积比。在临界断面  $S_2 = S^*$  时,  $v$  有最大值, 今求  $v = v_{\max}$  时之  $\lambda$  值。

由极值点  $\frac{dv}{d\lambda_2} = 0$  代入 (12-23) 式

$$\frac{dv}{d\lambda_2} = \frac{1}{\lambda_1 \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right)^{\frac{1}{k-1}}} \cdot \frac{d}{d\lambda_2} \left[ \lambda_2 \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_2^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \right] = 0$$

化简之, 得  $\lambda_2^2 - 1 = 0$ , 即  $\lambda_2 = 1$

由此得出, 在喷管最小截面处气流速度等于临界音速  $\lambda_2 = 1$ ,  $V = a^*$ 。同时, 其它参数相应为

$$\left. \begin{aligned} T^* &= \frac{2}{k+1} T_0 \\ \rho^* &= \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}} \rho_0 \\ p^* &= \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p_0 \end{aligned} \right\} \quad (12-24)$$

同样,

$$\left. \begin{aligned} G &= S^* \rho^* a^* = S^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{p_0}{RT_0}} \\ R^* &= G a^* + S^* p^* = (k+1) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} S^* p_0 \end{aligned} \right\} \quad (12-25)$$

## 六、实际喷管的计算

在火炮上使用的扩张喷管没有曲面型壁的拉伐尔喷管, 多是锥型喷管, 因而管内气流不再是一元均匀流, 而是依锥角  $2\theta$  而变化的二元不均匀流。径向分速的存在将使气流总反力公式(12-21)的误差随着  $2\theta$  的增大而明显增大。为了修正实际喷管的各种损失, 采用了经验系数  $x_\mu$  及  $x_\theta$ , 即

$$K = x_\mu [1 + x_\theta (K' - 1)] \quad (12-26)$$

式中  $K'$ ——理想喷管之反作用系数;

$x_\mu \approx 0.98$ ——考虑耗散力之损失系数;

$x_\theta$ ——考虑喷管内气流径向膨胀之损失系数, 在炮口装置计算时, 可按下式求  $x_\theta$ ,

$$x_\theta = \cos 2\theta \quad (\theta < 35^\circ \text{ 时})$$

$$x_\theta = 0.342 \quad (\theta \geq 35^\circ \text{ 时})$$

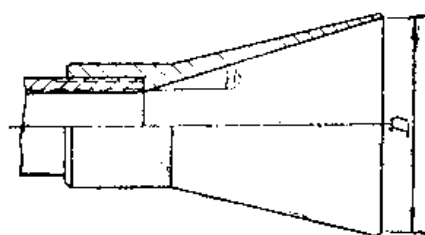


图12-4 锥型喷管

## 七、斜切喷管的计算

锥型喷管被与其轴线成  $\psi$  夹角 ( $\psi \neq 90^\circ$ ) 的平面切断所形成的喷管称斜切喷管(图12-5)。这种特殊形状的喷管在炮口装置上使用较多。由于气流在斜切段的补充膨胀, 气流轴线向侧方偏斜, 角度变化了  $\Delta\psi$ , 气流总反力也由  $F_1$  增大到  $F_2$ 。斜切喷管计算的目的是求出气流偏角  $\Delta\psi$  及总反力的变化。

图中  $S^*$ 、 $S_k$ ——最小截面及出口截面积;

$S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ ——投影面积;

$\lambda_0$ 、 $\lambda_1$ 、 $\lambda_2$ ——与  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  相对应截面之  $\lambda$  数;

$K_0$ 、 $K_1$ 、 $K_2$ ——与  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  相对应截面之反作用系数;

$\psi$ ——出口截面与喷管轴线之夹角 (斜切角);

$\Delta\psi$ ——由于斜切引起的出口气流轴线与喷管轴线之夹角;

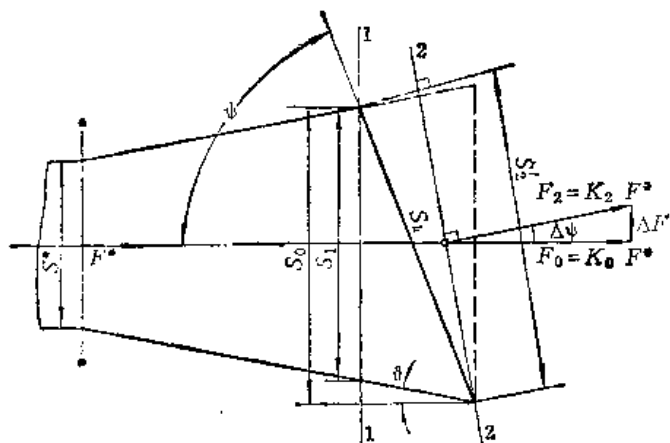


图12-5 斜切喷管中的气流

$F_0$ 、 $F_1$ 、 $F_2$ ——与  $S_0$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  相对应截面之气流总反力，  
而  $F_0 = K_0 F^*$ ， $F_1 = K_1 F^*$ ， $F_2 = K_2 F^*$

及  $F_2 = \frac{F_0}{\cos \Delta \psi}$  或  $K_2 = \frac{K_0}{\cos \Delta \psi}$

其中  $F^* = \frac{k+1}{k} Ga^* = \text{常数}$

由定义  $K = \frac{\lambda + \lambda^{-1}}{2}$

则  $\lambda = K + \sqrt{K^2 - 1}$  将此式代入式 (12-23) 得

$$v = \frac{S}{S^*} = \frac{[k - (k-1)(K + \sqrt{K^2 - 1})K]^{-\frac{1}{k-1}}}{K + \sqrt{K^2 - 1}}$$

于是，

$$\left. \begin{aligned} v_1^* &= \frac{S_1}{S^*} = \frac{[k - (k-1)(K_1 + \sqrt{K_1^2 - 1})K_1]^{-\frac{1}{k-1}}}{K_1 + \sqrt{K_1^2 - 1}} \\ v_{01} &= \frac{S_0}{S_1} = \frac{K_1 + \sqrt{K_1^2 - 1}}{K_0 + \sqrt{K_0^2 - 1}} \left[ \frac{k - (k-1)(K_1 + \sqrt{K_1^2 - 1})K_1}{k - (k-1)(K_0 + \sqrt{K_0^2 - 1})K_0} \right]^{\frac{1}{k-1}} \\ v_{20} &= \frac{S_2}{S_0} = \frac{K_0 + \sqrt{K_0^2 - 1}}{K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1}} \left[ \frac{k - (k-1)(K_0 + \sqrt{K_0^2 - 1})K_0}{k - (k-1)(K_2 + \sqrt{K_2^2 - 1})K_2} \right]^{\frac{1}{k-1}} \end{aligned} \right\} \quad (12-27)$$

其中， $v_1^*$ 、 $v_{01}$  及  $v_{20}$  由几何关系确定。

从图 12-6 可以看出，斜切出口截面为一椭圆。

设椭圆方程为  $\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{a^2} = 1$

当  $y = \frac{d}{2} = \frac{CC}{2}$  时， $a = \frac{d}{2} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{x^2}{b^2}}}$

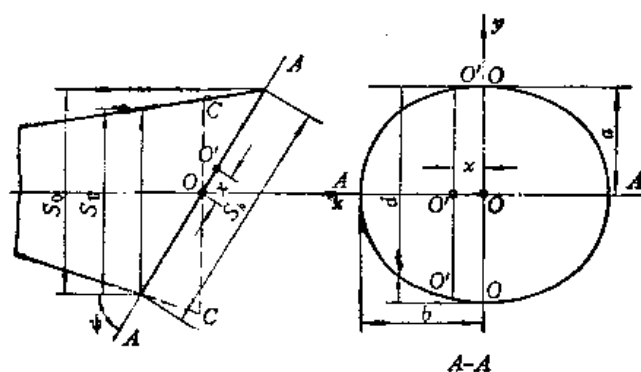


图12-6 斜切面积计算图

$$\text{而 } \frac{d}{2} = \frac{\overline{CC'}}{2} = (b+x)(\sin\psi - \cos\psi \operatorname{tg}\vartheta) = (b-x)(\sin\psi + \cos\psi \operatorname{tg}\vartheta)$$

于是

$$x = b \cot\psi \operatorname{tg}\vartheta$$

$$\frac{d}{2} = b(1 - \cot\psi \operatorname{tg}\vartheta)(\sin\psi + \cos\psi \operatorname{tg}\vartheta)$$

所以

$$S_k = \pi ab = \pi b^2 \frac{\operatorname{tg}\psi - \operatorname{tg}\vartheta}{\operatorname{tg}\psi} \frac{\sin\psi + \cos\psi \operatorname{tg}\vartheta}{\sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2\vartheta}{\operatorname{tg}^2\psi}}}$$

$$S_1 = \pi r_1^2 = \pi b^2 (\sin\psi - \cot\psi \operatorname{tg}\vartheta)^2$$

$$S_o = S_k \sin\psi$$

$$S_2 = S_k \sin(\psi + \Delta\psi)$$

根据面积比的定义,  $v_1^* = \frac{S_1}{S_o}$  可计算, 同样,

$$v_{o1} = \frac{S_o}{S_1} = \frac{\operatorname{tg}\psi + \operatorname{tg}\vartheta}{\operatorname{tg}\psi - \operatorname{tg}\vartheta} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{\operatorname{tg}^2\vartheta}{\operatorname{tg}^2\psi}}} \quad (12-28)$$

但是

$$v_{2o} = \frac{S_2}{S_o} = \frac{\sin(\psi + \Delta\psi)}{\sin\psi} \text{ 是未知的。}$$

由方程 (12-27) 的第一、二两式可解出  $K_o$  及  $K_1$ , 由第三方程与  $v_{2o}$  式联立可得到包含  $K_o$ 、 $\psi$  及  $\Delta\psi$  三个参量的方程组:

$$\left\{ \begin{aligned} v_{2o} &= \frac{K_o + \sqrt{K_o^2 - 1}}{\frac{K_o}{\cos\Delta\psi} + \sqrt{\frac{K_o^2}{\cos^2\Delta\psi} - 1}} \left[ \frac{k - (k-1)K_o(K_o + \sqrt{K_o^2 - 1})}{k - (k-1)\frac{K_o}{\cos\Delta\psi} \left( \frac{K_o}{\cos\Delta\psi} + \sqrt{\frac{K_o^2}{\cos^2\Delta\psi} - 1} \right)} \right]^{\frac{1}{k-1}} \\ \psi &= \arctg \frac{\sin\Delta\psi}{v_{2o} - \cos\Delta\psi} \end{aligned} \right. \quad (12-29)$$

一般, 由方程组 (12-29) 不能直接解出  $\Delta\psi$ , 而是编制  $\Delta\psi(K_o, \psi)$  表 (见表 12-1) 查找或用计算机解。

对于圆柱型斜切喷管,  $K_o = 1$ 。于是, (12-29) 式简化为

表12-1  $\Delta\psi(K_0, \psi)$  表 ( $k=1.33$ )

$\psi^\circ$ $\Delta\psi$	$K_0$	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.22	1.24	1.26	1.28	1.30
1	88.32	87.92	87.67	87.42	87.16	86.89	86.60	86.28	85.93	85.54	85.11	84.62	84.06	83.42	82.67	81.79	
2	86.60	85.84	85.33	84.83	84.32	83.78	83.20	82.57	81.87	81.11	80.25	79.29	78.20	76.94	75.50	73.81	
3	84.84	83.75	82.98	82.24	81.48	80.68	79.82	78.88	77.86	76.73	75.47	74.07	72.49	70.89	68.64	66.28	
4	83.04	81.64	80.63	79.65	78.65	77.58	76.45	75.22	73.89	72.42	70.80	69.00	66.98	64.73	62.19	59.31	
5	81.20	79.52	78.27	77.06	75.82	74.51	73.11	71.61	69.98	68.20	66.25	64.11	61.74	59.12	56.20	52.97	
6	79.32	77.38	75.90	74.46	72.99	71.45	69.81	68.05	66.15	64.10	61.87	59.43	56.78	53.88	50.71	47.26	
7	77.41	75.23	73.52	71.87	70.17	68.41	66.54	64.55	62.41	60.12	57.65	54.99	52.11	49.02	45.70	42.14	
8	75.44	73.04	71.13	69.27	67.37	65.39	63.31	61.11	58.77	56.27	53.61	50.77	47.74	44.53	41.13	37.56	
9	73.44	70.84	68.72	66.66	64.57	62.40	60.14	57.75	55.23	52.57	49.76	46.79	43.67	40.40	36.98	33.45	
10	71.40	68.61	66.30	64.06	61.79	59.45	57.01	54.47	51.80	49.01	46.09	43.04	39.87	36.59	33.21	29.76	
11	69.31	66.35	63.87	61.45	59.02	56.52	53.94	51.26	48.48	45.59	42.60	39.51	36.33	33.08	29.77	26.43	
12	67.18	64.07	61.42	58.85	56.27	53.64	50.93	48.15	45.28	42.32	39.29	36.19	33.04	29.84	26.63	23.42	
13	65.01	61.76	58.96	56.25	53.54	50.79	47.99	45.12	42.19	39.19	36.15	33.07	29.96	26.85	23.75	20.63	
14	62.80	59.42	56.50	53.66	50.84	47.99	45.11	42.18	39.21	36.21	33.18	30.14	27.10	24.09	21.11	18.13	
15	60.56	57.07	54.02	51.08	48.17	45.24	42.30	39.33	36.35	33.35	30.36	27.38	24.43	21.52	18.68	15.90	
16	58.28	54.70	51.55	48.51	45.52	42.54	39.56	36.58	33.60	30.63	27.69	24.79	21.93	19.14	16.43	13.82	
17	55.97	52.30	49.07	45.96	42.91	39.89	36.89	33.91	30.96	28.04	25.16	22.35	19.60	16.93	14.36	11.90	
18	53.62	49.90	46.59	43.43	40.34	37.30	34.30	31.34	28.42	25.56	22.77	20.05	17.42	14.88	12.45	10.14	
19	51.25	47.48	44.13	40.92	37.81	34.77	31.78	28.86	26.00	23.21	20.50	17.89	15.38	12.97	10.69	8.54	
20	48.86	45.06	41.67	38.44	35.33	32.29	29.34	26.46	23.67	20.97	18.36	15.86	13.47	11.20	9.07	7.07	
21	46.45	42.63	39.22	36.00	32.89	29.89	26.98	24.16	21.45	18.84	16.34	13.95	11.69	9.56	7.58	5.75	
22	44.03	40.21	36.80	33.58	30.51	27.54	24.69	21.95	19.33	16.82	14.43	12.17	10.04	8.05	6.22	4.53	
23	41.60	37.80	34.40	31.21	28.18	25.27	22.49	19.83	17.30	14.90	12.63	10.50	8.50	6.66	4.99	3.49	
24	39.19	35.40	32.04	28.89	25.90	23.07	20.37	17.81	15.38	13.09	10.94	8.94	7.09	5.40	3.89	2.57	
25	36.74	33.03	29.70	26.61	23.69	20.94	18.33	15.87	13.55	11.38	9.37	7.50	5.79	4.26	2.92	1.79	
26	34.32	30.67	27.41	24.39	21.55	18.88	16.38	14.02	11.83	9.78	7.90	6.17	4.62	3.25	2.09	1.15	
27	31.93	28.35	25.17	22.22	19.47	16.91	14.51	12.27	10.20	8.29	6.54	4.96	3.57	2.37	1.39	0.65	
28	29.55	26.07	22.97	20.12	17.47	15.01	12.73	10.62	8.67	6.90	5.30	3.88	2.65	1.63	0.84	0.31	
29	27.21	23.83	20.83	18.08	15.55	13.20	11.05	9.06	7.26	5.63	4.18	2.92	1.86	1.03	0.44	0.10	
30	24.90	21.64	18.75	16.12	13.70	11.49	9.46	7.61	5.95	4.47	3.18	2.09	1.21	0.57	0.18	0.01	

$$\psi = \arctg - \frac{\operatorname{tg} \Delta \psi}{\frac{1}{1 + \sin \Delta \psi} \left( \frac{1 - \sin \Delta \psi}{1 - k \sin \Delta \psi} \right)^{\frac{k}{k-1}} - 1} \quad (12-30)$$

这样, 在已知斜切喷管面积和斜切角  $\psi$  时, 便可根据 (12-27)~(12-30) 式计算出气流总反力  $F$  及气流偏角  $\Delta \psi$  来。

## 第二节 后效期炮膛合力与火药气体作用

### 系数 $\beta$ 的计算

后效期火药气体从炮膛内流出过程可以模型化为一个等截面圆管形半封闭容器的排空过程; 当带炮口装置时, 为口部装任意形状扩张喷管的这种容器的排空过程(图12-7)。

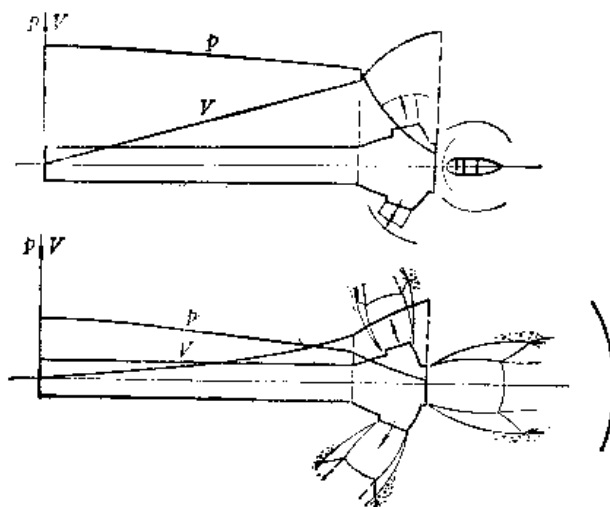


图12-7 后效期炮膛流出气动力模型

其初始参数如下: 后效期开始(弹底到达炮口截面)时, 令  $t = 0$ , 炮膛内气体重量为  $\omega$ , 内弹道平均参数为  $p_g$ 、 $T_g$ 、 $w_g$

$$w_g = \frac{1}{\rho_g g} = \frac{W_{KH}}{\omega} = \frac{\Lambda_g + 1}{\Delta}$$

式中  $W_{KH}$ ——炮膛总容积;

$\Lambda_g$ ——弹丸相对行程;

$\Delta$ ——装填密度。

### 一、基本假设及其推论

在进行后效期气流计算时, 除了采用第一节的一元准定常等熵等四条假设外, 尚须补充两条假设:

1. 炮口为临界断面, 即  $S = S^*$ ,  $u = u^*$ 。

2. 后效期各瞬时, 膛内气体密度均匀分布, 即  $\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$ 。

由补充假设 2 可以导出以下两条重要推论。

推论 1: 后效期各瞬时, 膛内气体速度呈直线分布。

由连续方程 (12-2), 因  $\frac{\partial \rho}{\partial x} = 0$ , 得

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad \text{或} \quad -\frac{\partial}{\partial t} \ln \rho + \frac{\partial V}{\partial x} = 0$$

对  $x$  积分,

$$C(t)x + V = D(t)$$

式中

$$C(t) = -\frac{\partial}{\partial t} \ln \rho$$

对于任意瞬时  $t$ , 当  $x = 0$  (膛底) 时,  $V = 0$ ,

于是

$$D(t) = 0$$

当  $x = L$  (炮口) 时,  $V = a^*(t)$

于是

$$C(t) = -\frac{a^*(t)}{L}$$

将  $C$  及  $D$  代入, 得

$$V = a^*(t) \frac{x}{L} \quad (12-31)$$

式中  $L$ ——炮膛总长度。

推论 2: 后效期各瞬时  $t$ , 膛内压强呈抛物线分布。

由动量方程 (12-12), 将  $V = a^*(t) \frac{x}{L}$  代入, 得

$$\frac{x}{L} \frac{\partial a^*(t)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{a^{*2}}{2} \frac{x^2}{L^2} \right) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

对  $x$  积分,

$$C_1(t) \frac{x^2}{2L} + a^{*2} \frac{x^2}{2L^2} + \frac{p}{\rho} = D_1(t)$$

式中

$$C_1(t) = \frac{\partial a^*(t)}{\partial t}$$

对于任意瞬时  $t$ , 当  $x = 0$  时,  $V = 0$ ,  $p = p_t(t)$

当  $x = L$  时,  $V = a^*(t)$ ,  $p = p^*(t)$

代入

$$D_1(t) = \frac{p_t}{\rho}$$

$$C_1(t) = \frac{2}{L} \left( \frac{p_t - p^*}{\rho} - \frac{a^{*2}}{2} \right)$$

将  $C_1$  及  $D_1$  代入,

$$\frac{x^2}{2L} \left[ \frac{2}{L} \left( \frac{p_t - p^*}{\rho} - \frac{a^{*2}}{2} \right) \right] + \frac{a^{*2}}{2} \frac{x^2}{L^2} + \frac{p}{\rho} = \frac{p_t}{\rho}$$

化简后,

$$p = p_t - (p_t - p^*) \frac{x^2}{L^2} \quad (12-32)$$

式中  $p_t$ ——膛底压强。

## 二、无炮口装置时的炮膛合力 $P_p$

对于图 12-7 之气动力模型, 我们首先根据非定常流的动量方程导出无炮口装置时的炮膛合力  $P_p$  公式, 然后再做准定常简化处理。

由动量方程 (12-5)



$$-\frac{\partial}{\partial t}(S\rho V) + \frac{\partial}{\partial x}(S\rho V^2 + Sp) = p \frac{\partial S}{\partial x} = 0$$

积分 
$$-\frac{\partial}{\partial t} \int_0^L S\rho V dx + \int_{Sp_t}^{Sp^*+Sp^*a^{*2}} d(S\rho V^2 + Sp) = 0$$

得 
$$-\frac{\partial I_o}{\partial t} + Sp^*a^{*2} + Sp^* - Sp_t = 0$$

式中  $I_o = \int_0^L S\rho V dx$  称为火药气体某瞬时  $t$  的膛内总动量。

令  $P_{pt} = Sp_t$  为后效期火药气体作用于炮膛的合力。当取炮身为受力对象分析力时，此结论是显而易见的。

同时 
$$Sp^*a^{*2} + Sp^* = Ga^* + Sp^* = F^*$$

于是 
$$P_{pt} = F^* + \frac{\partial I_o}{\partial t} \quad (12-33)$$

式 (12-33) 表示，后效期无炮口装置时的炮膛合力  $P_{pt}$  等于炮口截面气流总反力与火药气体膛内总动量之变化率的总和。必须注意，随着火药气体不断外排，膛内气流参数  $P_{pt}$ 、 $F^*$ 、 $I_o$  及  $\frac{\partial I_o}{\partial t}$  等都是时间的函数。

由于实际的炮膛排空过程十分复杂， $I_o(t)$  及  $\frac{\partial I_o(t)}{\partial t}$  的准确计算只能依靠数值方法，得不到一般分析解，为此，过去的后效期理论都无例外地采取了准定常简化处理。下面，我们将以一种有代表性的理论为例，介绍准定常简化方法，而数值方法则放到计算机程序的有关章节做简要说明。

在弹底飞出炮口截面瞬间，弹丸相对速度  $v_g \approx v_o$ ，而紧贴弹底的一层火药气体速度应与弹丸速度相同，即  $V = v_g \approx v_o$ 。由火药气体膛内速度线性分布假设， $t = 0$  瞬时膛内火药气体总动量  $I_o = \frac{1}{2} \frac{\omega}{g} v_o$ ；在后效期结束时 ( $t = \tau$ )， $I_o = 0$ 。

由 
$$\left( \frac{\partial I_o}{\partial t} \right)_{\text{平均}} = \frac{0 - \frac{1}{2} \frac{\omega}{g} v_o}{\tau} = -\frac{\omega v_o}{2g\tau}$$

又因 
$$\omega = \int_0^\tau Ggdt, \quad \text{于是, } \frac{\partial I_o}{\partial t} \approx -\frac{Gv_o}{2}$$

代入 (12-33) 式，便得到

$$P_{pt} = F^* - \frac{Gv_o}{2} \quad (12-33)'$$

将  $F^* = Ga^* + Sp^*$  中的各项用 (12-25) 式代入并整理后，便得到了炮膛合力  $P_{pt}$  的下列公式

$$P_{pt} = S(\xi_o p - \varepsilon p^{\frac{k+1}{2k}}) \quad (12-34)$$

式中  $\xi_o = (k+1) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}$  称为直喷管推力系数；

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{k}}{2} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \sqrt{\frac{\rho_g}{p_g \frac{1}{k}}} v_o$$

这就是一些火炮书籍中常用的苏联斯鲁霍斯基公式。很显然, 由于在推导过程中做了很多近似简化 (如用平均值代替  $\frac{\partial I_0}{\partial t}$ , 在引用 12-25 式时, 将膛内平均参数当做滞止参数等等), 加上基本假设中的一些简化, 使得上述公式不可避免地产生相当大的计算误差。类似 (12-34) 的理论公式还有  $n$  种, 著名的是雨贡纽公式, 特洛契科夫公式, 马蒙托夫公式等, 其间的主要区别是对  $\frac{\partial I_0}{\partial t}$  采取了不同的准定常处理, 本书不赘述。

### 三、炮膛内气流平均参数随时间的变化规律

公式 (12-33) 及 (12-34) 本身不能给出  $P_{pr}$  随时间的变化规律, 这是因为, 在由基本方程导出上式时做了准定常处理, 将  $\frac{\partial}{\partial t}$  项用平均值替代了。为了计算膛内气流参数随时间的变化规律又避免解偏微分方程的困难, 需要采取另一个补充假设: 认为炮膛容积足够大, 在同一瞬时膛内气体参数均匀一致, 气流速度的变化 (由 0 增大至  $a^*$ ) 仅发生在出口的局部区域。

从这一假设出发, 根据第一节的基本关系式就容易推导出平均参数随时间的变化规律。

设某瞬时  $t$  炮膛内气流平均压强为  $p$ , 平均比容  $w = \frac{1}{\rho g}$ , 平均温度为  $T$ 。

由于

$$w = \frac{W_{KH}}{\omega - \int_0^t G g dt}$$

式中  $g \int_0^t G dt$  表示  $t$  瞬时从炮口排出的火药气体重量。

由气流等熵过程假设

$$\left(\frac{p}{p_g}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{w_g}{w} \quad (12-35)$$

在流量公式 (12-25) 中, 引入修正系数  $\varphi$ , 并以膛内平均参数当做滞止参数代入, 得

$$G = \varphi S \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p}{\sqrt{RT}}$$

其中,  $\varphi$ ——流量系数, 对炮膛可取 0.95。

用气体状态方程及等熵方程代入并进行适当变换

$$G = \varphi S \sqrt{k \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \sqrt{\frac{p_g}{g w_g}} \left(\frac{p}{p_g}\right)^{\frac{k+1}{2k}}$$

再将  $w$  式代入 (12-35), 得

$$\left(\frac{p}{p_g}\right)^{\frac{1}{k}} = \frac{\omega - g \int_0^t G dt}{\omega} = 1 - \frac{g \int_0^t G dt}{\omega}$$

为了建立压强随时间的关系, 将上式微分

$$\begin{aligned} \frac{1}{k} \frac{p}{p_g}^{\frac{1-k}{k}} dp &= -\frac{gG}{\omega} dt \\ &= -\frac{\varphi S}{\omega} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \sqrt{\frac{gp_g}{w_g} \left( \frac{p}{p_g} \right)^{\frac{k+1}{2k}}} dt \end{aligned}$$

分离变量并积分

$$\begin{aligned} \left( \frac{p}{p_g} \right)^{\frac{1-3k}{2k}} d\left( \frac{p}{p_g} \right) &= -\frac{\varphi S k}{\omega} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \sqrt{\frac{gp_g}{w_g}} dt \\ \frac{2k}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_g}{p} \right)^{\frac{k-1}{2k}} \right] &= -\frac{\varphi S k}{\omega} \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \sqrt{\frac{gp_g}{w_g}} t \end{aligned}$$

所以 
$$p = p_g (1 + B' t)^{-\frac{2k}{k-1}} \quad (12-36)$$

式中 
$$B' = \varphi S \frac{k-1}{2\omega} \sqrt{gk \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \frac{p_g}{w_g}}$$

用等熵方程代入, 得

$$w = w_g (1 + B' t)^{\frac{2}{k-1}} \quad (12-37)$$

$$T = T_g (1 + B' t)^{-2} \quad (12-38)$$

图 12-8 绘出了  $p-t$ 、 $\rho-t$  及  $T-t$  曲线。可以看出, 在后效期开始阶段, 参数变化比较急剧, 随着时间增大, 逐渐趋于平缓。

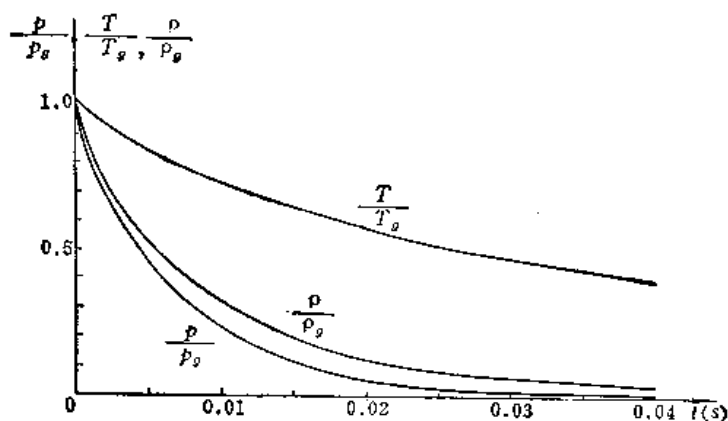


图12-8 后效期膛内气流平均参数变化曲线 (66-152GL)

图 12-9 绘出了实际的膛内气流参数随  $x$  及  $t$  的变化规律曲线, 此结果由数值计算得到。可以看出, 用平均参数变化代表的准定常近似与实际规律之间存在着相当大的距离。

最后, 关于火药气体全部排空的总时间, 即后效期时间间隔  $\tau$  的计算。按定义, 当膛内压强降至外界大气压时方为排空, 但由于  $p-t$  曲线的指数衰减规律, 拖尾很长, 计算误差很大, 而且, 当炮口压强  $p^*$  达到外界大气压后, 膛内平均压强

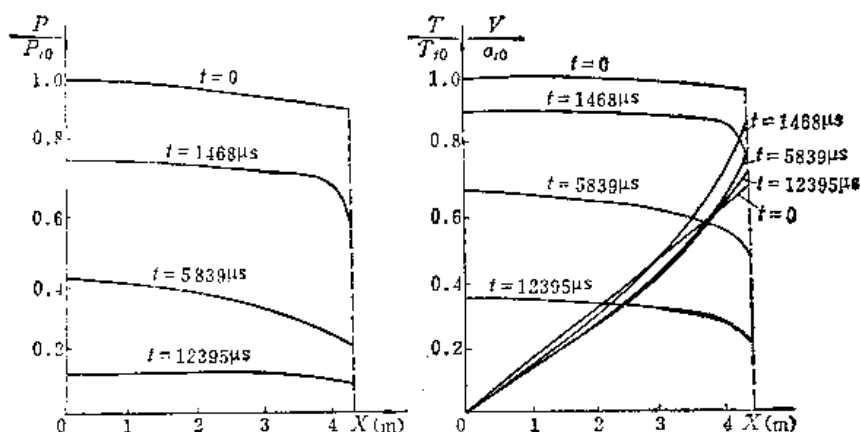


图12-9 后效期膛内气流参数实际变化曲线 (66-152GL, 数值解)

$$p = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{-\frac{k}{k-1}} p^* = 1.85 \text{ 公斤力/厘米}^2 \quad (k = 1.33)$$

已很低, 其炮膛合力可以略而不计。因此, 当膛内平均压力降至  $1.85 \sim 2$  公斤力/厘米<sup>2</sup> 时便认为后效期已结束。

#### 四、火药气体作用系数 $\beta$ 的计算

火药气体作用系数  $\beta$  是通过自由后坐最大速度公式定义的:

$$W_{\max} = \frac{q + \beta \omega}{Q_0} v_0$$

它虽然做为一个经验系数引出和使用, 但从力学概念上讲,  $\beta$  具有确切的物理意义。取后坐部分、装药、弹丸组成的体系为对象, 在后效期结束瞬间其动量方程为

$$-\frac{Q_0}{g} W_{\max} + \frac{q}{g} v_0 + \frac{\omega}{g} V = 0$$

在这个方程中, 火药气体质心速度用  $V$  表示, 令  $V = \beta v_0$  则得前式。因此,  $\beta$  表示在没有空气阻力的情况下, 后效期结束后的火药气体平均速度与弹丸初速之比。目前, 采用数值方法可以计算  $\beta$  的准确值。在早期的火炮专业书籍中介绍的各种理论与经验方法都是采用了较多的简化假设或者针对某种类型武器得到的, 因而存在着较大的局限性和计算误差。本节先介绍其中有代表性的一种方法, 然后提出改善计算精度的措施。

首先, 我们取自由后坐时的后坐部分为受力对象, 在后效期结束时列出动量方程:

$$\int_0^{t_k} P_{pr} dt = \frac{Q_0}{g} W_{\max}$$

其中

$$\int_0^{t_k} P_{pr} dt = \int_0^{t_g} P_{pr} dt + \int_0^{\tau} P_{pr} dt = I_n + I_h$$

$I_n$ 、 $I_h$  分别为内弹道时期与后效期炮膛合力冲量。

$$\text{而} \quad -\frac{Q_0}{g} W_{\max} = -\frac{q}{g} v_0 + \frac{\beta \omega v_0}{g} = \left( \frac{q}{g} + \frac{0.5 \omega}{g} \right) v_0 + \frac{(\beta - 0.5) \omega v_0}{g}$$

$$\text{所以} \quad -\frac{Q_0}{g} W_{\max} = \frac{Q_0}{g} W_s + \frac{(\beta - 0.5) \omega v_0}{g}$$

该式中的两项分别表示内弹道时期与后效期后坐部分动量的增量。

对比等式左右两端, 可得出:

$$I_h = \int_0^{\tau} P_{p'} dt = \left( \frac{\beta - 0.5}{g} \right) \omega v_o \quad (12-39)$$

我们对  $\frac{(\beta - 0.5)}{g} \omega v_o$  进一步分析, 可以看出,  $\frac{0.5}{g} \omega v_o$  相当于火药气体在后效期开始瞬时之总动量  $I_o$ , 即

$$I_o = \int_0^{\tau} S \rho V dx \approx \frac{0.5}{g} \omega v_o$$

将 (12-33) 式及上式代入 (12-39) 式, 得

$$I_h = \int_0^{\tau} \left( F^* + \frac{\partial I_o}{\partial t} \right) dt = \frac{\beta}{g} \omega v_o - I_o$$

而

$$\frac{\partial I_o}{\partial t} \approx -\frac{1}{2} G v_o$$

于是

$$\int_0^{\tau} \frac{\partial I_o}{\partial t} dt = -\frac{1}{2} v_o \int_0^{\tau} G dt = -\frac{1}{2} \frac{\omega}{g} v_o$$

代入  $I_h$  式, 最后得

$$\int_0^{\tau} F^* dt = \frac{\beta}{g} \omega v_o$$

所以

$$\beta = \frac{g}{\omega v_o} \int_0^{\tau} F^* dt \quad (12-40)$$

用

$$F^* = S \xi_o p = S(k+1) \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} p$$

及  $p = p_g (1 + B't)^{-\frac{2k}{k-1}}$  代入 (12-40) 式, 积分之, 因为

$$\int_0^{\tau} F^* dt = \frac{S \xi_o p_g}{B'} \cdot \frac{k-1}{k+1} \left[ 1 - (1 + B'\tau)^{-\frac{k+1}{k-1}} \right]$$

又由于

$$(1 + B'\tau)^{-\frac{k+1}{k-1}} \ll 1$$

所以

$$\int_0^{\tau} F^* dt = \frac{k+1}{k} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{3}{2}} \sqrt{gk p_g w_g} \frac{\omega}{g}$$

其中  $\sqrt{gk p_g w_g} = a_g$  是弹丸出炮口时膛内火药气体之平均音速。

最后, 代入式 (12-40) 并整理可得

$$\beta = \frac{k+1}{k} \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{a_g}{v_o} \quad (12-41)$$

这就是著名的斯鲁霍斯基  $\beta$  公式。该式对我国火炮工程应用的影响很大。与 (12-34) 式一样, 由于大量的简化假设使得它的计算值偏离试验值很多。例如, 该理论建议比热比  $k$

取 1.20, 即

$$\beta = 1.589 \frac{a_g}{v_o}$$

及  $k = 1.25$ , 即

$$\beta = 1.508 \frac{a_g}{v_o}$$

其计算结果一般都比自由后坐台测量的  $\beta$  值高。产生这种情况的原因之一是推导该理论时采用的等熵假设, 即忽略了炮膛流空过程中膛壁摩擦与热传导。为了修正热损失, 可

以采取各种处理方法。本书建议用提高  $k$  值并将它近似看做多变指数, 取  $k = 1.32 \sim 1.35$ , 其中, 各种榴弹炮取下限, 小口径加农炮、自动炮取上限。一般, 可取  $k = 1.33$  查表计算, 此时,

$$\beta = 1.393 \cdot \frac{u_{g-}}{v_0}$$

在进行估算时, 还经常采用一种经验公式, 其形式为:

$$\beta = \frac{A}{v_0}$$

式中,  $A$  是取决于武器内弹道特性的常数, 一般取  $A = 1300$ , 对于大威力加农炮及高初速自动炮  $A = 1250 \sim 1275$ , 各种轻武器  $A$  在 1200 以下。

当需要精确计算  $\beta$  及后效期膛内气流参数与炮膛合力规律时应采用数值计算方法。本书最后将介绍一种应用一元非定常管流特征线法进行数值计算的通用子程序, 可在后坐部分系统计算时调用。

### 五、带炮口装置时的炮膛合力 $P_T$ 及火药气体作用系数 $\beta_T$

对于图 12-7 所示之气体动力学模型, 当炮口装有制退器或助退器 (消焰器) 时, 火药气体作用于炮膛之合力由  $P_{pt}$  变为  $P_T$ 。下面, 推导  $P_T$  的计算公式。

首先, 取炮口装置的入口与出口间的一段为对象 (见图 12-10)。

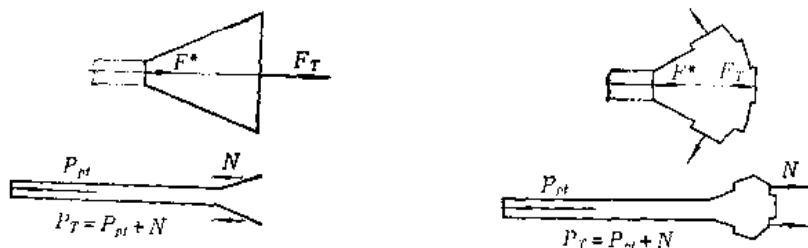


图 12-10 制退器及助退器中气体受力分析

由式 (12-10), 
$$N = F_T - F^*$$

式中  $N$ ——炮口装置壁面轴向反力;

$F_T$ ——炮口装置出口截面气流诸反力之轴向合力;

$F^*$ ——炮口装置入口截面 (即炮口) 气流总反力。

如果令 
$$F_T = \alpha F^*$$

则 
$$N = \alpha F^* - F^* = F^*(\alpha - 1) \quad (12-42)$$

其次, 取带炮口装置的炮身为受力对象,

则 
$$P_T - P_{pt} = N$$

即 
$$P_T = N + P_{pt} \quad (12-43)$$

该式表明, 火药气体作用于带炮口装置之炮身的炮膛合力  $P_T$ , 等于无炮口装置之炮膛合力  $P_{pt}$  与炮口装置壁面的轴向反力之和。

将式 (12-33) 代入, 得

$$P_T = \alpha F^* + \frac{\partial I_2}{\partial t} \quad (12-44)$$

式中  $\alpha = F_T/F^*$ ——炮口装置的结构特征量。分析表明, 这个参量只取决于炮口装置的形状和尺寸, 与气流状态参数无关。很显然,

当  $\alpha = 1$  时, 为无炮口装置情况;

当  $\alpha > 1$  时, 炮口装置增大气流总反力与炮膛合力, 此种炮口装置为后坐助推器;

当  $\alpha < 1$  时, 炮口装置减小气流总反力与炮膛合力, 此种炮口装置为炮口制退器与炮口偏流器。

在以下两节, 我们将专门讨论  $\alpha$  的计算方法。

式 (12-44) 与式 (12-33) 相似, 如果  $\frac{\partial I_0}{\partial t}$  采用相似的简化处理, 即取为  $-\frac{1}{2} Gv_0$  时, 则

$$P_T = \alpha F^* - \frac{1}{2} Gv_0 \quad (12-44)'$$

带炮口装置的火药气体作用系数  $\beta_T$  由下式定义:

$$W_T = \frac{g + \beta_T \omega}{Q_0} v_0$$

式中  $W_T$ ——带炮口装置时后效期结束点的自由后坐速度。

与不带炮口装置时火药气体作用系数  $\beta$  的推导完全相似, 可以得出

$$\beta_T = \frac{g}{\omega v_0} \int_0^{\tau} F_T dt = \frac{g}{\omega v_0} \int_0^{\tau} \alpha F^* dt$$

对于一种炮口装置,  $\alpha$  为常数, 故

$$\beta_T = \frac{\alpha g}{\omega v_0} \int_0^{\tau} F^* dt = \alpha \beta \quad (12-45)$$

于是, 便可以计算炮口装置的能量特征量 (效率)  $\eta_T$  及冲量特征量  $\chi$ :

$$\eta_T = 1 - \left( \frac{g + \alpha \beta \omega}{g + \beta \omega} \right)^2$$

$$\chi = \frac{\alpha \beta - 0.5}{\beta - 0.5}$$

### 第三节 炮口制退器设计

炮口制退器是炮身的一个组成部分。它通过控制后效期火药气体的流量分配与气流速度对炮身提供一个制退力, 使炮膛合力减小 ( $\alpha < 1$ ), 从而减小火炮后坐动能和炮架的射击负荷。目前, 我国装备的野炮大多数都采用了炮口制退器。一般来说, 炮口制退器的主要作用有两条。

第一、减小后坐动能。当后坐部分重量及后坐长度一定时, 可以减小射击时对炮架的作用力 (表12-2), 从而减轻火炮重量; 或者在后坐阻力一定时, 缩短后坐长度。炮口制退器的应用对解决火炮威力与机动性的矛盾起了有益的作用。

第二、便于采用统一炮架。在同一炮架上, 使用威力不同的炮身, 只要保证自由后坐动能相等, 即

$$\frac{1}{2} \frac{Q_{01}}{g} W_{T1}^2 = \frac{1}{2} \frac{Q_{02}}{g} W_{T2}^2$$

依此, 对两种炮身设计不同效率的炮口制退器, 就可保证炮架负荷相近, 从而采用同一炮架。这可以简化生产, 方便维护使用。在国内、外火炮系列中, 采用统一炮架的实例

表12-2 几门火炮计算书中的  $R_{\text{平均}}$ 

火 炮 名 称	无 制 退 器 $R_{\text{平均}}$	制 退 器 效 率 $\eta_r$ (计算值)	有 制 退 器 $R_{\text{平均}}$
59-57 G	7477公斤力	38%	4636公斤力
59-100 G	18680公斤力	35%	12140公斤力
56-85 J	7163公斤力	58%	3008公斤力
59-130 J	42110公斤力	30%	29480公斤力

不少,例如我国的54-122 L与56-152 L ( $\eta_r=30\%$ ); 60-122 J ( $\eta_r=59\%$ )与66-152 JL ( $\eta_r=54.5\%$ )等。

但是,炮口制退器在勤务使用中的问题也相当严重,它限制了制退效率的提高。其主要表现是炮口冲击波、噪声对炮手的生理危害作用。随着炮口制退器效率的提高,炮手区域的冲击波超压值相应增大,构成了对人员安全的威胁。对环境保护与生理防护标准来说,在已列装的火炮中,有不少均超出了允许极限。对于新设计的火炮,必须适当限制效率 $\eta_r$ 和采用优化设计方法选取合理的炮口制退器结构尺寸以满足要求。

炮口制退器设计的任务包括两部分,第一、根据总体设计的技术指标及炮口冲击波危害标准确定炮口制退器效率 $\eta_r$ 、结构特征量 $\alpha$ 、制退器结构尺寸及冲击波超压分布规律;第二、用试验方法测定实际效率与冲击波,与计算值比较,进行方案改进。

这一节主要介绍炮口制退器结构特征量 $\alpha$ 的计算方法,有关炮口冲击波问题将在第五节介绍。

### 一、炮口制退器的结构特点和分类

炮口制退器是安装在炮身口部的气体导引装置。由于尺寸、重量及加工工艺性等方面的要求和限制,它的实际结构均较简单,一般由1~2个腔室组成,腔室前方是弹孔,两侧为导引火药气体的侧孔与挡钣。

腔室的作用是使火药气体进一步膨胀加速以获得冲击前壁的速度和导引至侧方的流量分配比;侧孔的形状虽然有许多种,但它与挡钣主要起导引火药气体的作用;弹孔只是提供(弹丸飞行的孔道。就现有地面火炮而言,炮口制退器的结构型式可分为下述的三类。

#### 1. 冲击式或开腔式炮口制退器

它的结构特点是炮口制退器腔室直径较大(一般不小于2倍口径),两侧具有大面积侧孔,前方带有呈一定角度的反射挡钣。当火药气体进入腔室后,首先沿轴向膨胀加速,除中心附近的气流经弹孔流出外,大部分火药气体冲击挡钣后流动方向偏转,经侧孔排出。这种结构依靠大面积反射挡钣和侧孔获得较大的侧孔流量及较大的气流速度,气流方向取决于挡钣导流面角度和长度。为了进一步利用从弹孔向前流出的这部分气体,许多冲击式炮口制退器都采用了双腔室结构。由于进入第二腔室的气体流量已较小,压力也较低,故其尺寸可小于第一腔室。在相同重量的条件下,冲击式炮口制退器的效率一般高于其它结构型式的效率。

#### 2. 反作用式炮口制退器

这种制退器的结构特点是腔室直径很小(一般不超过1.3倍口径),没有或只有很小的前反射挡钣,侧孔多排布置,为保证较好地膨胀,有时将侧孔加工成扩张喷管状。



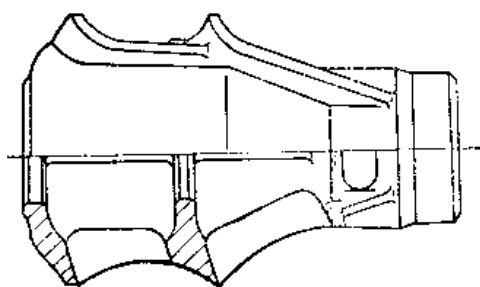


图12-11 56-85 J 冲击式炮口制退器

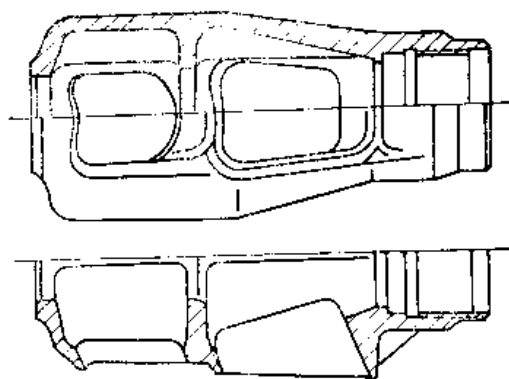


图12-12 66-152 J 冲击式炮口制退器

当火药气体进入腔室后，膨胀不大，仍保持较高的压力。其中一部分气体继续向前，从弹孔流出；另一部分则经侧孔进行二次膨胀后排出，其速度方向由侧孔控制。为了获得必要的侧孔流量，要求有足够大的制退器长度以保证侧孔入口面积。因此，在效率相同时，其结构较长，加工也较复杂。对于带尾翼的滑膛炮，需要采用这种结构，其它火炮采用较少。

### 3. 冲击-反作用式炮口制退器

这种制退器的结构特点是具有较大直径的腔室（大于1.3倍口径）和分散的圆形或条形侧孔。气体进入腔室时进行第一次膨胀加速，但由于不存在大面积侧孔，不能直接膨胀至极低的压力，因而侧孔仍起到二次加速与分配流量的作用。由此可见，此种炮口制退器兼有冲击式与反作用式的结构特点。我国装备的地面炮中，二分之一以上装有冲击-反作用式炮口制退器。

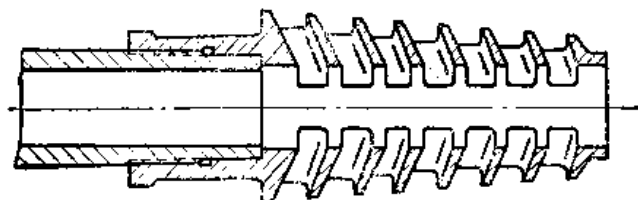


图12-13 反作用式炮口制退器

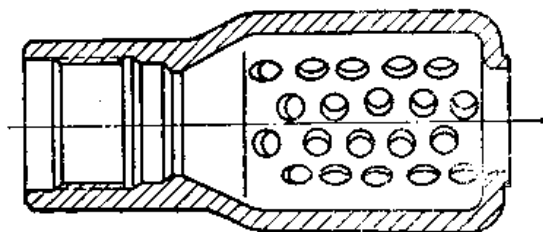


图12-14 59-130 J 冲击-反作用式炮口制退器

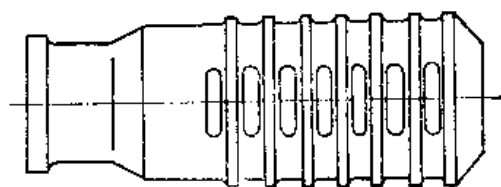


图12-15 59-100 G 冲击-反作用式炮口制退器

## 二、炮口制退器腔室内气体流量分配比的计算

火药气体进入炮口制退器腔室后，膨胀加速并不断向侧孔排出。流入侧孔的气体流量与侧孔入口面积、侧孔轴线角度及腔室结构有关。令

$$\sigma = \frac{G_o}{G} = \frac{G - G_1}{G} = \frac{1}{1 + \frac{G_1}{G_o}}$$

式中  $\sigma$  ——流量分配比;

$G_o$  ——经弹孔排出的秒流量;

$G_1$  ——经侧孔排出的秒流量;

$G$  ——炮口总流量。

由

$$G_o = S_o(\rho V)_o$$

$$G_1 = S_1(\rho V)_1$$

式中  $S_o, S_1$  ——弹孔及侧孔入口面积;

$(\rho V)_o$  ——腔室中心气流的单位面积秒流量;

$(\rho V)_1$  ——侧孔入口气流的单位面积秒流量。

令  $\delta = \frac{(\rho V)_1}{(\rho V)_o}$  (侧孔与弹孔单位面积流量之比)

于是

$$\sigma = \frac{1}{1 + \delta \frac{S_1}{S_o}} \quad (12-46)$$

该式说明, 流量分配比既取决于面积比, 也取决于  $\delta$ 。

### 1. 不同侧孔入口角时 $\delta$ 的计算

图12-16表示两种不同侧孔入口角  $\psi$  时之流动。当  $\psi < 90^\circ$  时, 进入侧孔的气流具有初始速度  $V_1 = V_o \cos \psi$ , 其中,  $V_o, V_1$  为腔室中心及侧孔入口之气流速度。当  $\psi \geq 90^\circ$  时, 进入侧孔之气流速度  $V_1 = 0$ , 依靠自身的膨胀能力加速, 因此, 通过侧孔之流量仅取决于腔室气体静压。随着  $\psi$  之增大, 腔室气流速度  $V_o$  阻碍进入侧孔之气流,  $\sigma$  下降。下面, 分别导出两种情况之  $\delta$ 。

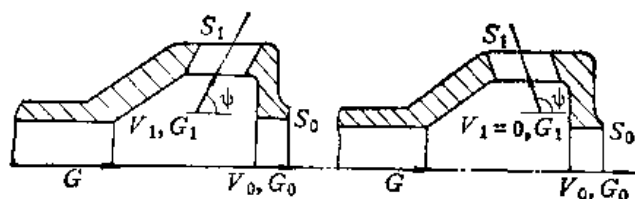


图12-16 流量分配比

当  $\psi < 90^\circ$  时, 由式 (12-25)

有

$$G = S^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p_{\#}}{\sqrt{RT_{\#}}}$$

式中,  $S^*$  为炮口截面积 (临界截面)。今设  $S^* = S_o^* + S_1^*$ ,  $S_o^*$  和  $S_1^*$  分别表示与弹孔及侧孔相对应之临界面积。下脚“滞”表示滞止参数, 以区别本节之腔室参数“o”。

由

$$G = G_o + G_1$$

则

$$G_o = S_o^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p_{\#}}{\sqrt{RT_{\#}}}$$

$$G_1 = S_1^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p_{\text{滞}}}{\sqrt{RT_{\text{滞}}}}$$

将 (12-18) 式代入以消去  $p_{\text{滞}}$  与  $T_{\text{滞}}$ 。因侧孔入口压力、温度与腔室中心之  $p_o$ 、 $T_o$  相同，所以

$$G_o = S_o^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_o^2 \right)^{-\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p_o}{\sqrt{RT_o}}$$

$$G_1 = S_1^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right)^{-\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p_o}{\sqrt{RT_o}}$$

为了简化公式，设

$$\frac{S_o^*}{S_1^*} = \frac{S_o}{S_1}$$

于是

$$\frac{G_1}{G_o} = \frac{S_1}{S_o} \frac{\sqrt{\left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right)^{-\frac{k+1}{k-1}}}}{\sqrt{\left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_o^2 \right)^{-\frac{k+1}{k-1}}}}$$

所以

$$\delta = \left( \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_o^2}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (\psi < 90^\circ \text{ 时}) \quad (12-47)$$

当  $\psi \geq 90^\circ$  时，设想气流先等熵滞止，即

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= p_o \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right)^{-\frac{k}{k-1}} \\ T_1 &= T_o \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right) \end{aligned} \right\} \quad (12-48)$$

然后，气体在静压  $p_1$  及  $\lambda = 0$  的情况下进入侧孔，此时

$$G_1 = S_1^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p_1}{\sqrt{RT_1}}$$

及 
$$G_o = S_o^* \sqrt{k \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_o^2 \right)^{-\frac{k+1}{k-1}}} \frac{p_o}{\sqrt{RT_o}}$$

将 (12-48) 代入  $G_1$ ，并与第一种情况同样处理，于是

$$\frac{G_1}{G_o} = \frac{S_1}{S_o} \frac{\sqrt{\left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_o^2 \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}{\sqrt{\left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right)^{\frac{k+1}{k-1}}}}$$

所以

$$\delta = \left[ \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_o^2 \right) \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_1^2 \right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (\psi \geq 90^\circ \text{ 时}) \quad (12-49)$$

在实际计算时, 大直径腔室中往往有环形突出部等各种干扰源, 故当  $\lambda_0$  较大时, 将形成激波 (图12-17), 气流便由超音速降为亚音速。由正激波前、后速度的普朗特关系式

$$\lambda_1 \lambda_2 = 1$$

故 (12-47) 及 (12-49) 式中的  $\lambda$  应以  $\lambda^{-1}$  代入; 同时, 引入符合系数  $\varphi_1$ , 做为对简化假设之修正, 这样

$$\delta = \varphi_1 \left( \frac{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_0^{-2}}{1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_0^{-2} \cos^2 \psi} \right)^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (\psi < 90^\circ \text{ 时})$$

$$\delta = \varphi_1 \left[ \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_0^{-2} \right) \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda_0^2 \cos^2 \psi \right) \right]^{\frac{k+1}{2(k-1)}} \quad (\psi \geq 90^\circ \text{ 时}) \quad (12-50)$$

计算经验表明, 对于反作用式炮口制退器, 采用 (12-47) 及 (12-49) 式, 是合适的, 但其它结构则应按 (12-50) 式计算。对于冲击式  $\varphi_1 = 0.85$ , 冲击-反作用式  $\varphi_1 = 1$ 。

## 2. 多腔室流量分配比计算

首先研究两个腔室时流量分配比 (图12-18)

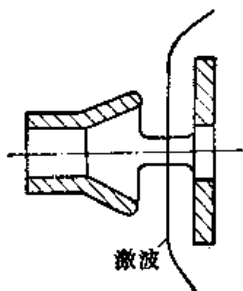


图12-17 制退器腔内激波的形成

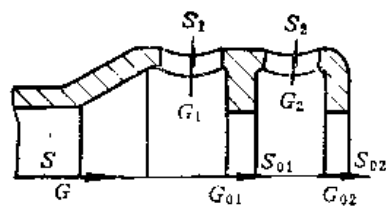
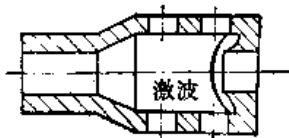


图12-18 双腔室流量分配比

由质量守恒方程: 第一腔室  $G = G_{o1} + G_1$

第二腔室  $G_{o1} = G_{o2} + G_2$

根据流量分配比定义  $\sigma_1 = \frac{G_{o1}}{G}$

所以

$$\sigma_1 = \frac{G_{o1}}{G_{o1} + G_1} = \frac{1}{1 + \frac{G_1}{G_{o1}}} = \frac{1}{1 + \delta_1 \frac{S_1}{S_{o1}}}$$

同样, 第二腔室

$$\sigma_2 = \frac{G_{o2}}{G_{o1}} = \frac{1}{1 + \delta_2 \frac{S_2}{S_{o2}}}$$

式中  $S_{o1}, S_{o2}$ ——第一、二腔室弹孔面积;

$S_1, S_2$ ——第一、二腔室侧孔面积;

$\sigma_1, \sigma_2$ ——第一、二腔室流量分配比。

对于多腔室流量分配比: 设腔室数为  $m$ , 经  $n$  个腔室后自弹孔排出的气体流量比为

$$\sigma = \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_i \cdots \sigma_m \quad (12-51)$$

式中

$\sigma_i$ ——经第  $i$  个气室后留在腔室内之流量比

$$\sigma_i = \frac{1}{1 + \delta_i \frac{S_i}{S_{oi}}} \quad (12-52)$$

$S_i, S_{oi}$ ——第  $i$  个腔室之侧孔及弹孔面积;

$\delta_i$ ——第  $i$  个腔室侧孔与弹孔单位面积秒流量之比。

因此, 从第  $i$  个腔室排出之气体流量比为:

$$\sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_{i-1} (1 - \sigma_i)$$

例如, 从第一腔室侧孔排出之气体流量比为  $(1 - \sigma_1)$ ; 从第二腔室侧孔排出之气体流量比为  $\sigma_1(1 - \sigma_2)$ , 依此类推。

### 三、炮口制退器结构特征量 $\alpha$ 的计算

结构特征量  $\alpha$  是炮口制退器计算的最主要参量。我们以图12-19三个腔室制退器为例推导  $\alpha$  公式。

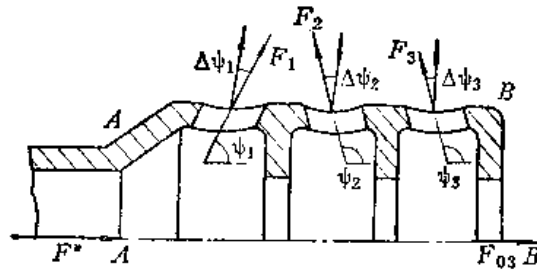


图12-19 炮口制退器的气流反力

取制退器  $A-A$  与  $B-B$  二截面间的一段为对象, 分析受力:

$F^* = \frac{k+1}{k} G a^*$ ——流入制退器腔室入口之气流总反力;

$F_1 = \frac{k+1}{k} G_1 a^* K_1$ ——第一腔室之侧孔出口气流总反力;

$F_2 = \frac{k+1}{k} G_2 a^* K_2$ ——第二腔室之侧孔出口气流总反力;

$F_3 = \frac{k+1}{k} G_3 a^* K_3$ ——第三腔室之侧孔出口气流总反力;

$F_{03} = \frac{k+1}{k} G_{03} a^* K_{03}$ ——第三腔室弹孔出口气流总反力。

将各出口气流反力投影于制退器腔室轴线上, 按照第二节的分析方法, 有

$$\begin{aligned} F_T = & \frac{F_1}{\cos \Delta \psi_1} \cos (\psi_1 + \Delta \psi_1) + \frac{F_2}{\cos \Delta \psi_2} \cos (\psi_2 + \Delta \psi_2) \\ & + \frac{F_3}{\cos \Delta \psi_3} \cos (\psi_3 + \Delta \psi_3) + F_{03} \end{aligned} \quad (12-53)$$

式中  $\Delta \psi_1, \Delta \psi_2, \Delta \psi_3$ ——由于各腔室侧孔出口截面之斜切引起的气流偏角;

$\psi_1, \psi_2, \psi_3$ ——各腔室侧孔出口气流轴线与腔室轴线之夹角。

根据质量守恒方程  $G = G_1 + G_2 + G_3 + G_{o3}$

而

$$G_1 = (1 - \sigma_1)G$$

$$G_2 = \sigma_1(1 - \sigma_2)G$$

$$G_3 = \sigma_1\sigma_2(1 - \sigma_3)G$$

$$G_{o3} = \sigma_1\sigma_2\sigma_3$$

式中  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ——各腔室之流量分配比。

令  $F_T = \alpha F^*$

代入 (12-53) 式并除以  $F^*$ ，便得到  $\alpha$  公式

$$\begin{aligned} \alpha = & K_{o3}\sigma_1\sigma_2\sigma_3 + K_1(1 - \sigma_1) \frac{\cos(\psi_1 + \Delta\psi_1)}{\cos\Delta\psi_1} \\ & + K_2\sigma_1(1 - \sigma_2) \frac{\cos(\psi_2 + \Delta\psi_2)}{\cos\Delta\psi_2} + K_3\sigma_1\sigma_2(1 - \sigma_3) \frac{\cos(\psi_3 + \Delta\psi_3)}{\cos\Delta\psi_3} \end{aligned} \quad (12-54)$$

对于  $m$  个气室的炮口制退器， $\alpha$  的公式与之相似：

$$\alpha = K_{om}\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_m + \sum_{i=1}^m \sigma_1\sigma_2\cdots(1 - \sigma_i) K_i \frac{\cos(\psi_i + \Delta\psi_i)}{\cos\Delta\psi_i} \quad (12-54)'$$

为了具体计算不同结构型式的炮口制退器结构特征量  $\alpha$ ，下面，我们将详细介绍 (12-54) 式中各参量之计算方法。

#### 四、各腔室气流速度系数 $\lambda_{oi}$ 及气流反作用系数 $K_{oi}$ 的确定

一般，炮口制退器各腔室有以下两种结构型式：一种是从炮口经过光滑锥形管均匀过渡至腔室，另一种是突然扩大至腔室。对于第一腔室，在现有制退器中两种型式均有（见图12-20），但更多的是介于两种结构之间，其过渡锥的起点不在炮口而是先突然扩大至  $D_1$ （约为  $1.2 \sim 1.3d$ ）再接过渡锥。至于第二腔室，则几乎都采用突然扩大的型式。



图12-20 均匀膨胀与突然膨胀的腔室结构

腔室结构的不同将影响气流速度系数及反作用系数之计算。根据第一节介绍的理论公式，各腔室之  $\lambda_{oi}$  及  $K_{oi}$  应按如下步骤决定。

##### 1. 计算各腔室之面积比 $v_{oi}$

根据定义，

$$\left. \begin{aligned} \text{第一腔室之 } v_{o1} &= \frac{S_{k1}}{S} \\ \text{第二腔室之 } v_{o2} &= v_{o1} \frac{S_{k2}}{S_{o1}} \\ \text{第 } i \text{ 腔室之 } v_{oi} &= v_{oi-1} \frac{S_{ki}}{S_{oi-1}} \end{aligned} \right\} \quad (12-55)$$

式中  $S_{k1}$ 、 $S_{k2}$ ——第一、二腔室横截面积。对于圆形腔室

$$S_{k1} = \frac{\pi}{4} D_{k1}^2$$

$$S_{k2} = \frac{\pi}{4} D_{k2}^2$$

$S$ 、 $S_{n1}$ ——炮膛及第一腔室弹孔面积。

## 2. 由公式 (12-23) 计算理想的速度系数 $\lambda'_{oi}$

$$v_{oi} = \frac{\left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{1}{k-1}}}{\lambda'_{oi} \left( 1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda'^2_{oi} \right)^{\frac{1}{k-1}}}$$

为了便于计算, 将上式绘成曲线  $\lambda'_{oi} - v_{oi}$  (图12-21) 供查用。

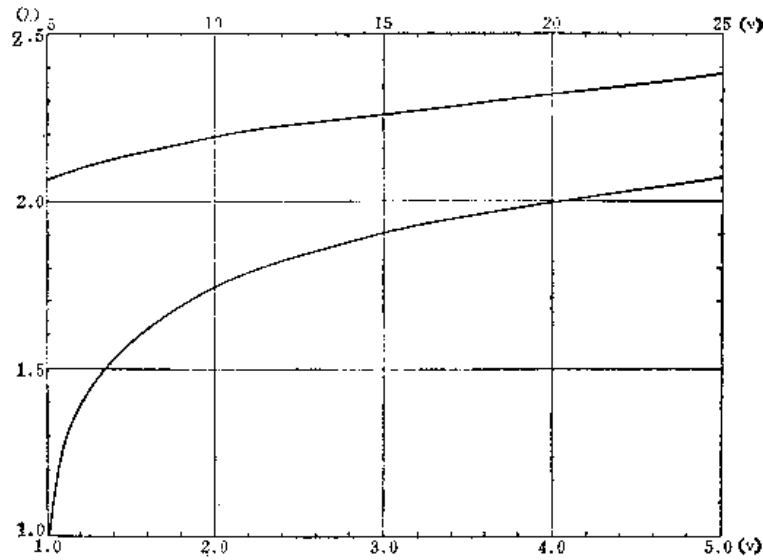


图12-21 速度系数与面积比关系曲线 ( $k = 1.33$ )

## 3. 计算理想反作用系数 $K'_{oi}$

由定义

$$K'_{oi} = \frac{\lambda'_{oi} + \lambda'^{-1}_{oi}}{2} \quad (12-56)$$

## 4. 按实际喷管修正反作用系数

由式 (12-26) 得

$$K_{oi} = \chi_\mu [1 + \chi_\delta (K'_{oi} - 1)] \quad (12-57)$$

式中  $\chi_\mu \approx 0.98$

$\chi_\delta = \cos 2\theta$  ( $\theta < 35^\circ$  时)

$\chi_\delta = 0.342$  ( $\theta \geq 35^\circ$  及突然膨胀时)

## 5. 计算实际喷管的速度系数 $\lambda_{oi}$

由定义

$$\lambda_{oi} = K_{oi} + \sqrt{K_{oi}^2 - 1} \quad (12-58)$$

这样, 可由  $\lambda_{oi}$  计算  $\delta_i$  及  $\sigma_i$ , 由最后腔室之  $K_{om}$  计算  $\alpha$ 。

### 五、各腔室侧孔气流反作用系数 $K_i$ 的确定

与 $K_{oi}$ 计算类似,  $K_i$ 可按如下步骤计算。

#### 1. 计算各腔室之侧孔出口面积比 $v_i$

根据定义, 第一腔室侧孔出口面积比  $v_1 = \frac{S_1}{S}$

第二腔室侧孔出口面积比  $v_2 = v_{o1} \frac{S_2}{S_{o1}}$

第 $i$ 腔室侧孔出口面积比  $v_i = v_{oi-1} \frac{S_i}{S_{oi-1}}$

式中  $S_1, S_2$ ——第一、二腔室侧孔出口面积。

#### 2. 由公式 (12-23) 计算理想的速度系数 $\lambda'_i$

$$v_i = \frac{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}}{\lambda'_i \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \lambda'^2_i\right)^{\frac{1}{k-1}}}$$

同样, 可查曲线 (图12-21)。

#### 3. 计算理想反作用系数 $K'_i$

$$K'_i = \frac{\lambda_i + \lambda_i^{-1}}{2} \quad (12-59)$$

#### 4. 按实际喷管修正反作用系数

由 (12-26) 式可得

$$K_i = X_u [1 + X_o X_{oi} (K'_i - 1)] \quad (12-60)$$

式中  $X_u \approx 0.98$

$X_o$ ——腔室气流径向膨胀的损失系数 (其公式同前);

$X_{oi}$ ——侧孔气流径向膨胀的损失系数 (其公式与 $X_o$ 的相同)。

这样, 便可计算各腔室之侧孔气流反作用系数  $K_i$ 。

### 六、侧孔出口气流角的计算

在 $\alpha$ 公式 (12-54)' 中,  $\psi_i + \Delta\psi_i$  是各侧孔出口气流之平均轴线与腔室几何轴线的夹角。在这两项中,  $\Delta\psi_i$  是由于孔道轴线与出口平面不垂直——斜切引起的气流偏角; 而 $\psi_i$  表示无斜切之孔道出口气流平均轴线与腔室几何轴线的夹角, 该角不同于孔道几何轴线与腔室几何轴线的夹角 $\psi'_i$ 。试验表明, 只有在侧孔导向性很好, 即孔道导向部长度与侧孔宽度之比 $\frac{l}{c}$ 较大时才有 $\psi_i = \psi'_i$ 。由于炮口制退器腔室厚度较小, 一般不具备上述条件, 因此, 在计算 $\alpha$ 时, 不应以几何角 $\psi'_i$ 代入计算, 否则将产生较大的偏差。下面, 我们分别说明 $\psi_i$ 及 $\Delta\psi_i$ 的具体计算方法。

#### 1. $\psi_i$ 及侧孔导向系数 $\varphi_i$

为了修正 $\psi_i$ 与 $\psi'_i$ 之差别, 引入侧孔导向系数 $\varphi_i$  (见图12-22)。该曲线是用实验符合方法画出的。图中



$l$ ——侧孔导向部长度或导向挡  
板长度;  
 $c$ ——侧孔宽度(方孔), 对于  
圆孔则用相当长度  $\frac{\pi d}{4}$   
( $d$  为孔径) 代替。

从图中可以看出, 仅当  $\frac{l}{c}$  接近于 1  
时,  $\varphi_2$  才等于 1, 一般

$$\psi_i = \varphi_2 \psi'_i \quad (12-61)$$

## 2. 斜切角 $\Delta\psi_i$ 的计算

在第一节中已推导了  $\Delta\psi(K_0, \psi)$   
的关系式并列列表 12-1 以便查找。下

面, 举例介绍该表的使用方法。可以分为两种情况 (图 12-23)。

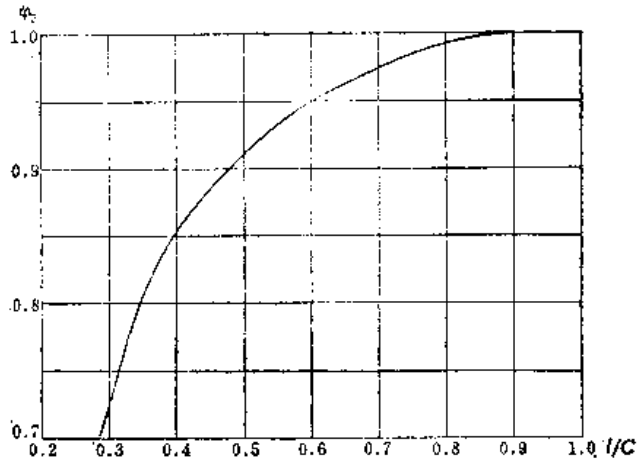


图 12-22 侧孔导向系数  $\varphi_2$ — $\frac{l}{c}$  曲线

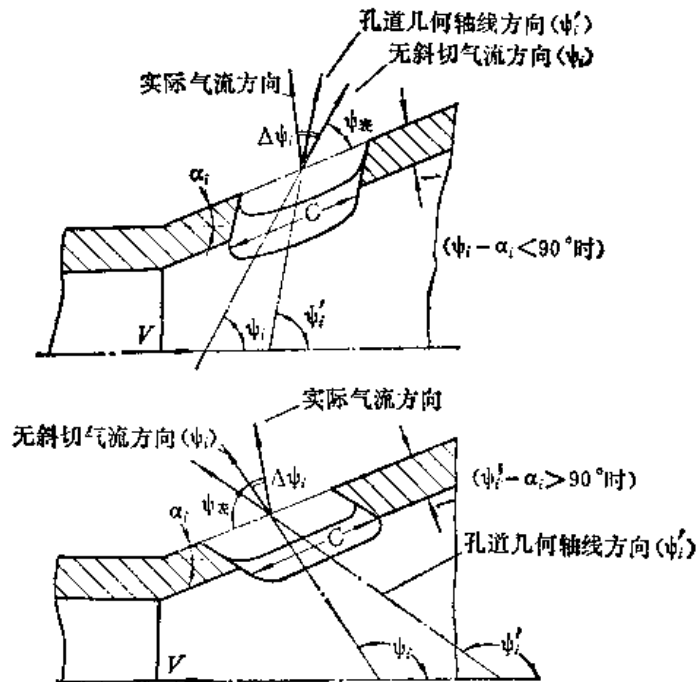


图 12-23 两种侧孔的气流斜切

第一、 $\psi'_i - \alpha_i < 90^\circ$  时

此时

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\pi} &= \psi_i - \alpha_i = \varphi_2 \psi'_i - \alpha_i \\ \Delta\psi_i &> 0 \end{aligned} \right\} \quad (12-62)$$

且

式中  $\alpha_i$ ——腔室壁与轴线之夹角, 当腔室为圆柱形时,  $\alpha_i = 0^\circ$ 。

第二、 $\psi'_i - \alpha_i > 90^\circ$  时

此时

$$\left. \begin{aligned} \psi_{\pi} &= 180^\circ - \psi_i + \alpha_i = 180^\circ - \varphi_2 \psi'_i + \alpha_i \\ \Delta\psi_i &< 0 \end{aligned} \right\} \quad (12-63)$$

查表时, 用侧孔出口气流反作用系数  $K_i$  及  $\psi_{\pi}$  并插值计算即得。

**例题：**已知侧孔  $\frac{l}{c}=0.764$ ,  $K_i=1.11$ , 侧壁锥角  $\alpha_i=2.5^\circ$ , 侧孔夹角  $\psi'_i=110^\circ$ , 求  $\Delta\psi_i$ 。

**解：**由  $\frac{l}{c}=0.764$  查曲线 (图12-21),  $\varphi_2=0.986$ ;

由 (12-61) 式  $\psi_i=\varphi_2\psi'_i=0.986\times 110^\circ=108.46^\circ$ ;

由 (12-63) 式  $\psi_2=180^\circ-\psi_i+\alpha_i=180^\circ-108.46^\circ+2.5^\circ=74.04^\circ$ ,

查表12-1, 插值

$\Delta\psi_i$	$\psi_2$	$K_i$		
		1.10	1.11	1.12
4		77.59	77.02	76.45
4.93			74.04	
5		74.51	73.81	73.11

得

$$\Delta\psi_i=-4.93^\circ$$

### 七、结构特征量的极限值 $\alpha_\infty$ 与炮口制退器极限效率 $\eta_\infty$

由式(12-54)'可见, 当  $\sigma=\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_m=0$ ,  $\psi_i=180^\circ$  及  $v_\infty=\infty$  时,  $\alpha$  具有极小值  $\alpha_\infty$ ;

$$\alpha_\infty=-K_\infty=-\frac{\lambda_\infty+\lambda_\infty^{-1}}{2}$$

由于

$$v_\infty=\frac{\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{1}{k-1}}}{\lambda_\infty\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda_\infty^2\right)^{\frac{1}{k-1}}}=\infty$$

所以

$$\left(1-\frac{k-1}{k+1}\lambda_\infty^2\right)=0$$

即

$$\lambda_\infty=\sqrt{\frac{k+1}{k-1}}$$

所以

$$\alpha_\infty=-K_\infty=-\frac{k}{\sqrt{k^2-1}} \quad (12-64)$$

当  $k=1.33$  时  $\alpha_\infty=-1.517$

$\alpha_\infty$  称为结构特征量的极限值。其物理意义是, 当炮口制退器将全部火药气体导引至  $180^\circ$  方向并无限膨胀时 (喷管出口面积  $\infty$ ), 此种炮口制退器的结构特征量为  $\alpha_\infty$ 。很显然, 当火炮安装了这种制退器时, 其效率具有理论极限值  $\eta_\infty$ , 称为极限效率。

表 12-3 列出了几种火炮的  $\eta_\infty$  值。

表 12-3

火 炮	65-37G	56-85 J	59 100G	54-122 L	59-130G	66-152 GL
$\eta_\infty(\%)$	92.8	94.2	97.0	73.7	98.0	90.4

$$\eta_{\infty} = 1 - \left( \frac{1 + \alpha_{\infty} \beta \frac{\omega}{q}}{1 + \beta \frac{\omega}{q}} \right)^2$$

$\eta_{\infty}$ 除了采用结构特征量为  $\alpha_{\infty}$  的制退器外, 还取决于内弹道条件, 它表示后效期火药气体可能被利用的最大限度。当然,  $\alpha_{\infty}$  及  $\eta_{\infty}$  在实际结构中是不能实现的, 但是, 这两个参量具有重要的理论意义。

### 八、炮口制退器效率计算例题

计算 59-100 G 单腔室多孔冲击-反作用式及 59-1-130 J 双腔室冲击式炮口制退器效率。

符 号	计 算 公 式	单 位	59-100G	59-1-130 J	
				第一腔室	第二腔室
$\frac{\omega}{q}$			0.369	0.386	
$v_o$		米/秒	900	930	
$S$	即 $S_{oo}$	厘米 <sup>2</sup>	81.8	139.4	
$S_{oi}$	$\frac{\pi}{4} d_{oi}^2$	厘米 <sup>2</sup>	91.6	165.1	165.1
$S_{ki}$	$\frac{\pi}{4} D_{ki}^2$	厘米 <sup>2</sup>	232.4	411.9	448.6
$2\theta_i$		度	>70	>70	>70
$S_i$		厘米 <sup>2</sup>	376.7	316.2	326.6
$\psi_i'$		度	90	90	105
$(l/c)_i$			1.15	0.645	0.617
$\alpha_i$		度	0	0	0
$v_{oi}$	$v_{oi-1} \cdot \frac{S_{ki}}{S_{oi-1}} \quad (v_{oo}=1)$		2.84	2.95	8.02
$\lambda_{oi}'$			1.89	1.90	2.16
$K_{oi}'$			1.210	1.213	1.311
$\chi_{\theta}$	$\cos 2\theta (\theta < 35^\circ), 0.342 (\theta \geq 35^\circ)$		0.342	0.342	0.342
$K_{oi}$	$\chi_{\mu} [1 + \chi_{\theta} (K_{oi}' - 1)]$		1.050	1.051	1.084
$\lambda_{oi}$	$K_{oi} + \sqrt{K_{oi}^2 - 1}$		1.370	1.376	1.508
$\delta_i$	(12-48)、(12-49)、(12-50)		0.758	0.646	0.677
$\sigma_i$	$\frac{1}{1 + \delta_i \frac{S_i}{S_{oi}}}$		0.243	0.447	0.427
$v_i$	$v_{oi-1} \cdot \frac{S_i}{S_{oi-1}}$		—	2.268	5.84
$\lambda_i'$	(12-23)		—	1.80	2.10

符 号	计 算 公 式	单 位	59-100G	59-1-130 J	
				第一腔室	第二腔室
$K'_i$	$\frac{\lambda'_i + \lambda''_i}{2} - 1$		—	1.178	1.288
$X_{k_i}$	同 $X_k$		1	1	1
$K_i$	$X_{k_i} [1 + X_{k_i} \cdot X_{k_i} (K'_i - 1)]$		—	1.040	1.077
$\varphi_2$	曲线 (12-22)		1	0.981	0.955
$\psi_i$	$\varphi_i \psi'_i$	度	90	86.5	100.3
$\psi_{\text{表}}$	(12-62) 或 (12-63)	度	—	—	—
$\Delta\psi_i$	表12-1	度	—	—	—
$\alpha$	(12-54)		0.255	0.193	
$\beta$	$\frac{A}{v_0}$		1.390	1.344	
$\eta_T$	$1 - \left( \frac{1 + \alpha\beta \frac{\omega}{q}}{1 + \beta \frac{\omega}{q}} \right)^2$	(%)	44.1	47.5	
$\chi$	$\frac{\alpha\beta - 0.5}{\beta - 0.5}$		-0.171	-0.285	
$\eta_T$	实验	(%)	45	45	

### 九、炮口制退器结构尺寸的选择原则

为了保证所要求的结构特征量  $\alpha$  和制退器效率  $\eta_T$ ，炮口制退器的结构型式和几何尺寸可能有无穷多个组合。例如，可以用较大直径的腔室和较小的侧孔角度得到给定的  $\alpha$ ；也可以用较小直径的腔室和较大的侧孔角度得到此  $\alpha$ ；同样，用多室冲击式或单室任意形状小侧孔的冲击-反作用式结构型式均能达到同样的效率  $\eta_T$ 。实际上，现有火炮上安装的炮口制退器结构就是这样五花八门的。但是，随着火炮威力的提高与对环境影响的加剧，对炮口制退器设计提出了新的要求和限制，仅仅满足单一的效率指标是不够的，还要兼顾其它指标。采用最优化方法进行参数选择与结构设计是炮口制退器设计的方向。其依据的原则是：

1. 在保证规定效率  $\eta_T$  的前提下，炮口气流对环境的危害最小。具体地说，野炮炮口制退器在炮手操作位置产生的炮口冲击波、噪声级应最低；直接瞄准火炮的炮口制退器形成的炮口焰应不妨碍瞄准；多管自动炮的炮口制退器应使气流相互干扰最小，等等。就勤务使用要求而言，仅满足规定效率而对环境危害比较严重的炮口制退器不允许装备。当采用最优化设计仍未达到要求时，应降低效率指标。

2. 炮口制退器尺寸与重量应合理。在满足第一条要求之后，应选择结构尺寸与重量最小的方案，以减轻平衡机负荷，减小身管振动。

在这两条原则中，第一条是基本的，而且，就目前的技术水平来说，困难也最大。关于这个问题，我们将在后面介绍。第二条原则可以通过合理的结构设计来实现。下面，

我们具体介绍炮口制退器结构设计的一些问题。

炮口制退器结构设计包括确定：结构型式、腔室数  $m$ 、几何尺寸如  $D_k$ 、 $\psi$ 、 $d_o$ 、 $S_1$ 、 $\frac{l}{c}$ 、 $\theta$  及制退器长度  $L_k$  等。其中， $D_k$ 、 $L_k$  及  $\psi$  取决于效率  $\eta_r$ ，需通过最优化设计确定，其它参数则应事先决定。

1. 弹孔直径  $d_o$ ：弹孔直径的大小以保证弹丸能顺利通过为原则。 $d_o$  过大将使效率降低，一般，应保证

$$d_o \geq d_H + 2L_k \tan(\beta + \delta)$$

式中  $d_H$ ——火炮阴线直径；

$\beta$ ——弹孔中心线与炮膛轴线装配后的偏角，按规定的加工精度要求， $\beta$  约为  $5'$  左右。

$\delta$ ——弹丸出炮口时的章动角，可取  $10' \sim 40'$ 。

按经验，单室制退器  $d_o = (1.07 \sim 1.15)d$ ，双室制退器第二腔室  $d_o = (1.20 \sim 1.30)d$ 。

2. 侧孔总面积  $S_1$ ：从有效利用制退器结构出发，侧孔的有效面积应与前钣的反射面积相近，即

$$\delta S_1 \approx S_k - S_o$$

也就是说，前钣反射能力与侧孔排出能力相当，以便使撞击在前钣的气体可全部经侧孔排出。

3. 侧孔导向性  $\frac{l}{c}$ ：为了保证气流在侧孔中良好导向，起码应使  $\frac{l}{c} > 0.8$ 。

4. 腔室半锥角  $\theta$ ：从减小气流损失出发， $\theta$  应取较小值，但这将使制退器变长。一般取  $2\theta = 15^\circ \sim 30^\circ$  较适宜。

#### 第四节 炮口偏流器与炮口助退器设计

安装于航空炮炮口的气体偏流器又称消焰器或定向器。其主要作用是将炮膛内绝大部分火药气体导向侧方。一般，航空炮安装位置靠近喷气发动机进气道，若不加引导，则大量火药气体及冲击波将进入其中，形成气流脉动，使发动机颤振以致停车。这种故障在高  $M$  数及高空射击时尤其容易发生。因此，多数战斗机的航空炮均装有偏流器。

炮口偏流器的工作原理与炮口制退器相同。但结构有如下区别：单侧非对称排气；为了保证大的侧孔流量比，长度较大；一般均采用  $\psi = 90^\circ$ ；又由于飞机要求迎面阻力系数较小，偏流器均采用细长形。此外，偏流器不一定与身管联结，可以固定于机身上。这时，炮口装置除了提供一个轴向力之外，还因气流的单侧排出产生一个法向力。这些力对飞机质心的力矩成了射击时的干扰源。图 12-24 是一种炮口偏流器。

炮口助退器用于小口径高射速自动武器。当炮身的后坐能量不足以达到规定的循环时间时，采用助退器可以增大后坐速度，提高射频。助退器有作用式及反作用式两种。反作用式助退器是一个锥形扩张喷管，依靠火药气体在喷管扩张段膨胀时提供的气流反作用力增大炮身的后坐动能。反作用式助退器又是一种性能较好的消焰器，它能够削弱炮口焰。小口径自动武器是一种直接瞄准的近战武器，炮口焰的存在会影响射手的视线，妨碍跟踪目标，所以，这类武器都无例外地要求抑制炮口焰，并广泛采用锥形消焰器，

因此,反作用式助退器的助退与消焰作用同时存在。为了使炮口装置直径不致过大,通常,其反作用系数 $K$ 不超过1.3。如果要求 $K > 1.3$ ,最好采用作用式助退器。这种助退器由半封闭圆筒及装在圆筒内的活塞组成。圆筒固定于自动炮的架体上,活塞联于身管端部,当火药气体静压作用于活塞时,提供了附加的后坐冲量(图12-25)。与反作用式助退器相比,在直径相同时,作用式助退器的效率可高出一倍以上。但是,作用式助退器无明显的消焰作用。

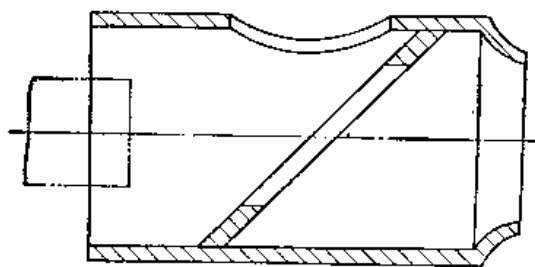


图12-24 航空炮炮口偏流器

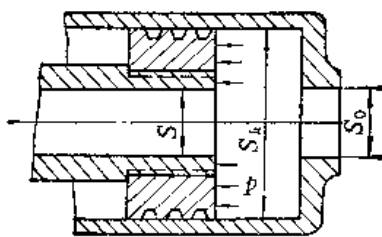


图12-25 作用式助退器

下面,分别介绍三种炮口装置的计算方法。

### 一、炮口偏流器

作用于炮口偏流器上的力有两种情况:

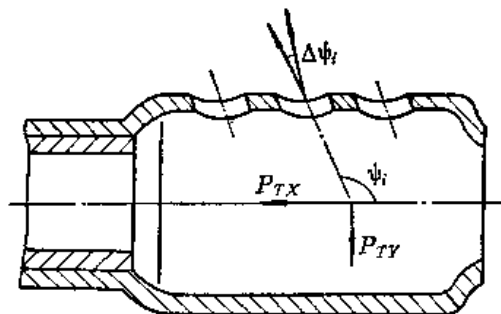


图12-26 炮口偏流器受力

当炮口偏流器与身管固联时,作用于炮身上的轴向分力 $P_{TX}$ 与带炮口制退器时的 $P_T$ 相同,即

$$P_{TX} = \alpha_x F^* + \frac{\partial I_o}{\partial t} \quad (12-65)$$

式中  $\alpha_x$ ——结构特征量的轴向分量;

$P_{TX}$ ——炮膛合力的轴向分力。

还有一个法向分力 $P_{TY}$ 作用于炮身

$$P_{TY} = \alpha_y F^* \quad (12-66)$$

式中  $\alpha_y$ ——结构特征量的法向分量。

$\alpha_x$ 的推导方法与炮口制退器的相同,公式形式也完全一样

$$\alpha_x = K_{om} \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_m + \sum_{i=1}^m \sigma_1 \sigma_2 \cdots (1 - \sigma_i) K_i \frac{\cos(\psi_i + \Delta\psi_i)}{\cos\Delta\psi_i}$$

$\alpha_v$  的推导也类似, 其公式为

$$\alpha_v = \sum_{i=1}^m \sigma_1 \sigma_2 \cdots \sigma_{i-1} (1 - \sigma_i) K_i \frac{\sin(\psi_i + \Delta\psi_i)}{\cos\Delta\psi_i} \quad (12-67)$$

当炮口装置与炮身分开时, 应只计算作用于炮口偏流器上的力:

$$\begin{aligned} \text{轴向力} \quad N_x &= F^* (\alpha - 1) \\ \text{法向力} \quad N_y &= P_{xy} = \alpha_y F^* \end{aligned} \quad (12-68)$$

## 二、反作用式助退器

反作用式助退器的计算十分简单。其结构特征量  $\alpha = K$ 。当已知出口直径  $D_k$  及半锥角  $\delta$  时, 便可计算  $\alpha$ 。其步骤如下:

1. 根据  $\frac{D_k}{d}$  计算  $\lambda'$ : 由 (12-23) 式或查曲线 (图 12-21)。
2. 计算理想反作用系数  $K'$

$$K' = \frac{\lambda + \lambda'}{2}$$

3. 修正  $K'$ , 得到  $\alpha = K$ , 由 (12-57) 式得

$$K = \chi_k [1 + \chi_k (K' - 1)]$$

4. 计算  $\eta_r$  及  $\chi$  等参量。

当给定  $\alpha$  进行正面设计时, 采用试算法或利用计算机程序均很简便。

## 三、作用式助退器

当炮身装有作用式助退器时, 其受力为

$$P_T = F^* + \frac{\partial I_o}{\partial t} + p(S_k - S) \quad (12-69)$$

式中  $F^* + \frac{\partial I_o}{\partial t} = P_{pr}$  ——无炮口装置时的炮膛合力;

$p(S_k - S)$  ——火药气体作用于活塞之静压力;

$p$  ——圆筒内的气体压强;

$S_k$  ——圆筒横截面积。

若作用式助退器之结构特征量为  $\alpha$ , 则

$$\alpha = 1 + \frac{p(S_k - S)}{F^*}$$

经过一些变换后, 可得:

$$\alpha = 1 + (K - 1) \frac{S_k - S}{S_o - S} \quad (12-70)$$

式中,  $K = \frac{\lambda + \lambda^{-1}}{2}$

而  $\lambda$  可按锥形喷管计算, 或者利用突然膨胀的  $\lambda$  公式

$$\lambda = -\frac{1}{\epsilon} + \sqrt{\frac{1}{\epsilon^2} - \frac{1}{\epsilon} \frac{S}{S_o}}$$

其中

$$\varepsilon = 1 + \frac{k-1}{k+1} \left( 1 - \frac{S}{S_0} \right)$$

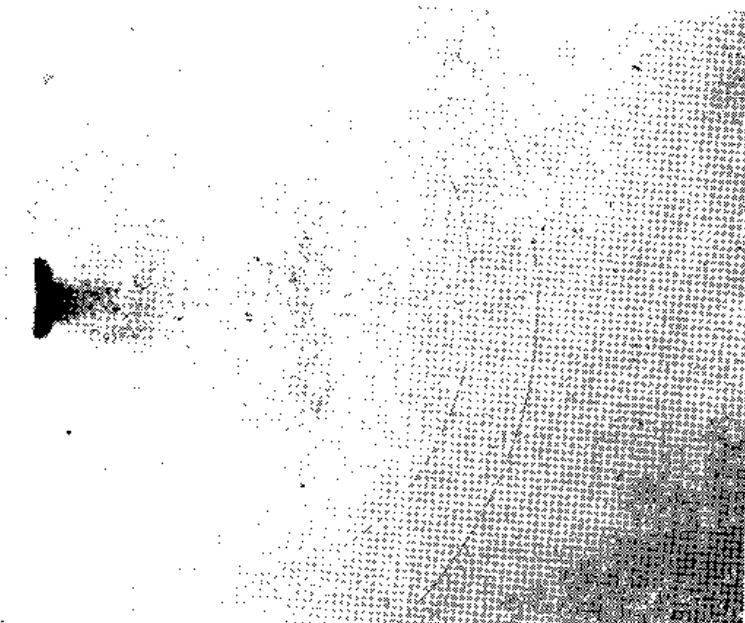
## 第五节 炮口气流现象

本节简要介绍在火炮发射过程中, 炮口周围出现的各种物理现象, 并说明它们的发生与发展机理。目的是了解炮口冲击波、噪声及炮口焰等各种危害因素产生的原因、影响因素及与炮口装置设计的关系, 为进一步控制这些危害因素提供必要知识。

在弹丸飞出炮口前后, 由于火药气体的喷射, 在炮口周围形成了随时间变化的两个流场。

### 一、初始流场

弹丸在膛内加速运动时, 前方的空气及少量漏气被弹丸推动形成了 1~2 个激波。此激波逐渐加强, 到炮膛出口时膨胀为一个球形冲击波, 称为初始冲击波 (见照片 12-1)。



照片12-1 初始流场的阴影照片

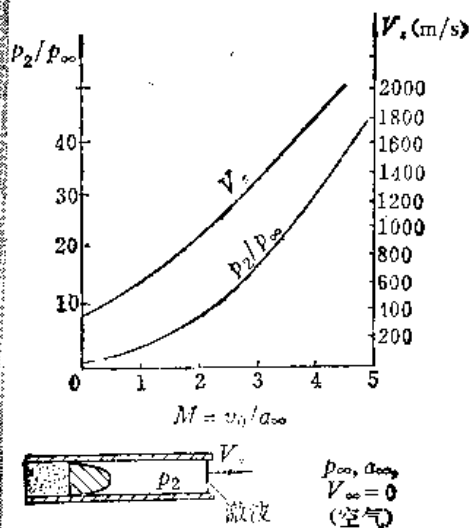


图12-27 弹前激波的强度

初始冲击波的强度主要取决于弹丸速度。 $v_0$ 越高, 弹前激波及初始冲击波越强。当  $v_0$  在 1000 米/秒以下时, 弹前激波到达炮口时之气体压力一般为 10~20 公斤力/厘米<sup>2</sup>, 当  $v_0$  超过 1500 米/秒时气体压力可达 35 公斤力/厘米<sup>2</sup> 以上。弹前激波是弹丸膛内运动的阻力之一, 内弹道计算时往往将它略而不计。但是, 对于超速炮这个阻力的影响变大。

跟在初始冲击波后面的是初始射流——由压缩空气及漏火药气体组成的超音速射流。关于这种射流的性质, 将在后面介绍。

弹丸飞出时, 由于高压火药气体的猛烈喷射, 初始射流被吞没。但是, 初始冲击波却始终在外层不断增大其球半径, 同时, 它的存在对后面的火药气体流场性质产生较大的影响。

### 二、火药气体流场

弹丸刚出炮口时, 高温、高压火药气体首先从锥形弹尾部溢出, 向侧方剧烈膨胀,



其速度达 1500~2000 米/秒，包围弹丸并象活塞一样推动空气形成第二个冲击波——炮口冲击波。照片 12-2 是火药气体流场的阴影照片，最外层的几个冲击波球是初始冲击



照片12-2 无炮口装置时的炮口流场阴影照片

波，内层的一个球就是炮口冲击波，它的强度远高于初始冲击波。其主要特点是：

1. 它是一个由火药气体连续、有限地补充能量的动球心，是一个近似球形的冲击波；

2. 具有明显的方向性，是一个各向异性的非均匀冲击波；

3. 炮口冲击波前方嵌以另一个冠状冲击波，组成了复杂的相交波系。

下面，简要地说明一下这三个特点。

炮口冲击波与瞬时释放能量的冲击波不同，其能量是由炮膛内连续排出的高压火药气体不断提供的：

$$E = Kt^\alpha$$

式中  $E$ ——火药气体补充给冲击波的能量；

$K$ ——取决于炮口弹道参量的常数；

$\alpha$ ——时间指数。

$\alpha$  决定了能量补充的速率，有些试验曾测定了  $\alpha \approx 1$ 。同时，火药气体从炮膛排空的总时间比较长，而能量补充的时间却相对地短得多，一般为后效期时间  $\tau$  的若干分之一，这一特点反映了能量补充的有限性。其原因主要是膛内气体向外排出的速率是以随时间呈指数关系衰减的，在一段时间后，炮口冲击波早已膨胀到远离炮口，火药气体能量已无法向其补充。

试验表明, 炮口冲击波的球心速度  $U_0$  也是以随时间呈指数关系衰减的。动球心特性是由炮膛定向喷射决定的。火药气体除了向三自由度空间膨胀外, 还有一个向前的轴向动量  $P(t)$ , 此动量支持冲击波球沿轴线运动:

$$U_0 = \frac{P(t)}{M_a(t) + M_j(t)}$$

式中  $M_a(t)$ —— $t$  瞬时与冲击波球一起运动的压缩空气层质量;

$M_j(t)$ —— $t$  瞬时冲击波球内的火药气体质量。

随着冲击波球不断扩大,  $M_a(t) + M_j(t)$  的增长速率大于  $P(t)$  值的增长速率, 于是  $U_0$  单调递减。至某一瞬间  $U_0$  趋于常量。

炮口冲击波既然是球心以一定速度移动的球形冲击波, 那么, 冲击波球上各点的绝对速度  $D$  就是球心速度  $U_0$  与冲击波阵面相对速度  $V_0$  的矢量和(图 12-28),

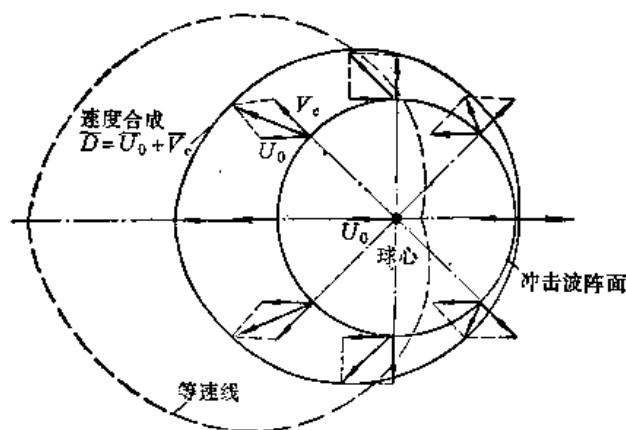


图12-28 炮口冲击波速度合成

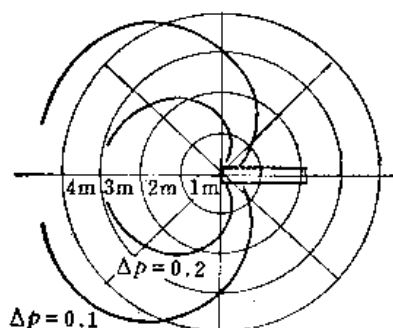


图12-29 炮口冲击波等压线 (37 G)

$$\vec{D} = \vec{U}_0 + \vec{V}_0$$

图 12-29 及照片 12-2 绘出了实测的炮口冲击波等压线与波阵面分布图。所谓等压线, 是指某平面内冲击波超压相等的诸点之连线。波阵面是某瞬时冲击波波头位置线, 它是等时线。等时线近似为圆形, 而等压线则近似为桃形。这反映了动球心速度  $U_0$  的影响, 说明炮口冲击波强度是具有方向性的, 即沿  $U_0$  方向冲击波最强, 随着向后夹角之增大而逐渐减弱。这种各向异性冲击波称为非均匀冲击波。

从照片 12-2 中可以清楚地看出, 在炮口冲击波前方还有一个圆弧形冲击波嵌在上边, 称为冠状冲击波。它的形成原因比较复杂, 这里不能详述, 只简单地指出, 它与弹丸和初始冲击波相互作用有关。

由于初始冲击波强度较弱, 随着惯性运动其直径不断扩大, 波阵面速度逐渐向周围大气的音速接近。而在初始冲击波内部运动的炮口冲击波, 其强度和波阵面运动速度远高于它, 因此, 最后必将追赶上它并合而为一。在追赶过程中, 尤其是前期, 它们之间的相互作用对炮口冲击波的形状、分布特性以至强度都有不可忽视的影响。若不考虑初始冲击波的存在, 则会使作用于炮口装置上的压力估值明显偏高。这是因为, 炮口冲击波是在已被初始冲击波扰动了的运动介质中传播的。由冲击波理论可知, 此时之冲击波压力将比不考虑初始冲击波作用的常温、静止空气为低。

从炮口连续喷射出的火药气体在口部形成一个超音速射流 (见照片 12-2), 它的主要特点是:

1. 为膨胀不足射流, 内部形成瓶状激波系;
2. 具有显著的非定常性, 其几何尺寸和气动力参数随时间变化。瓶状激波系 经历一个生长-稳定-衰减过程。

下面, 简要地说明一下这两个特点。

所谓膨胀不足射流, 是指出口压力与外界环境压力之比 (称压力比  $n$ ) 大于 1 的射流。气体在射流中继续膨胀, 形成了一个形状如瓶的激波系, 它由两个相交的斜激波、一个正激波 (又称马赫盘) 及两个反射激波组成。瓶状激波系的结构及气体参数分布对中间弹道及炮口焰的特性有直接影响。在图 12-30 中, 我们将射流分为若干个区域加以研究。

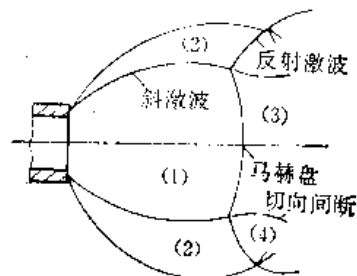


图12-30 膨胀不足射流结构

(2) 区: 相交激波与射流边界之间的超音速区。在边界外是火药气体与外界空气的紊流混合区, 是发生二次炮口焰的区域。

(3) 区: 马赫盘后的亚音速区。(1) 区的超音速气流经正激波后, 压力与温度升高, 速度由 2000 米/秒降至 150 米/秒, 是产生中间焰的区域。图 12-32 绘出了马赫盘前后的压力分布。

(4) 区: 经两道斜激波后之超音速区, 与 (3) 区由切向间断相接, 压力相等。

炮口射流的非定常性表现在射流及瓶状激波的几何尺寸及气流参数随时间变化而固定不变。也就是说, 图 12-31 及图 12-32 所示的参数分布及图 12-30 的射流几何尺寸仅仅是某一瞬时的图形, 不同瞬时的上述图形将是变化的。图 12-33 绘出了 7.62 毫米步枪的瓶状激波形状随时间的发展变化。图 12-34 绘出了轴线上几个气体间断 (初始冲击波、炮口冲击波、火药气体与空气交界面及马赫盘) 随时间发展的轨迹。图中横坐标为  $X/d$ , 纵坐标为时间  $t/\tau$ 。可以看出射流和瓶状激波经历了一个生长-稳定-衰减

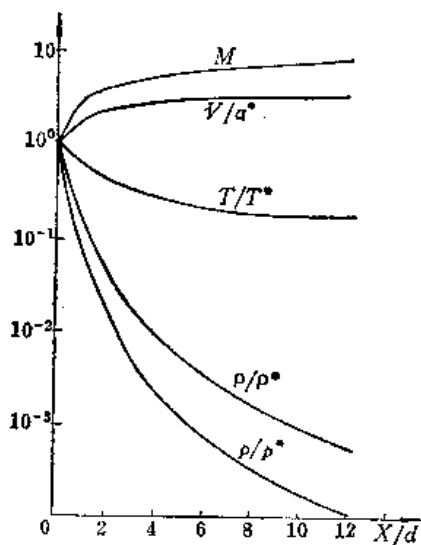


图12-31 火药气体射流瓶状激波内的轴向参数分布

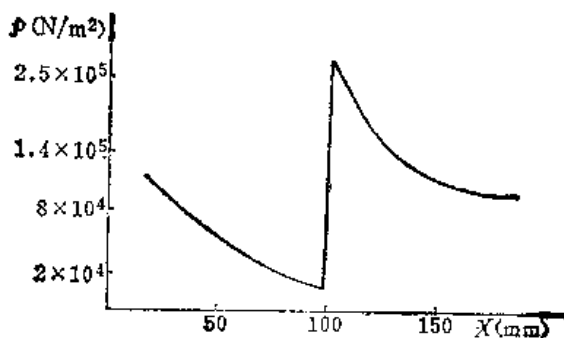


图12-32 弹底穿过马赫盘后之轴向压力分布 (7.62毫米步枪)

过程, 现分述如下。

生长期: 时间从  $0 \sim \frac{1}{20} \tau$  ( $\tau$ ——后效期总时间), 射流及瓶状激波将持续增大。其中, 相交激波一开始就达到了最大张角, 马赫盘直径和瓶状激波长度 (炮口截面与马赫盘的距离) 不断增大, 至  $\frac{1}{20} \tau$  左右时马赫盘直径达到了最大值。

稳定期: 时间从  $\frac{1}{20} \tau \sim \frac{1}{10} \tau$ , 射流及马赫盘直径变化较小, 瓶状激波长度仍缓慢增大, 至  $\frac{1}{10} \tau$  时达到了最大值。

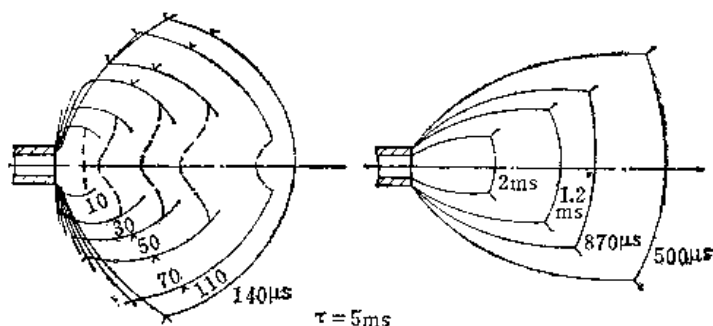


图12-33 瓶状激波发展图 (7.62毫米步枪)

衰减期: 时间从  $\frac{1}{10} \tau \sim \tau$ , 射流及瓶状激波连续缩小。这个过程是与膛内压力的衰减规律一致的。

形成以上三个时期气流非定常变化的原因有两个: 一是火药气体射流推动炮口冲击波运动时受到冲击波的约束作用; 二是后效期随时间呈指数下降的膛口压力变化规律。从射流理论可知, 瓶状激波几何尺寸与出口压力比呈指数关系, 例如

$$\text{马赫盘直径 } D_m \propto p^{0.5}$$

$$\text{瓶状激波长度 } X_m \propto p^{0.5}$$

照理讲, 在后效期开始时, 因炮口压力最高, 瓶的尺寸应最大, 以后随着炮口压力

下降, 瓶的尺寸不断减小, 但由于外层炮口冲击波的约束作用, 限制了射流的发展, 使得射流与瓶状激波必须从小逐渐长大。随着冲击波向外扩展, 约束作用减小, 膛内参数下降规律起支配作用, 于是, 经过短暂的稳定时期后, 射流及瓶状激波不断衰减。图 12-34 反映了轴线方向上射流与冲击波之间相互作用的规律。实际上, 其它方向上的规律也相似, 只是射流与冲击波脱离的时间将随着与轴线夹角之增大而逐渐减小。例如, 在侧后方, 相交激波之张角在  $0.006 \tau$  即达最大值, 然后连续减小, 说明射流与冲击波在  $0.006 \tau$  时开始脱离; 在侧方, 马赫盘直径在  $0.05 \tau$  前增大, 经  $0.05 \tau$  的稳定时期后, 开始衰减, 说明射流与冲击波在  $0.1 \tau$  时才开始脱离; 而在前方, 瓶状激波在  $0.1 \tau$  前均连续长大, 且脱离最慢。这一现象反映了火药气体向炮口冲击波补充能量是有方向性的, 因

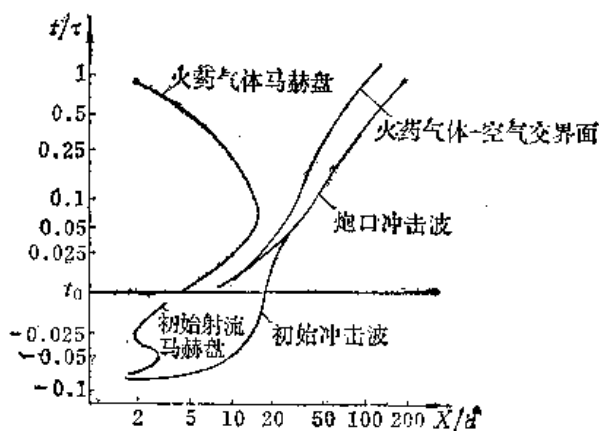


图12-34 炮口流场轴向断面发展图

而决定了炮口冲击波强度的各向异性。

### 三、带炮口装置的流场

当炮口安装各类炮口装置时,流场将发生变化。照片 12-3 是一个带锥形消焰器的炮口流场,照片 12-4 是一个带炮口制退器的炮口流场。

带锥形消焰器的炮口射流及瓶状激波呈细长状。随着消焰器面积比的增大,气流出口速度 $V$ 及出口马赫数 $M$ 的增大,射流越向细长发展。与此相应,冲击波球心速度 $U$ 增大,波阵面向着椭球形变化,冲击波方向性更强。

带炮口制退器时,弹孔及两侧孔分别形成独立的气体射流与冲击波,它们的几何尺寸与气动力特性同单一气流。弹孔与侧孔冲击波也是由弹孔与侧孔火药气体连续、有限地补充能量的动球心的,近似球形的冲击波。这些冲击波在空间的合成结果即是最终的炮口冲击波场。用四个球形冲击波(冠状冲击波、弹孔冲击波及两个侧孔冲击波)在空中相交的物理模型可以近似模拟带炮口制退器之冲击波场(图 12-35)。

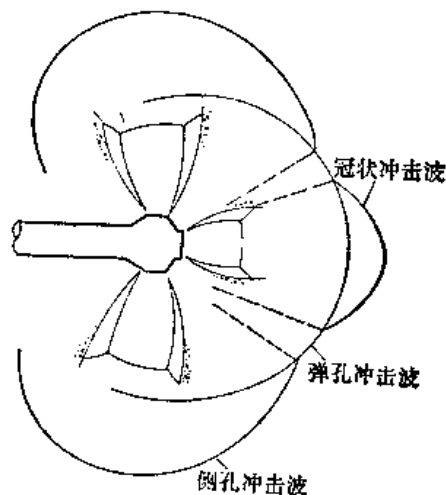
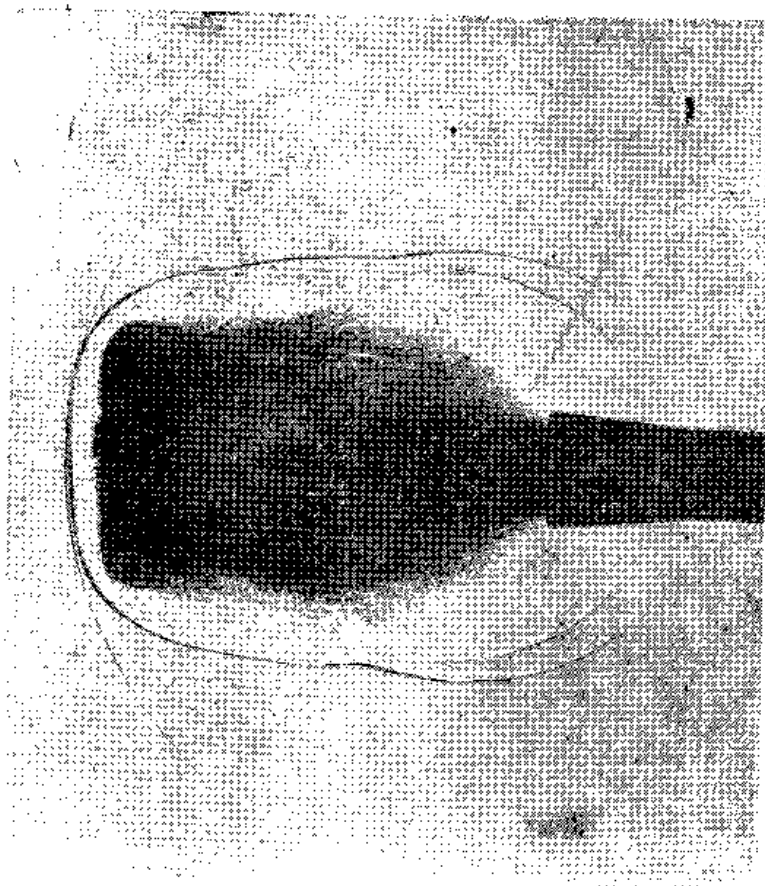
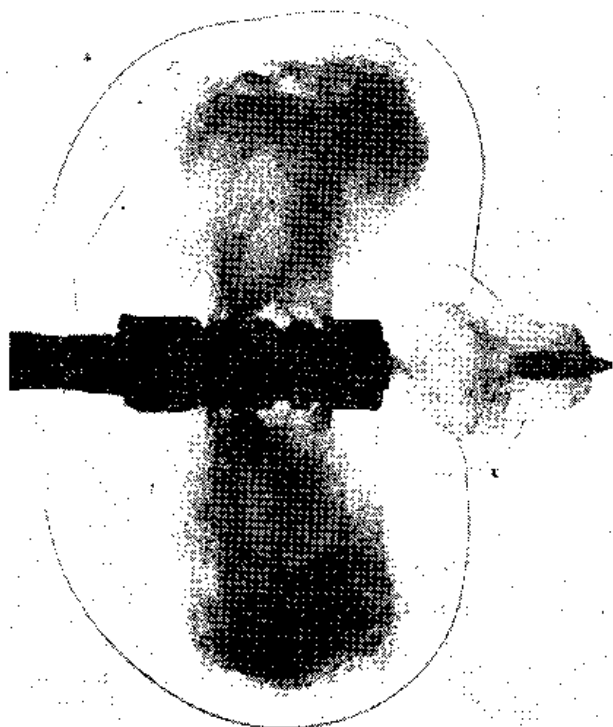


图12-35 带炮口制退器之炮口冲击波场物理模型



照片12-3 带锥形消焰器的炮口流场阴影照片



照片12-4 带炮口制退器的炮口流场阴影照片

## 第六节 炮口冲击波、噪声的控制及炮口冲击波超压场计算

### 一、一般概念

炮口冲击波、噪声是炮口气流几个危害因素中最严重的一个。炮口冲击波压力波形如图 12-36 所示。冲击波的前锋以超音速运动，称为波阵面。波阵面前沿十分陡峭，上升时间在一微秒以下。波阵面的压力峰值为  $p_1$ ，通常，用  $p_1$  与周围空气压力  $p_\infty$  之差做为衡量冲击波强度的主要参数，称为冲击波超压，用  $\Delta p$  表示

$$\Delta p = p_1 - p_\infty$$

冲击波的作用时间包括正压区  $\tau_+$  与负压区  $\tau_-$ 。对炮口冲击波而言，负压区时间  $\tau_-$  不是危害的主要指标，因此，以后谈到冲击波作用时间系指  $\tau_+$ 。

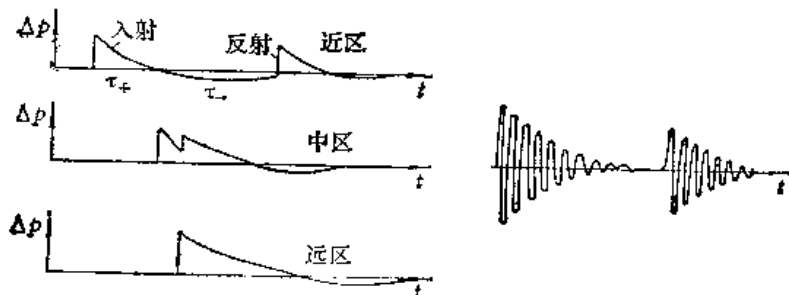


图12-36 炮口冲击波、噪声波形

炮口噪声是火炮发射过程中，炮口附近各扰动源产生之噪声的总称。这些扰动源包括弹丸激波、超音速射流及冲击波等。由于扰动源的瞬变性质，决定了炮口噪声必然是脉冲噪声，其测量的声压波形如图 12-36 所示。为了与人的听觉生理特点相一致（人耳对声音的分辨与声压或声功率的对数成比例），声压的度量常采用相对值  $L_p$ ——声压级（单位分贝 dB）

声压级  $L_p(\text{dB}) = 20 \lg \frac{p}{p_r}$

其中  $p$ ——声压，  
 $p_r$ ——参考声压，用 1000 赫芝时正常人耳刚能听到的声压（0.0002达因/厘米<sup>2</sup>）为基准。

炮口冲击波、噪声都是以压力波的形式向外传播的。但这两种波的性质有区别：噪声是以纵波形式传播的小振幅、交复振荡的线性波，其传播速度为当地音速，声压随距离衰减较慢；而冲击波是波阵面本身以超音速运动的大振幅非线性波，随着传播距离增大，很快衰减，最后蜕化为声波。从对人员的生理危害来看，二者均是脉冲压力，具有相似的作用，人身均感觉为脉冲噪声。不同的是，由于冲击波压力较高，往往首先造成对中耳的机械损伤，从而减轻了对内耳的伤害；而噪声则由于交复振荡直接侵入内耳及听觉神经，会引起内耳的严重损伤，造成暂时性失听。

表12-4  $\Delta p(\text{公斤力/厘米}^2) - L_p(\text{dB})$  换算表

$L_p(\text{dB})$	160	161	162	163	164	165	166	167
$\Delta p(\text{公斤力/厘米}^2)$	0.0204	0.0229	0.0256	0.0288	0.0323	0.0363	0.0407	0.0457
$L_p(\text{dB})$	168	169	170	171	172	173	174	175
$\Delta p(\text{公斤力/厘米}^2)$	0.0512	0.0575	0.0645	0.0724	0.0812	0.0911	0.102	0.115
$L_p(\text{dB})$	176	177	178	179	180	181	182	183
$\Delta p(\text{公斤力/厘米}^2)$	0.129	0.144	0.162	0.182	0.204	0.229	0.257	0.288
$L_p(\text{dB})$	184	185	186	187	188	189	190	
$\Delta p(\text{公斤力/厘米}^2)$	0.323	0.363	0.407	0.457	0.512	0.575	0.645	

一般来说，在炮口附近测量到的压力波形中，既包含冲击波也包含了噪声。但是，在炮手操作区域内，炮口冲击波仍较强，它是压力波中强度最高的一个，也是对人员及装备、器材的主要威胁；在远场以外，则全部变为噪声。为了便于对生理危害进行分析和比较，往往将炮口冲击波和噪声统看做是脉冲噪声，并化为声压级。实际上  $\Delta p(\text{公斤力/厘米}^2)$  与  $L_p(\text{dB})$  之间存在着简单的换算关系（见表 12-4）。

对人员的听觉与内脏器官之损伤主要取决于压力峰值、频谱分布、上升时间、重复频率、总重复时间以及人员的生理状态和防护情况等。在制订人员安全标准

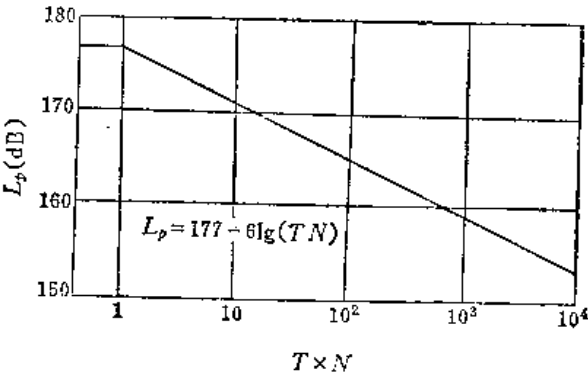


图12-37 炮口噪声安全标准

时,为了简单和规范化,一般都用压力峰值和暴露总时间(脉冲宽度 $T \times$ 发数 $N$ )的综合影响为基准。图12-37列出了我军的炮口噪声安全标准。

## 二、炮口冲击波压力分布规律及其影响因素

在第五节已介绍了炮口冲击波的形成和发展的基本特征。下面,我们从各种火炮及炮口装置上实测的等压线规律中归纳出影响炮口冲击波场的各种因素。

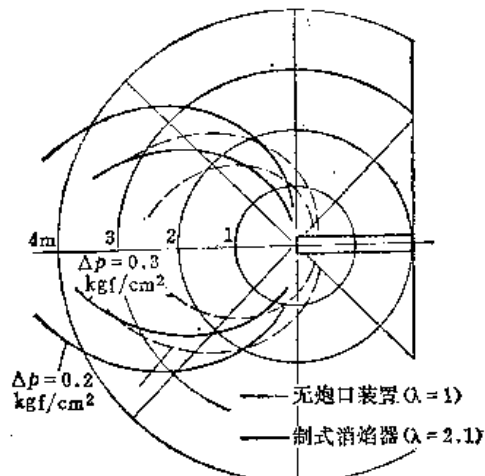


图12-38 带制式消焰器的冲击波场 (37 G)

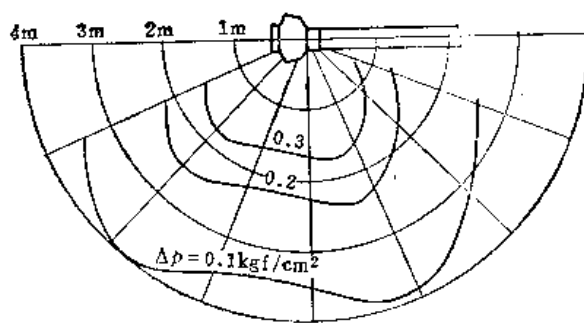


图12-39 带三通式制退器的冲击波场 (37 G)

从这些等压线可以看出:炮口冲击波场是具有方向性的非均匀、对称压力场。其一般分布规律有下述三点。

1. 在不带炮口装置及带消焰器时,冲击波等压线呈桃形,随着消焰器反作用系数 $K$ 之增大,等压线向细长发展。这表明,超压沿轴线方向增强。

2. 冲击波等压线与出口射流轴线一致。

3. 带炮口制退器时,由于三个方向的冲击波在空间合成,形成了向侧后方偏斜的等压线,引起后方区域超压的明显增大。

由于火炮弹道条件、炮口装置及使用条件的不同,炮口冲击波场分布将有很大差别。影响炮口冲击波场分布规律的主要因素有以下几个:

1. 火药气体剩余能量 $E_0$ 及炮口压力 $p_g$

火药气体剩余能量 $E_0$ 。定义为弹丸出炮口后火药气体自炮口释放的总能量,它可近似看做是后效期开始时的气体总焓。

$$E_0 = H - E_1 - E_2 - E_3 - E_4$$

式中  $H$ ——装药总能量;

$E_1$ ——弹丸动能;

$E_2$ ——后坐部分动能;

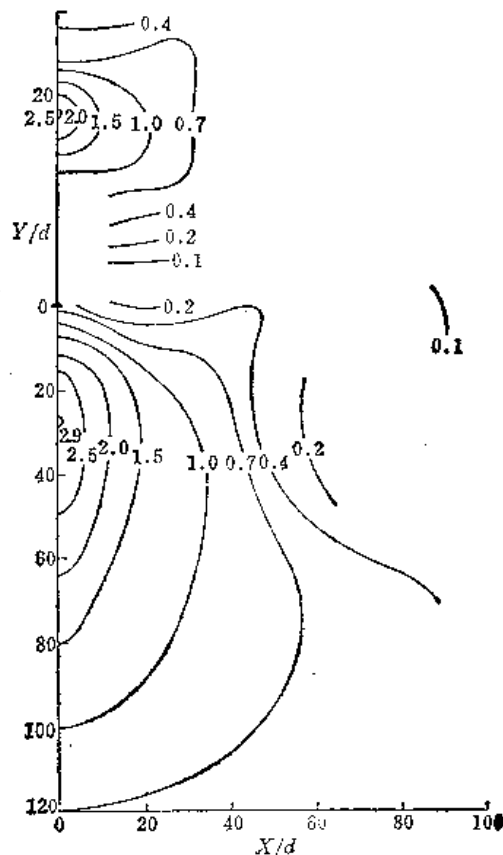


图12-40 无后坐炮的冲击波场



$E_s$ ——内弹道时期火药气体动能;

$E_f$ ——弹丸摩擦及膛内热散失。

近似计算时可用

$$E_s = \eta \left( 1 - \frac{1}{2} - \frac{q}{g} v_0^2 \right)$$

式中  $\eta$ ——取决于火药性质的系数, 其值在 0.6~1.0 之间。

许多试验表明, 对于远场

$$\Delta p \propto E_s$$

炮口压力  $p_g$  主要影响中、近场冲击波超压。在  $E_s$  相同时,  $p_g$  高的火炮, 中近场冲击波超压明显偏高。这是因为  $p_g$  决定冲击波的初始压力, 但  $p_g$  对远场影响较小。

## 2. 身管长度及最大射角

身管长度  $L$  与最大射角  $\varphi_m$  决定了测点与冲击波源的距离  $R$ 。试验表明,  $\Delta p \propto R^{-\alpha}$  ( $\alpha = 1.0 \sim 1.5$ ), 因之, 当火炮  $E_s$  相近时, 短身管、大射角的加榴炮比长身管、小射角的加农炮炮口冲击波对炮手的威胁要严重些。

## 3. 炮口装置的类型及结构

很明显, 锥形消焰器使前方冲击波超压增大, 侧后方减小 (图 12-38); 而炮口制退器则相反 (图 12-39), 而且, 随着制退器效率  $\eta_r$  的提高, 侧后方超压之总趋势是相应增大。但是, 由于制退器结构型式不同, 这种变化规律十分复杂。例如, 在  $\eta_r$  (或  $\alpha$ ) 一定时, 不同结构的制退器冲击波场分布规律可能相差很大, 最大超压方向有的在后方, 有的在侧方。因之, 炮手位置的冲击波超压也各不相同。

## 4. 阵地及障碍物 (防盾与工事) 情况

冲击波在传播过程中遇到壁面或地面时将发生反射现象, 而反射冲击波超压有时会超过入射超压, 特别是在距炮口较远的位置, 经地面形成所谓“非正规反射”时。当冲击波越过有限面积的障碍物时将产生绕射现象, 如果障碍物尺寸较小, 经两侧绕射的冲击波可能相撞而迭加, 形成冲击波超压较高的区域, 图 12-41 表示防盾带来的这种不利结果。在坑道工事中, 在军舰、坦克、飞机上, 炮口冲击波的反射及绕射现象都比野战火炮的复杂得多, 在进行系统设计时要考虑这些情况。

总之, 炮口冲击波场具有明显的方向性, 炮口或炮口装置出口气流速度和方向决定了冲击波场的这种方向性; 炮口制退器侧孔气流导致后方冲击波增强。当火炮口径较大、装药量较多、身管较短、射角较大且装有一定效率的炮口制退器时, 炮口冲击波的

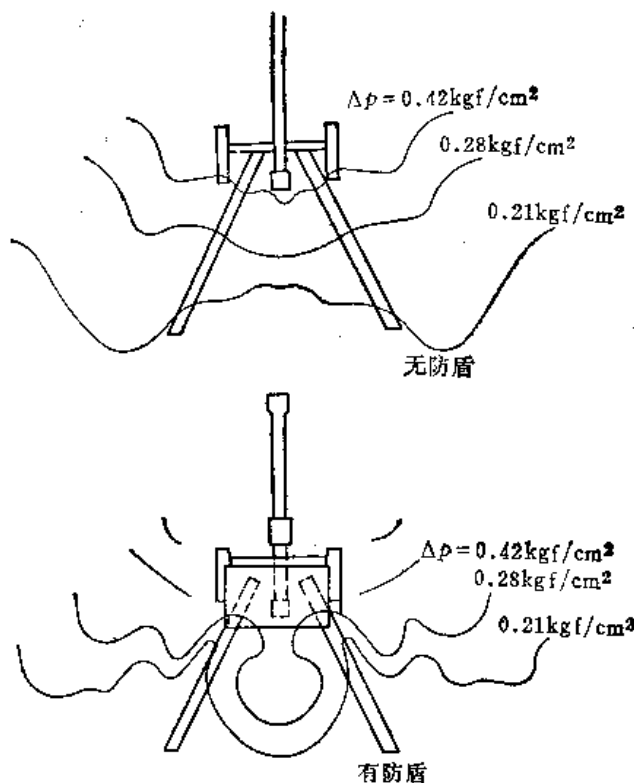


图12-41 防盾对炮口冲击波场分布的影响

威胁也较为严重,尤其是在坑道工事射击时,壁面反射将导致冲击波的明显加剧,成为火炮勤务使用中一个十分严重的问题。

### 三、炮口噪声场的分布特点

炮口冲击波是最强的噪声源,它远离炮口向外传播并逐渐衰减为声波后仍保持较高的声压级。例如,大口径火炮,其脉冲噪声可传播几十公里以外,在数百米外的区域,声压级仍保持 100dB 左右。通过土壤以地震波形式传播的炮口噪声足以引起附近建筑物的震动。因此,炮口噪声是远场区人员与设施的主要危害源。

炮口噪声与炮口冲击波有着相似的分布特性——方向性。如果用等声压级线来描述这一特性,可以看出,无炮口装置时的等声压级线在炮口方向最强(图12-42);无后坐炮的等声压级线在炮尾方向最强;而带炮口制退器时,等声压级线却几乎接近以炮口为中心的圆。与炮口冲击波等压线比较,等声压级线更接近圆形。这是因为随着距离增大,冲击波阵面趋于球形,球心速度也变为零的缘故。

远场噪声的强度主要取决于火药气体剩余能量,而炮口装置只影响等声压级线的中心。其它因素如炮口压力、身管长度、最大射角等均无明显影响。从这个意义上说,远场噪声的强度主要由火炮威力决定。

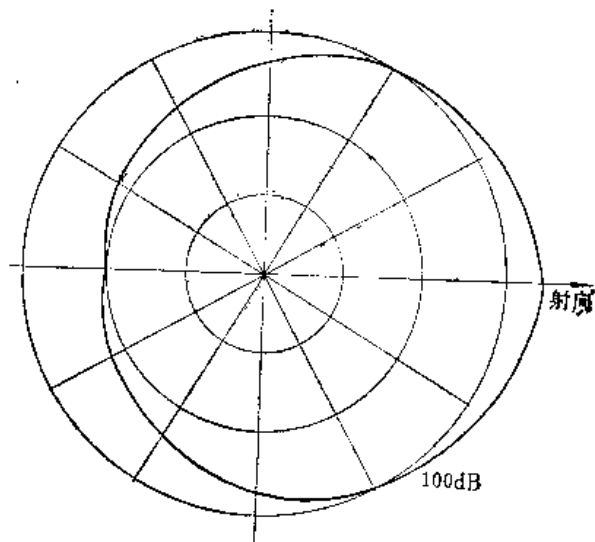


图12-42 远距离炮口噪声的等声压级线

### 四、关于炮口冲击波的控制问题

所谓炮口冲击波的控制,是指设计的火炮系统、阵地与工事结构,应保证在火炮操作位置的有轻便防护装备之炮手处于噪声安全标准的极限之内。

由于炮口冲击波危害的严重性,对它的控制问题在 60 年代既已尖锐提出并从多方面入手寻找较好的解决措施。其中包括:降低冲击波源的强度;隔离冲击波、噪声;采用高效能的个人防护器材等。

第一种措施无疑是最理想的。多年来,各国的火炮研究人员曾做了大量的探索工作。首先,从内弹道及装药设计开始,在保证弹丸初速的前提下,使炮口压力最小。这项工作取得成效的例子只是某些无后坐炮,通过优化设计可使近场超压降低三分之一以上。其次,设计新结构的炮口制退器,使效率一定时,冲击波超压尽可能减低,但到目前为止,效果不明显。有两个因素影响它的效果,一是制退器的结构尺寸与重量。有一些制退-消声器,具有良好的降低冲击波、噪声效果,但结构庞大,它可以成功地用于某些轻武器,但无法在火炮上使用。二是与保证制退效率的矛盾,一些较好的消声器往往伴随着效率的降低。因此,在没有更优越的制退器结构时,一种比较可行的方法就是利用炮口冲击波场的方向性,对结构进行优化设计,保持效率与冲击波的最佳组合,使炮手

区域超压最低。

第二种措施是在冲击波源与炮手之间设置障碍物。坦克及军舰的炮塔具有很好的防护作用,其它工事也应采取合理的防护结构。野炮的防盾一般不具备防冲击波的能力,一些试验已证明了这一点。为了使野炮防盾能够比较有效地减小冲击波,应大大增加其尺寸,而这样做往往与提高火炮机动性有矛盾。

第三种措施包括人员的听觉防护(如耳塞、耳罩和头盔)、内脏器官防护(各种护具)以及其它生理防护措施。就目前采用的听觉防护器材性能来看,对冲击波、噪声的衰减水平约在 10~25dB 左右。其主要缺点是影响对话及传达口令。这种防护器材的性能正在不断改进中。

## 第七节 炮口焰及其抑制

炮口焰是后效期火药气体产生的可见光。炮口焰容易暴露阵地,大大增加了被对方空中及地面观察发现的概率;对于直接瞄准武器,炮口焰影响射手视觉,妨碍瞄准。早在第一次世界大战时,就开始采取了简单的消焰措施。二次世界大战后,在机械消焰装置上进行了许多研究,取得了一定效果。近年来,通过对炮口气流的研究,对炮口焰的物理、化学机理上的认识不断深入,从而使消焰效果更加明显,但仍留有不少问题尚待解决。

### 一、炮口焰的产生

炮口焰是炮口火焰气体产生的可见光。按时间及空间区域划分,主要有三个发光区:

1. 初次焰:紧靠膛口处的低亮度区,是炮膛内高温火药气体在口部的继续辐射。

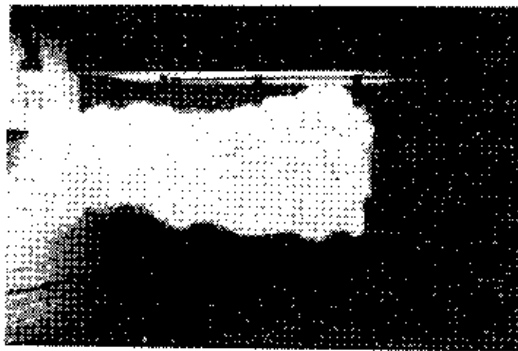


图12-43 炮口焰照片

2. 中间焰:火药气体通过正激波(马赫盘)后再次点燃形成的化学燃烧,发生于图 12-30 之(3)区。

炮膛内的火药气体是未完全氧化的可燃气体(包含大量的H、C、CO分子),在瓶状激波区膨胀时形成低压、低温环境不能自燃。经马赫盘后,压力及温度陡增(见图 12-32),温度超过其点火点(1000~1100 开)而燃烧,形成 1600~1900 开的火焰区。这个亚音速区被切向间断包围,不能与外界空气混合,因之,不受外界环境的影响。中间焰的范围比较小。

3. 二次焰：火药气体与外界空气在射流边界区紊流混合后点燃形成的大范围之明亮火焰。

二次焰与中间焰相比，有以下两个特点：

第一、由于同外界空气混合后补充了氧气，因之，二次焰燃烧得更加充分，最高温度可达  $2500^{\circ}\text{K}$ 。曾经进行过这样的试验：分别向空气、氮气及氧气环境中发射，拍摄了炮口焰并测量火焰温度。发现，向氮气中发射时中间焰仍存在，但二次焰消失；向氧气中发射时，二次焰显著加剧，火焰温度达  $2800\sim 3000$  开。这个试验说明，二次焰是依靠环境中的氧气燃烧的。

第二、二次焰不稳定，其亮度、形状、尺寸及持续时间受外界因素影响较大（如温度、湿度、风力、气压、雨雪等），在各发弹之间二次焰也不一致。在速射火炮中，随着射速增大，二次焰更加严重。

二次焰是炮口焰中最明亮、范围最大的一个，因而肉眼看到的主要是二次焰。

目前，对二次焰的点燃机理还未完全搞清，原因可能是激波、中间焰的热量，也可能是未燃尽的药粒等。

炮口焰使火药气体能量进一步释放，它影响炮口流场结构——局部形成反向压力梯度并可能使炮口冲击波超压增大。这一点，在冲击波场分析时应当予以考虑。

## 二、炮口焰的抑制方法

削弱甚至消除炮口焰，应当从多方面入手。目前，主要有两种方法：

1. 装药中加入消焰剂：常用的消焰剂为硫酸钾与硝酸钾等钾盐，它们可以延缓点火从而消除二次焰。其主要缺点是产生过多的、具有腐蚀性的烟。炮口烟是悬浮在炮口气体中的固态或液态质点，对人员、器材及勤务操作都很不利。

2. 炮口安装消焰器：消焰器是炮口装置的一种，它可以将炮口焰减小到不致暴露的程度。最常用的消焰器有锥形与叉形两种（图 12-44）。

消焰器的基本原理是使气体在装置内膨胀加速，压力与温度平稳降低，以致膛内火药气体与外界空气混合前已降到点火温度以下。最理想的消焰器应保证火药气体压力在腔内降至一大气压，这样，就可全部消除炮口焰。但是，这样的装置十分庞大，无法实用。实际的消焰器，其消焰效果与结构尺寸有密切关系，目前虽有简单的计算方法，但不精确，主要仍需通过试验检查。

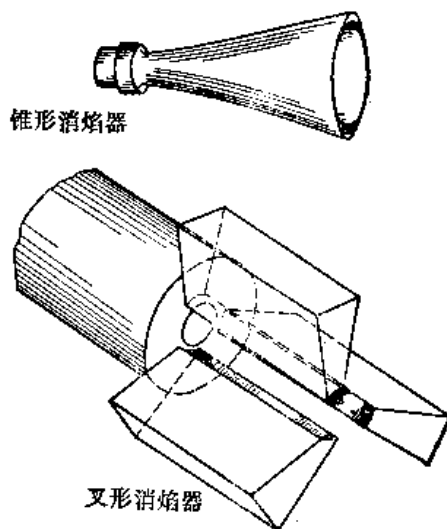


图12-44 消焰器

## 第十三章 火炮射击时的动力学分析

前面所有对反后坐装置设计的理论分析,全都是建立在这样的假设基础之上的,即认为射击时火炮完全处于静止和稳定的条件之下。也就是说,把火炮和地面都当成刚体且静止不动。只是后坐部分沿炮膛轴线方向作一个自由度的后坐运动。然后,在这样的前提下去分析全炮在后坐和复进时的受力,把后坐阻力和复进合力的大小与全炮的受力联系起来,并以此为基础去分析火炮各主要部件在射击时的受力和校核验算它们的强度。目前,各种火炮的反后坐装置和炮架各部件大都是基于这种静态假设来设计的。它虽在选用适宜的安全系数后一定程度地解决了火炮设计的问题,但是往往在新研制的火炮的试验中出现一些原有理论无法解释的现象和问题,有时实测的结果与静止受力条件下分析出的数据差距太远,致使原有理论的正确性也受到了普遍的怀疑。

实际上火炮与地面都是弹性和塑性体,而且火炮各部件配合上总是存在间隙。在射击时火炮各大部件本身和相互之间以及火炮与地面之间,由于上述原因必然存在着或多或少的变形和运动,这就使得火炮在射击时实际的受力和运动比想象的要复杂得多。在电子计算机普及应用的今天,已有条件建立一些较接近实际的物理模型,对火炮射击作一定深度的动力学分析。这方面的工作在70年代以后有了较多的发展,无论国外的文献资料及国内的研究都在不同的深度和广度上作了大量的工作。他们或者把射击时的火炮当成有限自由度的集总参数的模型去分析它的受力和运动,或者在此基础上更进一步考虑各部件的弹性而作线性或非线性的有限元分析。所得结果不仅可以用于分析火炮及其部件的受力和大幅度的运动,还可以用于火炮的振动和精度的分析,使火炮炮架的理论进一步深化。

本章把火炮处理成三个自由度及五个自由度的集总参数的物理模型,分别用动静法和拉格朗日方程来分析其射击时的受力和运动。通过这两种物理模型来介绍对火炮射击时进行动力学分析的思路和方法。主要是根据物理模型按不同的方法建立基本的运动微分方程组,对这些方程组进行简化,作进行计算机运算之前的必要的数学处理,为后面的计算机程序编制作好准备。实际上,由于火炮总体和反后坐装置结构的不同,各自由度模型的导出公式中的具体形式会有相当大的不同,因此本章所介绍的只是进行火炮集总参数动力学分析的初步方法,仅供分析具体火炮时的借鉴。动力学分析中计算公式的推导和简化是十分困难和繁杂的,但是求得具体火炮的结构和动力学参量以及约束条件更为困难。对后者在本章中不作过多的讨论。全靠对具体火炮和具体的射击情况作实际的测量或计算。

目前对火炮射击的动力学分析计算已经逐渐进入实用阶段。建立在动力学分析基础上的火炮及其部件的设计理论也正在逐步发展。较全面的更新火炮设计理论的前景已经逐渐清晰。

### 第一节 三自由度模型的火炮射击动力学分析

常见的火炮射击动力学分析多采用三个自由度的模型,即只考虑后坐部分沿摇架的

后坐，起落部分绕耳轴的转动及全炮绕驻锄支点转动三个互相独立的运动，其它均视为刚体而不考虑其相对运动。这虽是最简单的动力分析模型，但它也相当程度突出地反映了火炮射击时的受力和运动的主要情况。这样分析得到的火炮各部分的运动和受力的结果比过去一个自由度的情况向真实靠近了一步。它有助于分析火炮在有振动或跳动情况下对火炮后坐运动的影响，也有助于分析考虑间隙存在的情况下起落部分动态受力与静态受力的差别。此外，由于所分析的模型自由度较少，便于直接引用动静法来列出基本的运动微分方程组，使最后得到的结果不十分复杂，从而为读者提供直接运用动静法对火炮进行动力学分析的思路。

### 一、基本假设

1. 火炮方向角  $\psi = 0^\circ$ ，受力均在垂直对称面上，不考虑弹丸旋转的反作用力矩，射击时火炮只作平面运动；
2. 火炮当成三部分的刚体：后坐部分，不包含后坐部分的起落部分和不包含起落部分的炮架部分；
3. 后坐部分通过反后坐装置与炮架弹性连接，射击时沿摇架导轨后坐复进运动；
4. 起落部分可绕耳轴转动，相对转角  $\theta$  是由于高低机及平衡机的弹性变形造成的；
5. 全炮可绕驻锄支点转动，而驻锄支点则固定不动，火炮的相对转角  $\alpha$  与车轮的弹性或座盘与地面的约束条件有相应的函数关系。

### 二、符号说明

所列出的所有物理量均是对应于火炮在方向角为  $0^\circ$  时的垂直对称面的，其相应符号如下（可参考图13-1）：

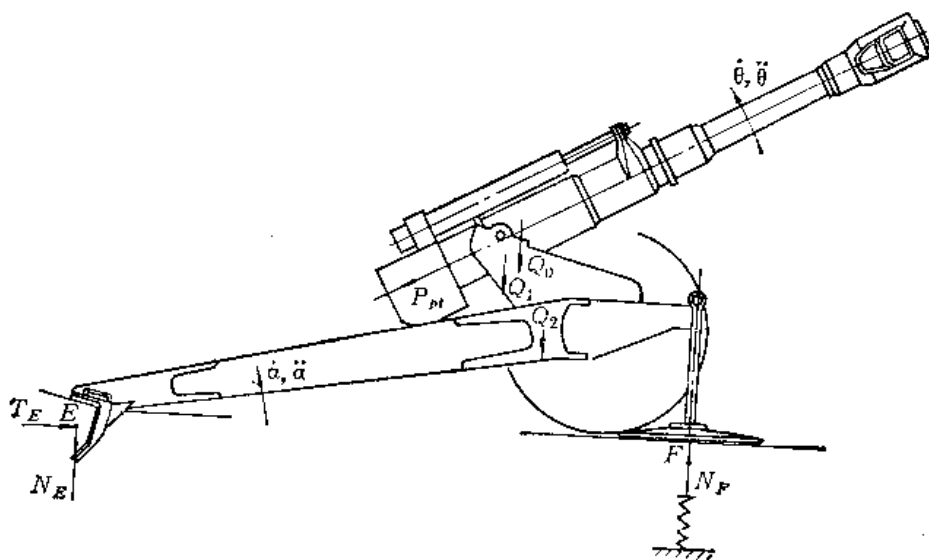


图13-1 火炮射击时的受力和运动

- $C_0$ ——某瞬时而坐部分重心的位置，称之为后坐部分重心；  
 $C_1$ ——某射角时不计后坐部分重量的起落部分重心的位置（含平衡机），称之为摇架重心；

- $C_3$ ——不计起落部分重量的炮架其余部分重心的位置，称之为炮架重心；  
 $Q_0$ ——后坐部分重量；  
 $Q_1$ ——不计后坐部分的起落部分重量；  
 $Q_2$ ——不计起落部分的炮架重量；  
 $X_0$ ——发射前后坐部分重心 $C_0$ 与耳轴 $D$ 在炮膛轴线方向上的距离；  
 $X$ ——后坐长度；  
 $X_0 - X$ ——某瞬时 $C_0$ 与 $D$ 在炮膛轴线方向上的距离；  
 $e$ ——动力偶臂，后坐部分重心 $C_0$ 与炮膛轴线的垂直距离，当 $C_0$ 在炮膛轴线上方向时取正值；  
 $X_1$ ——摇架重心 $C_1$ 与耳轴 $D$ 在炮膛轴线方向上的距离；  
 $Z_1$ ——摇架重心 $C_1$ 与耳轴 $D$ 在垂直于炮膛轴线方向上的距离；  
 $A_3$ ——平衡机上支点；  
 $A_4$ ——平衡机下支点；  
 $B$ ——高低机齿轮与齿弧的啮合点；  
 $D$ ——耳轴中心；  
 $E$ ——驻锄支点；  
 $F$ ——座盘或车轮支承中心点；  
 $X_3$ ——平衡机上支点 $A_3$ 与耳轴 $D$ 在炮膛轴线方向上的距离；  
 $Z_3$ ——平衡机上支点 $A_3$ 与耳轴 $D$ 在垂直于炮膛轴线方向上的距离；  
 $L_D$ ——发射前耳轴 $D$ 至驻锄支点的水平距离；  
 $H_D$ ——发射前耳轴 $D$ 至驻锄支点的垂直距离；  
 $L_B$ ——高低机齿轮齿弧啮合点 $B$ 至驻锄支点 $E$ 的水平距离；  
 $H_B$ —— $B$ 点与 $E$ 点的垂直距离；  
 $L_2$ ——发射前炮架重心 $C_2$ 至驻锄支点 $E$ 的水平距离；  
 $H_2$ ——发射前 $C_2$ 至 $E$ 点的垂直距离；  
 $L_4$ ——发射前平衡机下支点 $A_4$ 至耳轴 $D$ 点的水平距离；  
 $H_4$ ——发射前 $A_4$ 至 $D$ 点的垂直距离；  
 $L_F$ ——座盘或车轮支点 $F$ 至驻锄支点的水平距离；  
 $\Delta H$ ——驻锄支点 $E$ 至地面的距离；  
 $I_0$ ——后坐部分绕其质心 $C_0$ 的转动惯量；  
 $I_1$ ——摇架绕其质心 $C_1$ 的转动惯量；  
 $I_2$ ——炮架绕其质心 $C_2$ 的转动惯量；  
 $\varphi$ ——射角；  
 $\theta$ ——射击时高低机缓冲器等的变形造成的起落部分绕耳轴的附加转角；  
 $\alpha$ ——火炮射击时跳动引起的绕驻锄支点 $E$ 的转角；  
 $\eta_0$ ——射击某瞬时尚坐部分重心 $C_0$ 对驻锄支点 $E$ 的水平距离；  
 $\xi_0$ ——某瞬时 $C_0$ 与 $E$ 点的垂直距离；  
 $P_{pt}$ ——炮膛合力；  
 $\nu_b$ ——驻退机紧塞具的摩擦系数；

- $\nu_f$ ——复进机紧塞具的摩擦系数;  
 $A_f$ ——复进机活塞工作面积;  
 $p_0$ ——复进机的初压;  
 $P_0$ ——复进机的初力;  
 $N_1$ ——摇架前支点的反力, 向上为正;  
 $N_2$ ——摇架后支点的反力, 向下为正;  
 $F_c$ ——驻退机中紧塞垫的常数阻力;  
 $f$ ——摇架导轨的摩擦系数, 通常  $f = 0.16 \sim 0.18$ ;  
 $\eta_1$ ——射击某瞬时摇架重心  $C_1$  对驻锄支点  $E$  的水平距离;  
 $\xi_1$ ——某瞬时  $C_1$  与  $E$  点的垂直距离;  
 $d'$ ——耳轴中心  $D$  至炮膛轴线的垂直距离, 炮膛轴线在上方时取正值;  
 $C_\theta$ ——与  $\theta$  有关的阻尼系数;  
 $C_\alpha$ ——与  $\alpha$  有关的阻尼系数;  
 $M_K$ ——平衡机力对耳轴的力矩;  
 $U$ ——高低机齿轮作用于齿弧啮合点  $B$  上的力, 向斜下方为正;  
 $\rho$ ——高低机齿弧的节圆半径;  
 $R_1$ ——平衡机上支点  $A_3$  与耳轴  $D$  之间的距离,  $R_1 = \sqrt{X_3^2 + Z_3^2}$ ;  
 $R_2$ ——平衡机下支点  $A_4$  与耳轴  $D$  之间的距离,  $R_2 = \sqrt{L_4^2 + H_4^2}$ ;  
 $\alpha_0$ —— $0^\circ$  射角时平衡机上、下支点与耳轴连线所形成的夹角;  
 $l_\varphi$ ——任意射角  $\varphi$  时平衡机上、下支点间的距离;  
 $h_\varphi$ ——任意射角  $\varphi$  时平衡机力对耳轴的力臂;  
 $K$ ——任意射角  $\varphi$  时的平衡机力;  
 $K_0$ ——最大射角时的平衡机力 (平衡机初力);  
 $S_0$ ——气压式平衡机气体初体积的相当长度;  
 $F_\varphi$ ——某射角时平衡机的压缩高度;  
 $K_U$ ——高低机缓冲弹簧的相当刚度;  
 $K_F$ ——车轮或地面弹性的相当刚度;  
 $X_{N_1}$ ——摇架前支点与耳轴在炮膛轴线方向上的距离;  
 $Z_{N_1}$ ——摇架前支点与耳轴在垂直于炮膛轴线方向上的距离;  
 $X_{N_2}$ ——摇架后支点与耳轴在炮膛轴线方向上的距离;  
 $Z_{N_2}$ ——摇架后支点与耳轴在垂直于炮膛轴线方向上的距离;  
 $L_U$ ——射击前高低机齿轮轴心至耳轴的水平距离;  
 $H_U$ ——射击前高低机齿轮轴心至耳轴的垂直距离;  
 $Z_R$ ——反后坐装置阻力与耳轴在垂直于炮膛轴线方向上的距离, 在耳轴上方为正。

### 三、基本方程的推导

以驻锄后支点作为原点的不动参考系, 其横坐标  $\eta$  向右为正, 纵坐标  $\xi$  向上为正。

#### 1. 取后坐部分为对象所得到的方法

后坐部分在射击某一瞬间的受力如图 13-2 所示。用动静法考虑了运动的惯性力以后



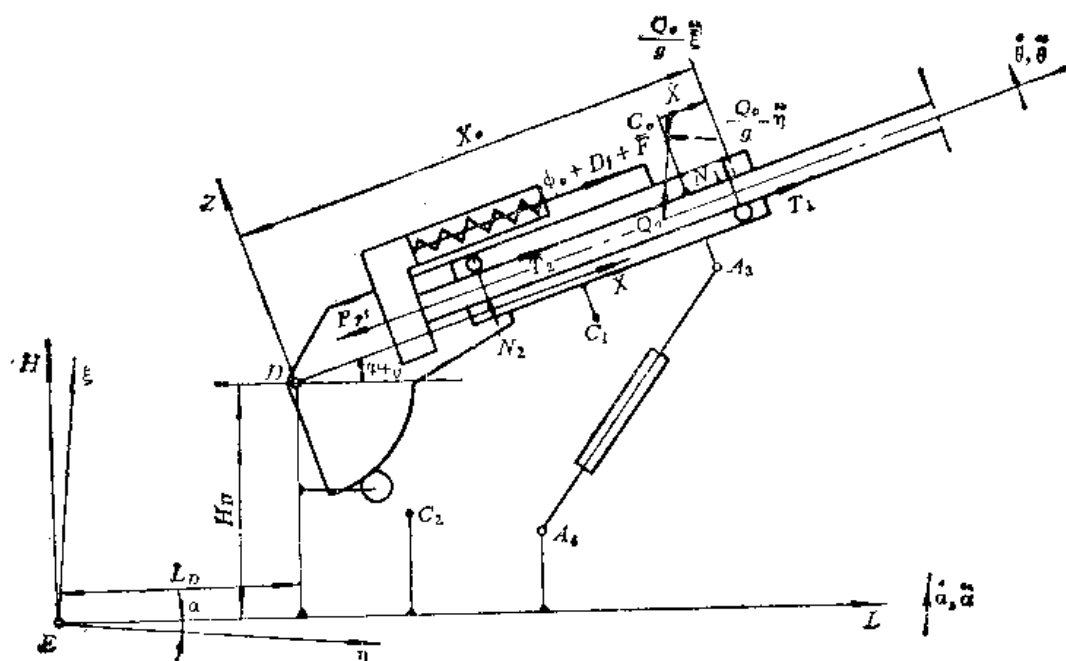


图13-2 后坐部分受力原理图

可写出力系的三个平衡方程式。

$\Sigma X = 0$ ,  $X$  向后为正, 则有

$$\begin{aligned} & \frac{Q_o}{g} [\ddot{\eta}_o \cos(\varphi + \theta + \alpha) + \ddot{\xi}_o \sin(\varphi + \theta + \alpha)] \\ & + P_{p1} - \phi_o - P_f - F - T + Q_o \sin(\varphi + \theta + \alpha) = 0 \end{aligned} \quad (13-1)$$

由简单的几何关系知:

$$\begin{aligned} \eta_o &= (X_o - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) - (e + d) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + L_D \cos \alpha - H_D \sin \alpha \\ \xi_o &= (X_o - X) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + (e + d) \cos(\varphi + \theta + \alpha) \\ & + L_D \sin \alpha + H_D \cos \alpha \end{aligned}$$

分别对时间两次求导:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_o &= -\dot{X} \cos(\varphi + \theta + \alpha) - (X_o - X) \sin(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \\ & - (e + d) \cos(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) - L_D \sin \alpha \dot{\alpha} - H_D \cos \alpha \dot{\alpha} \\ \dot{\xi}_o &= -\dot{X} \sin(\varphi + \theta + \alpha) + (X_o - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \\ & + (e + d) \sin(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \\ & + L_D \cos \alpha \dot{\alpha} - H_D \sin \alpha \dot{\alpha} \\ \ddot{\eta}_o &= -\ddot{X} \cos(\varphi + \theta + \alpha) + \dot{X} \sin(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) - [-\dot{X} \sin(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \\ & + (X_o - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + (X_o - X) \sin(\varphi + \theta + \alpha) (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha})] - (e + d) [\cos(\varphi + \theta + \alpha) (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) - \sin(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2] \\ & - L_D \ddot{\alpha} \sin \alpha - L_D \dot{\alpha}^2 \cos \alpha - H_D \cos \alpha \ddot{\alpha} + H_D \dot{\alpha}^2 \sin \alpha \\ \ddot{\xi}_o &= -\ddot{X} \sin(\varphi + \theta + \alpha) - \dot{X} \cos(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) + [-\dot{X} \cos(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \\ & + (X_o - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) - (X_o - X) \sin(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2] + (e + d) [\sin(\varphi + \theta + \alpha) (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + \cos(\varphi + \theta + \alpha) (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2] \\ & + L_D \ddot{\alpha} \cos \alpha - L_D \dot{\alpha}^2 \sin \alpha - H_D \sin \alpha \ddot{\alpha} + H_D \dot{\alpha}^2 \cos \alpha \end{aligned}$$

$$+ \theta + \alpha)(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2] - (e + d)[\sin(\varphi + \theta + \alpha)(\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + \cos(\varphi + \theta + \alpha)(\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2] + L_D \ddot{\alpha} \cos \alpha - L_D \sin \alpha \ddot{\alpha} - H_D \sin \alpha \ddot{\alpha} - H_D \cos \alpha \dot{\alpha}^2$$

又知反后坐装置提供的阻力是

$$R = \phi_0 + P_f + F = (1 + v_h) \left\{ H_R \frac{K_1 \gamma}{20 g} \left[ \frac{(A_o - A_p)^3}{a_x^2} + \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \right] \dot{X}^2 + H_c \frac{K_{1f} \gamma}{20 g} \left[ H_f \frac{A_{of}^3}{a_x^2} + \frac{K_{2f}}{K_{1f}} \frac{A_{fj}^3}{a_f^2} \right] \dot{X}^2 \right\} + [1 + \operatorname{sgn}(\dot{x}) v_f] P_o \left( \frac{s_o}{s_o - x} \right)^n + F_s \quad (13-2)$$

其中:  $\dot{X} \geq 0, H_R = 1, H_c = 0$

$\dot{X} < 0, H_R = 0, H_c = 1$

$\dot{X} < 0$ , 且  $\lambda - X < \rho, H_f = 0$

$\dot{X} < 0$ , 且  $\lambda - X > \rho, H_f = 1$

此处  $\lambda$  为计算的最大后坐长度,  $\rho$  为节制杆式驻退机复进时真空消失点。

$$T = f(N_1 + N_2)$$

将前述各量代入 (13-1) 式并化简得:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} \frac{Q_o}{g} [L_D \sin(\varphi + \theta) - H_D \cos(\varphi + \theta) - (e + d)] - \ddot{\theta} \frac{Q_o}{g} (e + d) - \ddot{X} \frac{Q_o}{g} \\ + N_1 f + N_2 f = -P_{pe} + R + \dot{\theta}^2 \frac{Q_o}{g} (X_o - X) + 2 \dot{\alpha} \dot{\theta} \frac{Q_o}{g} (X_o - X) \\ + \dot{\alpha}^2 \frac{Q_o}{g} [(X - X_o) + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)] - Q_o \sin(\varphi + \theta + \alpha) \end{aligned} \quad (13-3)$$

$\Sigma Z = 0$ , 有

$$N_1 - N_2 = Q_o \cos(\varphi + \theta + \alpha) - \frac{Q_o}{g} [\ddot{\eta}_o \sin(\varphi + \theta + \alpha) - \ddot{\xi}_o \cos(\varphi + \theta + \alpha)] \quad (13-4)$$

将  $\ddot{\eta}_o$  及  $\ddot{\xi}_o$  代入并化简得:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} \frac{Q_o}{g} [(X_o - X) + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)] + \ddot{\theta} \frac{Q_o}{g} (X_o - X) \\ - N_1 + N_2 = -Q_o \cos(\varphi + \theta + \alpha) + \dot{\theta}^2 \frac{Q_o}{g} (e + d) + 2 \dot{X}(\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \frac{Q_o}{g} \\ + 2 \dot{\alpha} \dot{\theta} \frac{Q_o}{g} (e + d) + \dot{\alpha}^2 \frac{Q_o}{g} [(e + d) - L_D \sin(\varphi + \theta) + H_D \cos(\varphi + \theta)] \end{aligned} \quad (13-5)$$

$\Sigma M_c = 0$ , 有

$$\begin{aligned} P_{pe} e + R(Z_R - e - d) + f N_2 (Z_{N_2} - e - d) - N_1 (X_{N_1} - X_o + X) \\ - N_2 (X_o - X - X_{N_2}) - f N_1 (Z_{N_1} + e + d) + I_o (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) = 0 \end{aligned}$$

可改写成

$$\begin{aligned} + \ddot{\alpha} I_o + \ddot{\theta} I_o - N_1 [f(Z_{N_1} + e + d) + (X_{N_1} - X_o + X)] \\ + N_2 [f(Z_{N_2} - e - d) - (X_o - X - X_{N_2})] = -P_{pe} e \\ - R(Z_R - e - d) \end{aligned} \quad (13-6)$$



$$\begin{aligned}\ddot{\xi}_1 = & \ddot{a}L_D\cos\alpha - \dot{a}^2L_D\sin\alpha - \ddot{u}H_D\sin\alpha - \dot{a}^2H_D\cos\alpha \\ & + (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha})X_1\cos(\varphi + \theta + \alpha) - (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2X_1\sin(\varphi + \theta + \alpha) \\ & - (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha})Z_1\sin(\varphi + \theta + \alpha) - (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2Z_1\cos(\varphi + \theta + \alpha)\end{aligned}$$

将前面导出的 $\ddot{\eta}_0, \ddot{\xi}_0, \ddot{\eta}_1, \ddot{\xi}_1$ 代入式 (13-7) 并化简可得:

$$\begin{aligned}& \ddot{u} \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X)^2 + (e + d)^2 + (X_0 - X)L_D\cos(\varphi + \theta) + (e + d)H_D\cos(\varphi + \theta) \right. \\ & + (X_0 - X)H_D\sin(\varphi + \theta) - (e + d)L_D\sin(\varphi + \theta)] + \frac{Q_1}{g} [X_1^2 + Z_1^2 + (X_1L_D \\ & + Z_1H_D)\cos(\varphi + \theta) + (X_1H_D - Z_1L_D)\sin(\varphi + \theta)] + I_0 + I_1 \Big\} + \ddot{\theta} \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X)^2 \right. \\ & + (e + d)^2] + \frac{Q_1}{g} [X_1^2 + Z_1^2] + I_0 + I_1 \Big\} + \ddot{X} \frac{Q_0}{g} (e + d) \\ = & P_{\rho}d - C_0\ddot{\theta} - Q_0[(X_0 - X)\cos(\varphi + \theta + \alpha) - (e + d)\sin(\varphi + \theta + \alpha)] \\ & - Q_1[X_1\cos(\varphi + \theta + \alpha) - Z_1\sin(\varphi + \theta + \alpha)] + \dot{\theta}\dot{X}\frac{Q_0}{g}2(X_0 - X) + \dot{a}\dot{X}\frac{Q_0}{g} \\ & \cdot 2(X_0 - X) + 2Kh_{\varphi+\theta} - U\rho\cos 20^\circ - \dot{a}^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X)L_D\sin(\varphi + \theta) + (e + d)H_D\sin(\varphi + \theta) \right. \\ & - (X_0 - X)H_D\cos(\varphi + \theta) + (e + d)L_D\cos(\varphi + \theta)] \\ & + \frac{Q_1}{g} [(X_1L_D + Z_1H_D)\sin(\varphi + \theta) - (X_1H_D - Z_1L_D)\cos(\varphi + \theta)] \Big\} \quad (13-8)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{式中} \quad Kh_{\varphi+\theta} = & K_0 \left( \frac{S_k}{S_k - F_{\varphi+\theta}} \right)^{1.05} R_1 R_2 \frac{\sin(\alpha_0 + \varphi + \theta)}{l_{\varphi+\theta}} \\ l_{\varphi+\theta} = & \sqrt{R_1^2 + R_2^2 - 2R_1R_2\cos(\alpha_0 + \varphi + \theta)} \\ F_{\varphi+\theta} = & l_{\varphi\max} \frac{i}{l_{\varphi+\theta}}\end{aligned}$$

又有

$$U\rho\cos\alpha = K_v\theta \quad (13-9)$$

$\Sigma X = 0$ , 有

$$\begin{aligned}T_0 = & (Q_0 + Q_1) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + \frac{Q_0}{g} [\ddot{\eta}_0\cos(\varphi + \theta + \alpha) + \ddot{\xi}_0\sin(\varphi + \theta + \alpha)] \\ & + \frac{Q_1}{g} [\ddot{\eta}_1\cos(\varphi + \theta + \alpha) + \ddot{\xi}_1\sin(\varphi + \theta + \alpha)] + P_{\rho} - K\sin\delta_k \\ & + U\cos(\varphi + \theta - \varepsilon) \quad (13-10)\end{aligned}$$

将 $\ddot{\eta}_0, \ddot{\xi}_0, \ddot{\eta}_1, \ddot{\xi}_1$ 代入 (13-10) 式并化简得:

$$\begin{aligned}T_D = & \ddot{u} \left\{ \frac{Q_0}{g} [L_D\sin(\varphi + \theta) - H_D\cos(\varphi + \theta) - (e + d)] - \frac{Q_1}{g} [Z_1 - L_D\sin(\varphi \right. \\ & + \theta) + H_D\cos(\varphi + \theta)] \Big\} - \ddot{\theta} \left[ \frac{Q_0}{g} (e + d) + \frac{Q_1}{g} Z_1 \right] - \frac{Q_0}{g} \ddot{X} - 2\dot{a}\dot{\theta} \\ & \cdot \left[ -\frac{Q_0}{g} (X_0 - X) + \frac{Q_1}{g} X_1 \right] - \dot{\theta}^2 \left[ \frac{Q_0}{g} (X_0 - X) + \frac{Q_1}{g} X_1 \right] - \dot{a}^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X)\right.\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta) \Big] + \frac{Q_1}{g} \{ (X_1 + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi \\
& + \theta) \Big\} + (Q_0 + Q_1) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + P_{pr} - K \sin \delta_k + U \cos(\varphi + \theta - \varepsilon)
\end{aligned}
\quad (13-11)$$

其中 
$$\varepsilon = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{9} - \operatorname{tg}^{-1} \frac{H_D}{L_D}$$

$$\delta_k = \beta - \delta = \sin^{-1} \left[ \frac{R_1}{L_{\varphi+\theta}} \sin(\alpha_0 + \varphi + \theta) \right] - \sin^{-1} \frac{Z_3}{R_1}$$

$\Sigma z = 0$ , 有

$$\begin{aligned}
N_D &= (Q_0 + Q_1) \cos(\varphi + \theta + \alpha) - K \cos \delta_k - U \sin(\varphi + \theta - \varepsilon) \\
&- \frac{Q_0}{g} [\ddot{\eta}_0 \sin(\varphi + \theta + \alpha) - \ddot{\xi}_0 \cos(\varphi + \theta + \alpha)] \\
&- \frac{Q_1}{g} [\ddot{\eta}_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha) - \ddot{\xi}_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha)]
\end{aligned}
\quad (13-12)$$

将  $\ddot{\eta}_0, \ddot{\xi}_0, \ddot{\eta}_1, \ddot{\xi}_1$  代入 (13-12) 式并化简得:

$$\begin{aligned}
N_D &= \ddot{a} \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X) + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)] + \frac{Q_1}{g} [X_1 + L_D \cos(\varphi \right. \\
&+ \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)] \Big\} + \ddot{\theta} \left[ \frac{Q_0}{g} (X_0 - X) + \frac{Q_1}{g} X_1 \right] - \dot{a}^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(e + d) \right. \\
&- L_D \sin(\varphi + \theta) + H_D \cos(\varphi + \theta)] + \frac{Q_1}{g} [Z_1 - L_D \sin(\varphi + \theta) \\
&+ H_D \cos(\varphi + \theta)] \Big\} - 2\dot{\theta}\dot{a} \left[ \frac{Q_0}{g} (e + d) + \frac{Q_1}{g} Z_1 \right] - 2(\dot{\theta} + \dot{a}) \frac{Q_0}{g} \dot{X} \\
&- \dot{\theta}^2 \left[ \frac{Q_0}{g} (e + d) + \frac{Q_1}{g} Z_1 \right] + (Q_0 + Q_1) \cos(\varphi + \theta + \alpha) - K \cos \delta_k \\
&- U \sin(\varphi + \theta - \varepsilon)
\end{aligned}
\quad (13-13)$$

### 3. 取全炮为对象所得到的方程

全炮在射击某一瞬间的受力如图13-4所示。用动静法考虑了各种运动的惯性力以后也可写出力系的诸平衡方程式。

$\Sigma M_E = 0$ , 有

$$\begin{aligned}
& Q_0 \eta_0 + Q_1 \eta_1 + Q_2 \eta_2 - P_{pr} [H_D \cos(\varphi + \theta) - L_D \sin(\varphi + \theta) + (d + e)] - N_F L_F \\
& + C_0 \dot{a} - \frac{Q_0}{g} \ddot{\eta}_0 \xi_0 + \frac{Q_0}{g} \ddot{\xi}_0 \eta_0 - \frac{Q_1}{g} \ddot{\eta}_1 \xi_1 + \frac{Q_1}{g} \ddot{\xi}_1 \eta_1 - \frac{Q_2}{g} \ddot{\eta}_2 \xi_2 + \frac{Q_2}{g} \ddot{\xi}_2 \eta_2 \\
& + I_0(\ddot{a} + \ddot{\theta}) + I_1(\ddot{a} + \ddot{\theta}) + I_2 \ddot{a} = 0
\end{aligned}
\quad (13-14)$$

根据简单的几何关系可得到:

$$\begin{aligned}
\eta_2 &= L_2 \cos \alpha - H_2 \sin \alpha \\
\xi_2 &= L_2 \sin \alpha + H_2 \cos \alpha \\
\dot{\eta}_2 &= -L_2 \dot{\alpha} \sin \alpha - H_2 \dot{\alpha} \cos \alpha \\
\dot{\xi}_2 &= L_2 \dot{\alpha} \cos \alpha - H_2 \dot{\alpha} \sin \alpha \\
\ddot{\eta}_2 &= -\ddot{\alpha} L_2 \sin \alpha - \dot{\alpha}^2 L_2 \cos \alpha - \ddot{\alpha} H_2 \cos \alpha + \dot{\alpha} H_2 \sin \alpha
\end{aligned}$$

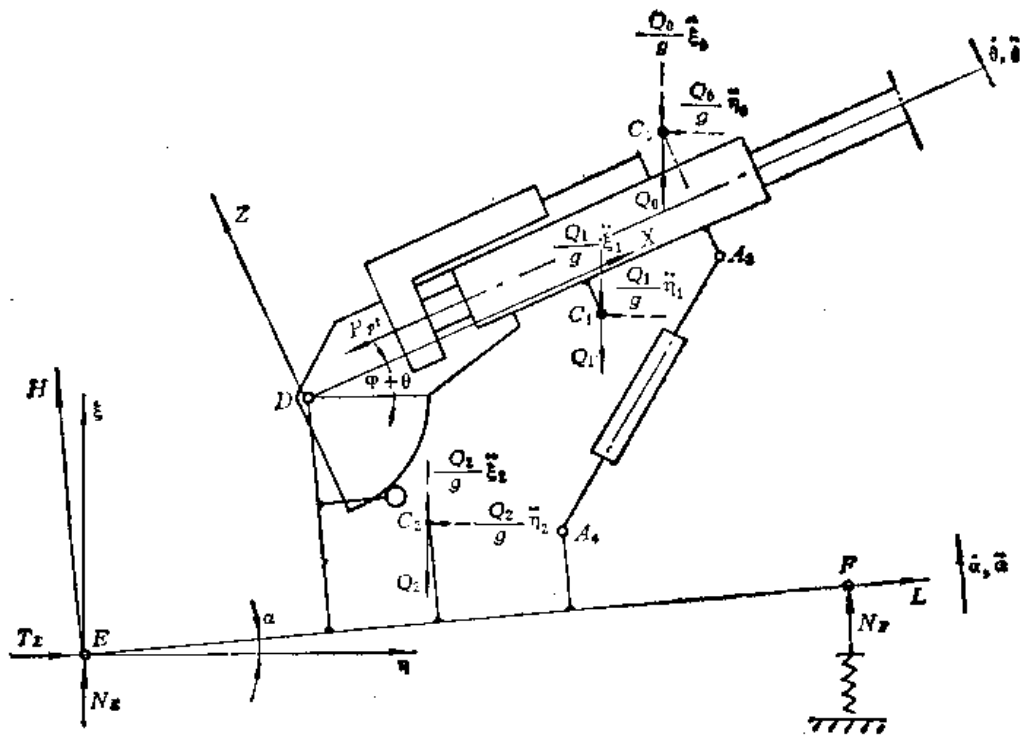


图13-4 全炮受力的原理图

$$\ddot{\xi}_z = \ddot{a}L_2 \cos \alpha - \dot{a}^2 L_2 \sin \alpha - \ddot{a}H_2 \sin \alpha - \dot{a}^2 H_2 \cos \alpha$$

将相应的物理量代入式 (13-14) 并化简后得:

$$\begin{aligned} \ddot{a} \left\{ \frac{Q_0}{g} [L_D^2 + H_D^2 + (X_0 - X)^2 + (e + d)^2 + 2[(X_0 - X)L_D + (e + d)H_D] \cos(\varphi + \theta) \right. \\ \left. + 2[(X_0 - X)H_D - (e + d)L_D] \sin(\varphi + \theta) \right\} + \frac{Q_1}{g} [L_D^2 + H_D^2 + X_1^2 + Z_1^2 \\ + 2(X_1 L_D + Z_1 H_D) \cos(\varphi + \theta) + 2(X_1 H_D - Z_1 L_D) \sin(\varphi + \theta)] + \frac{Q_2}{g} (L_2^2 + H_2^2) \\ + (I_0 + I_1 + I_2) \Big\} + \ddot{\theta} \left\{ -\frac{Q_0}{g} [(X_0 - X)^2 + (e + d)^2 + [(X_0 - X)L_D + (e + d)H_D] \cos(\varphi + \theta) \right. \\ \left. + [(X_0 - X)H_D - (e + d)L_D] \sin(\varphi + \theta)] + \frac{Q_1}{g} [X_1^2 + Z_1^2 \right. \\ \left. + (X_1 L_D + Z_1 H_D) \cos(\varphi + \theta) + (X_1 H_D - Z_1 L_D) \sin(\varphi + \theta)] + I_0 + I_1 \Big\} + \ddot{X} \frac{Q_0}{g} \\ \times [(e + d) - L_D \sin(\varphi + \theta) + H_D \cos(\varphi + \theta)] = -P_{pr} [H_D \cos(\varphi + \theta) \\ - L_D \sin(\varphi + \theta) + d + e] + C_a \ddot{a} + Q_0 [(X_0 - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) - (e + d) \sin(\varphi \\ + \theta + \alpha) + L_D \cos \alpha - H_D \sin \alpha] + Q_1 [L_D \cos \alpha - H_D \sin \alpha + X_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha) \\ - Z_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha)] + Q_2 [L_2 \cos \alpha - H_2 \sin \alpha] - N_F L_F + \dot{\theta} (2 \dot{a} + \dot{\theta}) \\ \times \left\{ \frac{Q_0}{g} \{ [(X_0 - X)L_D + (e + d)H_D] \sin(\varphi + \theta) - [(X_0 - X)H_D - (e + d)L_D] \right. \\ \left. \times \cos(\varphi + \theta) \} + \frac{Q_1}{g} [(X_1 L_D + Z_1 H_D) \sin(\varphi + \theta) - (X_1 H_D - Z_1 L_D) \cos(\varphi + \theta)] \right\} \\ + 2 \dot{X} (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X) + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)] \quad (13-15) \end{aligned}$$

其中

$$N_F = K_F L_F (\alpha - \alpha_c) \quad (13-16)$$

 $\Sigma \eta = 0$ , 有

$$T_E = -\frac{Q_0}{g} \ddot{\eta}_0 + \frac{Q_1}{g} \ddot{\eta}_1 + \frac{Q_2}{g} \ddot{\eta}_2 + P_{pr} \cos(\varphi + \theta + \alpha)$$

将 $\ddot{\eta}_0, \ddot{\eta}_1, \ddot{\eta}_2$ 代入并化简得:

$$\begin{aligned} T_E = & -\ddot{a} \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + L_D \sin \alpha + H_D \cos \alpha + (e + d) \cos(\varphi \right. \\ & + \theta + \alpha)] + \frac{Q_1}{g} [X_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha) + Z_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha) + L_D \sin \alpha \\ & + H_D \cos \alpha] + \frac{Q_2}{g} (L_2 \sin \alpha + H_2 \cos \alpha) \} - \ddot{\theta} \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X) \sin(\varphi + \theta \right. \\ & + \alpha) + (e + d) \cos(\varphi + \theta + \alpha)] + \frac{Q_1}{g} [X_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha) + Z_1 \cos(\varphi + \theta \\ & + \alpha)] \} - \ddot{X} \frac{Q_0}{g} \cos(\varphi + \theta + \alpha) + 2 \dot{X}(\dot{\theta} + \dot{a}) \frac{Q_0}{g} \sin(\varphi + \theta + \alpha) \\ & - (\dot{\theta} + \dot{a})^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) - (e + d) \sin(\varphi + \theta + \alpha)] \right. \\ & + \frac{Q_1}{g} [X_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha) - Z_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha)] \} - \dot{a}^2 \left[ \frac{Q_0}{g} (L_D \cos \alpha \right. \\ & - H_D \sin \alpha) + \frac{Q_1}{g} (L_D \cos \alpha - H_D \sin \alpha) + \frac{Q_2}{g} (L_2 \cos \alpha - H_2 \sin \alpha) \Big] \\ & + P_{pr} \cos(\varphi + \theta + \alpha) \end{aligned} \quad (13-17)$$

 $\Sigma \xi = 0$ , 有

$$N_E = Q_0 + Q_1 + Q_2 + \frac{Q_0}{g} \ddot{\xi}_0 + \frac{Q_1}{g} \ddot{\xi}_1 + \frac{Q_2}{g} \ddot{\xi}_2 - N_F + P_{pr} \sin(\varphi + \theta + \alpha)$$

将 $\ddot{\xi}_0, \ddot{\xi}_1, \ddot{\xi}_2$ 代入并化简得:

$$\begin{aligned} N_E = & -\ddot{a} \left\{ \frac{Q_0}{g} [-(X_0 - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) + (e + d) \sin(\varphi + \theta + \alpha) - L_D \cos \alpha \right. \\ & + H_D \sin \alpha] + \frac{Q_1}{g} [-X_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha) + Z_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha) - L_D \cos \alpha \\ & + H_D \sin \alpha] + \frac{Q_2}{g} (-L_2 \cos \alpha + H_2 \sin \alpha) \} - \ddot{\theta} \left\{ \frac{Q_0}{g} [-(X_0 - X) \cos(\varphi \right. \\ & + \theta + \alpha) + (e + d) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + \frac{Q_1}{g} [-X_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha) \\ & + Z_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha)] \} - \ddot{X} \frac{Q_0}{g} \sin(\varphi + \theta + \alpha) - 2 \dot{X}(\dot{\theta} + \dot{a}) \frac{Q_0}{g} \cos(\varphi + \theta \\ & + \alpha) - (\dot{\theta} + \dot{a})^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - X) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + (e + d) \cos(\varphi + \theta + \alpha)] \right. \\ & + \frac{Q_1}{g} [X_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha) + Z_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha)] \} - \dot{a}^2 \left[ \frac{Q_0}{g} (L_D \sin \alpha \right. \\ & + H_D \cos \alpha) + \frac{Q_1}{g} (L_D \sin \alpha + H_D \cos \alpha) + \frac{Q_2}{g} (L_2 \sin \alpha + H_2 \cos \alpha) \Big] \\ & + Q_0 + Q_1 + Q_2 + P_{pr} \sin(\varphi + \theta + \alpha) - N_F \end{aligned} \quad (13-18)$$

上面所导出的微分方程组或代数方程组中共联系了十一个火炮射击时所关心的物理量即：后坐行程 $X$ ，摇架的转动角度 $\theta$ ，火炮的跳动角度 $\alpha$ ，摇架前、后支点反力 $N_1$ 、 $N_2$ ，后坐阻力 $R$ ，齿弧反力 $U$ ，耳轴反力 $N_D, T_D$ ，座盘或车轮反力 $N_F$ ，驻锄支点反力 $T_F$ 。解出前述所有的方程组，就可以得到对应于射击任意瞬时的火炮运动和受力的相应数值。

#### 四、基本方程的归并和整理

由对后坐部分分析得到的式(13-3)，(13-5)，(13-6)，对起落部分分析得到的式(13-8)以及对全炮分析得到的式(13-15)组成了一组独立的封闭方程：

$$\left. \begin{aligned} a_{11}\ddot{\alpha} + a_{12}\ddot{\theta} + a_{13}\ddot{X} + a_{14}N_1 + a_{15}N_2 &= b_1 \\ a_{21}\ddot{\alpha} + a_{22}\ddot{\theta} + a_{23}\ddot{X} + a_{24}N_1 + a_{25}N_2 &= b_2 \\ \vdots \\ a_{s1}\ddot{\alpha} + a_{s2}\ddot{\theta} + a_{s3}\ddot{X} + a_{s4}N_1 + a_{s5}N_2 &= b_s \end{aligned} \right\} \quad (13-19)$$

其中  $a_{ij} = a_{ij}(t, X, \theta, \alpha, \dot{X}, \dot{\theta}, \dot{\alpha})$

$b_{ij} = b_{ij}(t, X, \theta, \alpha, \dot{X}, \dot{\theta}, \dot{\alpha}) \quad i, j = 1, 2, \dots, 5$

各元素的表达式如下：

$$a_{11} = -\frac{Q_o}{g} [L_D \sin(\varphi + \theta) - H_D \cos(\varphi + \theta) - (e + d)]$$

$$a_{12} = -\frac{Q_o}{g} (e + d)$$

$$a_{13} = -\frac{Q_o}{g}$$

$$a_{14} = f$$

$$a_{15} = f$$

$$b_1 = -P_{\mu} + R + \dot{\theta}^2 \cdot \frac{Q_o}{g} (X_o - X) + 2\dot{\alpha}\dot{\theta} \cdot \frac{Q_o}{g} (X_o - X) + \dot{\alpha}^2 \frac{Q_o}{g} [(X - X_o) + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)] - Q_o \sin(\varphi + \theta + \alpha)$$

$$a_{21} = \frac{Q_o}{g} [(X_o - X) + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)]$$

$$a_{22} = \frac{Q_o}{g} (X_o - X)$$

$$a_{23} = 0$$

$$a_{24} = -1$$

$$a_{25} = 1$$

$$b_2 = -Q_o \cos(\varphi + \theta + \alpha) + \dot{\theta}^2 \frac{Q_o}{g} (e + d) + 2\dot{X}(\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \frac{Q_o}{g} + 2\dot{\alpha}\dot{\theta} \frac{Q_o}{g} (e + d) + \dot{\alpha}^2 \frac{Q_o}{g} [(e + d) - L_D \sin(\varphi + \theta) + H_D \cos(\varphi + \theta)]$$

$$a_{31} = I_o$$

$$a_{32} = I_o$$



$$a_{33} = 0$$

$$a_{34} = -[f(Z_{N1} + e + d) + (X_{N1} - X_o + X)]$$

$$a_{35} = f(Z_{N2} - e - d) - (X_o - X - X_{N2})$$

$$b_3 = -P_{pe} - R(Z_R - e - d)$$

$$a_{41} = \frac{Q_o}{g} [ (X_o - X)^2 + (e + d)^2 + (X_o - X)L_D \cos(\varphi + \theta) + (e + d)H_D \cos(\varphi + \theta) + (X_o - X)H_D \sin(\varphi + \theta) - (e + d)L_D \times \sin(\varphi + \theta) ] + \frac{Q_1}{g} [ X_1^2 + Z_1^2 + (X_1 L_D + Z_1 H_D) \cos(\varphi + \theta) + (X_1 H_D - Z_1 L_D) \sin(\varphi + \theta) ] + I_o + I_1$$

$$a_{42} = \frac{Q_o}{g} [ (X_o - X)^2 + (e + d)^2 ] + \frac{Q_1}{g} [ X_1^2 + Z_1^2 ] + I_o + I_1$$

$$a_{43} = \frac{Q_o}{g} (e + d)$$

$$a_{44} = 0$$

$$a_{45} = 0$$

$$b_4 = P_{pd} - C_0 \dot{\theta} - Q_o [ (X_o - X) \cos(\varphi + \theta + \alpha) - (e + d) \sin(\varphi + \theta + \alpha) ] - Q_1 [ X_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha) - Z_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha) ] + 2 \dot{X} (\dot{\alpha} + \dot{\theta}) \frac{Q_o}{g} (X_o - X) + 2 K h_{\tau+\theta} - U \rho \cos 20^\circ - \dot{\alpha}^2 \left\{ \frac{Q_o}{g} [ (X_o - X)L_D \sin(\varphi + \theta) + (e + d) \times H_D \sin(\varphi + \theta) - (X_o - X)H_D \cos(\varphi + \theta) + (e + d)L_D \cos(\varphi + \theta) ] + \frac{Q_1}{g} [ (X_1 L_D + Z_1 H_D) \sin(\varphi + \theta) - (X_1 H_D - Z_1 L_D) \cos(\varphi + \theta) ] \right\}$$

$$a_{51} = \frac{Q_o}{g} \left\{ L_D^2 + H_D^2 + (X_o - X)^2 + (e + d)^2 + 2 [ (X_o - X)L_D + (e + d)H_D ] \times \cos(\varphi + \theta) + 2 [ (X_o - X)H_D - (e + d)L_D ] \sin(\varphi + \theta) \right\} + \frac{Q_1}{g} [ L_D^2 + H_D^2 + X_1^2 + Z_1^2 + 2 (X_1 L_D + Z_1 H_D) \cos(\varphi + \theta) + 2 (X_1 H_D - Z_1 L_D) \times \sin(\varphi + \theta) ] + \frac{Q_2}{g} (L_D^2 + H_D^2) + I_o + I_1 + I_2$$

$$a_{52} = \frac{Q_o}{g} \left\{ (X_o - X)^2 + (e + d)^2 + [ (X_o - X)L_D + (e + d)H_D ] \cos(\varphi + \theta) + [ (X_o - X)H_D - (e + d)L_D ] \sin(\varphi + \theta) \right\} + \frac{Q_1}{g} [ X_1^2 + Z_1^2 + (X_1 L_D + Z_1 H_D) \cos(\varphi + \theta) + (X_1 H_D - Z_1 L_D) \sin(\varphi + \theta) ] + I_o + I_1$$

$$a_{53} = \frac{Q_o}{g} [ e + d - L_D \sin(\varphi + \theta) + H_D \cos(\varphi + \theta) ]$$

$$a_{54} = 0$$

$$a_{55} = 0$$

$$\begin{aligned}
b_s = & -P_{st} [H_D \cos(\varphi + \theta) - L_D \sin(\varphi + \theta) + d + e] + C_a \dot{\alpha} + Q_o [(X_o - X) \cos(\varphi \\
& + \theta + \alpha) - (e + d) \sin(\varphi + \theta + \alpha) + L_D \cos \alpha - H_D \sin \alpha] + Q_1 [L_D \cos \alpha \\
& - H_D \sin \alpha + X_1 \cos(\varphi + \theta + \alpha) - Z_1 \sin(\varphi + \theta + \alpha)] + Q_2 [L_2 \cos \alpha \\
& - H_2 \sin \alpha] - N_F L_F + \dot{\theta} (2 \dot{\alpha} + \dot{\theta}) \left\{ \frac{Q_o}{g} \{ [(X_o - X) L_D + (e + d) H_D] \sin(\varphi \right. \\
& + \theta) - [(X_o - X) H_D - (e + d) L_D] \cos(\varphi + \theta) \} + \frac{Q_1}{g} [(Z_1 L_D + Z_1 H_D) \\
& \times \sin(\varphi + \theta) - (X_1 H_D - Z_1 L_D) \cos(\varphi + \theta)] \} + 2 \dot{X} (\dot{\theta} + \dot{\alpha}) \frac{Q_o}{g} \\
& \times [(X_o - X) + L_D \cos(\varphi + \theta) + H_D \sin(\varphi + \theta)]
\end{aligned}$$

前述微分方程组 (13-19) 可以用全主元高斯消去法变换成适于数值求解的形式, 即

$$\left. \begin{aligned}
\ddot{\alpha} &= f_1(t, \theta, \alpha, X, \dot{\alpha}, \dot{\theta}, \dot{X}) \\
\ddot{\theta} &= f_2(t, \theta, \alpha, X, \dot{\alpha}, \dot{\theta}, \dot{X}) \\
\ddot{X} &= f_3(t, \theta, \alpha, X, \dot{\alpha}, \dot{\theta}, \dot{X}) \\
N_1 &= f_4(t, \theta, \alpha, X, \dot{\alpha}, \dot{\theta}, \dot{X}) \\
N_2 &= f_5(t, \theta, \alpha, X, \dot{\alpha}, \dot{\theta}, \dot{X})
\end{aligned} \right\} \quad (13-20)$$

如令:  $Y_1 = \alpha$ ,  $Y_2 = \theta$ ,  $Y_3 = X$ ,

$Y_4 = \dot{\alpha}$ ,  $Y_5 = \dot{\theta}$ ,  $Y_6 = \dot{X}$ ,

则可写成下述一阶微分方程组:

$$\begin{aligned}
\dot{\alpha} &= \dot{Y}_1 = Y_4 \\
\dot{\theta} &= \dot{Y}_2 = Y_5 \\
\dot{X} &= \dot{Y}_3 = Y_6 \\
\dot{Y}_4 &= \ddot{\alpha} = f_1(t, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6) = Y_7 \\
\dot{Y}_5 &= \ddot{\theta} = f_2(t, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6) = Y_8 \\
\dot{Y}_6 &= \ddot{X} = f_3(t, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6) = Y_9
\end{aligned}$$

以及下列的一组代数方程组

$$\begin{aligned}
N_1 &= f_4(t, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5) \\
N_2 &= f_5(t, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
R = & (1 + v_h) \left\{ H_K \frac{K_1 \gamma}{20 g} \left[ \frac{(A_o - A_p)^3}{a_s^2} + \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \right] Y_7^2 + H_o \frac{K_{1f} \gamma}{20 g} \left[ H_f \frac{A_{ef}^3}{a_s^2} \right. \right. \\
& \left. \left. + \frac{K_{2f}}{K_{1f}} \frac{A_{fj}^3}{a_f^2} \right] Y_8^2 + [1 + \text{sign}(Y_6) v_f] P_o \left( \frac{s_o}{s_o - Y_3} \right)^n + F_o \right.
\end{aligned}$$

$$U = \frac{K_o Y_3}{\cos(Y_1)}$$

$$\begin{aligned}
T_D = & Y_7 \left\{ \frac{Q_o}{g} [L_D \sin(\varphi + Y_2) - H_D \cos(\varphi + Y_2) - (e + d)] - \frac{Q_1}{g} [Z_1 - L_D \right. \\
& \times \sin(\varphi + Y_2) + H_D \cos(\varphi + Y_2)] \} - Y_8 \left[ \frac{Q_o}{g} (e + d) + \frac{Q_1}{g} Z_1 \right] \\
& - \frac{Q_o}{g} Y_9 - 2 Y_4 Y_5 \left[ \frac{Q_o}{g} (X_o - Y_3) + \frac{Q_1}{g} X_1 \right] - Y_5^2 \left[ \frac{Q_o}{g} (X_o - Y_3) + \frac{Q_1}{g} X_1 \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -Y_4^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - Y_3) + L_D \cos(\varphi + Y_2) + H_D \sin(\varphi + Y_2)] + \frac{Q_1}{g} [X_1 \right. \\
& \left. + L_D \cos(\varphi + Y_2) + H_D \sin(\varphi + Y_2)] \right\} + (Q_0 + Q_1) \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) + P_{pr} \\
& - K \sin \delta_K + U \cos(\varphi + Y_2 - \varepsilon)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_D = Y_7 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - Y_3) + L_D \cos(\varphi + Y_2) + H_D \sin(\varphi + Y_2)] + \frac{Q_1}{g} [X_1 \right. \\
\left. + L_D \cos(\varphi + Y_2) + H_D \sin(\varphi + Y_2)] \right\} + Y_8 \left[ \frac{Q_0}{g} (X_0 - Y_3) + \frac{Q_1}{g} X_1 \right] \\
- Y_4^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(e + d) - L_D \sin(\varphi + Y_2) + H_D \cos(\varphi + Y_2)] + \frac{Q_1}{g} [Z_1 \right. \\
\left. - L_D \sin(\varphi + Y_2) + H_D \cos(\varphi + Y_2)] \right\} - 2 Y_4 Y_5 \left[ \frac{Q_0}{g} (e + d) + \frac{Q_1}{g} Z_1 \right] \\
- 2(Y_4 + Y_5) \frac{Q_0}{g} Y_6 - Y_5^2 \left[ \frac{Q_0}{g} (e + d) + \frac{Q_1}{g} Z_1 \right] + (Q_0 + Q_1) \cos(\varphi \\
+ Y_2 + Y_1) - K \cos \delta_K - U \sin(\varphi + Y_2 - \varepsilon)
\end{aligned}$$

$$N_F = K_F L_F (Y_1 - \alpha_r)$$

$$\begin{aligned}
T_K = -Y_7 \left\{ \frac{g}{Q_0} [(X_0 - Y_3) \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) + L_D \sin Y_1 + H_D \cos Y_1 + (e + d) \cos(\varphi \right. \\
\left. + Y_2 + Y_1)] + \frac{Q_1}{g} [X_1 \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) + Z_1 \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) + L_D \sin Y_1 \right. \\
\left. + H_D \cos Y_1] + \frac{Q_2}{g} (L_2 \sin Y_1 + H_2 \cos Y_1) \right\} - Y_8 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - Y_3) \sin(\varphi \right. \\
\left. + Y_2 + Y_1) + (e + d) \cos(\varphi + Y_2 + Y_1)] + \frac{Q_1}{g} [X_1 \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) + Z_1 \cos(\varphi \right. \\
\left. + Y_2 + Y_1)] \right\} - Y_6 \frac{Q_0}{g} \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) + 2 Y_6 (Y_5 + Y_4) \frac{Q_0}{g} \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) \\
- (Y_5 + Y_4)^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [(X_0 - Y_3) \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) - (e + d) \sin(\varphi + Y_2 + Y_1)] \right. \\
\left. + \frac{Q_1}{g} [X_1 \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) - Z_1 \sin(\varphi + Y_2 + Y_1)] \right\} - Y_4^2 \left[ \frac{Q_0}{g} (L_D \cos Y_1 \right. \\
\left. - H_D \sin Y_1) + \frac{Q_1}{g} (L_D \cos Y_1 - H_D \sin Y_1) + \frac{Q_2}{g} (L_2 \cos Y_1 - H_2 \sin Y_1) \right] \\
+ P_{pr} \cos(\varphi + Y_2 + Y_1)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
N_K = -Y_7 \left\{ \frac{Q_0}{g} [-(X_0 - Y_3) \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) + (e + d) \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) \right. \\
\left. - L_D \cos Y_1 + H_D \sin Y_1] + \frac{Q_1}{g} [-X_1 \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) + Z_1 \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) \right. \\
\left. - L_D \cos Y_1 + H_D \sin Y_1] + \frac{Q_2}{g} (-L_2 \cos Y_1 + H_2 \sin Y_1) \right\} - Y_8 \left\{ \frac{Q_0}{g} \right. \\
\left. \times [-(X_0 - Y_3) \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) + (e + d) \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) + \frac{Q_1}{g} \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& \times \{ -X_1 \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) + Z_1 \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) \} - Y_0 \frac{Q_0}{g} \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) \\
& - 2Y_0(Y_3 + Y_4) \frac{Q_0}{g} \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) - (Y_3 + Y_4)^2 \left\{ \frac{Q_0}{g} [ (X_0 - Y_3) \sin(\varphi \right. \\
& + Y_2 + Y_1) + (e + d) \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) ] + \frac{Q_1}{g} [ X_1 \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) \\
& + Z_1 \cos(\varphi + Y_2 + Y_1) ] \} - Y_4^2 \left[ \frac{Q_0}{g} (L_D \sin Y_1 + H_D \cos Y_1) + \frac{Q_1}{g} (L_D \sin Y_1 \right. \\
& + H_D \cos Y_1) + \frac{Q_2}{g} (L_2 \sin Y_1 + H_2 \cos Y_1) \Big] + Q_0 + Q_1 + Q_2 \\
& + P_{pr} \sin(\varphi + Y_2 + Y_1) - N_F
\end{aligned}$$

只要同时运用这些代数方程组即可在确定的结构尺寸和重量诸元的前提下, 根据初始条件  $t = 0, \alpha_0 = \theta_0 = X_0 = \alpha_0 = \dot{\theta}_0 = \dot{X}_0 = \ddot{\alpha}_0 = \ddot{\theta}_0 = \ddot{X}_0 = 0$  应用龙格库塔法解前述六个一阶微分方程组, 最后就可以得到所有主要物理量对时间的变化规律。这些物理量是:

与火炮运动有关的量:  $\alpha, \theta, X, \dot{\alpha}, \dot{\theta}, \dot{X}, \ddot{\alpha}, \ddot{\theta}, \ddot{X}$

与火炮受力有关的量:  $R, N_1, N_2, U, T_D, N_D, N_E, T_E, N_E$

关于对上述微分方程和代数方程组求解的计算机程序情况在第十六章介绍。总之, 火炮三自由度模型的动力学分析在一定程度上较真实地反映了火炮射击时的主要运动和主要受力, 为分析火炮的射击精度, 分析火炮反后坐装置的工作, 分析炮架各部分的强度提供了较好的基础。

## 第二节 火炮发射时的五自由度动力学模型

火炮发射时的运动和受力分析的研究, 对提高火炮的射击精度, 提高火炮零部件强度和刚度设计具有十分重要的意义。正确地分析火炮射击时受力和运动现象, 合理地选择自由度, 不但可以较客观地反映火炮射击时受力和运动规律, 并且可以把复杂的力学问题简化成比较简单的力学模型计算。在第一节三自由模型分析的基础上, 将火炮的射击现象进一步抽象成五自由度动力学模型。本节将阐述火炮发射时的五自由度动力学模型的建立, 以及用分析力学的方法得到各力之间的相互关系, 从而为火炮动力分析提供另外一种思路。

### 一、符号说明

- $X$ ——火炮驻锄中心  $O_B$  的水平位移;
- $Y$ ——火炮驻锄中心  $O_B$  的垂直位移;
- $\theta$ ——全炮发射时, 绕驻锄中心  $O_B$  的转角, 以逆时针方向为正;
- $\varphi$ ——起落部分绕耳轴中心  $O$  的转角, 以逆时针方向为正;
- $S$ ——后坐部分相对起落部分的直线位移;
- $O$ ——火炮耳轴中心;
- $O_B$ ——火炮驻锄中心;
- $A$ ——火炮车轮或座板与土壤接触中心点;

- $X_0$ ——火炮发射前, 耳轴中心  $O$  的  $X$  坐标;  
 $Y_0$ ——火炮发射前, 耳轴中心  $O$  的  $Y$  坐标;  
 $X_{o_1}$ ——火炮发射前, 炮架质心  $O_1$  的  $X$  坐标;  
 $Y_{o_1}$ ——火炮发射前, 炮架质心  $O_1$  的  $Y$  坐标;  
 $d$ ——火炮后坐部分质心的  $P$  坐标, 后坐部分质心在耳轴上方为正;  
 $P_2$ ——起落部分质心的  $P$  坐标;  
 $S_2$ ——起落部分质心的  $S$  坐标;  
 $O_1$ ——炮架部分的质心;  
 $O_2$ ——起落部分的质心;  
 $O_3$ ——后坐部分的质心;  
 $e$ ——动力偶臂, 后坐部分质心在炮膛轴线下方向为正;  
 $\varphi_0$ ——火炮射击前所赋予的射角;  
 $\alpha_2$ ——火炮射角  $\varphi_0 = 0$  时, 起落部分和后坐部分合为一体时的质心与耳轴中心联线与水平夹角;  
 $l_a$ ——起落部分和后坐部分合为一体时射前质心与耳轴中心联线的距离;  
 $N_{Bx}$ ——驻锄中心  $O_B$  处土壤所提供的水平约束反力;  
 $N_{By}$ ——驻锄中心  $O_B$  处土壤所提供的垂直约束反力;  
 $N_{Ay}$ —— $A$  点处土壤所提供的垂直约束反力;  
 $N_{Ax}$ —— $A$  点处的水平摩擦力;  

$$N_{Ax} = -f_A N_{Ay} \operatorname{sign}(\dot{x} - L\dot{\theta} \sin(\xi_0 + \theta));$$
 $P_{pt}$ ——炮膛合力;  
 $\phi_0$ ——驻退机液压阻力;  
 $P_f$ ——复进机力;  
 $P_{fo}$ ——复进机初力;  
 $F_{cs}$ ——驻退机紧塞具提供的不变摩擦力;  
 $F_{of}$ ——复进机紧塞具提供的不变摩擦力;  
 $v_z$ ——驻退机紧塞具相当摩擦系数;  
 $v_f$ ——复进机紧塞具相当摩擦系数;  
 $T$ ——全系统动能;  
 $T_1$ ——炮架部分动能;  
 $T_2$ ——起落部分动能;  
 $T_3$ ——后坐部分动能;  
 $Q_r$ ——广义力;  
 $q_r$ ——广义坐标;  
 $\dot{q}_r$ ——广义速度;  
 $f_A$ —— $A$  点的摩擦系数;  
 $M_1$ ——炮架部分质量;  
 $M_2$ ——起落部分质量;  
 $M_3$ ——后坐部分质量;

- $g$ ——重力加速度;  
 $L$ ——驻锄中心  $O_s$  与车轮轮缘下端点或座板中心点联线距离;  
 $\xi_0$ ——发射前  $L$  与水平的夹角;  
 $K_1, K_2$ ——土壤两段的刚度系数;  
 $M_G$ ——高低机齿轮, 齿弧和支臂共同提供的力矩;  
 $K_G$ ——高低机齿轮, 齿弧和支臂的复合刚度系数;  
 $C_G$ ——高低机齿轮, 齿弧和支臂的复合阻尼系数;  
 $M_F$ ——平衡机提供的力矩;  
 $H_{s1}$ ——耳轴中心射前到地面的距离;  
 $f_T$ ——后坐部分与摇架衬板或导轨之间的摩擦系数;  
 $M_{\kappa\pi}$ ——弹丸弹带作用炮身的回转力矩;  
 $N_1, N_2$ ——摇架作用于后坐部分的两个约束支反力;  
 $\varphi_1$ ——内弹道虚拟功系数;  
 $\varphi_{11}$ ——内弹道的弹丸质量虚拟系数;  
 $S_d$ ——炮膛断面积;  
 $p$ ——内弹道平均压力;  
 $\omega_1$ ——内弹道的火药装药量;  
 $q$ ——弹丸重量;  
 $P_g$ ——炮口点的炮膛合力;  
 $p_g$ ——炮口点的平均压力;  
 $\chi$ ——炮口制退器冲量特征量;  
 $t_g$ ——弹丸从起动到出炮口瞬间所需的时间;  
 $t_k$ ——从弹丸开始运动到后效期结束的时间;  
 $b$ ——后效期时间常数;  
 $K_F$ ——弹簧式平衡机的刚度系数;  
 $C_F$ ——弹簧式平衡机的阻尼系数;  
 $W_0$ ——复进机初容积;  
 $A_f$ ——复进机活塞工作面积;  
 $n$ ——复进机多方指数;  
 $S_0$ ——发射前后坐部分质心的  $S$  坐标;  
 $K_{11}$ ——后坐时驻退机主流液压阻力系数;  
 $K_{21}$ ——后坐时驻退机支流液压阻力系数;  
 $K_K$ ——复进节制活瓣液压阻力系数;  
 $K_{41}$ ——驻退机主流漏流液压阻力系数;  
 $K_{42}$ ——复进节制器漏流液压阻力系数;  
 $\gamma$ ——驻退液重度;  
 $K_{12}$ ——复进时驻退机流液孔液压阻力系数;  
 $K_{22}$ ——复进节制器流液孔液压阻力系数;  
 $A_0$ ——驻退机后坐时活塞工作面积;

- $A_p$ ——节制环内孔面积;  
 $A_{ff}$ ——复进节制腔工作面积;  
 $A_{of}$ ——驻退机复进时活塞工作面积;  
 $a_x$ ——驻退机主流液孔面积;  
 $a_{o1}$ ——驻退机主流漏流面积;  
 $\Omega_1$ ——后坐时驻退机支流通路的最小面积;  
 $a_f$ ——复进节制器流液孔面积;  
 $a_{o2}$ ——复进节制器漏流面积;  
 $a_K$ ——复进节制活瓣流液孔面积;  
 $a_{x1}$ ——变后坐驻退机后坐流液孔面积, 长后坐和短后坐均参加工作;  
 $a_{x2}$ ——变后坐驻退机后坐流液孔面积, 短后坐时不参加工作;  
 $\beta_0$ ——高低射角为  $0^\circ$  时, 平衡机上支点与耳轴中心联线同平衡机下支点与耳轴中心联线之间的夹角;  
 $r_1$ ——平衡机上支点与耳轴中心之间联线的距离;  
 $r_2$ ——平衡机下支点与耳轴中心之间联线的距离;  
 $l_0$ ——射角为  $0^\circ$  时平衡机两支点间距离;  
 $l_p$ ——射角为  $\varphi_0 + \varphi$  时平衡机两支点间距离;  
 $h_p$ ——耳轴中心到  $l_p$  线之间的距离;  
 $n_p$ ——平衡机个数;  
 $K_p$ ——弹簧式平衡机刚度系数;  
 $C_p$ ——弹簧式平衡机阻尼系数;  
 $f_p$ ——平衡机弹簧在某射角时长度改变量;  
 $l_{pm}$ ——平衡机弹簧自由伸张时平衡机两支点间的距离;  
 $l_m$ ——气压式平衡机当初压是  $p_0$  时两支点间的距离;  
 $S_{o3}$ ——气压式平衡机初始体积相当长度;  
 $W_{op}$ ——气压式平衡机初始体积;  
 $A_{p3}$ ——气压式平衡机活塞工作面积;  
 $n_{p3}$ ——气压式平衡机紧塞皮碗个数;  
 $l_{p2}$ ——气压式平衡机紧塞皮碗工作长度;  
 $d_1$ ——气压式平衡机内筒外径;  
 $P_0$ ——气压式平衡机初力;  
 $p_0$ ——气压式平衡机初压;  
 $K$ ——气压式平衡机多方指数;  
 $f_{pm}$ ——气压式平衡机紧塞皮碗与内筒外表面间的摩擦系数;  
 $K_G$ ——高低机齿轮, 齿弧和支臂的复合刚度系数;  
 $C_G$ ——高低机齿轮, 齿弧和支臂复合阻尼系数;  
 $L_h$ ——筒型摇架防转基轴的衬板中心到质心运动轨迹的距离或槽型框型摇架两滑轨中心之间的距离;  
 $d_s$ ——火炮口径;

- $t_f$ ——膛线深度;  
 $f_z$ ——弹带和炮身膛线之间的摩擦系数;  
 $\eta$ ——膛线缠角;  
 $C_1$ ——土壤的阻尼系数;  
 $N_A$ ——土壤变形— $A_1$ 时的抗力;  
 $C_2$ ——土壤和车轮复合阻尼系数;  
 $D_{00}$ ——火炮射角为  $0^\circ$  时, 全炮重心到驻锄中心  $O_B$  的水平距离;  
 $N_{Ay0}$ ——发射前  $A$  点的约束反力;  
 $D_{0\varphi_0}$ ——射角为  $\varphi_0$  时, 全炮重心到驻锄中心  $O_B$  的水平距离;  
 $N_{By0}$ ——发射前  $O_B$  点约束反力;  
 $Y_{z0}$ ——发射前  $A$  点处土壤变形量;  
 $Y_0$ ——发射前  $O_B$  点土壤变形量;  
 $N'_{Ay}$ —— $A$  点土壤所承受的约束反力;  
 $\Delta H$ ——没有重力作用时驻锄中心到地面的垂直距离;  
 $A_1$ ——土壤两个刚度系数转折点的变形量;  
 $Y_{00}$ ——车轮压死时, 车轮外表面到轮缘下端点间的距离;  
 $h_{z0}$ ——车轮不承载时, 车轮外表面到轮缘下端点间的距离;  
 $Y_z$ ——以土壤不承载表面为原点, 向上为正的土壤垂直变形量;  
 $Y'_z$ ——以车轮和土壤不承载时, 轮缘下端点为坐标原点, 向上为正的土壤和车轮复合垂直变形量;  
 $A'_1$ ——土壤刚度系数转折点相对应的土壤和车轮复合变形量;  
 $B'$ ——车轮压死时, 土壤和车轮相对应的复合变形量;  
 $N_0$ ——车轮压死时所需要的力;  
 $H_1$ ——复进机活塞中心与后坐部分质心运动轨迹间的距离;  
 $H_2$ ——驻退机活塞中心到后坐部分质心运动轨迹间的距离;  
 $H_1$ ——筒型摇架下滑板中心到后坐部分质心运动轨迹间的距离;  
 $H_2$ ——筒型摇架上滑板中心到后坐部分质心运动轨迹间的距离;  
 $S_{10}$ ——发射前后坐部分质心到  $N_1$  作用线间的距离;  
 $S_{20}$ ——发射前后坐部分质心到  $N_2$  作用线间的距离;  
 $\Delta$ ——摇架和后坐部分之间装配间隙;  
 $H_{x1}$ ——发射前耳轴中心到地面距离;  
 $\rho$ ——复进时, 驻退机非工作腔真空消失的复进行程;  
 $d$ ——耳轴中心到后坐部分质心直线运动轨迹的距离, 耳轴中心在轨迹下方为  $E$ ;  
 $\text{sign}(E)$ ——符号函数;

$$\text{sign}(E) = \begin{cases} 1 & E > 0 \\ 0 & E = 0 \\ -1 & E < 0 \end{cases}$$



## 二、基本假设

1. 把火炮看成由三块刚体组成, 即火炮的后坐部分, 其质量记作  $M_3$ 、火炮的起落部分 (不含后坐部分), 其质量记作  $M_2$ 、火炮的炮架部分, 其质量记作  $M_1$ 。各块刚体中忽略其制造间隙和空回。

2. 火炮的方向射角  $\psi = 0^\circ$ , 受力均在火炮垂直对称射面内, 射击时火炮只作平面运动。

3. 车轮和土壤均富有弹性。轮子在支反力的作用下作垂直运动, 且其变化规律为已知函数, 车轮和地面之间有水平的相对运动, 相互之间的摩擦力记作  $f_A \cdot N_{Ay}$ 。

4. 驻锄支点  $O_B$  在支反力  $N_{By}$ ,  $N_{Bx}$  作用下作垂直和水平运动, 其  $N_{By}$ ,  $N_{Bx}$  的变化规律为已知函数。

5. 火炮发射时, 全炮绕驻锄支点  $O_B$  转动。

6. 火炮的后坐部分和起落部分在火炮发射时相对耳轴中心转动, 并且高低机和平衡机所提供的力矩  $M_G$ 、 $M_P$  是转动角位移的已知函数。

7. 后坐部分相对起落部分作直线运动, 考虑后坐部分和起落部分之间的装配间隙。

## 三、力学模型的建立

火炮发射时的运动和受力是非常复杂的, 应经过仔细分析研究, 取其主要的反映实际的运动, 建立力学模型进行计算。现根据火炮发射时的基本假设, 选取运动幅度大, 消耗能量多的运动来建立力学模型。

现把火炮发射时的运动归结为以下相互独立的五个主要运动:

1. 火炮后坐部分相对起落部分摇架的直线运动, 记作  $S$ 。其起始原点为以耳轴中心为坐标原点的后坐部分质心的  $S$  坐标, 发射前记作  $S_0$ 。

2. 火炮的后坐部分和起落部分相对炮架作以耳轴中心为圆心的转动, 记作  $\varphi$ , 规定以逆时针方向为正。

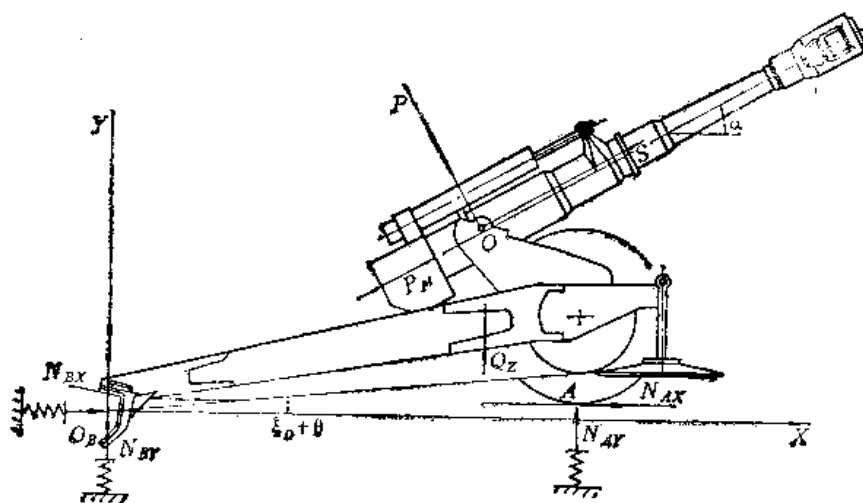


图13-5 火炮互自由度的动力学模型

3. 全炮作相对于驻锄支点  $O_s$  为中心的转动, 其变化量记作  $\theta$ , 规定以逆时针方向为正。

4. 全炮的水平移动, 其变化量记作  $X$ , 规定发射前驻锄支点  $O_s$  为坐标原点。

5. 全炮的垂直移动, 其变化量记作  $Y$ , 规定发射前驻锄支点  $O_s$  不受  $(M_1 + M_2 + M_3)g$  的作用位置为坐标原点。

#### 四、方程推导

对于复杂的动力学问题, 采用牛顿定律直接建立方程是比较困难的。对于自由度较多的复杂力学系统, 通常采用分析力学理论。对于五自由度的动力学问题, 如果采用动静法直接建立方程, 会使建立方程的过程相当繁复。所以一般采用拉格朗日第二类方程, 即:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} - \frac{\partial T}{\partial q_r} = Q_r \quad (13-21)$$

$$r = 1, 2, \dots, n \quad n \text{ 为自由度数}$$

其中:

$Q_r$ ——广义力,

$$Q_r = \sum_{i=1}^N F_i \frac{\partial r_i}{\partial q_r} = \sum_{i=1}^N \left( F_{ix} \frac{\partial X_i}{\partial q_r} + F_{iy} \frac{\partial Y_i}{\partial q_r} + F_{iz} \frac{\partial Z_i}{\partial q_r} \right)$$

$N$  为质点系的质点数,  $X_i, Y_i, Z_i$  为  $i$  个质点的坐标,

$q_r$ ——广义坐标;

$\dot{q}_r$ ——广义速度;

$$T \text{——质点系动能, } T = \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} m_i V_i^2$$

本节把火炮简化成三个质点的质点系, 而该质点系的动能根据寇尼格定理求得。

$$T = T_1 + T_2 + T_3 \quad (13-22)$$

$T_1$ ——炮架部分动能;

$T_2$ ——起落部分动能;

$T_3$ ——后坐部分动能;

$$T_i = \frac{1}{2} M_i V_{ic}^2 + \frac{1}{2} \sum m_i V_i^2$$

$T_i$  等式右端第一项代表质心的动能, 第二项代表质点系随质心平动的坐标系的相对动能。

从拉格朗日方程的形式可以看出, 要建立关于运动的微分方程, 必须把系统的动能和广义力求出, 然后进行微分运算, 就得到所要求的方程组。

##### 1. 系统动能的计算公式

由寇尼格定理, 先对质点系的三个质点分别求动能, 然后把三个质点的动能分别相加得到系统动能。

$$T_1 = \frac{1}{2} M_1 V_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}^2 \quad (13-23)$$

$$T_2 = \frac{1}{2} M_2 V_2^2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta} + \dot{\phi})^2 \quad (13-24)$$

$$T_3 = \frac{1}{2} M_3 V_3^2 + \frac{1}{2} J_3 (\dot{\theta} + \dot{\phi})^2 \quad (13-25)$$

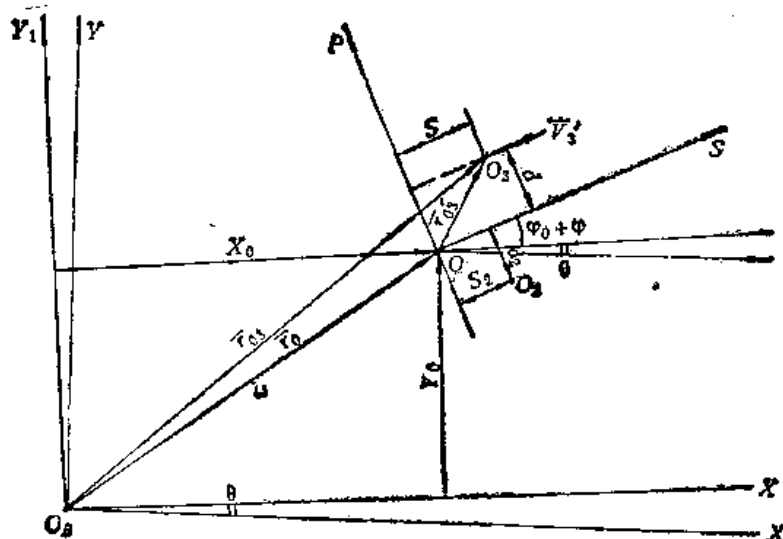


图13-6 后坐部分运动分析图

$$\vec{V}_3 = \vec{V}_0 + \vec{\omega}_1 \times \vec{r}_{03} + \vec{V}'_3 \quad (13-26)$$

$$\vec{\omega}_1 = (\dot{\phi} + \dot{\theta}) \vec{K}$$

$$\vec{r}_{03} = \dot{s} \vec{i} + d \vec{j}$$

$$\vec{V}'_3 = \dot{s} \vec{i}$$

$$\vec{\omega}_1 \times \vec{r}_{03} = (\dot{\phi} + \dot{\theta}) \vec{K} \times (\dot{s} \vec{i} + d \vec{j})$$

$$= (\dot{\phi} + \dot{\theta}) (\dot{s} \vec{j} - d \vec{i})$$

$$\vec{V}_0 = \vec{V}_{0s} + \vec{\omega} \times \vec{r}_0$$

$$\vec{\omega} = \dot{\theta} \vec{K}$$

$$\vec{r}_0 = [X_0 \cos(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \sin(\varphi_0 + \varphi)] \vec{i}$$

$$+ [-X_0 \sin(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \cos(\varphi_0 + \varphi)] \vec{j}$$

设  $\vec{\xi}$  为  $X$  轴单位矢量,  $\vec{\eta}$  为  $Y$  轴单位矢量

$$\vec{V}_{0s} = \dot{X} \vec{\xi} + \dot{Y} \vec{\eta}$$

$$= \dot{X} [\cos(\varphi_0 + \varphi + \theta) \vec{i} - \sin(\varphi_0 + \varphi + \theta) \vec{j}]$$

$$+ \dot{Y} [\sin(\varphi_0 + \varphi + \theta) \vec{i} + \cos(\varphi_0 + \varphi + \theta) \vec{j}]$$

$\vec{i}$ ,  $\vec{j}$ ,  $\vec{K}$  分别为  $O S P Z$  坐标系的单位矢量

$$\vec{\omega} \times \vec{r}_0 = \dot{\theta} \vec{K} \times \{ [X_0 \cos(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \sin(\varphi_0 + \varphi)] \vec{i}$$

$$+ [-X_0 \sin(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \cos(\varphi_0 + \varphi)] \vec{j} \}$$

$$= \dot{\theta} \{ [X_0 \cos(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \sin(\varphi_0 + \varphi)] \vec{j}$$

$$- [-X_0 \sin(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \cos(\varphi_0 + \varphi)] \vec{i} \}$$

$$\vec{V}_0 = \{ \dot{X} \cos(\varphi_0 + \varphi + \theta) + \dot{Y} \sin(\varphi_0 + \varphi + \theta) \}$$

$$- \dot{\theta} [-X_0 \sin(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \cos(\varphi_0 + \varphi)] \vec{i}$$

$$+ \{ -\dot{X} \sin(\varphi_0 + \varphi + \theta) + \dot{Y} \cos(\varphi_0 + \varphi + \theta) \}$$

$$\begin{aligned}
& + \dot{\theta} (X_0 \cos(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \sin(\varphi_0 + \varphi)) \} \bar{j} \\
\vec{V}_3 = & \{ \dot{S} - \dot{\theta} (-X_0 \sin(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \cos(\varphi_0 + \varphi) + d) - \dot{\phi} d \\
& + \dot{X} \cos(\varphi_0 + \varphi + \theta) + \dot{Y} \sin(\varphi_0 + \varphi + \theta) \} \bar{i} \\
& + \{ \dot{\theta} (X_0 \cos(\varphi_0 + \varphi) + Y_0 \sin(\varphi_0 + \varphi) + S) + \dot{\phi} S \\
& - \dot{X} \sin(\varphi_0 + \varphi + \theta) + \dot{Y} \cos(\varphi_0 + \varphi + \theta) \} \bar{j}
\end{aligned}$$

令  $\alpha = \varphi_0 + \varphi + \theta$ ,  $\beta = \varphi_0 + \varphi$

则有:

$$\begin{aligned}
\vec{V}_3 = & \{ \dot{S} - \dot{\theta} (-X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta + d) - \dot{\phi} d \\
& + \dot{X} \cos \alpha + \dot{Y} \sin \alpha \} \bar{i} \\
& + \{ \dot{\theta} (X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta + S) + \dot{\phi} S \\
& - \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha \} \bar{j}
\end{aligned} \quad (13-27)$$

同理推得  $\vec{V}_2$ :

$$\begin{aligned}
\vec{V}_2 = & \{ -\dot{\theta} (-X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta + P_2) - \dot{\phi} P_2 \\
& + \dot{X} \cos \alpha + \dot{Y} \sin \alpha \} \bar{i} \\
& + \{ \dot{\theta} (X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta + S_2) - \dot{\phi} S_2 \\
& - \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha \} \bar{j}
\end{aligned} \quad (13-28)$$

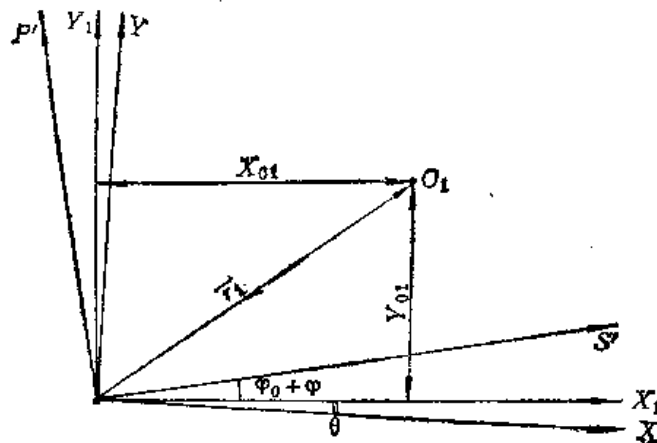


图13-7 炮架部分运动分析图

$$\begin{aligned}
\vec{V}_1 = & \vec{V}_{0s} + \vec{\omega} \times \vec{r}_1 \\
\vec{r}_1 = & (X_{01} \cos \beta + Y_{01} \sin \beta) \bar{i} + (-X_{01} \sin \beta + Y_{01} \cos \beta) \bar{j} \\
\vec{\omega} \times \vec{r}_1 = & \dot{\theta} \vec{k} \times [(X_{01} \cos \beta + Y_{01} \sin \beta) \bar{i} \\
& + (-X_{01} \sin \beta + Y_{01} \cos \beta) \bar{j}] \\
\vec{V}_1 = & [-\dot{\theta} (-X_{01} \sin \beta + Y_{01} \cos \beta) + \dot{X} \cos \alpha + \dot{Y} \sin \alpha] \bar{i} \\
& + [\dot{\theta} (X_{01} \cos \beta + Y_{01} \sin \beta) - \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha] \bar{j}
\end{aligned} \quad (13-29)$$

由此得到各质点的动能, 也即得到了系统的动能。

$$\begin{aligned}
T_1 = & \frac{1}{2} M_1 \{ [-\dot{\theta} (-X_{01} \sin \beta + Y_{01} \cos \beta) + \dot{X} \cos \alpha + \dot{Y} \sin \alpha]^2 \\
& + [\dot{\theta} (X_{01} \cos \beta + Y_{01} \sin \beta) - \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha]^2 \} + \frac{1}{2} J_1 \dot{\theta}^2
\end{aligned} \quad (13-30)$$

$$\begin{aligned}
T_2 = & -\frac{1}{2} M_2 \{ [\dot{\zeta} - \dot{\theta}(-X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta + P_2) - \dot{\phi}P_2 + \dot{X} \cos \alpha + \dot{Y} \sin \alpha]^2 \\
& + [\dot{\theta}(X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta + S_2) + \dot{\phi}S_2 - \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha]^2 \} \\
& + \frac{1}{2} J_2 (\dot{\theta} + \dot{\phi})^2
\end{aligned} \quad (13-31)$$

$$\begin{aligned}
T_3 = & -\frac{1}{2} M_3 \{ [\dot{\zeta} - \dot{\theta}(-X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta + d) - \dot{\phi}d + \dot{X} \cos \alpha + \dot{Y} \sin \alpha]^2 \\
& + [\dot{\theta}(X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta + S) + \dot{\phi}S - \dot{X} \sin \alpha + \dot{Y} \cos \alpha]^2 \} \\
& + \frac{1}{2} J_3 (\dot{\theta} + \dot{\phi})^2
\end{aligned} \quad (13-32)$$

系统动能  $T = T_1 + T_2 + T_3$ 。

## 2. 广义力 $Q_r$

使所要求的广义坐标方向上的微增量  $\delta_{qr}$  不为 0，而其余的广义坐标的微增量全为 0，求得该广义坐标方向的广义力的微功  $\delta W_{qr}$ ，则有：

$$\delta W_{qr} = Q_r \delta_{qr}$$

广义力即为：

$$Q_r = \frac{\delta W_{qr}}{\delta_{qr}} \quad (13-33)$$

### 1) $Q_x$

$$\begin{aligned}
\delta W_x = Q_x \delta_x = & N_{Bx} \delta_x - f_A N_{Ay} \operatorname{sign} [\dot{X} - \dot{\theta}(\Delta H \\
& - Y + Y'_2)] \delta_x - P_{Pr} \cos \alpha \delta_x
\end{aligned} \quad (13-34)$$

$$\begin{aligned}
Q_x = & N_{Bx} - f_A N_{Ay} \operatorname{sign} [\dot{X} - \dot{\theta}(\Delta H - Y + Y'_2)] \\
& - P_{Pr} \cos \alpha
\end{aligned} \quad (13-35)$$

### 2) $Q_y$

$$\begin{aligned}
\delta W_y = Q_y \delta_y = & N_{By} \delta_y - (M_1 + M_2 + M_3) g \delta_y \\
& - P_{Pr} \sin \alpha \delta_y + N_{Ay} \delta_y
\end{aligned} \quad (13-36)$$

$$Q_y = N_{Ay} + N_{By} - (M_1 + M_2 + M_3) g - P_{Pr} \sin \alpha \quad (13-37)$$

### 3) $Q_\theta$

$$\begin{aligned}
\delta W_\theta = Q_\theta \delta_\theta = & N_{Ay} L \cos(\xi_0 + \theta) \delta_\theta - M_3 g \cos \alpha (S + X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta) \delta_\theta \\
& + M_3 g \sin \alpha (d - X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta) \delta_\theta - M_2 g \cos \alpha (S_2 + X_0 \cos \beta \\
& + Y_0 \sin \beta) \delta_\theta + M_3 g \sin \alpha (P_2 - X_0 \cos \beta + Y_0 \cos \beta) \delta_\theta - M_1 g (X_{01} \cos \theta \\
& - Y_{01} \sin \theta) \delta_\theta + f_A N_{Ay} \left[ L \sin(\xi_0 + \theta) - h_{20} + \frac{N_{Ay}}{K_3} \right] \operatorname{sign} [\dot{X} \\
& - \dot{\theta}(\Delta H - Y + Y'_2)] \delta_\theta + P_{Pr} \{ d + e + (H_{s1} - h_{20} \\
& + L \sin(\xi_0 + \theta)) \cos \alpha - L \cos(\xi_0 + \theta) \sin \alpha \} \delta_\theta
\end{aligned} \quad (13-38)$$

$$\begin{aligned}
Q_\theta = & N_{Ay} L \cos(\xi_0 + \theta) - M_3 g \cos \alpha (S + X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta) + M_3 g \sin \alpha (d \\
& - X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta) - M_2 g \cos \alpha (S_2 + X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta) \\
& + M_3 g \sin \alpha (P_2 - X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta) - M_1 g (X_{01} \cos \theta - Y_{01} \sin \theta) \\
& + f_A N_{Ay} \left[ L \sin(\xi_0 + \theta) - h_{20} + \frac{N_{Ay}}{K_3} \right] \operatorname{sign} [\dot{X} - \dot{\theta}(\Delta H - Y + Y'_2)]
\end{aligned}$$

$$+P_{rr}\{d+e+[H_{z1}-h_{z0}+L\sin(\xi_0+\theta)]\cos\alpha-L\cos(\xi_0+\theta)\sin\alpha\} \quad (13-39)$$

4)  $Q_v$ 

$$\begin{aligned} \delta W_v = Q_v \delta v = & -M_G \delta v + P_{rr}(e+d)\delta v + M_P \delta v \\ & -M_3 g(S\cos\alpha - d\sin\alpha)\delta v \\ & -M_2 g(S_2\cos\alpha - P_2\sin\alpha)\delta v \end{aligned} \quad (13-40)$$

$$\begin{aligned} Q_v = & -M_G + P_{rr}(e+d) - M_3 g(S\cos\alpha - d\sin\alpha) \\ & -M_2 g(S_2\cos\alpha - P_2\sin\alpha) + M_P \end{aligned} \quad (13-41)$$

5)  $Q_s$ 

$$\begin{aligned} \delta W_s = Q_s \delta s = & -P_{rs}\delta s - M_3 g \sin\alpha \delta s + [1 - v_f \operatorname{sign}(\dot{s})]P_f \delta s \\ & - \left[ (1 + v_s)\phi_0 + F_{sx} + F_{sf} + f_x(|N_1| + |N_2|) + 2\frac{M_{hs}}{L_h}f_x \right] \operatorname{sign}(\dot{s})\delta s \end{aligned} \quad (13-42)$$

$$\begin{aligned} Q_s = & -P_{rs} - M_3 g \sin\alpha + [1 - v_f \operatorname{sign}(\dot{s})]P_f \\ & - \left[ (1 + v_s)\phi_0 + F_{sx} + F_{sf} + f_x(|N_1| + |N_2|) + 2f_x \frac{M_{hs}}{L_h} \right] \operatorname{sign}(\dot{s}) \end{aligned} \quad (13-43)$$

### 3. 方程推导

由拉格朗日第二类方程

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_r} - \frac{\partial T}{\partial q_r} = Q_r$$

只要将前面已求出的系统动能和各广义位标的广义力分别代入求导和化简, 就得到一组微分方程组, 应注意的是不同的广义力对应于不同的系统, 其系统的动能也相应不同。

$$\begin{aligned} (M_1 + M_2 + M_3)\ddot{X} - (M_1 X_{01} \sin\theta + M_1 Y_{01} \cos\theta + M_2 X_0 \sin\theta \\ + M_2 Y_0 \cos\theta + M_2 P_2 \cos\alpha + M_2 S_2 \sin\alpha + M_3 X_0 \sin\theta \\ + M_3 Y_0 \cos\theta + M_3 d \cos\alpha + M_3 S \sin\alpha)\ddot{\theta} - (M_2 P_2 \cos\alpha \\ + M_2 S_2 \sin\alpha + M_3 d \cos\alpha + M_3 S \sin\alpha)\ddot{\phi} + M_3 \cos\alpha \ddot{\xi} \\ - (M_1 X_{01} \cos\theta - M_1 Y_{01} \sin\theta + M_2 X_0 \cos\theta - M_2 Y_0 \sin\theta \\ - M_2 P_2 \sin\alpha + M_2 S_2 \cos\alpha + M_3 X_0 \cos\theta - M_3 Y_0 \sin\theta \\ - M_3 d \sin\alpha + M_3 S \cos\alpha)\dot{\theta}^2 + (M_2 P_2 \sin\alpha - M_2 S_2 \cos\alpha \\ + M_3 d \sin\alpha - M_3 S \cos\alpha)\dot{\phi}^2 - 2M_3 \sin\alpha \dot{\xi} \dot{\theta} - 2M_3 \sin\alpha \dot{\xi} \dot{\phi} \\ + (2M_2 P_2 \sin\alpha - 2M_2 S_2 \cos\alpha + 2M_3 d \sin\alpha \\ - 2M_3 S \cos\alpha)\dot{\phi} \dot{\theta} = N_{sx} - f_s N_{sx} \operatorname{sign}(\dot{X} - \dot{\theta}(\Delta H - Y + Y'_2)) \\ - P_{rr} \cos\alpha \end{aligned} \quad (13-44)$$

$$\begin{aligned} (M_1 + M_2 + M_3)\ddot{Y} + (M_1 X_{01} \cos\theta - M_1 Y_{01} \sin\theta + M_2 X_0 \cos\theta \\ - M_2 Y_0 \sin\theta - M_2 P_2 \sin\alpha + M_2 S_2 \cos\alpha + M_3 X_0 \cos\theta \\ - M_3 Y_0 \sin\theta - M_3 d \sin\alpha + M_3 S \cos\alpha)\ddot{\theta} - (M_2 P_2 \sin\alpha \\ - M_2 S_2 \cos\alpha + M_3 d \sin\alpha - M_3 S \cos\alpha)\ddot{\phi} + M_3 \dot{\xi} \sin\alpha \\ - (M_1 X_{01} \sin\theta + M_1 Y_{01} \cos\theta + M_2 X_0 \sin\theta + M_2 Y_0 \cos\theta \\ + M_2 P_2 \cos\alpha + M_2 S_2 \sin\alpha + M_3 X_0 \sin\theta + M_3 Y_0 \cos\theta \\ + M_3 d \cos\alpha + M_3 S \sin\alpha)\dot{\theta}^2 - (M_2 P_2 \cos\alpha + M_2 S_2 \sin\alpha \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + M_3 d \cos \alpha + M_3 S \sin \alpha ) \dot{\phi}^2 + 2 M_3 \cos \alpha \dot{S} \dot{\theta} + 2 M_3 \cos \alpha \dot{S} \dot{\phi} \\
& - (2 M_2 P_2 \cos \alpha + 2 M_2 S_2 \sin \alpha + 2 M_3 d \cos \alpha \\
& + 2 M_3 S \sin \alpha ) \dot{\theta} \dot{\phi} = N_{AV} + N_{BV} - (M_1 + M_2 + M_3) g \\
& - P_{F1} \sin \alpha
\end{aligned} \tag{13-45}$$

$$\begin{aligned}
& (M_1 X_{01}^2 + M_1 Y_{01}^2 + M_2 X_0^2 + M_2 Y_0^2 + M_3 X_0^2 + M_3 Y_0^2 + M_2 P_2^2 \\
& + M_2 S_2^2 + M_3 d^2 + M_3 S^2 + J_1 + J_2 + J_3 - 2 M_2 X_0 P_2 \sin \beta \\
& + 2 M_2 X_0 S_2 \cos \beta + 2 M_2 Y_0 P_2 \cos \beta + 2 M_2 Y_0 S_2 \sin \beta \\
& - 2 M_3 X_0 d \sin \beta + 2 M_3 X_0 S \cos \beta + 2 M_3 Y_0 d \cos \beta \\
& + 2 M_3 Y_0 S \sin \beta ) \ddot{\theta} - (M_1 X_{01} \sin \theta + M_1 Y_{01} \cos \theta \\
& + M_2 X_0 \sin \theta + M_2 Y_0 \cos \theta + M_3 X_0 \sin \theta + M_3 Y_0 \cos \theta \\
& + M_2 P_2 \cos \alpha + M_2 S_2 \sin \alpha + M_3 d \cos \alpha + M_3 S \sin \alpha ) \ddot{X} \\
& + (M_1 X_{01} \cos \theta - M_1 Y_{01} \sin \theta + M_2 X_0 \cos \theta - M_2 Y_0 \sin \theta \\
& + M_3 X_0 \cos \theta - M_3 Y_0 \sin \theta - M_2 P_2 \sin \alpha + M_2 S_2 \cos \alpha \\
& - M_3 d \sin \alpha + M_3 S \cos \alpha ) \ddot{Y} - [(M_2 P_2 X_0 - M_2 S_2 Y_0 \\
& + M_3 d X_0 - M_3 S Y_0) \sin \beta - (M_2 P_2 Y_0 + M_2 S_2 X_0 \\
& + M_3 d Y_0 + M_3 S X_0) \cos \beta - M_2 (P_2^2 + S_2^2) - M_3 (d^2 + S^2) \\
& - J_2 - J_3] \ddot{\phi} + M_3 (X_0 \sin \beta - Y_0 \cos \beta - d) \ddot{S} \\
& + 2 M_3 (S + X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta) \dot{S} \dot{\theta} + 2 M_3 (S + X_0 \cos \beta \\
& + Y_0 \sin \beta) \dot{S} \dot{\phi} - [(M_2 P_2 X_0 - M_2 S_2 Y_0 + M_3 d X_0 \\
& - M_3 S Y_0) \cos \beta + (M_2 P_2 Y_0 + M_2 S_2 X_0 + M_3 d Y_0 \\
& + M_3 S X_0) \sin \beta] \dot{\phi}^2 - (2 M_2 X_0 P_2 \cos \beta + 2 M_2 X_0 S_2 \sin \beta \\
& + 2 M_2 Y_0 P_2 \sin \beta - 2 M_2 Y_0 S_2 \cos \beta + 2 M_3 X_0 d \cos \beta \\
& + 2 M_3 X_0 S \sin \beta + 2 M_3 Y_0 d \sin \beta \\
& - 2 M_3 Y_0 S \cos \beta) \dot{\phi} \dot{\theta} = N_{AV} L \cos(\xi_0 + \theta) - M_3 g \cos \alpha (S \\
& + X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta) + M_3 g \sin \alpha (d - X_0 \sin \beta \\
& + Y_0 \cos \beta) - M_2 g \cos \alpha (S_2 + X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta) \\
& + M_2 g \sin \alpha (P_2 - X_0 \sin \beta + Y_0 \cos \beta) \\
& - M_1 g (X_{01} \cos \theta - Y_{01} \sin \theta) + f_A N_{AV} [L \sin(\xi_0 + \theta) \\
& - h_{20} + \frac{N_{AV}}{K_3}] \text{sign}(\dot{X} - \dot{\theta}(\Delta H - Y + Y_2')) \\
& + P_{F1} \{d + e + [H_{x1} - h_{20} + L \sin(\xi_0 + \theta)] \cos \alpha \\
& - L \cos(\xi_0 + \theta) \sin \alpha \}
\end{aligned} \tag{13-46}$$

$$\begin{aligned}
& [-M_2 P_2 (X_0 \sin \beta - Y_0 \cos \beta - P_2) + M_2 S_2 (X_0 \cos \beta \\
& + Y_0 \sin \beta + S_2) - M_3 d (X_0 \sin \beta - Y_0 \cos \beta - d) \\
& + M_3 S (X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta + S) + J_2 + J_3] \ddot{\theta} \\
& - [M_2 (\dot{P}_2 \cos \alpha + S_2 \sin \alpha) + M_3 (d \cos \alpha + S \sin \alpha)] \ddot{X} \\
& - [M_2 (P_2 \sin \alpha - S_2 \cos \alpha) + M_3 (d \sin \alpha - S \cos \alpha)] \ddot{Y} \\
& - M_3 d \ddot{S} + [M_2 (P_2^2 + S_2^2) + M_3 (d^2 + S^2) + J_2 + J_3] \ddot{\phi} \\
& + 2 M_3 S \dot{S} \dot{\theta} + 2 M_3 S \dot{S} \dot{\phi} + \{[M_2 (P_2 X_0 - S_2 Y_0) + M_3 (d X_0
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& -SY_0))\cos\beta + [M_2(P_2Y_0 + S_2X_0) + M_3(dY_0 \\
& + SX_0)]\sin\beta \} \dot{\theta}^2 = -M_c + P_{pr}(e+d) - M_3g(S\cos\alpha \\
& - d\sin\alpha) - M_2g(S_2\cos\alpha - P_2\sin\alpha) + M_p
\end{aligned} \quad (13-47)$$

$$\begin{aligned}
M_3\{\ddot{S} + (X_0\sin\beta - Y_0\cos\beta - d)\ddot{\theta} - d\ddot{\varphi} + \cos\alpha\ddot{X} + \sin\alpha\ddot{Y} \\
- 2S\dot{\varphi}\dot{\theta} - (X_0\cos\beta + Y_0\sin\beta + S)\dot{\theta}^2 - S\dot{\varphi}^2\} = -P_{pr} \\
- M_3g\sin\alpha + [(1 - v_f\text{sign}(\dot{S}))P_f - \{(1 + v_s)\phi_0 \\
+ F_{ex} + F_{ef} + f_T(|N_1| + |N_2|) + 2f_T\frac{M_{hx}}{L_h}\}\text{sign}(\dot{S})]
\end{aligned} \quad (13-48)$$

#### 4. 主动力和约束反力

##### 1) 炮膛合力 $P_{pr}$

$$P_{pr} = \begin{cases} \frac{1}{\varphi_1} \left( 1 + \frac{\omega_1}{2q} \right) S_d p & 0 \leq t \leq t_g \\ \chi P_g e^{-\frac{t-t_g}{b}} & t_g \leq t < t_K \\ 0 & t_K \leq t \end{cases} \quad (13-49)$$

$$P_g = \frac{1}{\varphi_1} \left( \varphi_{11} + \frac{\omega_1}{2q} \right) S_d p_g \quad (13-50)$$

##### 2) 复进机力 $P_f$

$$P_f = \begin{cases} P_{f0} \left[ \frac{W_0}{W_0 - A_f(S_0 - S)} \right]^n & \dot{S} < 0 \\ P_{f0} \left[ \frac{W_0}{W_0 - A_f(S_0 - S)} \right]^n - \frac{K_K \gamma}{20g} - \frac{A_f^3}{a_K^2} \dot{S}^2 & \dot{S} > 0 \end{cases} \quad (13-51)$$

如果无复进节制活瓣, 则  $\frac{K_K \gamma}{20g} - \frac{A_f^3}{a_K^2} \dot{S}^2 = 0$

##### 3) 驻退机液压阻力 $\phi_0$

(1) 带沟槽式复进节制器的节制杆式驻退机, 例 85 J, 122 J, 59-1 式 130 J;

$$\dot{S} < 0$$

$$\phi_0 = \frac{K_{11}\gamma}{20g} - \frac{(A_0 - A_p)^3}{\left(a_x + \sqrt{\frac{K_{11}}{K_{41}}} a_{01}\right)^2} \dot{S}^2 + \frac{K_{21}\gamma}{20g} - \frac{A_{f1}^3}{\Omega_1^2} \dot{S}^2 \quad (13-52)$$

当  $\dot{S} = 0$  时,  $\lambda = S_0 - S_0$

$$\dot{S} > 0, -(\lambda - S_0 - \rho) \geq S \geq -(\lambda - S_0)$$

$$\phi_0 = \frac{K_{22}\gamma}{20g} - \frac{A_{f2}(A_{f2} + a_f)^2}{\left(a_f + \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{42}}} a_{02}\right)^2} \dot{S}^2 \quad (13-53)$$

$$\dot{S} > 0, S \geq -(\lambda - S_0 - \rho)$$



$$\phi_0 = \frac{K_{22}\gamma}{20g} \frac{A_{fj}(A_{fj}+a_f)^2}{\left(a_f + \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{42}}}a_{02}\right)^2} \dot{S}^2 + \frac{K_{12}\gamma}{20g} \frac{A_{0f}(A_{0f}+a_x)^2}{\left(a_x + \sqrt{\frac{K_{12}}{K_{41}}}a_{01}\right)^2} \dot{S}^2 \quad (13-54)$$

(2) 混合式驻退机, 例 122 L,

$$\dot{S} < 0$$

$$\phi_0 = \frac{K_{11}\gamma}{20g} \frac{(A_0 + A_{fj} - A_p)A_0^2}{\left(a_x + \sqrt{\frac{K_{11}}{K_{41}}}a_f\right)^2} \dot{S}^2 \quad (13-55)$$

当  $\dot{S} = 0$  时,  $\lambda = S_0 - S$

$$\dot{S} > 0, -(\lambda - S_0 - \rho) \geq S \geq -(\lambda - S_0)$$

$$\phi_0 = 0$$

$$\dot{S} > 0, S \geq -(\lambda - S_0 - \rho)$$

$$\phi_0 = \frac{K_{22}\gamma}{20g} \frac{A_{0f}(A_{0f}+a_f)^2}{a_f^2} \dot{S}^2 \quad (13-57)$$

(3) 变后坐节制杆式驻退机, 例 59-130 J, 59-152 J,

$$\dot{S} < 0$$

$$\phi_0 = \frac{K_{11}\gamma}{20g} \frac{(A_0 + a_{x1})^2}{(a_{x1} + a_{x2})^2} (A_0 - A_{fj}) \dot{S}^2 + \frac{K_{21}\gamma}{20g} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \dot{S}^2 \quad (13-58)$$

$a_{x2}$  是随射角变化而改变的流液孔, 短后坐时,  $a_{x2} = 0$ , 长后坐时,  $a_{x2} = \text{常数}$ 。

当  $\dot{S} = 0$  时,  $\lambda = S_0 - S$ 。

$$\dot{S} > 0, -(\lambda - S_0 - \rho) \geq S > -(\lambda - S_0)$$

$$\phi_0 = \frac{K_{22}\gamma}{20g} \frac{A_{fj}(A_{fj}+a_f)^2}{\left(a_f + \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{42}}}a_{02}\right)^2} \dot{S}^2 \quad (13-59)$$

$$\dot{S} > 0, \dot{S} \geq -(\lambda - S_0 - \rho)$$

$$\phi_0 = \frac{K_{22}\gamma}{20g} \frac{A_{fj}(A_{fj}+a_f)^2}{\left(a_f + \sqrt{\frac{K_{22}}{K_{42}}}a_{02}\right)^2} \dot{S}^2 + \frac{K_{12}\gamma}{20g} \frac{(A_{0f}+a_{x1})^2 A_{0f}}{(a_{x1}+a_{x2})^2} \dot{S}^2 \quad (13-60)$$

4) 平衡机提供的力矩  $M_p$

(1) 推式弹簧平衡机

$$M_p = n_p(K_p f_p + C_p \dot{f}_p) \frac{r_1 r_2}{l_p} \sin(\beta_0 + \varphi_0 + \varphi) \quad (13-61)$$

$$f_p = l_{pm} - l_p$$

$$l_p = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\beta_0 + \varphi_0 + \varphi)} \quad (13-62)$$

$$\dot{f}_p = + \frac{r_1 r_2}{l_p} \sin(\beta_0 + \varphi_0 + \varphi) \dot{\varphi} \quad (13-63)$$

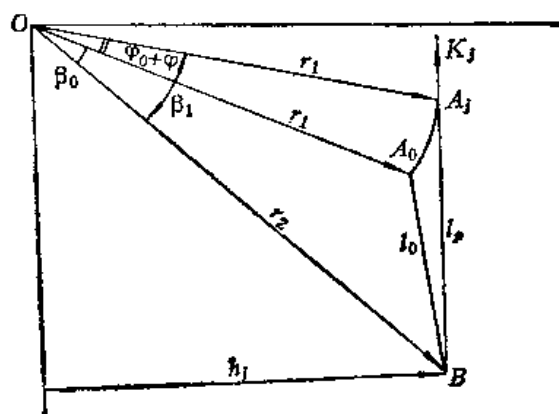


图13-8 推式平衡机受力分析

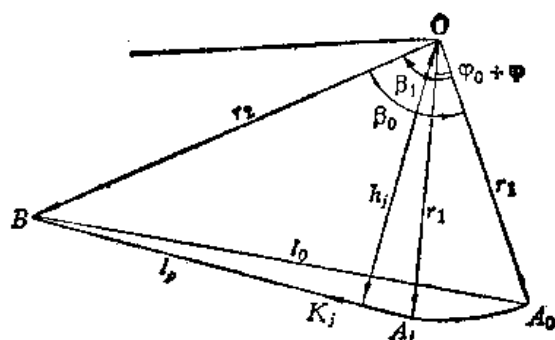


图13-9 拉式平衡机受力分析

$$M_F = n_F \left[ K_F f_F + C_F \frac{r_1 r_2}{l_F} \sin(\beta_0 + \varphi_0 + \varphi) \dot{\varphi} \right] \frac{r_1 r_2}{l_F} \sin(\beta_0 + \varphi_0 + \varphi) \quad (13-64)$$

## (2) 拉式弹簧平衡机

$$M_F = n_F \left[ K_F f_F - C_F \frac{r_1 r_2}{l_F} \sin(\beta_0 - \varphi_0 - \varphi) \dot{\varphi} \right] \frac{r_1 r_2}{l_F} \sin(\beta_0 - \varphi_0 - \varphi) \quad (13-65)$$

$$l_F = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\beta_0 - \varphi_0 - \varphi)} \quad (13-66)$$

## (3) 推式气压平衡机

$$M_F = n_F P_0 \left( \frac{S_{03}}{S_{03} - f_F} \right)^K \left[ 1 - 4f_{Fm} \frac{n_{F3} l_{F3}}{d_1} \operatorname{sign}(\dot{\varphi}) \right] \frac{r_1 r_2}{l_F} \sin(\beta_0 + \varphi_0 + \varphi) \quad (13-67)$$

$$f_F = l_m - l_F$$

$$P_0 = -\frac{\pi}{4} d_1^2 p_0 = A_{P3} p_0$$

$$S_{03} = \frac{W_{0P}}{A_{P3}}$$

$$l_F = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\beta_0 + \varphi_0 + \varphi)}$$

## (4) 拉式气压平衡机

$$M_F = n_F P_0 \left( \frac{S_{03}}{S_{03} - f_F} \right)^K \left[ 1 - 4f_{Fm} \frac{n_{F3} l_{F3}}{d_1} \operatorname{sign}(\dot{\varphi}) \right] \frac{r_1 r_2}{l_F} \sin(\beta_0 - \varphi_0 - \varphi) \quad (13-68)$$

$$l_F = \sqrt{r_1^2 + r_2^2 - 2r_1 r_2 \cos(\beta_0 - \varphi_0 - \varphi)}$$

5) 高低机齿轮, 齿弧及支臂所提供的力矩  $M_G$ 

把高低机齿轮, 齿弧及支臂合成作为一个弹簧, 它是振动角  $\varphi$  的线性函数。

$$M_G = K_G \varphi + C_G \dot{\varphi} \quad (13-69)$$

6) 约束反力  $N_{BX}$ ,  $N_{BY}$ 

$$N_{BX} = \begin{cases} -(K_1 X + C_1 \dot{X}) & -A_1 \leq X < 0 \\ -(K_2 (X + A_1) + N_A + C_1 \dot{X}) & X < -A_1 \\ 0 & X \geq 0 \end{cases} \quad (13-70)$$

$$N_{BY} = \begin{cases} -(K_1 Y + C_1 \dot{Y}) & -A_1 \leq Y < 0 \\ -[K_2(Y + A_1) + N_A + C_1 \dot{Y}] & Y < -A_1 \\ 0 & Y \geq 0 \end{cases} \quad (13-71)$$

$$N_A = -K_1 A_1$$

$C_1$  为土壤阻尼系数

7) 约束反力  $N_{AY}$

$N_{AY}$  是广义坐标  $\theta$  和  $Y$  的函数。火炮发射前则有:

$$N_{AY_0} = \frac{D_{0\varphi_0}}{L \cos \xi_0} (M_1 + M_2 + M_3) g \quad (13-72)$$

$$N_{BY_0} = \left( 1 - \frac{D_{0\varphi_0}}{L \cos \xi_0} \right) (M_1 + M_2 + M_3) g \quad (13-73)$$

$$\begin{aligned} (M_1 + M_2 + M_3) g D_{0\varphi_0} &= (M_1 + M_2 + M_3) g D_{00} \\ &- (M_2 + M_3) g l_g [\cos \alpha_2 - \cos(\alpha_2 + \varphi_0)] \end{aligned} \quad (13-74)$$

(1) 前支撑点是座板

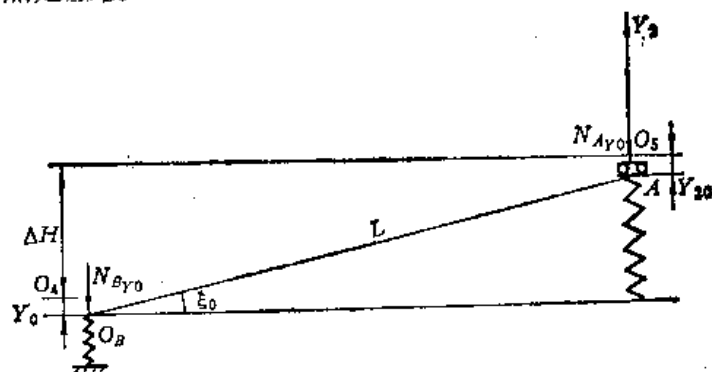


图13-10 火炮发射前土壤受力分析

研究发射前土壤的受力情况, 则有:

$$-N_{AY_0} = \begin{cases} K_1 Y_{20} & -A_1 \leq Y_{20} < 0 \\ K_2(Y_{20} + A_1) + N_A & Y_{20} < -A_1 \end{cases} \quad (13-75)$$

$$Y_{20} = \begin{cases} -\frac{N_{AY_0}}{K_1} & N_{AY_0} \leq -N_A \\ -\frac{N_{AY_0} + N_A}{K_2} - A_1 & N_{AY_0} > -N_A \end{cases} \quad (13-76)$$

同理可以得到  $Y_0$ .

$$-N_{BY_0} = \begin{cases} K_1 Y_0 & -A_1 \leq Y_0 < 0 \\ K_2(Y_0 + A_1) + N_A & Y_0 < -A_1 \end{cases} \quad (13-77)$$

$$Y_0 = \begin{cases} -\frac{N_{BY_0}}{K_1} & N_{BY_0} \leq -N_A \\ -\frac{N_{BY_0} + N_A}{K_2} - A_1 & N_{BY_0} > -N_A \end{cases} \quad (13-78)$$

$$\sin \xi_0 = \frac{\Delta H - Y_0 + Y_{z0}}{L} \quad (13-79)$$

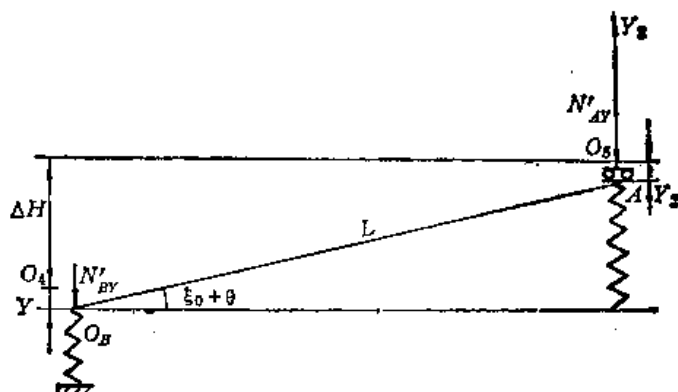


图13-11 火炮发射时土壤受力分析

任意时刻，仍以土壤为研究对象，则有：

$$N'_{AY} = \begin{cases} 0 & Y_2 \geq 0 \\ K_1 Y_2 + C_1 \dot{Y}_2 & -A_1 \leq Y_2 < 0 \\ K_2 (Y_2 + A_1) + N_A + C_1 \dot{Y}_2 & Y_2 < -A_1 \end{cases} \quad (13-80)$$

$$\sin(\xi_0 + \theta) = \frac{\Delta H - Y + Y_2}{L} \quad (13-81)$$

$$L \sin(\xi_0 + \theta) = \Delta H - Y + Y_2$$

等式两边对时间  $t$  求导：

$$\dot{Y}_2 = L \dot{\theta} \cos(\xi_0 + \theta) + \dot{Y}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + Y_2}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + Y_{z0}}{L}$$

作用于火炮座板上的力  $N_{AY}$  与作用于土壤上的力  $N'_{AY}$  是一对作用力和反作用力，则：

$$N_{AY} = -N'_{AY}$$

$$N_{AY} = \begin{cases} 0 & \left( \theta \geq \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + Y_{z0}}{L} \right) \\ -K_1 [L \sin(\xi_0 + \theta) - \Delta H + Y] - C_1 [L \dot{\theta} \cos(\xi_0 + \theta) + \dot{Y}] & \left( \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + Y_{z0}}{L} > 0 \geq \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y - A_1}{L} \right. \\ \quad \left. - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + Y_{z0}}{L} \right) \\ -K_2 [L \sin(\xi_0 + \theta) - \Delta H + Y + A_1] - N_A - C_1 [L \dot{\theta} \cos(\xi_0 + \theta) + \dot{Y}] & \left( \dot{\theta} < \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y - A_1}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + Y_{z0}}{L} \right) \end{cases}$$

(13-82)

(2) 前支撑点为车轮时





$$\begin{aligned}
N_{AY} = & \left\{ \begin{aligned} & 0 \quad \left( 0 \geq \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20}}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + Y'_{20} + h_{20}}{L} \right) \\ & - \frac{K_1 K_3}{K_1 + K_3} [L \sin(\xi_0 + \theta) - \Delta H + Y - h_{20}] - C_2 (L \dot{\theta} \cos(\xi_0 + \theta) + \dot{Y}) \\ & \quad \left( \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20}}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + Y'_{20} + h_{20}}{L} > \theta \right. \\ & \quad \left. \geq \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20} - A'_1}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20} + Y'_{20}}{L} \right) \\ & - \frac{K_2 K_3}{K_2 + K_3} [L \sin(\xi_0 + \theta) - \Delta H + Y - h_{20} + A'_1] - N_A \\ & \quad - C_2 (L \dot{\theta} \cos(\xi_0 + \theta) + \dot{Y}) \\ & \quad \left( \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20} - A'_1}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y_0 + h_{20} + Y'_{20}}{L} > \theta \geq \right. \\ & \quad \left. \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20} - B'}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20} - A'_1}{L} \right) \\ & - K_2 [L \sin(\xi_0 + \theta) - \Delta H + Y - h_{20} + B'] - N_0 \\ & \quad - C_2 (L \dot{\theta} \cos(\xi_0 + \theta) + \dot{Y}) \\ & \quad \left( \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20} - B'}{L} - \sin^{-1} \frac{\Delta H - Y + h_{20} - A'_1}{L} < \theta \right) \end{aligned} \right. \quad (13-92)
\end{aligned}$$

方程中的  $\xi_0$  是初始值, 可以用仪器测得此值, 也可以用火炮和土壤的结构参量进行计算, 现确定其函数关系。

如果  $-N_{AY_0} \geq N_A$ ,  $-N_{BY_0} \geq N_A$

$$\begin{aligned}
Y_0 &= \frac{1}{K_1} N_{BY_0} = \frac{1}{K_1} (M_1 + M_2 + M_3) g \left( 1 - \frac{D_{0Y_0}}{L \cos \xi_0} \right) \\
Y'_{20} &= -\frac{K_1 + K_3}{K_1 K_3} N_{AY_0} = -\frac{K_1 + K_3}{K_1 K_3} (M_1 + M_2 + M_3) g - \frac{D_{0Y_0}}{L \cos \xi_0} \\
\sin \xi_0 &= \frac{\Delta H - Y_0 + Y'_{20} + h_{20}}{L} = \frac{\Delta H}{L} + \frac{(M_1 + M_2 + M_3) g}{LK_1} \\
&+ \frac{h_{20}}{L} - \frac{(M_1 + M_2 + M_3) g D_{0Y_0}}{L^2 \cos \xi_0} \left( \frac{1}{K_1} + \frac{K_1 + K_3}{K_1 K_3} \right) \quad (13-93)
\end{aligned}$$

令:

$$a = \frac{(M_1 + M_2 + M_3) g}{L^2} D_{0Y_0} \left( \frac{1}{K_1} + \frac{K_1 + K_3}{K_1 K_3} \right) \quad (13-94)$$

$$b = \frac{\Delta H}{L} + \frac{(M_1 + M_2 + M_3) g}{K_1 L} + \frac{h_{20}}{L} \quad (13-95)$$

$$\sin \xi_0 + \frac{a}{\cos \xi_0} = b \quad (13-96)$$

解此三角方程可求得  $\xi_{00}$ 。

如果  $-N_{BY_0} \geq N_A$ ,  $-N_{AY_0} < N_A$

$$a = \frac{(M_1 + M_2 + M_3)}{L^2} g D_{0v_0} \left( \frac{1}{K_1} + \frac{K_2 + K_3}{K_2 K_3} \right) \quad (13-97)$$

$$b = \frac{\Delta H}{L} + \frac{(M_1 + M_2 + M_3)}{K_1 L} g + \frac{h_{20}}{L} + \frac{K_1 - K_2}{L K_2} A_1 \quad (13-98)$$

如果  $-N_{Av_0} < N_A$ ,  $-N_{Av_0} < N_A$

$$a = \frac{(M_1 + M_2 + M_3)}{L^2} g D_{0v_0} \left( \frac{1}{K_2} + \frac{K_2 + K_3}{K_2 K_3} \right) \quad (13-99)$$

$$b = \frac{\Delta H}{L} + \frac{(M_1 + M_2 + M_3)}{K_2 L} g + \frac{h_{20}}{L} \quad (13-100)$$

当前支撑点是座钣时, 只要把车轮的刚度系数  $K_3$  作无穷大处理, 同时令  $h_{20} = 0$ , 解三角方程可求得  $\xi_{00}$ 。

从上述两种前支撑情况的  $N_{Av}$  的推导, 都可以归结成前支撑点是车轮的情况。如果把  $K_3$  处理为无穷大,  $h_{20} = 0$ , 此时的  $Y'_{20} = Y_{20}$ , 这样处理的结果就是前支撑点是座钣的情况。如果  $K_1, K_2$  处理成无穷大, 这就是前支撑点是车轮的火炮放置在钢筋混凝土阵地上射击的情况。如果  $K_1, K_2, K_3$  都为无穷大,  $h_{20} = 0$ , 这就是前支撑点是座钣的火炮放置在钢筋混凝土阵地上射击的情况。

#### 8) 摇架支反力 $N_1, N_2$

摇架支反力  $N_1, N_2$  是整个系统的约束反力, 它既不能表示成广义力和广义速度的函数, 它又不是系统内的非理想约束。解拉格朗日方程组必须使  $N_1, N_2$  求得一定的函数关系。一般以后坐部分为示力对象, 向质心取矩和  $P$  坐标方向运动方程, 求取  $N_1, N_2$  的函数关系式。

#### (1) 筒型摇架

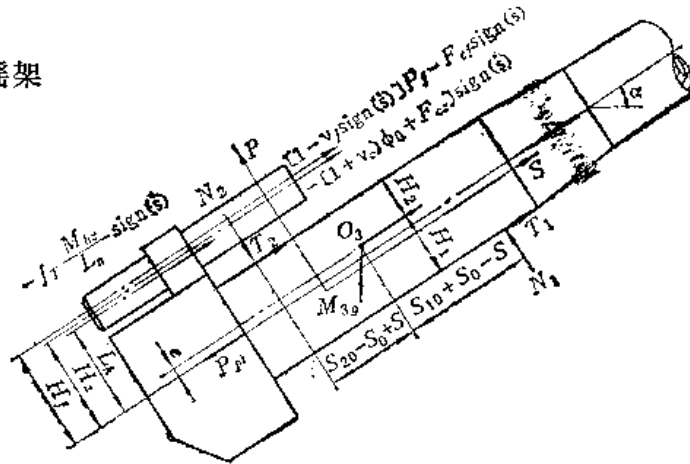


图13-14 筒型摇架后坐部分受力

$H_1$  和  $H_2$  之间只差  $2e$ , 而  $e$  只有几毫米, 为了解题的方便, 认为  $H_1$  和  $H_2$  相等,  $H_1 = H_2 = H$

$$\begin{aligned} & N_1 [S_{10} + S_0 - S - f_r H \operatorname{sign}(\dot{S})] + N_2 [S_{20} - S_0 + S \\ & \quad + f_r H \operatorname{sign}(\dot{S})] + P_{rr} e - J_s (\ddot{\phi} + \ddot{\theta}) - \{ (1 \\ & \quad - v_f \operatorname{sign}(\dot{S})) P_f - F_{af} \operatorname{sign}(\dot{S}) \} H_f + \{ (1 \\ & \quad + v_z) \phi_0 + F_{az} \} H_z \operatorname{sign}(\dot{S}) + f_r M_{kz} \operatorname{sign}(\dot{S}) = 0 \end{aligned} \quad (13-101)$$

$$\begin{aligned} & -N_1 + N_2 + M_3 g \cos \alpha + M_3 (\ddot{\theta} (X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta + S) \\ & \quad + \ddot{\phi} S - \ddot{X} \sin \alpha + \ddot{Y} \cos \alpha + 2\dot{S} (\dot{\phi} + \dot{\theta}) \\ & \quad - 2d\dot{\phi}\dot{\theta} + \dot{\theta}^2 (X_0 \sin \beta - Y_0 \cos \beta - d) - d\dot{\phi}^2) = 0 \end{aligned} \quad (13-102)$$





$$\begin{aligned}
& N_1(S_{10}+S_0-S-f_T H_1 \operatorname{sign}(\dot{S})) + N_2(S_{20}-S_0+S) \\
& - f_T [N_2 |H_2 \operatorname{sign}(\dot{S}) + P_{e1} e - J_3(\ddot{\theta} + \ddot{\varphi}) \\
& - \{[1 - v_f \operatorname{sign}(\dot{S})] P_f - F_{ef} \operatorname{sign}(\dot{S})\} H_f - \{(1 + v_z) \phi_0 \\
& + F_{ez}\} H_z \operatorname{sign}(\dot{S}) - 2f_T \frac{M_{hz}}{L_h} H_z \operatorname{sign}(\dot{S})] = 0
\end{aligned} \quad (13-109)$$

$$\begin{aligned}
& -N_1 + N_2 + M_2 g \cos \alpha + M_3 [\ddot{\theta}(X_0 \cos \beta + Y_0 \sin \beta + S) \\
& + \ddot{\varphi} S - \ddot{X} \sin \alpha + \ddot{Y} \cos \alpha + 2\dot{S}(\dot{\varphi} + \dot{\theta}) - 2d\dot{\varphi}\dot{\theta} \\
& + \dot{\theta}^2(X_0 \sin \beta - Y_0 \cos \beta - d) - \dot{\varphi}^2 d] = 0
\end{aligned} \quad (13-110)$$

如果  $N_1 > 0$ ,  $N_2 < 0$ , 则:

$$\Delta \varphi = \sin^{-1} \frac{\Delta}{S_{10} + S_{20}}$$

如果  $N_1 < 0$ ,  $N_2 < 0$ , 则:

$$\Delta \varphi = \sin^{-1} \frac{2\Delta}{S_{10} + S_{20}}$$

$$\alpha = \varphi_0 + \varphi + \Delta \varphi + \theta$$

$$\beta = \varphi_0 + \varphi + \Delta \varphi$$

### 9) 炮身回转力矩 $M_{hz}$

弹带嵌入膛线, 膛线导转侧迫使弹丸旋转, 膛线导转侧受到弹丸弹带的作用力, 其切向分力导致了回转力矩。弹带作用炮身的轴向力记作  $F_z$ , 则:

$$F_z = n_1 N (\sin \eta + f_z \cos \eta)$$

$n_1$ ——膛线条数;

$N$ ——弹带作用于膛线的正压力;

$\eta$ ——膛线缠角;

$f_z$ ——弹带和膛线的摩擦系数;

$$M_{hz} = n_1 N (\cos \eta - f_z \sin \eta) \frac{d_a + t_t}{2} \quad (13-111)$$

由火炮反后坐装置设计中炮膛合力的推导得出:

$$F_z = r = \frac{1}{\varphi_1} (\varphi_{11} - 1) S_a p \quad (13-112)$$

$$n_1 N = \frac{\varphi_{11} - 1}{\varphi_1} \frac{1}{\sin \eta + f_z \cos \eta} S_a p$$

$$M_{hz} = \frac{\varphi_{11} - 1}{\varphi_1} \frac{\cos \eta - f_z \sin \eta}{\sin \eta + f_z \cos \eta} \frac{d_a + t_t}{2} S_a p \quad (13-113)$$

$d_a$ ——火炮口径;

$t_t$ ——膛线深度;

### 5. 方程的求解

分析拉格朗日方程组 (13-44)~(13-48), 所有广义坐标对时间的二阶导数和  $N_1$ ,  $N_2$  均呈现线性表达, 在  $N_1$ ,  $N_2$  的关系式中, 二阶导数和  $N_1$ ,  $N_2$  也呈现线性表达, 为使求解计算方便, 引入  $N_1$ ,  $N_2$  为计算变量, 这样有七个未知量和有七个相应的方程, 使方程组封闭, 这必定能整理成  $\ddot{X}$ ,  $\ddot{Y}$ ,  $\ddot{\theta}$ ,  $\ddot{\varphi}$ ,  $\ddot{S}$ ,  $N_1$ ,  $N_2$  的线性代数方程组。

$$\begin{aligned}
a_{11}\ddot{X} + a_{12}\ddot{Y} + a_{13}\ddot{\theta} + a_{14}\ddot{\varphi} + a_{15}\ddot{S} + a_{16}N_1 + a_{17}N_2 &= C_1 \\
a_{21}\ddot{X} + a_{22}\ddot{Y} + a_{23}\ddot{\theta} + a_{24}\ddot{\varphi} + a_{25}\ddot{S} + a_{26}N_1 + a_{27}N_2 &= C_2 \\
a_{31}\ddot{X} + a_{32}\ddot{Y} + a_{33}\ddot{\theta} + a_{34}\ddot{\varphi} + a_{35}\ddot{S} + a_{36}N_1 + a_{37}N_2 &= C_3 \\
a_{41}\ddot{X} + a_{42}\ddot{Y} + a_{43}\ddot{\theta} + a_{44}\ddot{\varphi} + a_{45}\ddot{S} + a_{46}N_1 + a_{47}N_2 &= C_4 \\
a_{51}\ddot{X} + a_{52}\ddot{Y} + a_{53}\ddot{\theta} + a_{54}\ddot{\varphi} + a_{55}\ddot{S} + a_{56}N_1 + a_{57}N_2 &= C_5 \\
a_{61}\ddot{X} + a_{62}\ddot{Y} + a_{63}\ddot{\theta} + a_{64}\ddot{\varphi} + a_{65}\ddot{S} + a_{66}N_1 + a_{67}N_2 &= C_6 \\
a_{71}\ddot{X} + a_{72}\ddot{Y} + a_{73}\ddot{\theta} + a_{74}\ddot{\varphi} + a_{75}\ddot{S} + a_{76}N_1 + a_{77}N_2 &= C_7
\end{aligned} \quad (13-114)$$

$a_{ij}$  为结构参量和  $t$ 、 $X$ 、 $\dot{X}$ 、 $Y$ 、 $\dot{Y}$ 、 $\theta$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $\varphi$ 、 $\dot{\varphi}$ 、 $S$ 、 $\dot{S}$  的函数,  $C_i$  也是结构参量和广义坐标, 广义速度和时间的函数。

应用克莱姆法则求解方程组, 则有:

$$\begin{aligned}
\ddot{X} &= \frac{D_x}{D} = f_1(t, X, \dot{X}, Y, \dot{Y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, S, \dot{S}) \\
\ddot{Y} &= \frac{D_y}{D} = f_2(t, X, \dot{X}, Y, \dot{Y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, S, \dot{S}) \\
\ddot{\theta} &= \frac{D_\theta}{D} = f_3(t, X, \dot{X}, Y, \dot{Y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, S, \dot{S}) \\
\ddot{\varphi} &= \frac{D_\varphi}{D} = f_4(t, X, \dot{X}, Y, \dot{Y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, S, \dot{S}) \\
\ddot{S} &= \frac{D_S}{D} = f_5(t, X, \dot{X}, Y, \dot{Y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, S, \dot{S}) \\
N_1 &= \frac{D_{N_1}}{D} = f_6(t, X, \dot{X}, Y, \dot{Y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, S, \dot{S}) \\
N_2 &= \frac{D_{N_2}}{D} = f_7(t, X, \dot{X}, Y, \dot{Y}, \theta, \dot{\theta}, \varphi, \dot{\varphi}, S, \dot{S})
\end{aligned} \quad (13-115)$$

$D$ 、 $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_\theta$ 、 $D_\varphi$ 、 $D_S$ 、 $D_{N_1}$ 、 $D_{N_2}$  为函数行列式。

$$D = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{17} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{71} & a_{72} & \cdots & a_{77} \end{vmatrix} \quad (13-116)$$

$$D_x = \begin{vmatrix} c_1 & a_{12} & \cdots & a_{17} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_7 & a_{71} & \cdots & a_{77} \end{vmatrix} \quad (13-117)$$

$D_y$ 、 $D_\theta$ 、 $D_\varphi$ 、 $D_S$ 、 $D_{N_1}$ 、 $D_{N_2}$  的求法可用列向量( $C_1$   $C_2$ ..... $C_7$ ) 替换  $D$  中的相应列得到。

(13-115) 方程组求解, 可用尤格-库塔法数值积分计算, 只要将函数行列式  $D$ 、 $D_x$ 、 $D_y$ 、 $D_\theta$ 、 $D_\varphi$ 、 $D_S$ 、 $D_{N_1}$ 、 $D_{N_2}$  编入右端函数中, 取定积分步长, 编制计算程序, 输出所需要的参量与时间的变化量。编制计算程序过程中, 必须注意各约束反力的作用区间, 以及各种不同类型的火炮的不同结构型式, 其约束反力的表达式也相应不同。计算得到的各参量随时间的变化规律, 可以作为火炮总体设计和部件设计的依据。

## 第十四章 考虑液体可压缩性和筒壁

### 弹性变形的反后坐装置计算

在大威力火炮和坦克炮上,为了不使后坐长度过长,火炮结构过于庞大,通常是采取适当提高反后坐装置的工作压力的办法使后坐长度保持在较短的距离内。短后坐长的驻退机工作压力可高达 300 公斤力/厘米<sup>2</sup> 以上。在这种情况下,液体的可压缩性和筒壁弹性变形对反后坐装置工作的影响就不可忽视。不考虑它们的影响将使计算结果与实际产生较大的偏差。为此,还应掌握考虑液体可压缩性和筒变形的火炮后坐部分的后坐运动计算的方法。此处取短节制杆式驻退复进机为例。

#### 一、后坐运动方程的建立

图14-1所示为短节制杆式驻退复进机原理图。它包括驻退筒、驻退杆。驻退筒的液体通过通道  $a_1$  与储气筒相通。储气筒内有与游动活塞装配为一体的节制杆,液体和气体被游动活塞隔开。

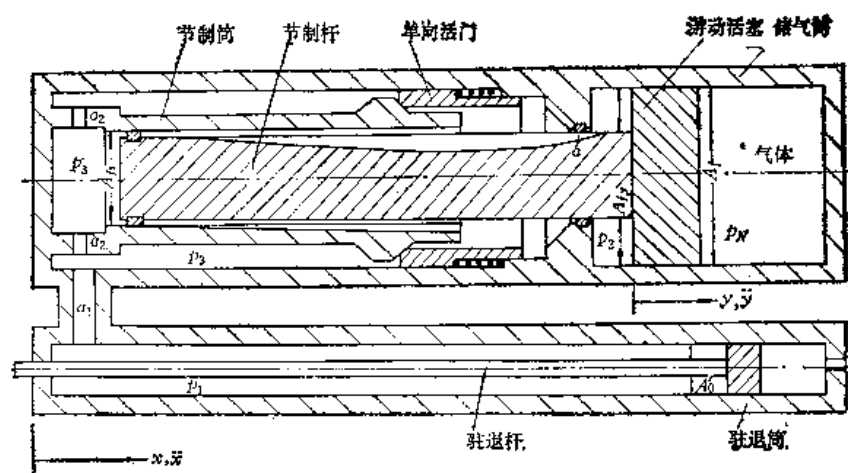


图14-1 短节制杆式驻退复进机简图

#### 1. 后坐部分的运动方程

图 14-2 为带驻退筒和储气筒的后坐部分的受力图,各腔的压力及面积均注明于图中。忽略通道  $a_1, a_2$  处的液流损失,即  $p_1 = p_3$ 。分析各腔的受力可得后坐部分的运动方程:

$$M_o \ddot{x} = P_{pr} - A_o p_1 + A_f p_f - A_{fj} p_1 - A_{fy} p_2 + Q_o \sin \varphi - F_1 - T + F_f \text{sign}(\dot{y} - \dot{x}) \quad (14-1)$$

式中  $A_{fy}$ ——游动活塞靠液体一边的面积,  $A_{fy} = A_f - A_{fj}$ ;

$\dot{y}$ ——游动活塞相对于地面的速度。

#### 2. 游动活塞的运动方程

由于考虑了液体的可压缩性和筒壁的弹性变形,所以不能再用一个传速比的系数把游动活塞的运动与后坐部分的运动联系起来,而必须独立地考虑游动活塞在各力的作用下的运动。为此,取活塞和节制杆的总体的受力图来分析。图14-3(a)为它的受力

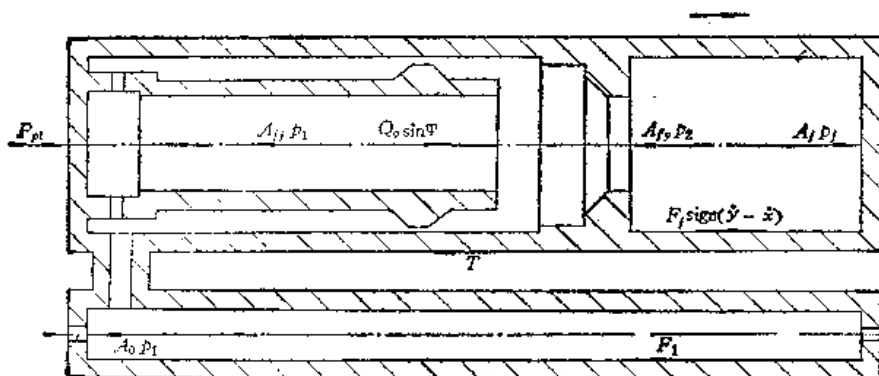


图14-2 后坐部分的受力图

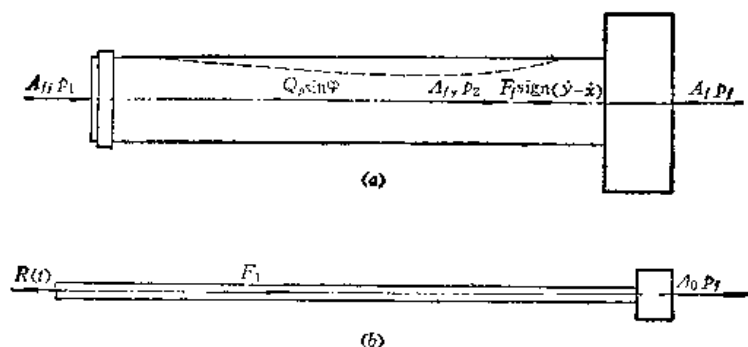


图14-3 游动活塞和驻退杆受力图

图，由此可得游动活塞的运动方程：

$$M_p \ddot{y} = A_{fj} p_1 + A_{fj} p_2 - A_f p_f - F_f \text{sign}(\dot{y} - \dot{x}) + Q_p \sin \varphi \quad (14-2)$$

其中  $Q_p$ ——游动活塞和节制杆装配总重量；

$M_p$ ——游动活塞和节制杆装配总质量。

## 二、压力 $p_1$ 和 $p_2$ 的计算

如果不考虑液体可压缩性和筒壁弹性变形的影响，方程 (14-1) 和方程 (14-2) 可由下式联系起来。

$$\begin{aligned} A_o \dot{x} &= A_{fj}(\dot{y} - \dot{x}) + a_s \omega_s \\ \text{或} \quad A_o \dot{x} &= A_{fj}(\dot{y} - \dot{x}) + A_{fj}(\dot{y} - \dot{x}) \\ \text{或} \quad A_o \dot{x} &= A_f(\dot{y} - \dot{x}) \end{aligned}$$

$$\dot{x} = -\frac{A_f}{A_o}(\dot{y} - \dot{x})$$

设  $K = \frac{A_f}{A_o}$  并代入上式得：

$$\dot{x} = K(\dot{y} - \dot{x}) \quad (14-3)$$

这样就可以利用伯努利方程和质量方程（连续方程）导出  $p_1$  和  $p_2$  的表达式。这正如第十章所讨论的。但在所研究的情况下，由于液体压力增加造成的液体被压缩和筒壁变

形, 改变了液体流动与后坐部分速度之间的关系, 因此在考虑它们的影响的情况下, (14-3) 式所确定的关系已不适用。

为了得到筒变形和液体压缩与液体压力的精确关系, 须考虑筒内容积和液体体积随压力变化的关系。

### 1. 液体压缩量的计算

由流体力学知, 当液体压力变化  $\Delta p$  时, 液体体积的改变量为:

$$\Delta V_v = \frac{(\Delta p)V}{E_t} = -\frac{(\Delta p)AL}{E_t} \quad (14-4)$$

其中  $\Delta V_v$ ——液体体积改变量;

$V$ ——液体原体积;

$A$ ——液柱横断面积;

$L$ ——液柱长度;

$E_t$ ——液体的体积弹性模量。

定义:  $C_1 = \frac{A}{E_t}$  并代入 (14-4) 式得:

$$\Delta V_v = C_1(\Delta p)L \quad (14-5)$$

其中  $C_1$  称为液体的压缩性常数, 它由  $A$ ,  $\beta$  决定。其中  $A$  可根据结构尺寸求出。得到  $\beta$  的方法, 一种是根据驻退机的工作压力范围选取数个压力值 (3-4个), 在这些压力值下通过实验来得到  $\beta$  的拟合方程; 另一种方法是把  $\beta$  近似的取为常数。据有关资料介绍: 斯切奥尔-M液的体积压缩系数  $\beta = 38.6 \times 10^{-6}$  厘米<sup>2</sup>/公斤, 锭子油的  $\beta = 75 \times 10^{-6}$  厘米<sup>2</sup>/公斤 ( $E_t = \frac{1}{\beta}$ )。

### 2. 筒容积改变量的计算

由高等材料力学的推导可得两端封闭的厚壁圆筒在内压  $p_N$  和外压  $p_w$  的作用下, 壁内任意半径  $r$  上点的径向位移  $u$ :

$$u = \frac{1-\mu}{E} \left( \frac{a^2 p_N - b^2 p_w}{b^2 - a^2} r \right) + \frac{1+\mu}{E} \cdot \frac{a^2 b^2 (p_N - p_w)}{(b^2 - a^2) r} \quad (14-6)$$

其中  $\mu$ ——筒的泊松比;

$a$ ,  $b$ ——筒的内、外半径 ( $a \leq r \leq b$ );

$E$ ——筒金属的弹性模量。

当  $p_w = 0$  时, 即对于圆筒只承受内压的特殊情况, 由式 (14-6) 可得内表面  $r = a$  的径向位移为

$$(u)_{r=a} = \frac{a p_N}{E} \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \mu \right) \quad (14-7)$$

于是圆筒在  $p_N$  的作用下容积的改变可以近似的表示为

$$\Delta V_t = (u)_{r=a} 2\pi a L$$

将 (14-7) 式代入上式得:

$$\Delta V_t = \frac{2a^2 \pi}{E} \left( \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \mu \right) p_N L \quad (14-8)$$

设:  $C_2 = \frac{2a^2\pi}{E} \left( \frac{a^2+b^2}{b^2-a^2} + \mu \right)$  并代入上式得:

$$\Delta V_s = C_2 p_N L \quad (14-9)$$

式中  $C_2$  称为筒的可压缩性常数, 驻退筒和储气筒的  $C_2$  是与它们的结构尺寸和材料有关的;  $L$  为  $p_N$  作用下的筒的长度。

如果筒内原受有压力  $p$ , 后来压力增大了  $\Delta p$ , 那么, 由于增大压力  $\Delta p$  引起的筒内体积的改变由式 (14-9) 可知应为:

$$\Delta V_s = C_2 (\Delta p) L \quad (14-10)$$

### 3. 压力 $p_1$ 和 $p_2$ 的表达式

在图14-1中, 由于流液孔  $a_x$  断面左面储气筒内腔的液体通常比较少, 筒壁 (外筒及节制筒) 一般比较厚, 因此可忽略这一部分的体积的变化, 于是在任意时刻  $t$  通过  $a_1$  的液体流量有下面的关系:

$$a_1 \omega_1 = A_{fj} (\dot{y} - \dot{x}) + a_x \omega_x \quad (14-11)$$

由图还可以看出在同一时刻  $a_1$  的液体流量又可写成:

$$a_1 \omega_1 = A_o \dot{x} - (C_{1x} + C_{2x}) \dot{p}_1 (L_{ox} - x) \quad (14-12)$$

式中  $\dot{p}_1 = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta p_1}{\Delta t}$

上两式中:  $\omega_1$ ——任意时刻  $t$  液体流过  $a_1$  时的流速;

$\omega_x$ ——任意时刻  $t$  流体流过  $a_x$  时的流速;

$C_{1x}$ ——驻退筒内液体的压缩性常数;

$C_{2x}$ ——驻退筒的压缩性常数;

$L_{ox}$ ——驻退筒内液柱的初始长度。

在同一时刻  $t$ , 液体通过制动流液孔  $a_x$  的流量为:

$$a_x \omega_x = A_{fj} (\dot{y} - \dot{x}) + (C_{1f} + C_{2f}) \dot{p}_2 (y - x + L_{of}) \quad (14-13)$$

式中  $C_{1f}$ ——储气筒内  $a_x$  断面右侧液体的压缩性常数;

$C_{2f}$ ——储气筒的  $a_x$  断面右侧压缩性常数;

$L_{of}$ ——储气筒内节制器右端面与游动活塞之间液柱的初始长度。

将 (14-12) 式代入 (14-11) 式得

$$A_{fj} (\dot{y} - \dot{x}) + a_x \omega_x = A_o \dot{x} - (C_{1x} + C_{2x}) (L_{ox} - x) \dot{p}_1$$

整理后得  $\dot{p}_1$  的表达式如下

$$\dot{p}_1 = \frac{1}{L_{ox} - x} \frac{A_o \dot{x} - A_{fj} (\dot{y} - \dot{x}) - a_x \omega_x}{C_{1x} + C_{2x}} \quad (14-14)$$

由 (14-13) 式可得  $\dot{p}_2$  的表达式:

$$\dot{p}_2 = \frac{1}{y - x + L_{of}} \frac{a_x \omega_x - A_{fj} (\dot{y} - \dot{x})}{C_{1f} + C_{2f}} \quad (14-15)$$

显然, 根据伯努利方程流液孔  $a_x$  两边的压力差可近似写为

$$p_1 - p_2 = \frac{\gamma}{2g} \left( \frac{\omega_x}{C_x} \right)^2$$

或

$$\omega_x^2 = \frac{2g}{\gamma} C_x^2 (p_1 - p_2) \text{sign} (p_1 - p_2)$$

由此可得:

$$\omega_x = C_x \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2) \text{sign}(p_1 - p_2) \text{sign}(p_1 - p_2)} \quad (14-16)$$

其中  $C_x$  为液孔  $a_x$  的流量系数, 相当于液压阻力系数的倒数  $C_x = \frac{1}{K}$ 。

(14-16) 式两边乘以  $a_x$  得:

$$a_x \omega_x = a_x C_x \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2) \text{sign}(p_1 - p_2) \text{sign}(p_1 - p_2)} \quad (14-17)$$

其中

$$a_x C_x = a_{ch} C_{ch} + a_d C_d + a_L C_L \quad (14-18)$$

式中  $a_{ch}$ ,  $a_d$ ,  $a_L$ ——分别为长沟槽, 短沟槽及漏液间隙的面积,

$C_{ch}$ ,  $C_d$ ,  $C_L$ ——分别为长沟槽, 短沟槽及漏液间隙处的流量系数, 它们通常是根  
据实验确定, 此处可分别取为 0.92, 0.82, 0.80。

复进机力仍如前述:

$$p_f = p_{f0} \left[ \frac{W_o}{W_o - A_f(\dot{y} - \dot{x})} \right]^n \quad (14-19)$$

由图 14-3(b) 可看出在时刻  $t$  驻退杆的力为

$$R(t) = A_o p_1 + F_1 \quad (14-20)$$

现将考虑液体可压缩性及筒变形影响, 用以求解后坐反面问题所必须的基本方程组  
(此处只是有一个驻退筒的情况, 如果是多个驻退筒则需在相应的项上乘以驻退筒数)  
汇总如下:

$$\ddot{x} = \frac{g}{Q_o} [P_{pt} - A_o p_1 + A_{f1} p_f - A_{f1} p_1 - A_{f2} p_2 + Q_o \sin \varphi - F_1 - T + F_f \text{sign}(\dot{y} - \dot{x})] \quad (14-21)$$

$$\ddot{y} = \frac{g}{Q_p} [A_{f1} p_1 + A_{f2} p_2 - A_{f1} p_f - F_f \text{sign}(\dot{y} - \dot{x}) + Q_p \sin \varphi] \quad (14-22)$$

$$\dot{p}_1 = \frac{1}{L_{ox} - x} \cdot \frac{A_o \dot{x} - A_{f1}(\dot{y} - \dot{x}) - a_x \omega_x}{C_{1x} + C_{2x}} \quad (14-23)$$

$$\dot{p}_2 = \frac{1}{y - x + L_{of}} \cdot \frac{a_x \omega_x - A_{f2}(\dot{y} - \dot{x})}{C_{1f} + C_{2f}} \quad (14-24)$$

$$a_x \omega_x = a_x C_x \sqrt{\frac{2g}{\gamma} (p_1 - p_2) \text{sign}(p_1 - p_2) \text{sign}(p_1 - p_2)} \quad (14-25)$$

$$a_x C_x = a_{ch} C_{ch} + a_d C_d + a_L C_L \quad (14-26)$$

$$p_f = p_{f0} \left[ \frac{W_o}{W_o - A_f(\dot{y} - \dot{x})} \right]^n \quad (14-27)$$

$$R(t) = A_o p_1 + F_1 \quad (14-28)$$

### 三、计算机求解的处理

从上面得到的方程可以看出, 要用手工的方法解它们是非常困难的。但借助于计算机来解上面的方程就没有什么困难。要用计算机进行计算, 首先必须对上面的方程进行改造。



将方程 (14-21) 到方程 (14-24) 改造成以  $t$  为自变量的一阶微分方程组如下:

$$\begin{aligned}
 \frac{dt}{dt} &= 1 \\
 \frac{dx}{dt} &= x_1 \\
 \frac{dx_1}{dt} &= \frac{g}{Q} [P_{pr} - A_o p_1 + A_f p_f - A_{fi} p_1 - A_{fy} p_2 + Q_o \sin \varphi - F_1 \\
 &\quad - T + F_f \text{sign}(y_1 - x_1)] \\
 \frac{dy}{dt} &= y_1 \\
 \frac{dy_1}{dt} &= \frac{g}{Q_p} [A_{fi} p_1 + A_{fy} p_2 - A_f p_f - F_f \text{sign}(y_1 - x_1) + Q_p \sin \varphi] \\
 \frac{dp_1}{dt} &= \frac{1}{L_{oz} - x} \frac{A_o x_1 - A_{fi}(y_1 - x_1) - a_x \omega_x}{C_{1z} + C_{2z}} \\
 \frac{dp_2}{dt} &= \frac{1}{y - x + L_{of}} a_x \omega_x - A_{fy}(y_1 - x_1)
 \end{aligned} \tag{14-29}$$

然后采用四次叠代的龙格-库塔方法编制的计算机源程序, 按照给定的初始条件和积分步长  $H$ , 以  $t$  为自变量逐步的求解方程组 (14-29) 和有关的代数方程 (与此同时对所需的表格函数进行不断的插值) 可得到各点处的运动诸元:  $x$ 、 $\dot{x}$ 、 $y$ 、 $\dot{y}$ 、 $p_1$ 、 $p_2$ 、 $t$ 、 $R(t)$  及其它数据, 一直到后坐结束为止。

#### 四、例 题<sup>●</sup>

计算 XM198 式 155 榴弹炮的后坐运动诸元。初始数据:

$$Q_o = 6977 \text{ 磅}; Q_p = 133 \text{ 磅};$$

$$F_1 = 810 \text{ 磅};$$

$$F_f = 1325 \text{ 磅}; T = 1340 \text{ 磅};$$

$$A_o = 5.5837 \text{ 英寸}^2; A_{fi} = 8.9462 \text{ 英寸}^2;$$

$$A_f = 44.1788 \text{ 英寸}^2; A_{fy} = 35.2326 \text{ 英寸}^2;$$

$$L_{oz} = 74.5 \text{ 英寸}; L_{of} = 0.2 \text{ 英寸}$$

$$D_1 = 3.625 \text{ 英寸 (驻退筒外径)};$$

$$D_T = 3.0 \text{ 英寸 (驻退筒内径)};$$

$$D_{B1} = 8.25 \text{ 英寸 (储气筒外径)};$$

$$D_B = 7.5 \text{ 英寸 (储气筒内径)};$$

$$W_o = 2165 \text{ 英寸}^3; p_{fo} = 1175 \text{ 磅/英寸}^2;$$

$$n = 1.8;$$

$$g = 386.04 \text{ 英寸/秒}^2; \mu = 0.3;$$

$$E = 3.0 \times 10^7 \text{ 磅/英寸}^2; \gamma = 0.03085 \text{ 磅/英寸}^3;$$

$$a_L = \begin{cases} 0.047 \text{ 英寸}^2 \text{ 短后坐;} \\ 0.021 \text{ 英寸}^2 \text{ 长后坐;} \end{cases}$$

● 此例题摘自国外资料, 其计量单位仍按英制。

$a_{ch}$ ,  $a_d$ , 及  $P_{pl}$  的值见表 14-1, 表 14-2, 表 14-3,  
驻退筒和驻退杆数为二。

计算结果见表 14-4。

表 14-1 长沟槽漏口面积

$y-x$ (英寸)	$a_{ch}$ (英寸 <sup>2</sup> )	$y-x$ (英寸)	$a_{ch}$ (英寸 <sup>2</sup> )	$y-x$ (英寸)	$a_{ch}$ (英寸 <sup>2</sup> )	$y-x$ (英寸)	$a_{ch}$ (英寸 <sup>2</sup> )
0.1249	0.0391	5.9978	0.1936	12.6850	0.3664	17.1273	0.1381
0.1751	0.1025	6.9973	0.2035	12.7500	0.3564	17.1322	0.1810
0.2884	0.1591	8.9963	0.2273	12.7581	0.3662	17.2322	0.1254
0.4384	0.1657	9.9948	0.2453	13.1580	0.3533	17.2443	0.1223
0.4410	0.1662	10.4935	0.2573	13.7579	0.3343	17.3443	0.1072
0.5690	0.1691	10.9925	0.2713	13.7595	0.3342	17.3467	0.1065
0.5750	0.1692	11.4895	0.2872	14.7595	0.2962	17.4467	0.0815
0.5793	0.1691	11.9840	0.3128	14.7615	0.2961	17.4629	0.0870
0.7543	0.1663	12.2311	0.3315	15.2615	0.2731	17.5129	0.0778
0.7575	0.1661	12.2325	0.3317	15.2630	0.2730	17.5526	0.0698
0.9575	0.1604	12.3325	0.3387	15.7630	0.2470	17.6000	0.0557
0.9586	0.1603	12.3450	0.3393	15.7660	0.2468	17.6500	0.0408
1.1168	0.1551	12.4425	0.3413	16.2660	0.2141	17.7000	0.0264
1.3668	0.1551	12.4900	0.3432	16.2699	0.2134	17.7500	0.0136
1.4091	0.1571	12.5000	0.3434	16.7199	0.1781	17.8000	0.0037
1.4234	0.1596	12.5089	0.3134	16.7236	0.1773	17.8250	0.0000
1.8983	0.1625	12.5742	0.3514	16.9236	0.1592	18.1999	0.0000
3.9981	0.1779	12.6455	0.3526	16.9273	0.1584		

表 14-2 短沟槽漏口面积

$y-x$ (英寸)	$a_d$ (英寸 <sup>2</sup> )	$y-x$ (英寸)	$a_d$ (英寸 <sup>2</sup> )	$y-x$ (英寸)	$a_d$ (英寸 <sup>2</sup> )	$y-x$ (英寸)	$a_d$ (英寸 <sup>2</sup> )
0.0871	0.0262	2.0027	0.4274	10.7640	0.1711	12.2651	0.0502
0.0900	0.3585	2.7527	0.4194	11.2660	0.1409	12.2836	0.0482
0.2630	0.4562	2.7543	0.4194	11.2691	0.1404	12.3021	0.0463
0.2917	0.4670	3.7512	0.4024	11.5691	0.1199	12.3207	0.0445
0.3417	0.4790	3.7553	0.4023	11.5761	0.1188	12.3392	0.0429
0.3864	0.4870	4.7553	0.3813	11.7761	0.1012	12.3577	0.0415
0.4414	0.4900	4.7560	0.3813	11.7773	0.1010	12.3762	0.0404
0.4508	0.4904	5.2560	0.3693	11.8773	0.0922	12.3947	0.0395
0.5108	0.4914	5.2565	0.3693	11.8798	0.0918	12.4040	0.0392
0.5150	0.4914	5.7565	0.3563	11.9798	0.0827	12.4108	0.0391
0.5241	0.4912	6.2570	0.3433	11.9847	0.0820	12.4500	0.0376
0.6341	0.4872	6.7580	0.3293	12.0847	0.0721	12.5000	0.0320
0.6400	0.4869	7.7580	0.2973	12.0943	0.0706	12.5500	0.0241
0.7490	0.4809	8.7600	0.2632	12.1943	0.0593	12.6000	0.0138
0.7633	0.4778	9.7602	0.2219	12.2037	0.0579	12.6500	0.0035
0.9562	0.4475	9.7615	0.2217	12.2095	0.0571	12.7000	0.0012
1.1301	0.4270	10.2615	0.1989	12.2281	0.0547	12.7147	0.0000
2.0000	0.4274	10.2640	0.1986	12.2466	0.0524	18.1999	0.0000

表14-3 膛底合力值

$T$ (秒)	$P_{pt}$ (磅)	$T$ (秒)	$P_{pt}$ (磅)	$T$ (秒)	$P_{pt}$ (磅)	$T$ (秒)	$P_{pt}$ (磅)
0.000000	79,947	0.006778	1,216,595	0.012038	102,358	0.022225	35,137
0.000677	83,973	0.007228	1,087,002	0.012055	102,159	0.025110	26,437
0.000543	124,372	0.007647	969,516	0.012073	101,962	0.029379	17,529
0.000876	163,747	0.008042	865,986	0.012090	101,764	0.033948	11,797
0.001134	202,125	0.008419	775,814	0.012178	100,783	0.038217	8,064
0.001347	239,530	0.008782	697,574	0.012265	99,813	0.042586	5,592
0.001527	275,937	0.009134	629,678	0.012352	98,853	0.046955	3,930
0.001584	311,519	0.009476	570,629	0.012440	97,903	0.051324	2,796
0.001823	346,150	0.009810	519,104	0.012527	96,963	0.055693	2,012
0.001947	379,901	0.010138	473,971	0.012615	96,033	0.060062	1,464
0.002785	672,537	0.010460	434,278	0.012702	95,113	0.064431	1,076
0.003295	899,777	0.010776	399,226	0.012789	94,202	0.068800	798
0.003671	1,073,067	0.011088	368,146	0.012877	93,302	0.073169	598
0.003973	1,204,557	0.011397	340,479	0.013750	84,798	0.077538	451
0.004229	1,302,914	0.011701	315,757	0.014624	77,141	0.081907	343
0.004454	1,374,922	0.012003	293,587	0.015498	70,239	0.086276	263
0.004654	1,425,926	0.012005	102,736	0.016372	64,013	0.090644	203
0.004837	1,460,154	0.012006	102,716	0.017246	58,390	0.095014	158
0.005605	1,480,974	0.012008	102,696	0.018119	53,307	0.099382	124
0.005266	1,492,947	0.012010	102,676	0.018993	48,707	0.102800	0
0.005710	1,461,724	0.012012	102,657	0.019887	44,542	5.000000	0
0.006280	1,349,940	0.012020	102,557	0.020741	40,766		

表14-4 计算结果

参 量	$E_t = 150000$	$E_t = 250000$	$E_t = 350000$	$\varphi$	后坐状态
时间(毫秒)	267	266	266	1°	长后坐
	196	198	200	70°	短后坐
驻退杆最大拉力(磅力)	41800	41700	41700	1°	长后坐
	63300	66100	66300	70°	短后坐
最大后坐速度(英寸/秒)	498	495	494	1°	长后坐
	501	497	495	70°	短后坐
后坐长度(英寸)	67.95	67.42	67.19	1°	长后坐
	52.44	51.61	51.27	70°	短后坐

## 第十五章 反后坐装置系统计算实例

本章作为设计实例，对一种口径为 130 毫米的加农炮的反后坐装置进行设计计算。

### 一、原始数据

#### 1. 内弹道数据

$$p_m = 3150 \text{ 公斤力/厘米}^2 \quad p_z = 1020 \text{ 公斤力/厘米}^2 \quad q = 33.4 \text{ 公斤} \quad \omega = 12.9 \text{ 公斤}$$

$$S = 1.394 \text{ 分米}^2 \quad W_0 = 18.58 \text{ 分米}^3 \quad l_g = 5952 \text{ 毫米}$$

$t$ (毫秒)	1.40	2.40	3.40	4.40	5.40	6.40(m)
$v$ (米/秒)	22.8	54.0	104.8	180.0	277.6	387.5
$l$ (毫米)	13.8	50.7	128.1	268.2	495	829
$t$ (毫秒)	7.80	9.00	10.21(k)	11.31	12.41	13.62(g)
$v$ (米/秒)	539.3	654.4	753.2	825.4	881.4	930.3
$l$ (毫米)	1477	2194	3046	3916	4856	5952

#### 2. 总体结构尺寸

$$D_{oo} = 3680 \text{ 毫米} \quad d_z = 3135 \text{ 毫米} \quad L = 3875 \text{ 毫米} \quad l_q = 957 \text{ 毫米}$$

$$H_z = 1290 \text{ 毫米} \quad \Delta H = 200 \text{ 毫米} \quad d = 8.1 \text{ 毫米} \quad \lambda_{\max} = 950 \text{ 毫米}$$

$$\varphi_j = 13^\circ 15' \quad \alpha = 31'$$

#### 3. 重量数据

$$Q_o = 2600 \text{ 公斤} \quad Q_q = 3322 \text{ 公斤} \quad Q_z = 6300 \text{ 公斤}$$

### 二、自由后坐运动诸元的计算

#### 1. 弹丸膛内运动时期

弹丸膛内运动时期自由后坐运动诸元的计算公式是

$$W = \frac{q + 0.5\omega}{Q_o + q + \omega} v \quad L = \frac{q + 0.5\omega}{Q_o + q + \omega} l$$

列表计算：

$t$ (毫秒)	1.40	2.40	3.40	4.40	5.40	6.40( $t_m$ )
$W$ (米/秒)	0.3433	0.8132	1.5782	2.7106	4.1803	5.8353
$L$ (毫米)	0.2078	0.7635	1.9290	4.0388	7.4541	12.484
$t$ (毫秒)	7.80	9.00	10.21( $t_k$ )	11.31	12.41	13.62( $t_g$ )
$W$ (米/秒)	8.1212	9.8545	11.342	12.430	13.273	14.009
$L$ (毫米)	22.242	33.039	45.869	58.970	73.125	89.630

#### 2. 火药气体后效作用时期

这一时期的自由后坐运动诸元按经验公式计算

$$W = W_g + \frac{g \chi P_g}{Q_o} b (1 - e^{-\frac{t}{b}})$$

$$L = L_g + W_g t + \frac{g \chi P_g}{Q_o} b [t - b (1 - e^{-\frac{t}{b}})]$$

式中  $W_g = 14.009 \text{ m/s}$ ,  $L_g = 89.630 \text{ mm}$ ,  $P_g = S p_g = 142188 \text{ kg}$ , 时间  $t$  从炮口点起算。  
计算  $\chi$

$$\beta = \frac{A}{v_o}$$

取  $A = 1275$ ,  $v_o = v_g = 930.3 \text{ m/s}$ , 求得  $\beta = 1.3705$ , 炮口制退器效率取为  $\eta_r = 45\%$ , 则

$$\chi = \frac{(q + \beta \omega) \sqrt{1 - \eta_r} - (q + 0.5 \omega)}{(\beta - 0.5) \omega} = -0.1753$$

$$b = \frac{(\beta - 0.5) \omega v_o}{g P_g} = 7.4894 \text{ 毫秒}$$

$$\tau = b \ln \frac{p_g}{1.8} = 6.340 b = 47.483 \text{ 毫秒}$$

列表计算

$t$ (毫秒)	$0.5 b$	$b$	$1.5 b$	$2 b$	$2.5 b$	$3 b$	$3.5 b$
	3.7447	7.4894	11.234	14.979	18.724	22.468	26.213
$W$ (米/秒)	13.732	13.564	13.462	13.400	13.363	13.340	13.326
$L$ (毫米)	141.53	192.61	243.19	293.48	343.59	393.57	443.50
$t$ (毫秒)	$4 b$	$4.5 b$	$5 b$	$5.5 b$	$6 b$	$6.340 b$	
	29.958	33.702	37.447	41.192	44.936	47.483	
$W$ (米/秒)	13.318	13.313	13.310	13.308	13.307	13.306	
$L$ (毫米)	493.39	543.24	593.09	642.93	692.75	726.64	

### 三、后坐正面问题设计

为了保证火炮在后坐时的静止性和稳定性, 必须对后坐阻力  $R$  有所限制, 使得

$$R \leq R_j = \frac{Q_z D_{o\varphi_j} - Q_o \times \cos \varphi_j}{h_j} - \frac{P_{pe}}{h_j}$$

取  $R = 0.9 R_j$ , 其中

$$Q_z D_{o\varphi_j} = Q_z D_{oo} - Q_g l_g \cos \alpha + Q_d l_d \cos(\varphi_j + \alpha) = 23092801 \text{ 公斤力} \cdot \text{毫米}$$

$$h_j = (H_z + \Delta H) \cos \varphi_j + d - d_z \sin \varphi_j = 739.89 \text{ 毫米}$$

#### 1. 建立后坐制动图

选用野炮第二类制动图, 其规律为

$$0 \leq t \leq t_a \quad 0 \leq X \leq X_a: \quad R = R_o + (R_a - R_o) \frac{t}{t_a}$$

$$t_a < t \leq t_k \quad X_a < X \leq X_k: \quad R = R_a - (R_a - R_k) \frac{t - t_a}{t_k - t_a}$$

$$t_k < t \leq t_\lambda \quad X_k < X \leq \lambda: \quad R = R_k - (R_k - R_\lambda) \frac{X - X_k}{\lambda - X_k}$$

取

$$R_a = 1.7Q_0 = 4420 \text{ 公斤}$$

$$t_a = t_k + b = 21.109 \text{ 毫秒}$$

用  $L_a$  和  $L_k$  分别代替  $X_a$  和  $X_k$ , 确定  $R_a$  和  $R_k$ , 略去  $\frac{P_{pi} l}{h_i}$ , 且系数取为 0.91。

$$L_a = 192.61 \text{ 毫米} \quad L_k = 726.64 \text{ 毫米}$$

$$R_a = 0.91 \frac{Q_0 D_{ovj} - Q_0 L_a \cos \varphi_j}{h_i} = 27803 \text{ 公斤力}$$

$$R_k = 0.91 \frac{Q_0 D_{ovj} - Q_0 L_k \cos \varphi_j}{h_i} = 26140 \text{ 公斤力}$$

## 2. 驻退后坐运动诸元的计算

(1)  $0 \leq t \leq t_a \quad 0 \leq X \leq X_a$

$$R = R_0 + (R_a - R_0) \frac{t}{t_a}$$

$$V = W - \frac{g}{Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{2t_a} t \right) t$$

$$X = L - \frac{g}{2Q_0} \left( R_0 + \frac{R_a - R_0}{3t_a} t \right) t^2$$

列表计算:

$t$ (毫秒)	1.40	2.40	3.40	4.40	5.40	6.40( $t_g$ )	7.80
$R$ (公斤力)	5970.8	7078.5	8186.3	9294.0	10402	11509	13060
$W$ (米/秒)	0.3438	0.8132	1.5782	2.7106	4.1803	5.8353	8.1212
$V$ (米/秒)	0.3159	0.7611	1.4973	2.5968	4.0293	5.6430	7.8640
$L$ (毫米)	0.2078	0.7635	1.9290	4.0388	7.4541	12.484	22.242
$X$ (毫米)	0.1805	0.7058	1.8052	3.8180	7.1013	11.960	21.404
$t$ (毫秒)	9.00	10.21	11.31	12.41	13.62( $t_g$ )	17.365	21.109( $t_a$ )
$R$ (公斤力)	14390	15730	16948	18167	19507	23656	27803
$W$ (米/秒)	9.8545	11.342	12.430	13.273	14.009	13.732	13.564
$V$ (米/秒)	9.5351	10.954	11.974	12.744	13.394	12.812	12.281
$L$ (毫米)	33.039	45.869	58.970	73.125	89.630	141.53	192.61
$\lambda$ (毫米)	31.856	44.258	56.896	70.509	86.323	135.37	182.34

(2)  $t_a < t \leq t_k \quad X_a < X \leq X_k$

$$R = R_a - (R_a - R_k) \frac{t - t_a}{t_k - t_a}$$

$$V = W - (W_a - V_a) - \frac{g}{Q_0} \left[ R_a - \frac{R_a - R_k}{2(t_k - t_a)} (t - t_a) \right] (t - t_a)$$

$$X = L - (L_a - X_a) - (W_a - V_a)(t - t_a) - \frac{g}{2Q_0} \left[ R_a - \frac{R_a - R_k}{3(t_k - t_a)} (t - t_a) \right] (t - t_a)^2$$

列表计算:

$t$ (毫秒)	24.854	28.599	32.344	36.088	39.833	43.578
$R$ (公斤力)	27647	27492	27336	27180	27024	26869
$W$ (米/秒)	13.462	13.400	13.363	13.340	13.326	13.318
$V$ (米/秒)	11.787	11.336	10.911	10.503	10.106	9.718
$L$ (毫米)	243.19	293.48	343.59	393.57	443.50	493.39
$X$ (毫米)	227.38	270.67	312.32	352.40	390.99	428.11
$t$ (毫秒)	47.322	51.067	54.812	58.556	61.103( $t_k$ )	
$R$ (公斤力)	26713	26557	26402	26246	26140	
$W$ (米/秒)	13.313	13.310	13.308	13.307	13.306	
$V$ (米/秒)	9.334	8.955	8.579	8.206	7.953	
$L$ (毫米)	543.24	593.09	642.93	692.75	726.64	
$X$ (毫米)	463.77	498.01	530.84	562.26	582.83	

(3)  $t_k < t \leq t_\lambda$   $X_k < X \leq \lambda$ :

$$R = K \frac{Q_0 D_{0\varphi_j} - Q_0 X \cos \varphi_j}{h_j}$$

$$V^2 = V_k^2 - \frac{g}{Q_0} (R_k + R)(X - X_k)$$

其中

$$K = \frac{R_k h_j}{Q_0 D_{0\varphi_j} - Q_0 X_k \cos \varphi_j} = 0.89467$$

列表计算:

$X$ (毫米)	630	680	730	780	830	880	930
$R$ (公斤力)	25996	25843	25690	25537	25384	25231	25078
$V^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )	53.971	44.192	34.470	24.806	15.199	5.6507	-3.8402
$V$ (米/秒)	7.347	6.648	5.871	4.981	3.899	2.377	—

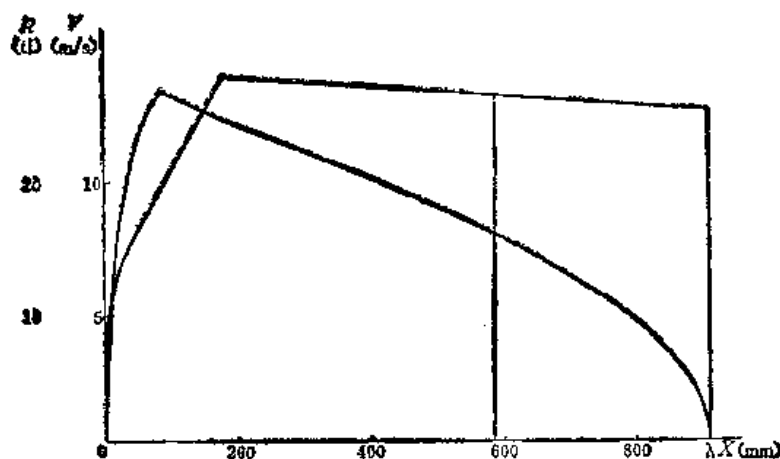
用插值法求得  $\lambda = 909.77$  毫米。用公式检验

$$\lambda = X_k + \frac{h_j}{K Q_0 \cos \varphi_j} \left[ R_k - \sqrt{R_k^2 - K \frac{Q_0 \cos \varphi_j}{h_j} \left( \frac{Q_0}{g} V_k^2 \right)} \right] = 909.74 \text{ 毫米}$$

结果基本相符合。正面计算的  $R-X$ ,  $V-X$  曲线见图15-1。

$$R_\lambda = 25140 \text{ 公斤力}$$

$$\theta_2 = \frac{2Q_0}{g} \frac{V_k}{R_k + R_\lambda} = 82.21 \text{ 毫秒}$$

图15-1 正面计算的  $R-X$ ,  $V-X$  曲线

$$t_h = t_k + \theta_2 = 143.31 \text{ 毫秒} = 0.14331 \text{ 秒}$$

### 3. 设计复进机

采用液体气压式复进机。为了增加后坐部分重量，采用筒后坐形式，所以复进机为三个筒式结构。

#### (1) 选择参数

$$P_{fo} \geq F + T + Q_o \sin \varphi_{\max} = v Q_o + f Q_o \cos \varphi_{\max} + Q_o \sin \varphi_{\max}$$

取  $v = 0.35$ ,  $f = 0.18$ , 则  $P_{fo} \geq 3079.4$  公斤力。

选  $P_{fo} = 3080$  公斤力  $p_{fo} = 60$  公斤力/厘米<sup>2</sup>  $m = 2.8$   
则

$$A_f = \frac{P_{fo}}{p_{fo}} = 51.333 \text{ 厘米}^2$$

#### (2) 确定主要结构尺寸

复进杆和三个筒采取同心配置形式。按照由内向外的顺序确定复进杆及三个筒的直径。

##### a. 复进杆直径 $d_f$

选用材料 40Cr,  $\sigma_s = 60$  公斤力/毫米<sup>2</sup>,  $[\sigma] = \frac{1}{3} \sigma_s = 20$  公斤力/毫米<sup>2</sup>。

由于是筒后坐，所以复进杆所承受的惯性力为零。

$$P_{fn} = m P_{fo} = 8624 \text{ 公斤力}$$

计算螺纹退刀槽处的直径

$$d'_f \geq 2 \sqrt{\frac{P_{fn}}{\pi [\sigma]}} = 23.43 \text{ 毫米}$$

则复进杆的直径为

$$d_f \geq 1.13 d'_f \geq 26.5 \text{ 毫米}$$

向大调整到紧塞元件的标准尺寸，最后确定  $d_f = 28$  毫米。

##### b. 内筒的内径 $D_i$ 与外径 $D'_i$



$$D_f = \sqrt{d_f^2 + \frac{4}{\pi} A_f} = 85.56 \text{ 毫米}$$

调整到紧塞元件的标准尺寸, 取  $D_f = 85$  毫米。重新计算  $A_f$

$$A_f = \frac{\pi}{4} (D_f^2 - d_f^2) = 50.587 \text{ 厘米}^2$$

$$W_o = \frac{A_f \lambda}{1 - m \frac{1}{n}} = 8.4123 \text{ 分米}^3 \quad (n = 1.3)$$

调整  $p_{fo}$

$$p_{fo} = \frac{P_{fo}}{A_f} = 60.89 \text{ 公斤力/厘米}^2$$

取  $p_{fo} = 61 \text{ 公斤力/厘米}^2$ , 则  $P_{fo} = p_{fo} A_f = 3085.8 \text{ 公斤力}$

内筒材料选为 40Cr,  $\sigma_s = 55 \text{ 公斤力/厘米}^2$ ,  $[\sigma_y] = \frac{1}{2} \sigma_s = 27.5 \text{ 公斤力/厘米}^2$

$$p_{fs} = p_{fo} m = 170.8 \text{ 公斤力/厘米}^2$$

$$D'_f = D_f \sqrt{\frac{[\sigma_y]}{[\sigma_y] - 2p_{fs}}} = 90.83 \text{ 毫米}$$

向大调整, 取  $D'_f = 93$  毫米。验算壁厚

$$\delta = \frac{D'_f - D_f}{2} = 4 \text{ 毫米} > 3 \text{ 毫米}$$

校核内筒受外压的稳定性。对于材料 40Cr,  $E = 2.1 \times 10^6 \text{ 公斤力/厘米}^2$ ,  $\mu = 0.3$ 。

$$\rho = \frac{D'_f + D_f}{4} = 44.5 \text{ 毫米}$$

$$p_{lj} = \frac{E \delta^3}{4 \rho^3 (1 - \mu^2)} = 419.00 \text{ 公斤力/厘米}^2$$

稳定安全系数为  $n = \frac{p_{lj}}{p_{fs}} = 2.45$ , 满足稳定性。

c. 中筒的内径  $D_c$  与外径  $D'_c$

中筒所承受的压力内外基本相等, 因此可以不考虑强度问题。选用材料为钢管 20, 内径选为  $D_c = 108$  毫米, 外径选为  $D'_c = 115$  毫米, 壁厚为

$$\delta = \frac{D'_c - D_c}{2} = 3.5 \text{ 毫米}$$

d. 外筒的内径  $D_b$  与外径  $D'_b$

通过结构设计, 确定  $L_f = 1170$  毫米,  $D_b = 166$  毫米。当复进机水平放置时, 中筒与外筒间气体空间的截面积应为

$$F = \frac{W_o}{L_f} = 71.900 \text{ 厘米}^2$$

应当确定适当的液面高  $H_b$ , 保证  $F = 71.900 \text{ 厘米}^2$

$$F = F_b - F_o$$

$$F_b = \left( \frac{\alpha_b}{360^\circ} \pi - \frac{1}{2} \sin \alpha_b \right) \frac{D_b^2}{4}$$

$$F_c = \left( \frac{\alpha_c}{360} \pi - \frac{1}{2} \sin \alpha_c \right) \frac{D'_c{}^2}{4}$$

$$\alpha_b = 2 \cos^{-1} \frac{2H_b - D_b}{D_b}$$

$$\alpha_c = 2 \cos^{-1} \frac{2H_c - D'_c}{D'_c}$$

$$H_c = H_b - \Delta h_b$$

$$\Delta h_b = \frac{D_b - D'_c}{2} = 25.5 \text{ 毫米}$$

利用上列公式, 预选两个液面高  $H_b$ , 用对分法逐次逼近  $F = 71.900 \text{ 厘米}^2$ , 最后确定液面高为  $H_b = 53.365 \text{ 毫米}$

外筒材料选用 35Cr,  $\sigma_s = 55 \text{ 公斤力/毫米}^2$ ,  $[\sigma] = \frac{1}{3} \sigma_s = 18.33 \text{ 公斤力/毫米}^2$

$$D'_b = D_b \sqrt{\frac{[\sigma] + 0.4 p_{fa}}{[\sigma] - 1.3 p_{fa}}} = 180.34 \text{ 毫米}$$

向大调整为  $D'_b = 181 \text{ 毫米}$ , 壁厚为

$$\delta = \frac{D'_b - D_b}{2} = 7.5 \text{ 毫米}$$

### (3) 计算复进机力

$$P_f = P_{fo} \left( \frac{W_o}{W_o - A_f X} \right)^n$$

$A_f = 50.587 \text{ 厘米}^2$ ,  $W_o = 8.4123 \text{ 厘米}^3$ ,  $n = 1.3$ ,

$$P_{fo} = A_f p_{fo} = 3085.8 \text{ 公斤力}$$

列表计算

$X$ (毫米)	0	11.960	44.258	86.323	135.37	182.34	227.38	270.67	312.32	352.40	390.99	428.11
$P_f$ (公斤力)	3085.8	3114.9	3195.9	3307.2	3445.9	3588.7	3735.8	3887.5	4044.0	4205.5	4372.2	4543.8
$X$ (毫米)	463.77	498.01	530.84	562.26	582.83	630	680	730	780	830	880	909.74
$P_f$ (公斤力)	4720.2	4901.4	5087.0	5276.5	5407.5	5730.7	6112.6	6541.8	7027.4	7580.7	8216.0	8640.2

## 4. 设计驻退机

采用带沟槽式复进节制器的节制杆式驻退机, 筒后坐。

### (1) 确定主要结构尺寸:

#### a. 活塞工作面积 $A_o$

根据所允许的驻退机最大工作压力  $p_{1\max}$  求  $A_o$ 。取  $p_{1\max} = 220 \text{ 公斤力/厘米}^2$ ,

$$\phi_{o\max} = R_a - P_{fa} - (F + T - Q_o \sin \varphi_j) = R_a - P_{fa} - (v + f \cos \varphi_j - \sin \varphi_j) Q_o$$

$$= 23445 \text{ 公斤力}$$

$$A_o \approx \frac{\phi_{o\max}}{p_{1\max}} = 106.6 \text{ 厘米}^2$$

取  $A_o = 110 \text{ 厘米}^2$ 。

估算每射击一发驻退液的温升, 对  $A_o$  校核。

$$W_y \approx A_o(\lambda + 2e)$$

取  $e = 30$  毫米, 则  $W_y = 10.67$  分米<sup>3</sup>。

$$\Delta T = \eta \frac{\frac{1}{2} \frac{Q_o}{g} W_{\max}^2 (1 - \eta_T)}{427(C_y Q_y + C_g Q_g)}$$

$\eta = 0.8$ , 采用斯皆奥尔-M液做为驻退液,  $c_y = 0.78$  大卡/公斤度

$$Q_y = \gamma W_y = 1.1 W_y$$

$C_g = 0.115$  大卡/公斤度, 设  $Q_g = 100$  公斤。计算得  $\Delta T = 1.3$  度, 符合要求。

b. 驻退筒内径  $D_T$  及驻退杆直径  $d_T$

取  $\eta = \frac{D_T}{d_T} = 2.0$ , 则

$$d_T = 2 \sqrt{\frac{A_o}{\pi(\eta^2 - 1)}} = 68.3 \text{ 毫米}$$

$$D_T = \eta d_T = 136.6 \text{ 毫米}$$

调整后取  $d_T = 67$  毫米,  $D_T = 137$  毫米

c. 驻退杆内腔直径  $d_1$

驻退杆材料选用 40Cr,  $\sigma_s = 55$  公斤力/毫米<sup>2</sup>,  $[\sigma] = \frac{1}{2.75} \sigma_s = 20$  公斤力/毫米<sup>2</sup>, 设摩擦力为  $F_{sp} = 100$  公斤力, 则

$$d_1 = \sqrt{d_T^2 - \frac{4}{\pi} \frac{\phi_{o\max} + F_{sp}}{[\sigma]}} = 54.7 \text{ 毫米}$$

向小调整, 取  $d_1 = 54$  毫米。驻退杆壁厚为  $\delta = \frac{d_T - d_1}{2} = 6.5$  毫米

d. 节制环直径  $d_p$

取  $d_p = d_1 - 8 = 46$  毫米

e. 驻退筒外径  $D'_T$

驻退筒材料选用 35Cr,  $\sigma_s = 55$  公斤力/毫米<sup>2</sup>,  $[\sigma] = \frac{1}{3} \sigma_s = 18.33$  公斤力/毫米<sup>2</sup>

$$D'_T = D_T \sqrt{\frac{3[\sigma] + 2p_{1\max}}{3[\sigma] - 4p_{1\max}}} = 155.3 \text{ 毫米}$$

向大调整, 取  $D'_T = 156$  毫米。壁厚为  $\delta = \frac{D'_T - D_T}{2} = 9.5$  毫米

f. 驻退机工作长度  $L_z$

驻退活塞长度取为  $l = 70$  毫米, 余量取为  $e = 30$  毫米, 则

$$L_z = \lambda_{\max} + l + 2e = 1080 \text{ 毫米}$$

(2) 设计节制杆

根据下列公式设计主流液孔面积  $a_x$  和节制杆直径  $\delta_{x1}$

$$a_x = \frac{(A_o - A_p)^{3/2}}{\sqrt{\frac{20g}{K_1 \gamma} \frac{\phi_o}{V^2} - \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2}}}$$

$$A_o = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_T^2) = 112.15 \text{ 厘米}^2, \quad A_p = \frac{\pi}{4} d_p^2 = 16.62 \text{ 厘米}^2, \quad A_{fj} = \frac{\pi}{4} d_1^2 = 22.902$$

厘米<sup>2</sup>，通过结构设计，得到  $\Omega_1 = 6.28 \text{ 厘米}^2$ 。液压阻力系数分别取  $K_1 = 1.5, K_2 = 2K_1 = 3.0$

$$\phi_o = R - P_f - (F + T - Q_o \sin \varphi_j) = R - P_f - 769.62 \text{ 公斤力}$$

$$\delta_x = \sqrt{d_p^2 - \frac{4}{\pi} a_x}$$

列表计算

X (毫米)	0	11.960	44.258	86.323	135.37	182.34	227.38	270.67
R (公斤力)	4420	11509	15730	19507	23656	27803	27647	27492
P <sub>f</sub> (公斤力)	3085.8	3114.9	3195.9	3307.2	3445.9	3588.7	3735.8	3887.5
φ <sub>0</sub> (公斤力)	564.58	7624.5	11764	15430	19440	23445	23142	22835
V (米/秒)	0	5.6430	10.954	13.394	12.812	12.281	11.787	11.336
a <sub>x</sub> (厘米 <sup>2</sup> )	0	5.5937	8.8828	9.5205	8.0440	6.9837	6.7389	6.5180
δ <sub>x</sub> (毫米)	46	37.467	31.385	30.063	33.043	35.026	35.468	35.862
X (毫米)	312.32	352.40	390.99	428.11	463.77	498.01	530.84	562.26
R (公斤力)	27336	27180	27024	26869	26713	26557	26402	26246
P <sub>f</sub> (公斤力)	4044.0	4205.5	4372.2	4543.8	4720.2	4901.4	5087.0	5276.5
φ <sub>0</sub> (公斤力)	22522	22205	21882	21556	21223	20886	20545	20200
V (米/秒)	10.911	10.503	10.106	9.718	9.334	8.955	8.579	8.206
a <sub>x</sub> (厘米 <sup>2</sup> )	6.3114	6.1135	5.9210	5.7322	5.5447	5.3586	5.1726	4.9865
δ <sub>x</sub> (毫米)	36.227	36.573	36.907	37.231	37.550	37.864	38.176	38.485
X (毫米)	582.83	630	680	730	780	830	880	909.74
R (公斤力)	26140	25996	25843	25690	25537	25384	25231	25078
P <sub>f</sub> (公斤力)	5407.5	5730.7	6112.6	6541.8	7027.4	7580.7	8216.0	8640.2
φ <sub>0</sub> (公斤力)	19963	19496	18961	18379	17740	17034	16245	16438
V (米/秒)	7.953	7.347	6.648	5.871	4.981	3.899	2.377	0
a <sub>x</sub> (厘米 <sup>2</sup> )	4.8593	4.5378	4.1588	3.7261	3.2137	2.5638	1.5983	0
δ <sub>x</sub> (毫米)	38.695	39.220	39.831	40.516	41.314	42.303	43.732	46

检验能否保证驻退杆内腔充满液体:

$$\sqrt{\frac{K_2 \gamma}{20g}} A_{fj}^2 (A_o + A_{fj} - A_p) \left( \frac{V}{\sqrt{\phi_o}} \right)_{\max} = 3.585 \text{ 厘米}^2 < \Omega_1$$

能保证充满。

经过调整, 初步确定节制杆尺寸 (见下表):

$X$ (毫米)	-20	87	160	300	440	580	720	840	910	960
$\delta_x$ (毫米)	35.0	30.1	35.3	36.9	38.0	39.3	41.0	43.4	45.7	46.0

#### 四、计算后坐反面问题

##### 1. 数据准备

首先要重新计算自由后坐运动诸元, 思路方法与前面一样, 只是一些数据有所变动。炮口制退器效率采用设计计算的结果,  $\eta_T = 48.07\%$ ,  $\beta = 1.3705$ ,  $\chi = -0.2703$ ,  $b = 7.4911$  毫秒,  $\tau = 47.493$  毫秒

驻退机采用紧塞垫紧塞, 复进机采用双皮碗紧塞, 其摩擦力分别为

$$F_c = 0.83 f \pi d_1 l_c p_x = 0.83 \times 0.1 \times \pi \times 6.7 \times 6.0 \times 15 = 157 \text{ 公斤力}$$

$$F_f = 1.5 f \pi (D_f l_{f1} + d_f l_{f2}) p_f = 1.5 \times 0.07 \times \pi \times (8.5 \times 1.15 + 2.8 \times 0.75) p_f = 3.92 p_f$$

由于驻退筒内径为  $D_{TT} = 137$  毫米, 而驻退活塞直径为  $D_{Tr} = 136.75$  毫米, 所以需要考虑漏流的影响。漏流面积为

$$a_o = \frac{\pi}{4} (D_{TT}^2 - D_{Tr}^2) = 0.5375 \text{ 厘米}^2$$

取  $K'_1 = 3K_1$ , 则折合主流流液孔面积为

$$a_s = a_s + a_o \sqrt{\frac{K_1}{K'_1}} = a_s + 0.3103 \text{ 厘米}^2$$

##### 2. 计算公式

后坐反面问题采用两次近似计算, 第一次用矩形法, 第二次用梯形法。

(1) 火药气体作用时期

矩形法 
$$V_i = W_i - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{g}{Q_o} R_{i-1} \Delta t_i$$

$$X_i = L_i - (L_{i-1} - X_{i-1}) - (W_{i-1} - V_{i-1}) \Delta t_i - \frac{g}{Q_o} R_{i-1} \frac{\Delta t_i^2}{2}$$

$$R_i = (1 + v_z) f(a_{si}) V_i^2 + (1 + v_f) P_{fo} \left( \frac{W_o}{W_o - A_f X_i} \right)^n + N_o$$

梯形法

$$V_i = W_i - (W_{i-1} - V_{i-1}) - \frac{g}{2Q_o} (R_{i-1} + R_i) \Delta t_i$$

$$X_i = L_i - (L_{i-1} - X_{i-1}) - (W_{i-1} - V_{i-1}) \Delta t_i - \frac{g}{6Q_o} (R_i + 2R_{i-1}) \Delta t_i^2$$

$$R_i = (1 + v_z) f(a_{si}) V_i^2 + (1 + v_f) P_{fo} \left( \frac{W_o}{W_o - A_f X_i} \right)^n + N_o$$

上面公式中, 在弹丸膛内运动时期

$$W = \frac{q + 0.5\omega}{Q_o + q + \omega} v \quad L = \frac{q + 0.5\omega}{Q_o + q + \omega} l$$

在火药气体后效作用时期,  $t' = t - t_g$ ,

$$W = W_g + \frac{g \chi P_g}{Q_o} b (1 - e^{-\frac{t'}{b}})$$

$$L = L_g + W_g t' + \frac{g \chi P_g}{Q_o} b (t' - b (1 - e^{-\frac{t'}{b}}))$$

(2) 惯性运动时期

矩形法

$$V_i = V_{i-1} - \frac{g}{Q_o} R_{i-1} \Delta t_i$$

$$X_i = X_{i-1} + V_{i-1} \Delta t_i - \frac{g}{Q_o} R_{i-1} \frac{\Delta t_i^2}{2}$$

$$R_i = (1 + v_z) f(a_{zi}) V_i^2 + (1 + v_f) P_{fo} \left( \frac{W_o}{W_o - A_f X_i} \right)^n + N_o$$

梯形法

$$V_i = V_{i-1} - \frac{g}{2Q_o} (R_{i-1} + R_i) \Delta t_i$$

$$X_i = X_{i-1} + V_{i-1} \Delta t_i - \frac{g}{6Q_o} (R_i + 2R_{i-1}) \Delta t_i^2$$

$$R_i = (1 + v_z) f(a_{zi}) V_i^2 + (1 + v_f) P_{fo} \left( \frac{W_o}{W_o - A_f X_i} \right)^n + N_o$$

$$f(a_z) = \frac{K_1 \gamma}{20 g} \left[ \frac{(A_o - A_p)^3}{a_z^2} + \frac{K_2}{K_1} \frac{A_{fj}^3}{\Omega_1^2} \right]$$

$$N_o = F_o + Q_o f \cos \varphi - Q_o \sin \varphi$$

$$f = 0.18$$

$$v_z = 0 \quad v_f = \frac{3.92}{A_f} = 0.07749$$

$$P_g = s p_g = 142188 \text{ 公斤力}$$

液压阻力系数仍取  $K_1 = 1.5$ ,  $K_2 = 2K_1 = 3.0$ 。

### 3. 射角 $\varphi = 0^\circ$ 的后坐反面问题计算

射角  $\varphi = 0^\circ$  时,  $N_o = 625$  公斤力。分段列表计算。

(1) 弹丸膛内运动时期:

$t_i$ (毫秒)	0	1.40		2.40		3.40		4.40	
$\Delta t_i$ (毫秒)		1.40		1.00		1.00		1.00	
$W_i$ (米/秒)	0	0.3433		0.8132		1.5782		2.7106	
$V_i$ (米/秒)	0	0.3225	0.3224	0.7773	0.7772	1.5270	1.5266	2.6430	2.6419
$L_i$ (毫米)	0	0.2078		0.7635		1.9290		4.0388	
$X_i$ (毫米)	0	0.1932	0.1932	0.7205	0.7204	1.8424	1.8423	3.8924	3.8921
$\delta_{xi}$ (毫米)		34.075	34.075	34.051	34.051	34.000	34.000	33.906	33.906
$a_{zi}$ (厘米 <sup>2</sup> )		7.8099	7.8099	7.8228	7.8228	7.8503	7.8503	7.9003	7.9003

$f(a_{zi})$			125.32	125.32	124.93	124.93	124.09	124.09	122.59	122.59
$P_{fi}$ (公斤力)	3085.8		3086.3	3086.3	3087.5	3087.5	3090.3	3090.2	3095.2	3095.2
$R_i$ (公斤力)	3949.9		3963.5	3963.5	4027.3	4027.3	4244.1	4243.9	4816.4	4815.7
$t_i$ (毫秒)	5.40		6.40		7.80		9.00		10.21	
$\Delta t_i$ (毫秒)	1.00		1.00		1.40		1.20		1.21	
$W_i$ (米/秒)	4.1803		5.8353		8.1212		9.8545		11.342	
$V_i$ (米/秒)	4.0935	4.0913	5.7237	5.7202	7.9649	7.9564	9.6397	9.6335	11.059	11.053
$L_i$ (毫米)	7.4541		12.484		22.242		33.039		45.869	
$X_i$ (毫米)	7.2296	7.2289	12.158	12.157	21.725	21.721	32.291	32.288	44.813	44.811
$\delta_{zi}$ (毫米)	33.753	33.753	33.527	33.527	33.089	33.089	32.605	32.605	32.032	32.032
$a_{zi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	7.9815	7.9815	8.1008	8.1008	8.3300	8.3299	8.5797	8.5796	8.8708	8.8707
$f(a_{zi})$	120.21	120.21	116.85	116.85	110.78	110.78	104.72	104.72	98.292	98.293
$P_{fi}$ (公斤力)	3103.3	3103.3	3115.4	3115.4	3139.0	3139.0	3165.5	3165.5	3197.4	3197.3
$R_i$ (公斤力)	5983.1	5980.9	7809.7	7805.1	11035	11020	13767	13755	16090	16079
$t_i$ (毫秒)	11.31		12.41		13.62( $t_g$ )					
$\Delta t_i$ (毫秒)	1.10		1.10		1.21					
$W_i$ (米/秒)	12.43		13.273		14.009					
$V_i$ (米/秒)	12.074		12.071		12.841	12.839	13.491		13.490	
$L_i$ (毫米)	58.970		73.125		89.630					
$X_i$ (毫米)	57.557		57.556		71.276	71.276	87.204		87.204	
$\delta_{zi}$ (毫米)	31.448		31.448		30.820	30.820	30.115		30.115	
$a_{zi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	9.1618		9.1617		9.4690	9.4690	9.8067		9.8067	
$f(a_{zi})$	92.468		92.469		86.892	86.892	81.358		81.358	
$P_{fi}$ (公斤力)	3230.4		3230.4		3266.6	3266.6	3309.6		3309.6	
$R_i$ (公斤力)	17585		17578		18472	18468	18999		18996	

## (2) 火药气体后效作用时期:

$t_i$ (毫秒)	17.366		21.111		24.857		28.602		32.348	
$\Delta t_i$ (毫秒)	3.746		3.746		3.746		3.746		3.746	
$W_i$ (米/秒)	13.582		13.323		13.165		13.070		13.012	
$V_i$ (米/秒)	12.794	12.761	12.169	12.141	11.598	11.599	11.118	11.118	10.673	10.673
$L_i$ (毫米)	141.23		191.58		241.16		290.28		339.12	
$X_i$ (毫米)	136.36	136.32	182.97	182.93	227.37	227.37	269.90	269.89	310.69	310.69
$\delta_{zi}$ (毫米)	33.616	33.613	35.562	35.562	36.070	36.070	36.556	36.556	36.984	36.984
$a_{zi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	8.0540	8.0555	6.9965	6.9967	6.7110	6.7110	6.4338	6.4338	6.1865	6.1865
$f(a_{zi})$	118.15	118.11	154.90	154.89	167.91	167.91	182.24	182.24	196.69	196.69

$P_{fi}$ (公斤力)	3448.8	3448.7	3590.7	3590.6	3735.7	3735.7	3884.7	3884.7	4037.7	4037.7
$R_i$ (公斤力)	23681	23573	27430	27326	27236	27239	27339	27336	27382	27381
$t_i$ (毫秒)	36.093		39.839		43.584		47.330		51.075	
$\Delta t_i$ (毫秒)	3.746		3.746		3.746		3.746		3.746	
$W_i$ (米/秒)	12.977		12.956		12.943		12.935		12.930	
$V_i$ (米/秒)	10.251	10.253	9.8500	9.8523	9.4615	9.4638	9.0826	9.0842	8.7090	8.7101
$L_i$ (毫米)	387.78		436.34		484.84		533.31		581.74	
$X_i$ (毫米)	349.37	349.88	387.52	387.53	423.69	423.70	458.43	458.43	491.75	491.75
$\delta_{xi}$ (毫米)	37.392	37.392	37.588	37.588	37.872	37.872	38.171	38.171	38.481	38.481
$a_{zi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	6.0069	6.0069	5.8330	5.8329	5.6645	5.6645	5.4858	5.4858	5.2995	5.2995
$f(a_{zi})$	208.31	208.31	220.61	220.61	233.62	233.62	248.75	248.75	266.18	266.18
$P_{fi}$ (公斤力)	4195.0	4195.0	4356.7	4356.7	4522.8	4522.8	4693.0	4693.0	4867.4	4867.4
$R_i$ (公斤力)	27035	27046	26724	26734	26412	26422	26202	26209	26058	26063
$t_i$ (毫秒)	54.821				58.566			61.113( $t_A$ )		
$\Delta t_i$ (毫秒)	3.746				3.746			2.547		
$W_i$ (米/秒)	12.927				12.926			12.925		
$V_i$ (米/秒)	8.3389		8.3402		7.9728		7.9745		7.7274	
$L_i$ (毫米)	630.17				678.59			711.51		
$X_i$ (毫米)	523.68		523.68		554.23		554.24		574.23	
$\delta_{xi}$ (毫米)	38.777		38.777		39.061		39.061		39.246	
$a_{zi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	5.1196		5.1196		4.9462		4.9462		4.8320	
$f(a_{zi})$	284.85		284.85		304.81		304.81		319.14	
$P_{fi}$ (公斤力)	5045.4		5045.5		5226.9		5226.9		5352.1	
$R_i$ (公斤力)	25869		25875		25632		25641		25448	



$t_i$ (毫秒)	91.113		96.113		101.11		106.11		111.11	
$\Delta t_i$ (毫秒)	5.000		5.000		5.00		5.00		5.00	
$V_i$ (米/秒)	4.8784	4.8736	4.3922	4.3907	3.9067	3.9094	3.4302	3.4375	2.9717	2.9818
$X_i$ (毫米)	763.15	763.14	786.30	786.30	807.05	807.05	825.40	825.41	841.43	841.45
$\delta_{xi}$ (毫米)	41.863	41.863	42.326	42.326	42.741	42.741	43.108	43.108	43.447	43.448
$a_{xi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	3.1652	3.1653	2.8589	2.8590	2.5818	2.5817	2.3343	2.3341	2.1038	2.1034
$f(a_{xi})$	736.95	736.90	902.13	902.11	1105.0	1105.1	1350.7	1350.8	1661.7	1662.3
$P_{fi}$ (公斤力)	6856.8	6856.7	7093.2	7093.2	7317.5	7317.5	7526.6	7526.8	7718.2	7718.4
$R_i$ (公斤力)	25552	25516	25671	25659	25375	25399	24627	24697	23614	23721
$t_i$ (毫秒)	116.11		121.11		126.11		131.11		136.11	
$\Delta t_i$ (毫秒)	5.00		5.00		5.00		5.00		5.00	
$V_i$ (米/秒)	2.5343	2.5334	2.0843	2.0927	1.6581	1.6764	1.2731	1.2991	0.9483	0.9693
$X_i$ (毫米)	855.24	855.24	866.78	866.80	876.17	876.20	883.58	883.62	889.22	889.27
$\delta_{xi}$ (毫米)	43.901	43.901	44.280	44.280	44.589	44.590	44.832	44.833	45.017	45.019
$a_{xi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	1.7925	1.7926	1.5299	1.5295	1.3145	1.3138	1.1436	1.1426	1.0128	1.0117
$f(a_{xi})$	2286.9	2286.8	3137.7	3139.0	4248.3	4252.8	5610.8	5620.6	7152.3	7168.2
$P_{fi}$ (公斤力)	7890.1	7890.1	8039.2	8039.3	8164.1	8164.5	8265.1	8265.7	8343.5	8344.2
$R_i$ (公斤力)	23814	23803	22919	23034	21102	21373	18625	19016	15939	16351
$t_i$ (毫秒)	141.11		146.11		151.11		156.11		161.11	
$\Delta t_i$ (毫秒)	5.00		5.00		5.00		5.00		5.00	
$V_i$ (米/秒)	0.6609	0.6879	0.4272	0.4484	0.2265	0.2401	0.0440	0.0498	-0.1349	-0.1365
$X_i$ (毫米)	893.34	893.39	896.18	896.21	897.90	897.92	898.63	898.64	898.43	898.43
$\delta_{xi}$ (毫米)	45.153	45.154	45.246	45.247	45.302	45.303	45.326	45.327	45.320	45.320
$a_{xi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	0.9169	0.9158	0.8508	0.8500	0.8105	0.8100	0.7934	0.7932	0.7981	0.7982
$f(a_{xi})$	8726.6	8746.6	10134	10154	11165	11180	11652	11659	11514	11512
$P_{fi}$ (公斤力)	8401.7	8402.3	8442.1	8442.6	8466.8	8467.1	8477.3	8477.5	8474.4	8474.4
$R_i$ (公斤力)	13489	13817	11571	11763	10321	10393	9781.8	9788.3	9965.6	9970.7

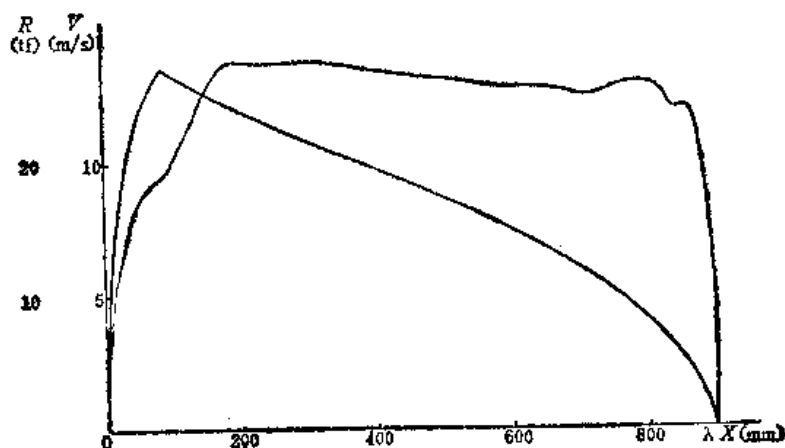
插值求出  $V_\lambda = 0$  时,  $\lambda = 898.58$  毫米。  $t_h = 157.45$  毫秒  $= 0.15745$  秒,  $R_m = 27381$  公斤力。反面问题计算的  $R-X$ ,  $V-X$  曲线见图 15-2。

#### 4. 射角 $\varphi = 45^\circ$ 的后坐反面问题计算

计算思路和方法与射角  $\varphi = 0^\circ$  时的后坐反面问题计算相同。具体计算过程从略。计算结果:

$$\lambda = 907.25 \text{ 毫米} \quad R_m = 28865 \text{ 公斤力} \quad t_h = 154.53 \text{ 毫秒} = 0.15453 \text{ 秒}$$

反面计算的结果基本符合要求。

图15-2 反面问题计算的  $R-X$ ,  $V-X$  曲线

### 五、复进问题的设计计算

采用复进全长制动的复进节制器,复进节制沟槽采用部分长度上深度为常数的形式,复进机内设置复进节制活瓣。复进节制活瓣的漏口为  $12 \times \phi 4$ , 所以,

$$a_K = 12 \times \frac{\pi}{4} \times 0.4^2 = 1.5080 \text{ 厘米}^2$$

复进稳定极限角为

$$\varphi_f = \text{tg}^{-1} \frac{L - d_z}{H_z} = 29.84^\circ$$

在零度射角下设计复进节制沟槽。当  $\varphi = 0^\circ$  时,  $\lambda = 898.58$  毫米。

#### 1. 确定复进节制沟槽的常数漏口面积 $a_{fo}$

驻退机的复进工作腔内真空消失点为

$$\rho = \frac{d_T^2}{D_T^2 - d_p^2} \lambda = 242.22 \text{ 毫米}$$

求  $\rho$  点的极限稳定复进合力  $r_{jp}$ :

$$Q_z D_{oef} = Q_z D_{oo} - Q_q l_q \cos \alpha + Q_q l_q \cos(\varphi_f + \alpha) = 22748000 \text{ 公斤力}$$

$$D_{oef} = 3610.8 \text{ 毫米}$$

$$r_{jp} = \frac{Q_z(L - D_{oef}) + Q_o(\lambda - \rho) \cos \varphi_f}{H_z \cos \varphi_f + d + (L - d_z) \sin \varphi_f} = 2103.1 \text{ 公斤力}$$

取  $\eta = 0.9$ , 则  $\eta |r_{jp}| = 1892.8$  公斤力

求  $\rho$  点和复进起始点的复进剩余力:

$$P_{sh} = (1 - v_f) P_{fo} \left[ \frac{W_o}{W_o - A_f(\lambda - \xi)} \right]^n - N'_c$$

$$v_f = 0.07749 \quad P_{fo} = 3085.8 \text{ 公斤力} \quad W_o = 8.4123 \text{ 分米}^3 \quad A_f = 50.587 \text{ 厘米}^2$$

$$N'_c = F_o + Q_o(f \cos 0^\circ + \sin 0^\circ) = 157 + 2600 \times 0.18 = 625 \text{ 公斤力}$$

所以

$$P_{shp} = 4842.3 \text{ 公斤力} \quad P_{shl} = 7194.7 \text{ 公斤力}$$

$0 \sim \rho$  段复进剩余力的曲线拟合系数

$$\alpha = \ln \frac{P_{sh\lambda}}{P_{sh\rho}} = 0.39595$$

活塞复进工作面积

$$A_{of} = \frac{\pi}{4} (D_T^2 - d_p^2) = 130.79 \text{ 厘米}^2$$

复进液压阻力系数分别取  $K_1 = 1.5$ ,  $K_2 = 3.0$ ,  $K_K = 2.5$

$$a_{xp} = \frac{\pi}{4} (d_p^2 - d_{xp}^2) + 0.3103 = 4.2199 \text{ 厘米}^2$$

$$f_f(a_{xp}) = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{of}^3}{a_{xp}^2} = 1056.6$$

$$f_f(a_K) = \frac{K_K \gamma}{20g} \frac{A_K^3}{a_K^2} = 797.90$$

$$a_{fo} = \frac{A_{fi}}{\sqrt{\frac{20g}{K_2 \gamma A_{fi}} \left[ \frac{P_{sh\rho} f_f(a_{xp})}{\eta |r_{fp}|} - f_f(a_K) \right] - 1}} = 0.32968 \text{ 厘米}^2$$

取沟槽条数为 2, 沟槽宽为  $B = 7$  毫米, 沟槽深度为  $h_o = 2.1$  毫米,

$$a_{fo} = 2Bh_o = 0.294 \text{ 厘米}^2$$

验算  $\rho$  点的稳定性:

$$f_f(a_{fo}) = \frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{(A_{fi} + a_{fo})^3}{a_{fo}^2} = 2428.6$$

$$P_{ff} = \frac{2g}{Q_o} f_f(a_{fo}) = 18.327 \text{ 1/米} \quad P_{kf} = \frac{2g}{Q_o} f_f(a_K) = 6.021 \text{ 1/米}$$

$$U_p^2 = \frac{2g}{Q_o} \frac{P_{sh\lambda}}{P_{kf} + P_{ff} - \frac{a}{\rho}} [e^{-\alpha} - e^{-(P_{kf} + P_{ff})\rho}] = 1.6022 (\text{米/秒})^2$$

$$\eta |r_{fp}| + P_{sh\rho} = 6735.1 \text{ 公斤力}$$

$$[f_f(a_{xp}) + f_f(a_{fo}) + f_f(a_K)] U_p^2 = 6862.4 \text{ 公斤力} > 6735.1 \text{ 公斤力}$$

$\rho$  点稳定性不满足, 重选  $a_{fo}$ , 验算, 最后确定  $h_o = 2$  毫米,  $a_{fo} = 2Bh_o = 0.28 \text{ 厘米}^2$ 。

## 2. 计算 0~l 段复进反面问题, 确定 l 点

复进反面问题的计算公式为

$$U_i^2 = \frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2 + \frac{C_i}{A_i}$$

对于 0~ $\rho$  段

$$A_i = 1 + \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i [f_f(a_{fo}) + f_f(a_K)]$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i [f_f(a_{fo}) + f_f(a_K)]$$

$$C_i = \frac{g}{Q_o} \Delta \xi_i (P_{shi} + P_{shi-1})$$

对于  $\rho \sim l$  段

$$A_i = 1 + \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{zi}) + f_f(a_{fo}) + f_f(a_k)]$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{zi-1}) + f_f(a_{fo}) + f_f(a_k)]$$

$$C_i = \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i (P_{zhi} + P_{zhi-1})$$

$$a_{zi} = \frac{\pi}{4} (d_p^2 - \delta_{zi}^2) + 0.3103$$

$$f_f(a_{zi}) = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{0f}^3}{a_{zi}^2}$$

$$f_f(a_{fo}) = \frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{(A_{fi} + a_{fo})^3}{a_{fo}^2} = 2672.7$$

$$f_f(a_k) = 797.90$$

$$P_{zhi} = (1 - \gamma_f) P_{fo} \left[ \frac{W_0}{W_0 - A_f(\lambda - \xi_i)} \right]^n - N'_z$$

复进合力在  $l \sim \lambda$  段取对行程  $\xi$  按余弦函数规律变化。因此根据功能关系, 要保证复进到位无冲击, 就要保证满足

$$U_\lambda^2 = U_l^2 - \frac{g}{Q_0} (\eta |r_{jk}| + |r_l|)(\lambda - l) = 0$$

其中

$$\eta |r_{jk}| = \eta \frac{Q_z(L - D_{off})}{H_z \cos \varphi_f + d + (L - d_z) \sin \varphi_f} = 1001.8 \text{ 公斤力}$$

用上式作为检验确定  $l$  点的依据。

分别计算  $0 \sim \rho$  段和  $\rho \sim l$  段的复进反面问题, 并确定  $l$  点。

(1)  $0 \sim \rho$  段:

列表计算

$\xi_i$ (毫米)	0	50	100	150	200	225	242.22 ( $\rho$ )
$\Delta \xi_i$ (毫米)		50	50	50	50	25	17.22
$P_{zhi}$ (公斤力)	7194.7	6576.5	6039.7	5569.8	5155.6	4966.4	4842.3
$A_i$		1.6547	1.6547	1.6547	1.6547	1.3274	1.2255
$B_i$		0.3453	0.3453	0.3453	0.3453	0.6726	0.7745
$C_i$		2.5980	2.3801	2.1902	2.0234	0.9548	0.6373
$U_i^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )	0	1.5701	1.7660	1.6921	1.5759	1.5187	1.4798
$U_i$ (米/秒)	0	1.2530	1.3289	1.3008	1.2554	1.2320	1.2165

(2)  $\rho \sim l$  段:

列表计算

$\xi_i$ (毫米)	242.22( $\rho$ )	250	260	270	320	370	420
$\Delta \xi_i$ (毫米)		7.78	10	10	50	50	50
$\delta_{xi}$ (毫米)		40.113	40.011	39.890	39.287	38.823	38.358
$a_{xi}$ (厘米 <sup>2</sup> )		4.2792	4.3560	4.4320	4.8070	5.0916	5.3735
$f_i(a_{xi})$	1056.6	1027.5	991.6	957.9	814.3	725.8	651.6
$P_{shi}$ (公斤力)	4842.3	4787.9	4719.3	4652.3	4338.1	4055.6	3800.4
$A_i$		1.1320	1.1684	1.1671	1.8084	1.7917	1.7777
$B_i$		0.8671	0.8303	0.8316	0.1645	0.1916	0.2083
$C_i$		0.2827	0.3587	0.3536	1.6961	1.5835	1.4821
$U_i^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )	1.4798	1.3832	1.2899	1.2221	1.0491	0.9960	0.9504
$U_i$ (米/秒)	1.2165	1.1761	1.1358	1.1055	1.0242	0.9980	0.9749
$U_{i\lambda}^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )							
$\xi_i$ (毫米)	470	520	570	620	670	720	770
$\Delta \xi_i$ (毫米)	50	50	50	50	50	50	50
$\delta_{xi}$ (毫米)	37.910	37.517	37.125	36.655	36.084	35.512	33.062
$a_{xi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	5.6418	5.8746	6.1045	6.3768	6.7030	7.0247	8.3442
$f_i(a_{xi})$	591.1	545.2	504.9	462.7	418.8	381.3	270.2
$P_{shi}$ (公斤力)	3568.8	3357.8	3164.9	2987.9	2825.1	2674.7	2535.6
$A_i$	1.7663	1.7576	1.7500	1.7420	1.7338	1.7267	1.7057
$B_i$	0.2223	0.2337	0.2424	0.2500	0.2580	0.2662	0.2733
$C_i$	1.3902	1.3067	1.2305	1.1607	1.0966	1.0376	0.9829
$U_i^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )	0.9067	0.8640	0.8228	0.7844	0.7492	0.7164	0.6910
$U_i$ (米/秒)	0.9522	0.9295	0.9071	0.8857	0.8656	0.8464	0.8313
$U_{i\lambda}^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )				-0.3710	-0.1914	-0.0157	0.3214

插值求得  $l = 722.33$  毫米。经计算,  $U_l^2 = 0.7149 \text{ 米}^2/\text{秒}^2$ ,  $|r_l| = 84.58$  公斤力

### 3. 设计 $l \sim \lambda$ 段的复进节制沟槽

这一段的复进合力  $r$  取对复进行程  $\xi$  按下面余弦规律变化:

$$|r| = |r_l| + \frac{1}{2}(\eta|r_{jk}| - |r_l|) \left( 1 - \cos \frac{\xi - l}{\lambda - l} \pi \right)$$

$$U^2 = U_l^2 - \frac{g}{Q_0} \left[ (\eta|r_{jk}| + |r_l|)(\xi - l) - \frac{1}{\pi}(\eta|r_{jk}| - |r_l|)(\lambda - l) \sin \frac{\xi - l}{\lambda - l} \pi \right]$$

$$l = 722.33 \text{ 毫米} \quad |r_l| = 84.58 \text{ 公斤力} \quad U_l^2 = 0.7149 \text{ 米}^2/\text{秒}^2$$

按下面公式设计复进节制漏口面积  $a_l$  及沟槽深度  $h$ :

$$a_f = \frac{A_{fi}}{\sqrt{\frac{20g}{K_2 \gamma A_{fi}} \frac{\phi_{fi}}{U^2} - 1}}$$

$$h = \frac{a_f}{2B} \quad B = 7 \text{ 毫米}$$

其中

$$\phi_{fi} = P_{shi} - (f_f(a_{zi}) + f_f(a_{fi}))U^2 + |r|$$

$$f_f(a_{zi}) = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{0f}^3}{a_{zi}^2} \quad f_f(a_k) = 797.90$$

列表设计计算

$\xi$ (毫米)	722.33 (I)	740	760	780	800	820	840	860	880	898.58
$ r $ (公斤力)	84.58	107.14	134.14	166.28	203.22	245.84	293.70	347.57	407.88	475.18
$U^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )	0.7349	0.7036	0.6813	0.6648	0.6573	0.6539	0.6504	0.6478	0.6457	0.6437
$\delta_x$ (毫米)		35.119	33.774	32.350	30.925	30.486	31.461	32.317	33.233	
$a_z$ (厘米 <sup>2</sup> )		7.1935	7.9704	8.7100	9.4181	9.6259	9.1851	8.7267	8.2551	
$f_f(a_z)$		363.1	296.2	248.0	212.1	202.9	223.0	247.1	276.1	
$P_{shi}$ (公斤力)		2617.8	2562.6	2509.1	2457.1	2406.6	2357.6	2309.9	2263.6	
$\phi_{fi}$ (公斤力)		1909.2	2001.3	2141.0	2322.1	2521.1	2722.5	2921.3	3099.0	
$a_f$ (厘米 <sup>2</sup> )	0.28	0.2769	0.2653	0.2494	0.2283	0.2031	0.1737	0.1384	0.0930	0
$h$ (毫米)	2	1.971	1.895	1.781	1.631	1.451	1.241	0.989	0.665	0

经过调整, 初步确定的  $l \sim \lambda$  段复进节制沟槽深度, 列于下表

$x$ (毫米)	-5	5	30	60	85	110	150
$h$ (毫米)	0	0.4	0.9	1.3	1.6	1.8	2.0

调整后,  $l = 748.58$  毫米。4. 计算  $l \sim \lambda$  段复进反面问题 $l \sim \lambda$  段的复进反面问题计算公式为

$$U_i^2 = \frac{B_i}{A_i} U_{i-1}^2 + \frac{C_i}{A_i}$$

其中

$$A_i = 1 + \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{zi}) + f_f(a_{fi}) + f_f(a_k)]$$

$$B_i = 1 - \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i [f_f(a_{zi-1}) + f_f(a_{fi}) + f_f(a_k)]$$

$$C_i = \frac{g}{Q_0} \Delta \xi_i (P_{shi} + P_{shi-1})$$

$$f_f(a_{zi}) = \frac{K_1 \gamma}{20g} \frac{A_{0f}^3}{a_{zi}^2}$$

$$f_f(a_{fi}) = \frac{K_2 \gamma}{20g} \frac{(A_{fi} \pm a_{fi})^3}{a_{fi}^2}$$

$$f_f(a_k) = 797.90$$

$$a_{fi} = 2Bh_i \quad B = 7 \text{ 毫米}$$

$$P_{shi} = (1 - v_f) P_{fo} \left[ \frac{W_o}{W_o - A_f(\lambda - \xi_i)} \right]^n - N'_c$$

列表计算

$\xi_i$ (毫米)	748.58(1)	780	810	840	850	860	870
$\Delta \xi_i$ (毫米)	28.58	31.42	30	30	10	10	10
$\delta_{xi}$ (毫米)	34.588	32.350	30.213	31.401	31.859	32.317	32.775
$a_{xi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	7.5334	8.7100	9.7600	9.1851	8.9576	8.7267	8.4926
$f_f(a_{xi})$	331.5	248.0	197.5	223.0	234.5	247.1	260.9
$h_i$ (毫米)	2.0	1.8429	1.6286	1.2811	1.1477	1.0144	0.8716
$a_{fi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	0.28	0.2580	0.2280	0.1793	0.1607	0.1420	0.1220
$f_f(a_{fi})$	2672.7	3138.9	4003.5	6429.8	7991.1	10205	13787
$P_{shi}$ (公斤力)	2593.9	2509.1	2431.7	2357.6	2333.6	2309.9	2286.6
$A_i$	1.4100	1.4961	1.5658	1.8434	1.3405	1.4245	1.5601
$B_i$	0.5846	0.4940	0.4284	0.1595	0.6600	0.5760	0.4404
$C_i$	0.5681	0.6050	0.5593	0.5421	0.1770	0.1752	0.1734
$U_i^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )	0.6999	0.6355	0.5311	0.3400	0.2994	0.2441	0.1801
$U_i$ (米/秒)	0.8366	0.7972	0.7287	0.5831	0.4572	0.4940	0.4243
$\xi_i$ (毫米)	880	885	890	893	895	896.8	898.58(2)
$\Delta \xi_i$ (毫米)	10	5	5	3	2	1.8	1.78
$\delta_{xi}$ (毫米)	33.233	33.462	33.691	33.829	33.920	34.003	34.084
$a_{xi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	8.2551	8.1352	8.0144	7.9412	7.8928	7.8485	7.8052
$f_f(a_{xi})$	276.1	284.3	292.9	298.4	302.0	305.4	308.8
$h_i$ (毫米)	0.6716	0.5716	0.4716	0.4116	0.3432	0.2712	0.2000
$a_{fi}$ (厘米 <sup>2</sup> )	0.0940	0.0800	0.0660	0.0576	0.0480	0.0380	0.0280
$f_f(a_{fi})$	23136	31882	46750	61306	88067	140850	258649
$P_{shi}$ (公斤力)	2263.6	2252.2	2240.9	2234.2	2229.7	2225.7	2221.7
$A_i$	1.9135	1.6219	1.9025	1.7063	1.6729	1.9641	2.7445
$B_i$	0.0871	0.3783	0.0976	0.2937	0.3272	0.0359	-0.7445
$C_i$	0.1717	0.0852	0.0848	0.0507	0.0337	0.0303	0.0299
$U_i^2$ (米 <sup>2</sup> /秒 <sup>2</sup> )	0.0979	0.0754	0.0484	0.0380	0.0276	0.0159	0.0066
$U_i$ (米/秒)	0.3129	0.2745	0.2201	0.1950	0.1661	0.1282	0.0811

计算结果,  $U_i = 0.0811$  米/秒, 符合要求。

## 第十六章 反后坐装置设计有关计算机程序介绍

### 第一节 关于后坐计算的RECOIL程序介绍

#### 一、程序的功能

RECOIL程序是用 FORTRAN IV 语言书写的, 包括主程序和子程序共 26 个, 1100 余条语句。其功能如下:

1. 可完成后坐正面问题计算 (包括后坐运动诸元计算, 后坐流液孔设计, 节制杆初调整和再调整) 以及后坐反面问题计算。可以按先正面计算后反面计算的顺序作系统计算并分段输出计算结果, 也可以作部分计算和输出;
2. 适用于节制杆式驻退机、弹簧式或液体气压式复进机的结构型式;
3. 可输出后坐运动诸元计算、后坐流液孔设计、节制杆初调整和再调整 以及 后坐反面问题计算的表格形式的结果并给出相应各曲线的示意图。

#### 二、程序框图

RECOIL程序的框图(见下页)。

##### 1. 逻辑量说明

IA——复进机逻辑符, 用以判别采用复进机的型式。

IA = 1 采用弹簧式复进机;

IA = 0 采用液体气压式复进机。

IB——初调整逻辑符, 用以判别初调整时起始段调整的形状。

IB = 1 节制杆初调整时将起始段调整为圆柱段;

IB = 0 节制杆初调整时将起始段调整为圆锥段。

IC——制动图逻辑符, 用以判别采用何种制动图形。

IC = 1 采用固定炮第二类制动图;

IC = 2 采用野炮第一类制动图;

IC = 3 采用野炮第二类制动图;

IC = 4 采用野炮第三类制动图。

ID——计算入口逻辑符, 用以判别计算的起点。

ID = 1 从运动诸元开始算起;

ID = 2 从流液孔尺寸开始算起;

ID = 3 从节制杆初调整开始算起;

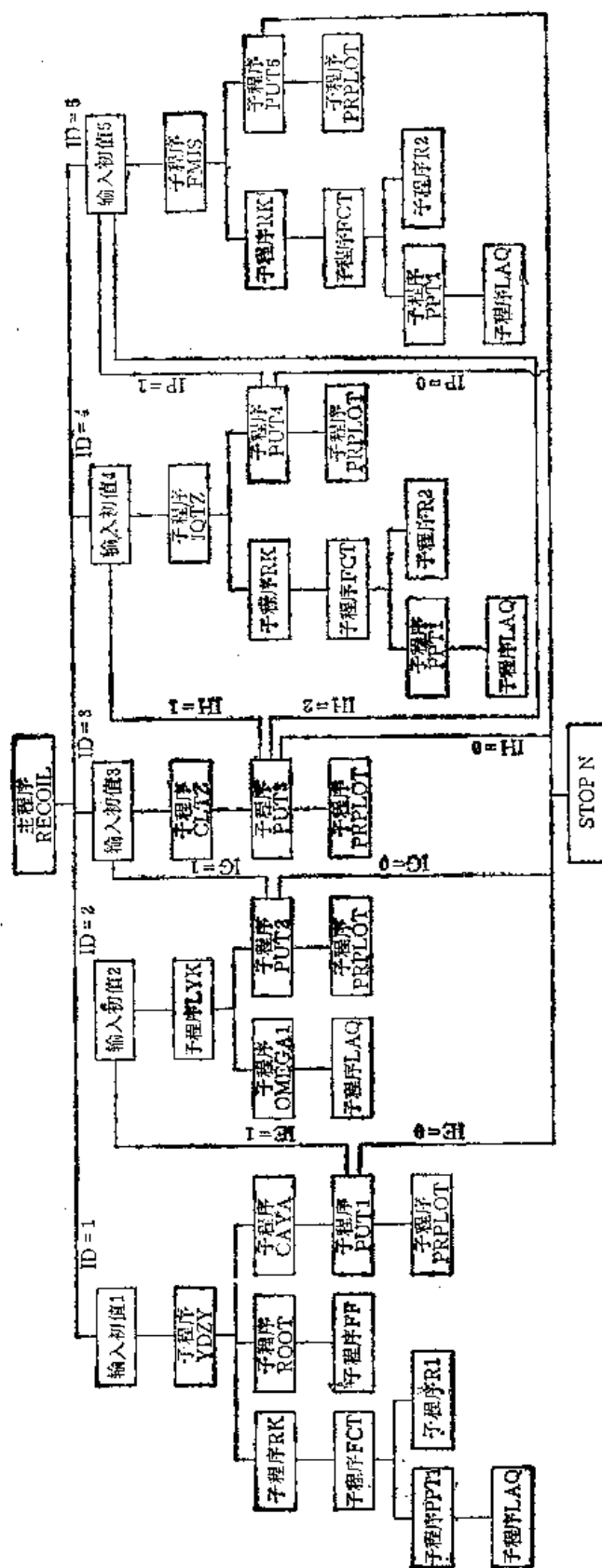
ID = 4 从节制杆再调整开始算起;

ID = 5 从反面问题开始算起。

IE、IG、IH、IP——计算出口逻辑符, 用以判别计算结束停机或继续下一步的计算。

IE = 1 表示运动诸元计算结束, 继续进行流液孔尺寸计算;





- IE = 0 表示运动诸元计算结束, 停机。  
 IG = 1 表示流液孔尺寸计算结束, 继续进行节制杆初调整;  
 IG = 0 表示流液孔尺寸计算结束, 停机。  
 IH = 1 表示节制杆初调整计算结束, 继续进行节制杆再调整;  
 IH = 2 表示节制杆初调整计算结束后, 继续进行后坐反面问题计算;  
 IH = 0 表示节制杆初调整计算结束, 停机。  
 IP = 1 表示节制杆再调整计算结束, 继续进行后坐反面问题计算;  
 IP = 0 表示节制杆再调整计算结束, 停机。

## 2. 正面和反面问题的龙格-库塔解法

由驻退方程

$$\frac{Q_0}{g} \frac{d^2 X}{dt^2} = P_{pt} - R$$

初始条件: 当  $t = 0$  时,  $X = 0$ ,  $V = 0$ ,  $R = R_0$ ,  $P_{pt} = P_{pt0}$ 。上述微分方程的初值问题, 可以用定步长的龙格-库塔法求解。将方程化为如下形式:

$$\begin{cases} \frac{dV}{dt} = \frac{g}{Q_0} (P_{pt} - R) \\ \frac{dX}{dt} = V \end{cases}$$

对于龙格-库塔法的详细的论述请参阅有关计算方法的书籍。这里只对式中  $R$ 、 $P_{pt}$  项作如下简要说明。

后坐阻力  $R$  在正面和反面问题中的求法不同。在正面问题中  $R$  可根据后坐制动图形确定:

$$R = R(t) \text{ 或 } R = R(X)$$

子程序  $R_1(T, y)$  给出了正面问题中四种后坐制动图形供计算选用。对于反面问题,  $R$  由下式确定

$$R = (1 + v_x) f(a_x) V^2 + (1 + v_f) P_f + N_s$$

子程序  $R_2(y)$  给出了适用于节制杆式驻退机和两种型式复进机及不同紧塞结构的后坐阻力  $R$ 。

关于膛合力  $P_{pt}$ , 对于膛内时期应用

$$P_{pt} = -\frac{1}{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{2} - \frac{\omega}{q} \right) s p$$

求得。对于后效期, 应用指数规律的经验公式求得, 先有

$$P_s = -\frac{1}{\varphi} \left( \varphi_1 + \frac{1}{2} - \frac{\omega}{q} \right) s p_s$$

再应用

$$P_{pt} = \chi P_s e^{-\frac{t-t_s}{b}}$$

式中:  $\chi$  为炮口制退器冲量特征量。此时  $t$  以后坐开始为起点计算。由于膛内时期内弹道给出了  $p-t$  的表格函数, 为了适应求解微分方程的时间步长, 本程序采用拉格朗日二次插值 (子程序 LAQ), 求出对应于任意时间  $t$  的膛内平均压力  $p$ , 进而可得到对应该时间的膛合力。膛合力的求得在子程序 PPT1( $T$ ) 中完成。

解驻退方程时, 求不同  $R$ 、 $P_{pr}$  值将在子程序 FCT 中完成。以上构成 RECOIL 程序求解正面、反面问题的基本骨架。

### 3. 主要子程序的说明

(1) 子程序 YDZY。求解正面问题中运动诸元计算子程序。它调用 RK (定步长的龙格-库塔标准子程序)、FCT、R1、PPT1 和 LAQ 子程序, 并调用 ROOT、FF 和 CAYA, 以及 PUT1 和 PRPLOT 子程序。

(2) 子程序 ROOT 和子程序 FF。在解运动诸元的过程中, 最大速度点  $t_{01}$  通过解超越方程得到。对于野炮第三类制动图和固定炮第二类制动图, 有

$$\chi P_g e^{-\frac{t}{b}} - R_g = 0$$

对于野炮第一类制动图, 有

$$\chi P_g e^{-\frac{t}{b}} - \left[ R_g - \left( \frac{R_g - R_k}{\tau} \right) t \right] = 0$$

对于野炮第二类制动图, 有

$$\chi P_g e^{-\frac{t}{b}} - \left[ R_g - \left( \frac{R_g - R_k}{t_k - t_0} \right) (t_g + t - t_0) \right] = 0$$

子程序 ROOT 是用 0.618 法求解超越方程的标准子程序。而子程序 FF 是 ROOT 要求的求上述方程的左端函数值。

确定出  $t_{01}$  后, 可求出对应之  $X_{01}$  和  $V_m$  值。

(3) 子程序 CAYA。对所求得的若干点的运动诸元进行采样处理, 使之成为包括某些特征点 (即  $t_m$ 、 $t_g$ 、 $t_{01}$  和  $t_k$  等) 在内的 20~30 点, 并贮存在工作数组  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  中, 即

$$A \leftarrow T; B \leftarrow X; C \leftarrow V; D \leftarrow P_{pr}; E \leftarrow R$$

为下一步求解流液孔尺寸和节制杆初调整作准备。

(4) 子程序 PUT1。列表输出经采样处理后的运动诸元计算结果, 如表 16-1 所示。同时调用子程序 PRPLOT 输出  $V-t$ 、 $P_{pr}-t$  和  $R-t$  示意曲线。

表 16-1 子程序 PUT1 的输出格式  
RECOIL MECHANISM DESIGN  
(1) COMPUTATION OF MOTIONAL DATA

T(S)	X(M)	V(M/S)	PPT(KGF)	R(KGF)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

(5) 子程序 PRPLOT。绘制示意曲线子程序。

(6) 子程序 LYK。计算流液孔尺寸  $a_x$  和  $\delta_x$ 。它调用子程序 OMEGA1、LAQ 和 PUT2, PRPLOT。

(7) 子程序 OMEGA1。后坐正面问题中, 计算出满足内腔充满条件的支流最小截面积。根据运动诸元计算采样结果, 以  $\Delta X = 0.002$  米等间隔计算出支流最小截面积  $\Omega_1$ , 并筛选出  $\Omega_{1min}$  作为计算  $a_x$ 、 $\delta_x$  的依据。为了使采样结果适应于  $\Delta X$  需要, 本子程序调用子程序 LAQ, 进行二次插值。

(8) 子程序 PUT2。列表输出流液孔计算结果, 如表 16-2 所示。并打印出  $a_r-X$ 、 $\delta_r-X$  示意曲线。

表16-2 子程序PUT2的输出格式

RECOIL MECHANISM DESIGN

(2) COMPUTATION OF ORIFICE AREA

X(M)	V(M/S)	PHIO(KGF)	AX(CM <sup>2</sup> )	DE(CM)
:	:	:	:	:

表中, PHIO— $\phi_0$ ;

DE— $\delta_r$ 。

(9) 子程序 CLTZ。进行节制杆理论外形的初调整, 按给定起始段结构型式, 在保证与理论  $R-X$  曲线误差最小的条件下, 自动将理论节制杆外形调正为若干个锥度。

(10) 子程序 PUT3。列表输出节制杆初调整结果, 如表 16-3 所示。并打印出  $\delta_r-X$  示意曲线。

表16-3 子程序PUT3的输出格式

RECOIL MECHANISM DESIGN

(3) ROUGH ADJUSTMENT OF CONTROL ROD

No (节制杆锥度段数)	X(M)	DE(CM)
:	:	:

(11) 子程序 JQTZ。进行节制杆再调整。利用反面问题计算进行节制杆再调整的原理, 已在第七章第五节中介绍, 这里不再叙述。当用数组形式给出后坐阻力调整范围 RCM, 并给出调整精度 EPS2 和节制杆增量 SB 后, 调用子程序 RK、FCT、PPT1、R2 和 LAQ 等, 用反面问题计算逐段调整。

(12) 子程序 PUT4。列表输出节制杆再调整结果, 如表 16-4 所示。

表16-4 子程序PUT4的输出格式

RECOIL MECHANISM DESIGN

(4) SMOOTH ADJUSTMENT OF CONTROL ROD

No	J1	J2	X(M)	DE(CM)	EPS
:	:	:	:	:	:

表中: J1——在调整中节制杆直径增加的次数;

J2——在调整中节制杆直径减少的次数;

DE——经再调整后节制杆直径;

EPS——节制杆某段经再调整后, 反面计算所得的最大后坐阻力与给定 RCM 之差值与 RCM 的百分比。

(13) 子程序 FMJS。进行反面问题计算的子程序, 它调用子程序 RK、FCT、PPT1、R2 和 LAQ 等。

(14) 子程序 PUT5。列表输出后坐反面问题计算结果, 如表 16-5 所示, 并输出  $V-X$ 、PPT-1 和  $R-X$  示意曲线。

表16-5 子程序PUT5的输出格式  
RECOIL MECHANISM DESIGN  
(5) COMPUTATION OF REVERSE PROBLEM

T(S)	X(M)	V(M/S)	PPT(KGF)	PF(KGF)	R(KGF)
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

表中: PF—— $P_f$ 。

### 三、关于计算误差的讨论

RECOIL 程序应用龙格-库塔法解驻退方程来计算后坐正面和反面问题, 不同于前面在第五章和第七章介绍的手算方法。如在膛内时期, 对积分  $\int_0^t P_{pr} dt$  处理方法, 本程序利用龙格-库塔法对炮膛合力进行数值积分, 而手算则利用动量守恒求自由后坐诸元来代替直接求这个积分。我们知道龙格-库塔法本身的误差是较小的, 特别是当步长取得较小的情况, 其计算误差比手算要小得多。在这里我们只讨论对炮膛合力进行数值积分与动量守恒求自由后坐诸元两者的误差。

在全炮膛具有相同截面积; 火药气体质点在弹丸后部空间均匀分布; 火药气体质点运动速度直线分布等假设下, 由动量守恒原理, 可得出

$$W = \frac{q + 0.5\omega}{Q_0 + q + \omega} v \quad (5-7)$$

在炮口点, 有

$$W_s = \frac{q + 0.5\omega}{Q_0 + q + \omega} v_s \quad (5-8)$$

在推导膛内时期炮膛合力计算公式中, 除沿用上述三条假设外, 为了计算方便, 再作如下近似:

$$\varphi_1 \approx 1.02$$

$$\varphi \approx \varphi_1 + \frac{1}{3} \frac{\omega}{q}$$

$$p_{xm} \approx p_t$$

最后导出计算公式

$$P_{pr} = \frac{1}{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{2} \frac{\omega}{q} \right) S p \quad (3-10)$$

应该指出, 由系统的动量守恒导出的 (5-7) 和 (5-8) 式是准确的。我们以弹丸出炮口时的自由后坐速度为考查对象, 由  $P_{pr}$  积分可得

$$W'_s = \frac{g}{Q_0} \int_0^{t_s} P_{pr} dt$$

数值计算表明, 通常  $W'_s > W_s$ , 其中  $W_s$  由式 (5-8) 计算得到。这可以归结为炮膛合力计算公式 (3-10) 近似程度较大, 所计算的炮膛合力偏大的缘故。因此利用龙格-库塔法解时, 一般对炮膛合力进行修正。

令修正系数  $\alpha = \frac{W}{W'_s}$ , 则修正后的炮膛合力为

$$P_{pr} = -\frac{\alpha}{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{2} - \frac{\omega}{q} \right) sp \quad (16-1)$$

下面介绍两种确定修正系数  $\alpha$  的方法。

### 1. 用直接积分求 $W'_s$

若弹丸在炮口点的速度按相对速度处理 (以炮身为参考系), 则自由后坐速度为

$$W_s = -\frac{q + 0.5\omega}{Q_0 + q + \omega} v_s$$

而  $W'_s$  用直接积分炮膛合力求得

$$W'_s = \frac{g}{Q_0} \int_0^{t_s} P_{pr} dt = -\frac{g}{Q_0} \cdot \frac{1}{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{2} - \frac{\omega}{q} \right) s \int_0^t p dt \quad (16-2)$$

为直接求出积分  $\int_0^t p dt$ , 引用以炮身为参考系的弹丸运动方程:

$$\varphi \frac{q}{g} - \frac{dv}{dt} = sp$$

移项, 有

$$dv = \frac{gs}{\varphi q} p dt$$

当  $t = t_s$  时,  $v = v_s$ , 积分上式得

$$v_s = \frac{gs}{\varphi q} \int_0^{t_s} p dt$$

故有

$$\int_0^{t_s} p dt = \frac{v_s \varphi q}{gs} \quad (16-3)$$

将 (16-3) 式代入 (16-2) 式, 可求得  $W'_s$

$$W'_s = -\frac{q + 0.5\omega}{Q_0} v_s \quad (16-4)$$

将  $W_s$  和  $W'_s$  代入修正系数的表达式, 经整理有

$$\alpha = \frac{Q_0}{Q_0 + q + \omega} \quad (16-5)$$

若弹丸在炮口点的速度按绝对速度处理, 同理可得

$$\alpha = \frac{Q_0}{Q_0 + 0.5\omega} \quad (16-6)$$

由式 (16-5) 和 (16-6) 可看出, 修正系数只与后坐部分、弹和药重量有关, 计算  $\alpha$  简单。但使用上述方法修正炮膛合力时, 应注意使系数  $\alpha$  与选定的自由后坐速度公式相对应, 即所选的参考系应一致, 否则会直接影响后坐运动计算的准确性。因为系数  $\alpha$  是根据式 (16-2) 推导出来的, 即由内弹道计算出的  $p-t$  和  $v-t$  的关系, 应该点点满足作用在炮膛横截面积上, 时间从 0 到  $t$  的火药气体平均压力的冲量  $s \int_0^t p dt$ , 等于此时间间隔内具有虚拟质量 (考虑各种摩擦和热散失相当弹丸质量增加) 的弹丸动量变

化  $\frac{\varphi q}{g}(v-0)$ 。但实际内弹道计算中(特别是表解法)由于某些参量选择不当,上述关系往往近似相等,而修正系数  $\alpha$  不能修正此误差。因此出现了下面的修正方法。

## 2. 用数值积分求 $W'_s$

由于前面方法求得的  $\alpha$  是建立在  $s \int_0^{t_s} p dt = -\frac{\varphi q}{g} v_s$  的基础上的,它不一定是实际内弹道计算的结果(例如表解法计算结果)。现考虑到实际内弹道计算结果,用数值积分的方法,求出实际平均压力  $p$  的全冲量  $A$ ,有

$$A = \int_0^{t_s} p dt \quad (16-7)$$

将(16-7)式代入式(16-2),得

$$W'_s = \frac{g}{Q_0} - \frac{1}{\varphi} \left( 1 + \frac{1}{2} - \frac{\omega}{q} \right) s A \quad (16-8)$$

若弹丸出炮口时的速度按相对速度处理,则

$$W_s = \frac{q + 0.5\omega}{Q_0 + q + \omega} v_s$$

修正系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{v_s Q_0 q \varphi}{(Q_0 + q + \omega) g s A} \quad (16-9)$$

若弹丸出炮口时的速度按绝对速度处理,则

$$W_s = \frac{q + 0.5\omega}{Q_0 + 0.5\omega} v_0$$

修正系数  $\alpha$  为

$$\alpha = \frac{v_0 Q_0 q \varphi}{(Q_0 + 0.5\omega) g s A} \quad (16-10)$$

RECOIL程序是应用第二种方法,将弹丸出炮口速度按相对速度处理计算修正系数  $\alpha$ ,并修正炮膛合力计算公式的。在求实际平均压力的全冲量  $A$  时,程序仍然用子程序 RK,只是右端函数中  $R=0$ ,为此构成新的子程序 FCT2。

## 第二节 关于复进计算的COUNTER-RECOIL程序介绍

### 一、程序功能

COUNTER-RECOIL程序是用 ALGOL 语言编写的,包括主程序,子程序三十几个,共约语句一千多条。为了使程序使用面广,该程序几乎能计算目前我国所有装备不同结构火炮的复进问题。其主要功能为:

1. 复进正面问题计算,估算针式复进节制器、混合式驻退机的沟槽式复进节制器、沟槽式全长复进节制器、短节制杆驻退复进机带沟槽的全长复进节制器的流液孔面积。
2. 对以上四种型式复进节制器进行反面问题计算。
3. 确定复进节制活瓣流液孔面积。根据结构需要,计算中可以对它任意取舍。
4. 可以计算不同类型复进机的复进问题。

## 二、程序框图

整个程序分两部分,即复进节制器常数流液孔面积的估算,和变流液孔面积的计算,或单独计算复进节制器变流液孔面积。及复进反面问题的计算。现把复进正面问题和反面问题分别用两个框图表示(见381~382页)。

已知数据主要包括重量诸元、全炮结构尺寸诸元、反后坐装置类型、反后坐装置结构尺寸诸元等。主要的标识符是QO、QZ、Y、K1、K2、K3、K4、KK、AF、VMAX、PFO、W、LAMBDA、FF、Z1、NU、NUF、DDT、DT、AO、DP、AOF、AF1、AFJ、OMEGA、AH、DZ、D、DOF、PHAI、X-DX、X-HF等。RF、PHAI、HF为初始计算值。对复进各阶段最后计算的结果以表格形式输出,包括时间 $t$ 、行程 $\xi$ 、速度 $U$ 、复进剩余力 $P_{rb}$ 、复进时驻退机液压阻力 $\phi_{0f}$ 、复进节制器液压阻力 $\phi_{ff}$ 、复进节制活瓣液压阻力 $\phi_{kf}$ 、复进合力 $r$ 及有关面积 $a_f$ 、 $a_s$ 等。复进第一段的正面问题计算,主要是计算和调整复进节制器流液孔常数段的面积,其步长为 $10^{-3}$ 秒。全长复进制动沟槽式复进节制器和混合式驻退机沟槽式复进节制器,如果计算不满足 $\rho$ 点稳定性,自动减小复进节制器流液孔面积再进行计算,直到满足为止,输出常数流液孔面积和每 $10^{-2}$ 秒的正确计算结果。接着进行第二段计算,输出计算结果,并以第三段的复进合力为余弦变化规律保证复进到位的速度不大于 $0.15$ 米/秒确定 $l$ 点。最后计算第三段变流液孔面积,输出变深度沟槽的深度。对于针式复进节制器和短节制杆驻退机带沟槽式的复进节制器,一般不存在复进稳定性问题,但有复进最大速度的设计要求,如果 $\rho$ 点的速度小于要求值,则自动增加常数流液孔面积,直到满足 $\rho$ 点速度大于要求值为止,输出最大速度和常数流液孔面积。然后继续计算到 $Z1$ 点,最后根据复进到位速度的要求,计算出复进节制器液压阻力并计算变流液孔面积并输出其值。复进反面问题的计算是指调整好复进节制器流液孔后,计算是否复进到位,冲击是否过大,复进速度和时间是否满足要求。本程序可以计算以上四种不同类型的复进节制器,在不同射角下的复进运动。步长为 $1$ 毫米,每 $10$ 毫米输出一组结果,复进第一段的计算中,如果 $\rho - \xi < 1$ 毫米,则计算一步,其步长为 $\rho - \xi$ , $\rho$ 点输出两个结果。折线段以直线插值的方法计算流液孔面积。输出的结果跟正面问题计算的相同。

## 三、子程序简介

T01——标题 (COUNTER-RECOIL COMPUTATION)

T02——表头,包括时间、复进行程、复进速度、驻退机力、复进节制器力、复进节制活瓣力、复进机力、复进剩余力、复进节制器流液孔面积、驻退机流液孔面积、复进合力、复进稳定极限。

RK(N, X, H, Y, F)——龙格-库塔解微分方程。

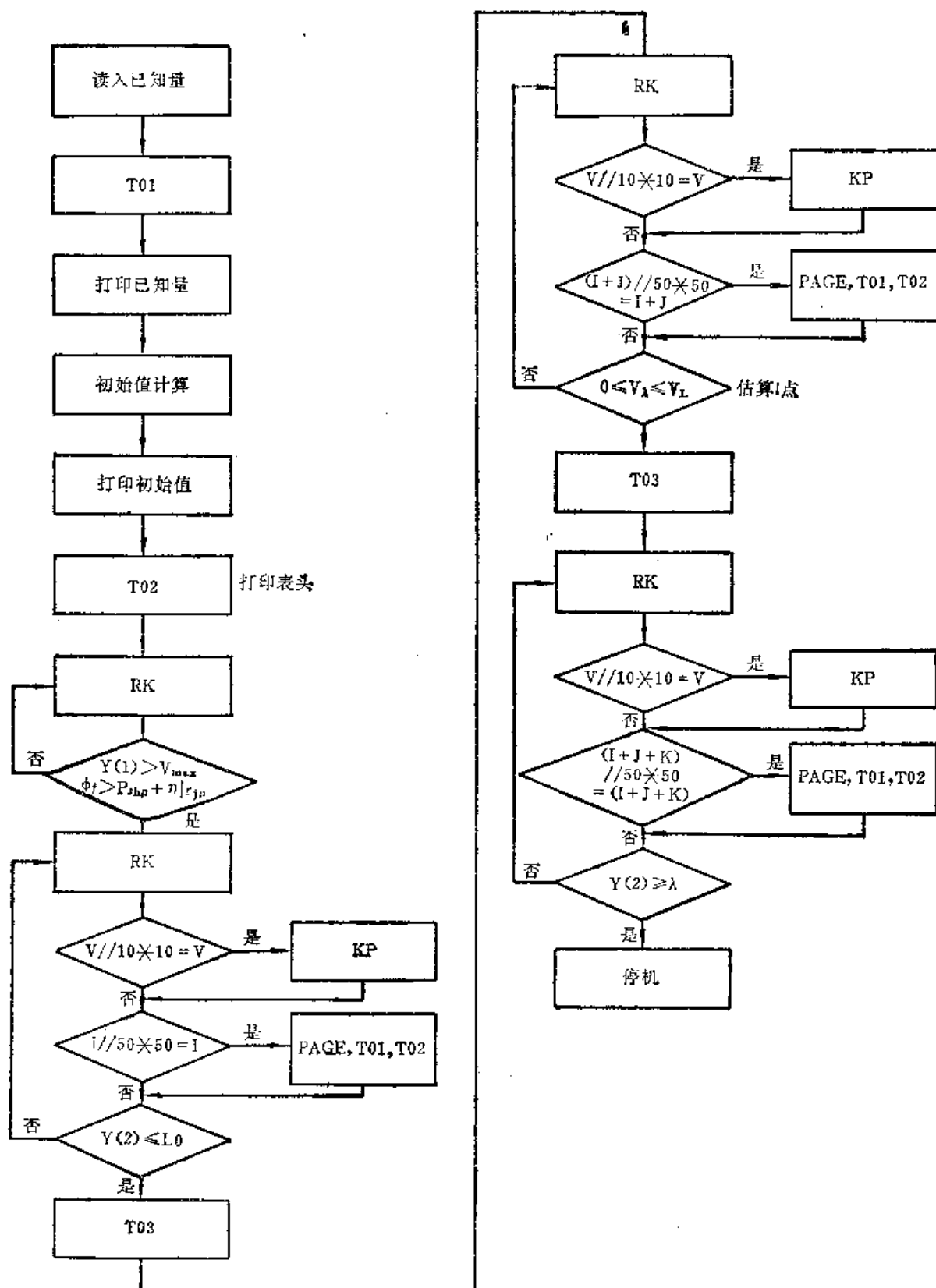
N——整型量,未知函数个数,此处为 $2$ 。

X——实型量,开始存放自变量初值,最后存放终值,此处为时间 $T$ 。

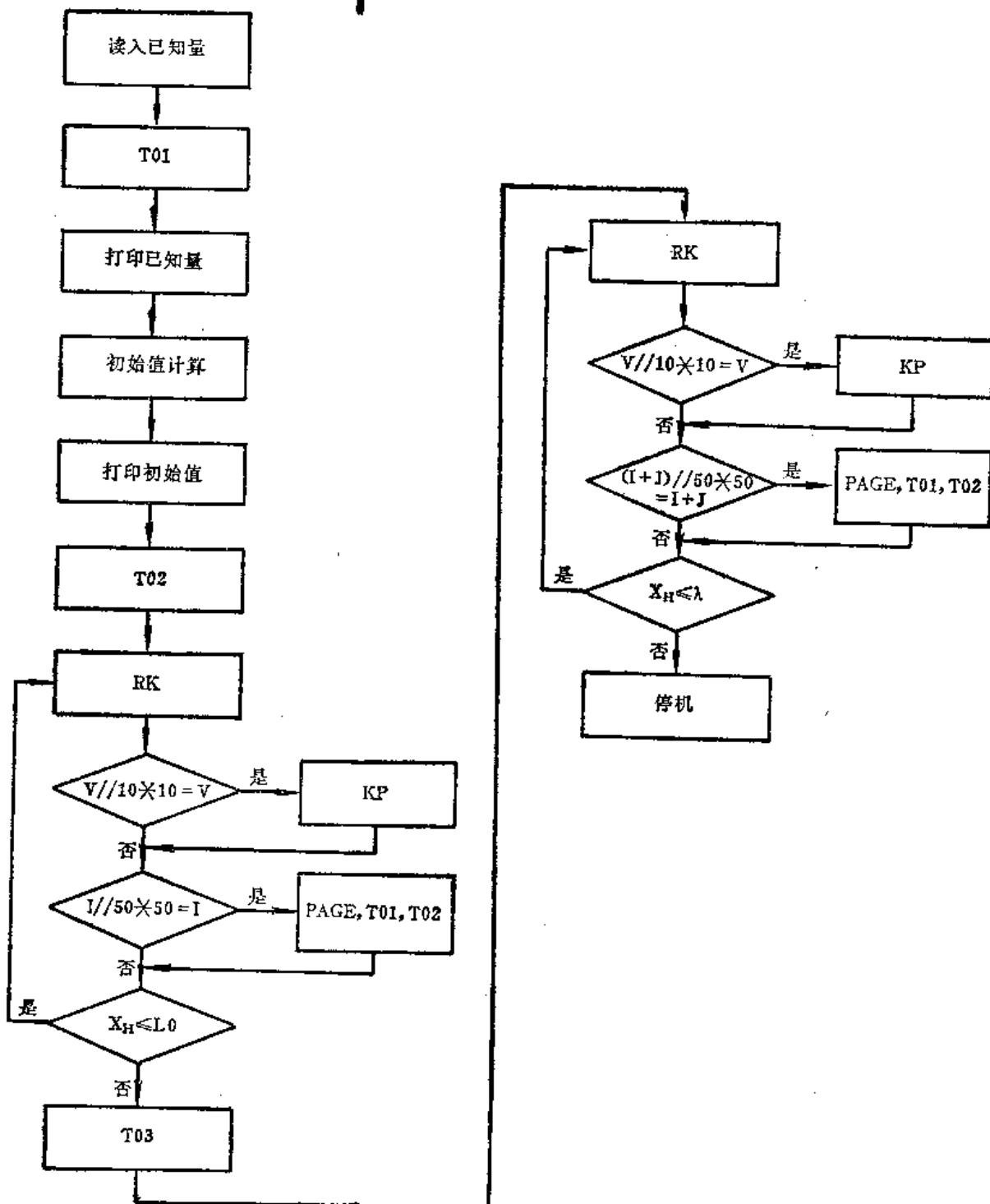
H——积分步长,实型量。

Y——实型数值 $Y[1:N]$ ,开始存放未知函数的初值数组,最后存放终值数组,此处为复进行程,复进速度数组。





复进正面问题框图



复进反面问题计算框图

F——右端函数子程序。

$R_1(Y)$ ——复进合力子程序。

$RJ(Y)$ ——复进稳定极限子程序。

$F(T, Y, K)$ ——右端函数子程序。

T——实型量。

Y——实型数组，此处为复进行程和复进速度数组。

K——实型数组，存放Y数组值。

$FIOF(Y)$ ——驻退机液压阻力子程序。

$FIKF(Y)$ ——复进节制活瓣液压阻力子程序。

$FIFF(Y)$ ——复进节制器液压阻力子程序。

$PSH(Y)$ ——复进剩余力子程序。

KP——空一行输出子程序。

T03——打‘\*’号子程序。

反面问题计算其自变量为复进行程 $X_H$ ，相应的子程序也相应的改变，例：

$RK(X_H, H, V, F)$ ——龙格-库塔法解微分方程。

$X_H$ ——实型量，此处为复进行程 $\xi$ 。

H——实型量，积分步长。

V——实型量，此处为复进速度 $U$ 。

F——右端函数子程序。

$R_1(X_H)$ ——复进合力子程序。

$RJ(X_H)$ ——复进稳定极限子程序。

其它子程序也作相应的改变。

### 第三节 后效期炮膛合力及炮口装置计算程序EMDE说明

这一节简要介绍本书推荐使用的后效期气流问题有关计算方法的FORTRAN IV程序，其主要功能和方法的使用概要。

#### 一、EMDE 程序功能

1. 计算后效期炮膛内气体参量沿轴线和随时间变化规律，计算炮膛合力 $P_{\mu}-t$ 及火药气体作用系数 $\beta$ 。
2. 计算炮口装置结构特征量 $\alpha$ 和效率 $\eta_T$ 。
3. 计算炮口冲击波场超压分布规律 $\Delta p(\varphi, R)$ 。

#### 二、主要子程序

1. 后效期炮膛内气体参量、炮膛合力及火药气体作用系数数值计算子程序 SUBROUTINE EMDE;

基本假设：

(1) 膛内为一元流，不考虑药室部扩大，用平均多变指数 $k$ 修正摩擦、热传导损失；

(2) 弹丸出口时, 膛内火药气体密度均匀分布;

(3) 弹丸出口时, 若弹底气体为超音速时, 则惯性外排; 若为亚音速时, 则有膨胀波里传使速度增大, 使炮口截面气流速度达到当地音速保持稳定, 直到流空为止。

基本解法: 应用一元非定常流偏微分方程组, 沿着向膛底和炮口方向运动的以及反射回来的两族特征线可以很方便地解出交点处的气体参量  $p(x, t)$ 、 $\rho(x, t)$ 、 $T(x, t)$  及  $V(x, t)$ 。继续计算直到膛内压强接近外界大气为止, 即达到流空状态, 完成了整个后效期膛内气流计算。经过计算机处理, 还可求得沿炮膛轴线  $x$  各点 (设  $x=0$  为膛底) 气体参量随时间变化规律  $p(t)$ 、 $\rho(t)$ 、 $T(t)$ 、 $V(t)$  以及炮膛合力

$$P_{pf}(t) = p(0, t) \cdot S$$

式中,  $p(0, t) = p_r$ ——膛底压强。

同时, 计算火药气体作用系数  $\beta$

$$\beta = 0.5 + \frac{g}{\omega v_0} \int_0^t p(0, t) s dt$$

有关一元非定常流特征线法计算后效期膛内气流问题的数值解法可参考有关文献。

输出结果:

- (1)  $p(x, t)$ 、 $\rho(x, t)$ 、 $T(x, t)$ 、 $V(x, t)$  表;
- (2)  $P_{pf}(t)$  表及曲线;
- (3)  $\beta$  值。

2. 炮口制退器计算子程序 SUBROUTINE BRAKE:

利用第三节介绍的理论公式计算炮口制退器结构特征量  $\alpha$  与制退效率  $\eta_r$ 。它适于用各种结构型式的炮口制退器。

输出结果: 结构特征量  $\alpha$ , 制退效率  $\eta_r$ 。

3. 炮口偏流器计算子程序 SUBROUTINE DEFLE:

利用第四节介绍的理论公式计算炮口偏流器结构特征量  $\alpha_x$  及  $\alpha_y$ 、制退效率  $\eta_r$ 。

输出结果: 结构特征量  $\alpha_x$ 、 $\alpha_y$ , 制退效率  $\eta_r$ 。

4. 反作用式 (锥形) 助退器计算子程序 SUBROUTINE CONET:

利用第四节介绍的理论公式计算结构特征量  $\alpha$  及助退效率  $\eta_r$ 。

输出结果: 结构特征量  $\alpha$ 、助退效率  $\eta_r$ 。

5. 炮口冲击波场数值计算子程序 SUBROUTINE PRESS:

基本假设:

(1) 无炮口装置及带锥形助退器的炮口冲击波是一个动球心的球形冲击波, 其能量  $E_d$  由火药气体连续、有限地补充; 球心速度  $U_0$  由火药气体轴向动量  $P(t)$  提供;

(2) 带炮口制退器的炮口冲击波是弹孔冲击波与两侧孔冲击波在空中的相交, 每一冲击波的性质与假设 (1) 同, 不考虑冠状冲击波的存在。

(3) 不考虑地面与障碍物的反射、绕射之影响。

该子程序是利用数值方法计算炮口冲击波的相交及衰减, 具体解法可参考有关

文献。

输出结果:

- (1) 冲击波等超压值表  $R(\Delta p, \varphi)$ ;
- (2) 冲击波等超压曲线图。

### 三、主程序使用

根据不同的计算要求, 在主程序中设置了控制开关常数  $K_x$  及  $K_y$ , 当按下表之组合输入这两个常数时, 主程序将分别调用相应的子程序, 完成不同的计算。此时, 应按表中之规定输入相应的起始数据。

本程序全部采用国际单位 (SI) 制。

序号	计 算 要 求	输 入		调用子程序	输 入 起 始 数 据
		$K_x$	$K_y$		
1	后效膛内气流参 量, $P_{pt}-t, \beta$	1	0	EMPTY	$P_g, T_g, v_0, W_0, l_g, l_{km}, S, \omega, q, k$
2	炮口制退器 $\alpha, \eta_T$	2	0	EMPTY, BRAKE	(1) 之全部起始数据及 $S_0(i), S_K(i), S_I(i),$ $S_E(i), \psi_f^*(i), \psi_E^*(i), \alpha(i), \theta(i),$ $1/c(i), n_0$
3	炮口偏流器 $\alpha_x,$ $\alpha_y, \eta_T$	3	0	EMPTY, DEFLE	同(2)
4	反作用式助退器 $\alpha, \eta_T$	4	0	EMPTY, CONET	(1) 之全部起始数据及 $D_K, \theta$
5	无炮口装置之 冲击波场	1	1	EMPTY, PRESS	(1) 之全部起始数据及 $E_A, K_A, T_A$
6	炮口制退器之 冲击波场	2	1	EMPTY, BRAKE, PRESS	(2) 之全部起始数据及 $E_A, K_A, T_A$
7	炮口偏流器之 冲击波场	3	1	EMPTY, DEFLE, PRESS	(3) 之全部起始数据及 $E_A, K_A, T_A$
8	反作用式助退 器之冲击波场	4	1	EMPTY, CONET, PRESS	(4) 之全部起始数据及 $E_A, K_A, T_A$

## 四、输入、输出参量之符号名

## 输入参量

参 量	意 义	符 号 名	类 型	单 位
$p_g$	弹丸出炮口时膛内平均压强	PG	实型变量	牛/米 <sup>2</sup>
$T_g$	弹丸出炮口时膛内平均温度	TG	实型变量	开
$v_0$	弹丸初速	$V_0$	实型变量	米/秒
$W_0$	药室容积	$W_0$	实型变量	米 <sup>3</sup>
$l_g$	弹丸行程长	LG	实型变量	米
$l_{km}$	炮膛总长度	LKM	实型变量	米
$\omega$	装药重量	OMIGA	实型变量	牛
$q$	弹丸重量	Q	实型变量	牛
$S$	炮膛横截面积	S	实型变量	米 <sup>2</sup>
$k$	多变指数	K	实型变量	—
$E_A$	补充给炮口冲击波的总能量	EA	实型变量	牛·米
$T_A$	补充能量的时间	TA	实型变量	秒
$K_A$	能量常数	KA	实型变量	牛·米/秒
$S_0(i)$	第 $i$ 腔室炮口制退器弹孔面积	$S_0(i)$	实型数组	米 <sup>2</sup>
$S_K(i)$	第 $i$ 腔室炮口制退器腔室面积	$SK(i)$	实型数组	米 <sup>2</sup>
$S_I(i)$	第 $i$ 腔室侧孔入口面积	$SI(i)$	实型数组	米 <sup>2</sup>
$S_E(i)$	第 $i$ 腔室侧孔出口面积	$SE(i)$	实型数组	米 <sup>2</sup>
$\psi_I^i(i)$	第 $i$ 腔室侧孔入口角度	$PSI(i)$	实型数组	度
$\psi_E^i(i)$	第 $i$ 腔室侧孔出口角度	$PSE(i)$	实型数组	度
$\alpha(i)$	第 $i$ 腔室壁与轴线夹角	$AL(i)$	实型数组	度
$\delta(i)$	第 $i$ 腔室半锥角	$TH(i)$	实型数组	度
$l/c(i)$	第 $i$ 腔室侧孔导向度	$LC(i)$	实型数组	—
$n$	腔室数	$N$	整型变量	—

## 输出参量

参 量	意 义	符 号 名	类 型	单 位
$x$	自膛底算起的轴线位置	X	实型变量	米
$t$	自弹丸出炮口算起的时间	T	实型变量	秒
$p$	膛内任一点之压强	P	实型变量	牛/米 <sup>2</sup>
$\rho$	膛内任一点之密度	RU	实型变量	公斤/米 <sup>3</sup>
$T$	膛内任一点之温度	TT	实型变量	开
$a$	膛内任一点之音速	A	实型变量	米/秒
$P_{Ft}$	炮膛合力	PPT	实型变量	牛

(续)

参 量	意 义	符 号 名	类 型	单 位
$M$	膛内任一点气流马赫数	$M$	实型变量	—
$\beta$	火药气体作用系数	BATA	实型变量	—
$\alpha$	炮口装置结构特征量	ALPHA	实型变量	—
$\alpha_x$	炮口偏流器结构特征量之轴向分量	ALPHAX	实型变量	—
$\alpha_y$	炮口偏流器结构特征量之法向分量	ALPHAY	实型变量	—
$\eta_T$	炮口装置效率	EATA	实型变量	—
$\Delta p$	炮口冲击波超压	DATP	实型变量	牛/米 <sup>2</sup>
$R$	测点距炮口的距离	$R$	实型变量	米
$\varphi$	测点之相位角	PHI	实型变量	度

#### 第四节 关于全炮动力计算的DAOG3程序介绍

##### 一、程序的功能

DAOG3 程序是用 FORTRAN IV 语言书写的, 包括主程序和子程序共十余个, 约 500 条语句。运动微分方程组因火炮结构的不同而不同, 本程序仅适用于反后坐装置上置, 驻退筒和复进筒后坐, 摇架为筒型这种类型的火炮。其功能如下:

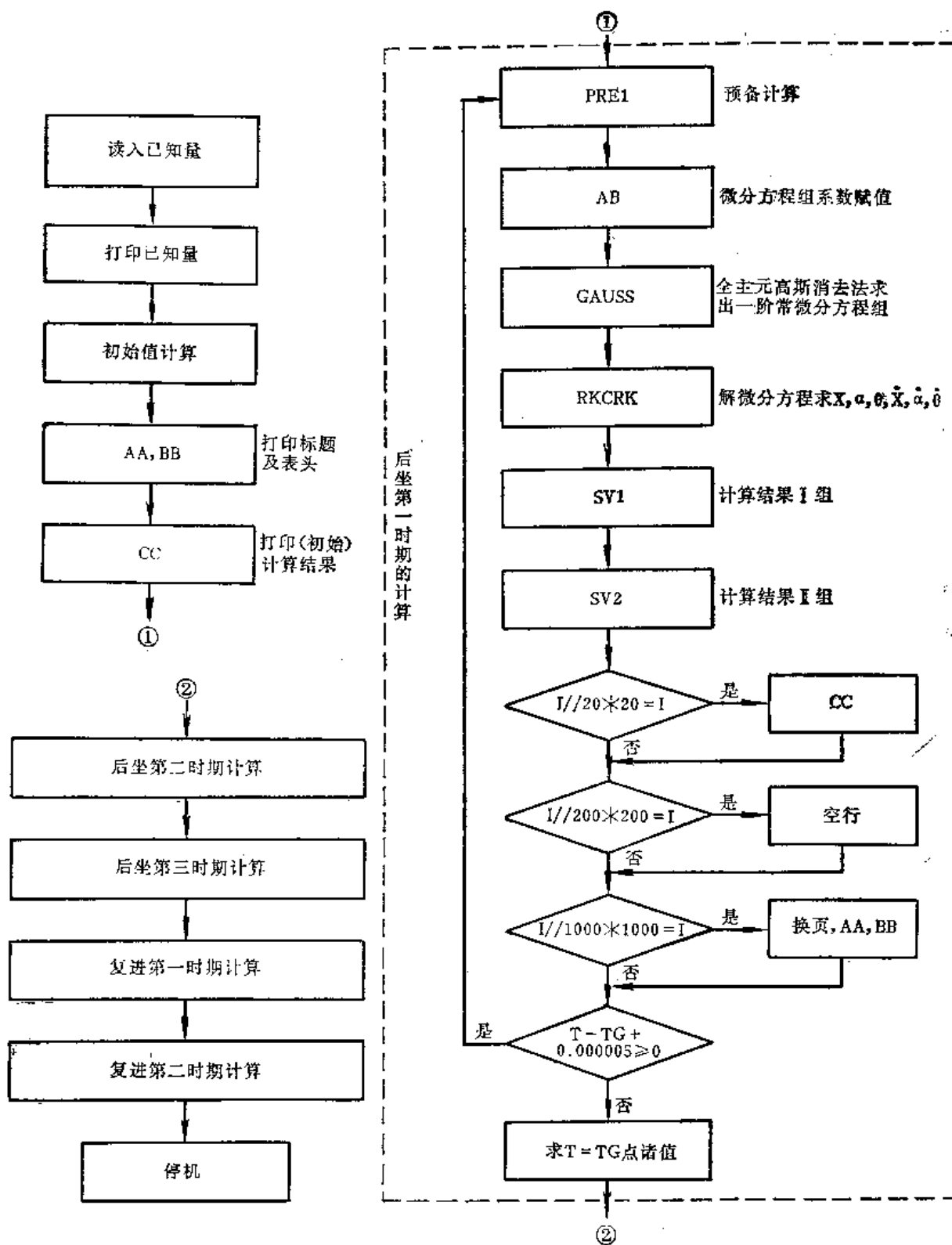
1. 可完成火炮三自由度 ( $x, \theta, \alpha$ ) 条件下射击时的后坐和复进全过程的全部运动与主要部件受力变化规律的计算;
2. 可研究火炮单自由度 ( $x$ ) 条件下射击与三自由度条件下运动与受力规律间的差异;
3. 可研究某些结构参数或约束条件变化后对火炮在射击时的受力和运动规律的影响。

##### 二、程序框图

把整个射击的后坐和复进全过程分成五个阶段, 即: 膛内时期 (后坐第一时期)、火药气体后效时期 (后坐第二时期), 后坐惯性时期 (后坐第三时期), 复进加速时期 (复进第一时期) 和复进减速时期 (复进第二时期)。

由于各个时期及特殊点的计算顺序均相同, 因此只较详细地列出了后坐第一时期的程序框图。现简要说明如下:

已知数据应包括火炮的各大部分的重量、重心位置及转动惯量的参数, 主要结构尺寸的参数, 主要约束部位的特性参数, 内弹道参数以及反后坐装置结构尺寸及特性参数等等。为了使整个计算资料全面完整, 应将其中的主要已知参数以一定格式打印出来, 如:  $Q_0, Q_1, Q_2, I_0, I_1, I_2, e, d, L_a, H_a, X_1, Z_1, L_2, H_2, s, q, \omega, P_g, \eta_T, A_0, A_{0f}, A_{ff}, A_T, p_0, K_1, K_2, p-t, \delta_{r-x}, h_{f-x}$  等值。





在开始后坐第一时期计算之前应进行初条件的确定及初始值的计算, 即有  $t_0 = x_0 = \dot{x}_0 = \theta_0 = \dot{\theta}_0 = \dot{\alpha}_0 = 0$ ,  $\alpha_0 = \alpha_0$ , 并通过直接公式或调用子程序求出各初始值, 如  $PPT_0$ ,  $R_0$  及各种约束反力等。在此基础上即可换页打印标题。表头及  $t = 0$  时刻在表格中应打印的值。本程序表格中输出的数据包括:  $t$ 、 $x$ 、 $\dot{x}$ 、 $PPT$ 、 $R$ 、 $\theta$ 、 $\dot{\theta}$ 、 $N_1$ 、 $N_2$ 、 $U$ 、 $N_D$ 、 $T_D$ 、 $\alpha$ 、 $\dot{\alpha}$ 、 $N_E$ 、 $T_E$  及  $N_F$ 。它将全面反映火炮的受力和运动随时间的变化规律。

后坐第一时期取时间步长为 5 微秒 ( $5 \times 10^{-6}$  秒), 每 0.1 毫秒打印输出一组计算结果, 每 1 毫秒空一行以便表格排列整齐和易于查对。每一步长的计算次序见程序框图, 主要是用高斯消去法进行一次微分方程组的交换, 用龙格-库塔法解一次微分方程, 用代数方程组求解一次各约束反力并于适宜时期 (循环 20 次) 打印一次计算结果。如果最后一组时间接近弹丸出炮口的时间  $t_g$ , 且  $t - t_g < 5$  微秒, 则按  $t - t_g$  作为步长进行计算, 求得对应于  $t_g$  时的各项数值, 然后即可转入下一时期的计算。

### 三、各子程序的简单介绍

AA——标题 (3-DEGREE OF FREEDOM DYNAMIC ANALYSIS OF GUN);

BB——表头, 前述各输出量符号及其单位;

CC——对应于表头的行下打印一组计算结果;

RK(N, T, H, Y, FCT, F, P, YW)——定步长龙格-库塔法解常微方程组, 其各形参为

N——整型量。方程个数;

T——实型量。自变量, 开始存放初值, 返回时存放初值加步长;

H——实型量。积分步长;

Y——实型数组 Y(N), 开始存放因变量初值, 返回时存放该步长积分结果;

FCT——右端函数子程序;

F——实型数组 F(N), 工作单元;

P——实型数组 P(N), 工作单元;

YW——实型数组 YW(N), 工作单元;

GUASS(N, A, B, EPS, ISW)——列主元高斯消去法解线性方程组, 其各形参为

N——整型量。方程的阶数;

A——实型数组 A(N, N)。存放方程组的系数;

B——实型数组 B(N), 开始存放方程组的常数项, 返回时存放方程组的解;

EPS——实型量。控制常数;

IWS——整型量。当列主元的绝对值小于 EPS 时, ISW = 0, 否则 ISW = 1;

QIP(N, X, Y, U, F)——一元三点插值

N——整型量。插值节点的个数;

X——实型数组 X(N)。存放 N 个插值结点;

Y——实型数组 Y(N)。存放 N 个插值结点处的函数值;

U——实型量。插值点;

F——实型量。插值结果；

AB(A, B)——线性方程组的系数表达式的子程序，其中

A——实型数组 A(5, 5)，存放系数表达式计算结果；

B——实型数组 B(5)，存放常数项表达式的计算结果；

在不同运动计算时期，数组 A(5, 5) 及 B(5) 中某些表达式略有不同，应予以注意。

FCT(T, Y, F)——右端函数子程序

T——实型量；

Y——实型数组 Y(N)，微分方程组中诸因变量；

F——实型数组 F(N)，微分方程组中诸右端函数值；

SV1——计算结果 I 子程序。

将龙格-库塔法计算结果转出给存放各运动计算结果的单元： $X, \dot{X}, \ddot{X}, \theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}, \alpha, \dot{\alpha}, \ddot{\alpha}$ 等；

SV2——计算结果 II 子程序。

将龙格-库塔法计算结果代入公式求出各约束反力的计算结果： $N_1, N_2, U, T_D, N_D, N_F, T_E, N_E$ 等；

PR1——预先计算子程序

对应于上一点的时间  $t$  及行程  $X$  插值计算求出 PPT,  $R$  等值。

#### 四、计算注意事项

##### 1. 各时期步长的选择

建议后坐第一时期取 5 微秒，后坐第二时期取 25 微秒，后坐第三时期取 50 微秒，复进第一、二时期均取 0.25 毫秒；

2. 注意各时期因受力的差异而引起的  $N_1, N_2$  方向的改变及  $R$  表达式形式的不同，适当的变换子程序 AB 中的计算公式；

3. 本计算把高低机处及地面前支点处的约束均处理成理想弹性约束，其弹性系数  $K_U, K_F$  均按经验选取。约束的处理方法也可根据实际情况不同而变化，使用时请自行处理。

附表 函数  $e^{-px}$ ,  $f(px)$  及  $F(px)$  之值

$px$	$e^{-px}$	$F(px)$	$f(px)$	$px$	$e^{-px}$	$F(px)$	$f(px)$
0.1	0.9048	0.666	0.6322	6.1	0.0022	65.24	0.8947
0.2	0.8183	0.708	0.6394	6.2	0.0020	71.08	0.8964
0.3	0.7408	0.754	0.6465	6.3	0.0018	77.48	0.8981
0.4	0.6703	0.804	0.6536	6.4	0.0017	84.47	0.8998
0.5	0.6065	0.858	0.6606	6.5	0.0015	92.09	0.9014
0.6	0.5488	0.915	0.6676	6.6	0.0014	100.44	0.9030
0.7	0.4966	0.977	0.6743	6.7	0.0012	109.6	0.9045
0.8	0.4493	1.044	0.6813	6.8	0.0011	119.5	0.9060
0.9	0.4066	1.116	0.6880	6.9	0.0010	130.3	0.9074
1.0	0.3679	1.194	0.6946	7.0	0.0009	142.2	0.9088
1.1	0.3329	1.277	0.7011	7.1	0.0008	155.2	0.9101
1.2	0.3012	1.367	0.7075	7.2	0.0007	169.4	0.9114
1.3	0.2725	1.465	0.7139	7.3	0.0007	184.9	0.9127
1.4	0.2466	1.572	0.7202	7.4	0.0006	201.9	0.9139
1.5	0.2231	1.687	0.7264	7.5	0.0006	220.5	0.9151
1.6	0.2019	1.810	0.7325	7.6	0.0005	240.8	0.9192
1.7	0.1827	1.945	0.7385	7.7	0.0005	263.0	0.9173
1.8	0.1653	2.088	0.7444	7.8	0.0004	287.3	0.9184
1.9	0.1496	2.244	0.7502	7.9	0.0004	313.8	0.9195
2.0	0.1353	2.414	0.7559	8.0	0.0003	342.9	0.9205
2.1	0.1225	2.599	0.7615	8.1	0.0003	374.5	0.9215
2.2	0.1108	2.798	0.7669	8.2	0.0003	409.5	0.9225
2.3	0.1003	3.013	0.7722	8.3	0.0002	447.5	0.9235
2.4	0.0907	3.247	0.7774	8.4	0.0002	489.3	0.9244
2.5	0.0821	3.500	0.7824	8.5	0.0002	535.0	0.9254
2.6	0.0743	3.774	0.7873	8.6	0.0002	585.0	0.9263
2.7	0.0672	4.071	0.7921	8.7	0.0002	639.6	0.9272
2.8	0.0608	4.395	0.7967	8.8	0.0002	699.6	0.9281
2.9	0.0550	4.746	0.8012	8.9	0.0001	765.2	0.9290
3.0	0.0498	5.124	0.8055	9.0	0.0001	837.0	0.9298
3.1	0.0450	5.536	0.8097	9.1	0.0001	915.4	0.9306
3.2	0.0408	5.985	0.8138	9.2	0.0001	1001.9	0.9314
3.3	0.0369	6.473	0.8178	9.3	0.0001	1097.0	0.9322
3.4	0.0334	7.000	0.8217	9.4	0.0001	1199	0.9330
3.5	0.0302	7.572	0.8255	9.5	0.0001	1312	0.9338
3.6	0.0273	8.201	0.8293	9.6	0.0001	1437	0.9345
3.7	0.0247	8.884	0.8330	9.7	0.0001	1574	0.9352
3.8	0.0224	9.621	0.8366	9.8	0.0001	1722	0.9356
3.9	0.0202	10.417	0.8401	9.9	0.0001	1885	0.9369
4.0	0.0183	11.30	0.8435	10.0	0.0000	2064	0.9372
4.1	0.0166	12.26	0.8468	10.1		2258	0.9379
4.2	0.0150	13.29	0.8500	10.2		2477	0.9385
4.3	0.0136	14.42	0.8531	10.3		2709	0.9391
4.4	0.0123	15.65	0.8561	10.4		2969	0.9397
4.5	0.0111	16.99	0.8590	10.5		3255	0.9403
4.6	0.0101	18.45	0.8619	10.6		3568	0.9409
4.7	0.0091	20.04	0.8645	10.7		3908	0.9415
4.8	0.0082	21.77	0.8671	10.8		4276	0.9421
4.9	0.0074	23.66	0.8696	10.9		4676	0.9427
5.0	0.0067	25.71	0.8720	11.0		5134	0.9432
5.1	0.0061	27.95	0.8744	11.1		5624	0.9438
5.2	0.0055	30.40	0.8767	11.2		6166	0.9443
5.3	0.0050	33.07	0.8789	11.3		6716	0.9448
5.4	0.0045	35.95	0.8811	11.4		7361	0.9453
5.5	0.0041	39.16	0.8832	11.5		8111	0.9458
5.6	0.0037	42.60	0.8853	11.6		8990	0.9463
5.7	0.0033	46.36	0.8873	11.7		9750	0.9468
5.8	0.0030	50.49	0.8892	11.8		10696	0.9472
5.9	0.0027	55.00	0.8911	11.9		11736	0.9477
6.0	0.0025	59.89	0.8929	12.0		12859	0.9481

## 参考文献

- [1] 李待琛 枪炮构造理论。
- [2] 邱凤昌等 火炮设计(二)反后坐装置 炮兵工程学院 1963。
- [3] 华恭, 伊玲益 火炮反后坐装置设计 国防工业出版社 1978。
- [4] A. A. Толочков Теория Лафетов Артиллерийских Установок 1960。
- [5] The Franklin Institute Carriages and Mounts Series Recoil Systems AMCP 706-342 1963。
- [6] C. J. Chen Fluid Mechanics of Recoil Mechanism 1978。
- [7] Б. В. Орлов等 Устройство и Проектирование Стволов Артиллерийских Орудий 1976。  
(中译本 炮身构造与设计 王天槐、刘淑华译 国防工业出版社)。
- [8] 竹中利夫, 浦田瑛三 液压流体力学 科学出版社, 1980。
- [9] C. J. Chen, E. O. Macagno, K. Y. Chang and S. C. Lin A Study of Orifice Area and Brifice Discharge Coefficient in Recoil Mechanisms。
- [10] H. Garver, H. Liberman Artillery Systems Engineering Study, Concept Team Final Report AD A102819 1981。
- [11] 郝杉林、刘亚军 前冲机的设计与计算 兵工学报火炮分册 1979第一期。
- [12] 曹光中 前冲炮的动力学分析和暂态振动计算 华东工程学院学报 1978第三期。
- [13] 张月林 前冲炮液压速度传感器的设计 华东工程学院学报 1982第三期。
- [14] R. Yalamanchili New Concept in Recoil Mechanism AD A090453 1980。
- [15] Б. В. Орлов Терто-Динамические и Баллистические Основы Проектирования Ракетных Двигателей На Твердом Топливом 1979。
- [16] 邱凤昌、张月林译 炮口装置 国防工业出版社 1974。
- [17] 李鸿志、尤国钊 炮口冲击波的形成和分布规律以及对减小冲击波途径的分析 华东工程学院学报 1977年第一期。
- [18] 李鸿志、高树贤 带膛口装置的膛口流场与冲击波形成机理 华东工程学院学报 1979年第二期。
- [19] 李鸿志、季儒彦、刘殿金 后效期膛膛参数变化规律及火药气体作用系数 $\beta$ 的计算 兵工学报武器分册 1982年第三期。
- [20] 李鸿志 模拟膛膛流空的数值计算方法 华东工程学院学报 1982年第三期。
- [21] G. Klingenberg Investigation of Combustion Phenomena Associated With the Flow of Heat Transport Gases 1976。
- [22] P. O. Schomer Acoustic Directivity Patterns For Army Weapons ADA 066223 1979。
- [23] 铁木辛柯 高等动力学。
- [24] 炮架动力学研究组 火炮射击时的运动与受力计算 兵工学报武器分册 1983年第一期。
- [25] M. Stippes Artillery Carriage Dynamics Study, Final Report 1962。
- [26] P. A. Cacari Analog Computer Stabilization Investigation of Lagrangian Equations 1969。