



HUOPAO  
FANHOUZUO  
ZHUANGZHI SHEJI

# 火炮反后坐 装置设计



◎ 高跃飞 编著 ◎



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

TJ3

1026



NUAA2014009434

TJ3  
1026-1

# 火炮反后坐装置设计

高跃飞 编著



国防工业出版社

· 北京 ·

2014009434

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了火炮反后坐装置设计的基本设计理论和工程应用知识。内容包括采用反后坐装置火炮的受力分析、后坐运动求解,反后坐装置的工作原理、结构组成,反后坐装置设计中的正面问题与反面问题的计算方法、设计过程,炮口制退器的设计理论,与反后坐装置设计有关的工程应用知识,以及新理论、新技术的介绍等。

本书是在作者多年教学讲义的基础上,加上国内外相关科研的最新成果编写而成,可供武器系统与发射工程专业及相近专业高年级本科生学习使用,也可作为相关工程技术人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

火炮反后坐装置设计/高跃飞编著. —北京:国防工业出版社,2010.6

ISBN 978-7-118-06831-3

I. ①火… II. ①高… III. ①火炮-反后座装置-设计-高等学校-教材 IV. ①TJ302

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 082584 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 19 字数 482 千字

2010 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 43.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

本书的编写目的是为武器系统与发射工程专业及相近专业的本科生教学提供适用的教材。本书也可以作为从事火炮武器研制和生产有关的科技人员的参考书。当前,专业课程的教学时数减少了,而对实践环节和计算机应用的要求增加了。因此,本书的编写将以反后坐装置的基本设计理论和工程应用为主,采用应用计算机求解的设计方法,同时介绍新近发展的反后坐装置技术。本教材的编写遵从以下原则:

(1) 注重反后坐装置设计理论的连贯性和设计过程的衔接性。以反后坐装置工作时的运动学、动力学特点来组织内容,使设计理论与设计过程很好地结合起来。

(2) 注重与实际教学的关系。教材内容只介绍反后坐装置的基本设计理论和设计方法,摒弃内容过深或实际教学难以介绍的内容。

(3) 采用计算机求解的方法。反后坐装置的运动计算及设计主要以数值计算方法为主,对于手工计算的方法不再介绍。

本书由高跃飞任主编,张赛飞、薛百文、曹广群分别参加了第8章、第10章、第11章的编写。由于编著者水平所限,书稿中难免有错误和不妥的地方,恳请读者批评指正。

# 目 录

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第1章 绪论 .....                 | 1  |
| 1.1 发射原理与作用到炮架上的载荷 .....     | 1  |
| 1.2 火炮反后坐装置 .....            | 2  |
| 1.3 反后坐装置的作用 .....           | 3  |
| 1.4 后坐系统与反后坐装置的类型 .....      | 5  |
| 1.5 反后坐装置的设计 .....           | 6  |
| 1.6 火炮及反后坐装置发展简介 .....       | 8  |
| 第2章 后坐运动与受力分析 .....          | 10 |
| 2.1 后坐部分的受力与运动方程 .....       | 10 |
| 2.1.1 射击时后坐部分的受力分析 .....     | 10 |
| 2.1.2 后坐运动微分方程 .....         | 11 |
| 2.2 炮膛合力的计算 .....            | 11 |
| 2.2.1 启动时期 .....             | 12 |
| 2.2.2 弹丸在膛内运动时期 .....        | 12 |
| 2.2.3 火药气体后效时期 .....         | 14 |
| 2.3 火炮后坐时的受力分析 .....         | 15 |
| 2.4 火炮后坐时的静止性和稳定性 .....      | 18 |
| 2.4.1 火炮后坐时的静止条件 .....       | 18 |
| 2.4.2 火炮后坐时的稳定条件 .....       | 18 |
| 2.4.3 射角和后坐行程对火炮稳定性的影响 ..... | 19 |
| 2.4.4 火炮后坐稳定极限角计算 .....      | 21 |
| 2.4.5 提高火炮射击稳定性的途径 .....     | 23 |
| 2.5 后坐过程中的动量与能量关系 .....      | 24 |
| 2.5.1 制退后坐运动 .....           | 25 |
| 2.5.2 自由后坐运动 .....           | 27 |
| 第3章 后坐阻力规律与后坐运动计算 .....      | 30 |
| 3.1 自由后坐运动计算 .....           | 30 |
| 3.1.1 弹丸在膛内运动时期的自由后坐计算 ..... | 31 |
| 3.1.2 火药气体后效期的自由后坐计算 .....   | 33 |

|            |                              |           |
|------------|------------------------------|-----------|
| 3.1.3      | 有炮口制退器时自由后坐的计算               | 36        |
| 3.2        | 后坐制动图                        | 38        |
| 3.2.1      | 选择和拟定后坐制动图的原则                | 39        |
| 3.2.2      | 典型后坐制动图                      | 40        |
| 3.3        | 制退后坐运动计算                     | 44        |
| 3.3.1      | 固定式火炮制退后坐运动计算                | 44        |
| 3.3.2      | 野战火炮制退后坐运动计算                 | 47        |
| 3.4        | 求解制退后坐运动方程的数值方法              | 52        |
| 3.5        | 自由后坐运动的近似计算                  | 55        |
| <b>第4章</b> | <b>复进机设计</b>                 | <b>57</b> |
| 4.1        | 概述                           | 57        |
| 4.2        | 复进机的结构类型                     | 58        |
| 4.2.1      | 弹簧式复进机                       | 58        |
| 4.2.2      | 气压式复进机                       | 59        |
| 4.2.3      | 火药气体复进机                      | 61        |
| 4.3        | 弹簧式复进机设计                     | 62        |
| 4.3.1      | 复进机力的变化规律                    | 62        |
| 4.3.2      | 弹簧初力 $F_{j0}$ 和压缩比 $C_m$ 的确定 | 62        |
| 4.3.3      | 弹簧结构尺寸的确定                    | 63        |
| 4.4        | 液体气压式复进机设计                   | 66        |
| 4.4.1      | 液体气压式复进机力的变化规律               | 66        |
| 4.4.2      | 液体气压式复进机初力和压缩比确定             | 67        |
| 4.4.3      | 液体气压式复进机结构尺寸确定               | 69        |
| 4.4.4      | 液体气压式复进机液量检查表的制作原理           | 74        |
| <b>第5章</b> | <b>节制杆式制退机设计</b>             | <b>76</b> |
| 5.1        | 概述                           | 76        |
| 5.2        | 制退机的结构类型                     | 78        |
| 5.2.1      | 带沟槽式复进节制器的节制杆式制退机            | 79        |
| 5.2.2      | 带针式复进节制器的节制杆式制退机             | 80        |
| 5.2.3      | 混合式节制杆式制退机                   | 81        |
| 5.2.4      | 变后坐长的节制杆式制退机                 | 81        |
| 5.3        | 制退机工作原理与液压阻力                 | 83        |
| 5.3.1      | 液压阻力的形成                      | 83        |
| 5.3.2      | 液体流动与基本方程                    | 84        |
| 5.4        | 节制杆式制退机液压阻力计算                | 87        |
| 5.4.1      | 基本假设                         | 88        |



|            |                       |            |
|------------|-----------------------|------------|
| 5.4.2      | 液压阻力计算                | 88         |
| 5.4.3      | 流液孔面积                 | 90         |
| 5.4.4      | 制退杆内腔充满条件             | 91         |
| 5.4.5      | 液压阻力系数的确定             | 92         |
| 5.5        | 节制杆式制退机结构设计           | 93         |
| 5.5.1      | 主要结构尺寸的确定             | 93         |
| 5.5.2      | 结构设计中应注意的问题           | 97         |
| 5.6        | 节制杆外形的调整              | 98         |
| 5.6.1      | 节制杆外形的初调整             | 98         |
| 5.6.2      | 节制杆外形的再调整             | 100        |
| <b>第6章</b> | <b>复进运动分析</b>         | <b>102</b> |
| 6.1        | 概述                    | 102        |
| 6.2        | 复进时后坐部分的受力与运动方程       | 103        |
| 6.3        | 火炮复进时的受力分析            | 105        |
| 6.3.1      | 复进加速时期(第一时期)          | 105        |
| 6.3.2      | 复进减速时期(第二时期)          | 106        |
| 6.4        | 复进制动图                 | 112        |
| 6.4.1      | 制订复进制动图的原则            | 112        |
| 6.4.2      | 制退机真空消失点              | 113        |
| 6.4.3      | 典型复进制动图               | 114        |
| 6.5        | 复进运动计算                | 116        |
| 6.5.1      | 固定式火炮复进运动计算           | 117        |
| 6.5.2      | 野战火炮复进运动计算            | 118        |
| <b>第7章</b> | <b>复进节制器设计</b>        | <b>119</b> |
| 7.1        | 沟槽式复进节制器设计            | 119        |
| 7.1.1      | 复进时制退机液压阻力            | 120        |
| 7.1.2      | 复进时复进节制器液压阻力          | 120        |
| 7.1.3      | 复进节制器流液孔面积            | 122        |
| 7.2        | 针式复进节制器设计             | 122        |
| 7.2.1      | 复进时制退机液压阻力            | 122        |
| 7.2.2      | 复进时复进节制器液压阻力          | 123        |
| 7.2.3      | 复进节制器流液孔面积            | 124        |
| 7.3        | 部分长度上流液孔面积为常数的复进节制器设计 | 125        |
| 7.4        | 复进节制活瓣设计              | 128        |
| 7.5        | 液压缓冲器设计               | 131        |
| 7.5.1      | 活门式液压缓冲器              | 131        |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 7.5.2 沟槽式液压缓冲器 .....         | 133        |
| <b>第8章 密封与液量调节 .....</b>     | <b>139</b> |
| 8.1 概述 .....                 | 139        |
| 8.2 密封装置的结构类型 .....          | 139        |
| 8.2.1 静密封 .....              | 140        |
| 8.2.2 动密封 .....              | 142        |
| 8.2.3 斯特封密封 .....            | 145        |
| 8.2.4 密封装置设计中应注意的几个问题 .....  | 147        |
| 8.3 密封装置摩擦力计算 .....          | 147        |
| 8.4 制退机液体发热计算 .....          | 151        |
| 8.5 液量调节器设计 .....            | 153        |
| 8.5.1 气压式液量调节器设计 .....       | 154        |
| 8.5.2 弹簧式液量调节器设计 .....       | 157        |
| 8.5.3 制退机保留空间计算 .....        | 157        |
| 8.6 反后坐装置中的液体 .....          | 158        |
| <b>第9章 反面问题计算 .....</b>      | <b>160</b> |
| 9.1 后坐反面问题计算 .....           | 160        |
| 9.1.1 炮膛合力计算 .....           | 161        |
| 9.1.2 后坐阻力计算 .....           | 165        |
| 9.1.3 后坐运动方程求解 .....         | 167        |
| 9.2 复进反面问题计算 .....           | 170        |
| 9.2.1 固定式火炮复进反面问题计算 .....    | 171        |
| 9.2.2 野战火炮复进反面问题计算 .....     | 173        |
| 9.3 液压阻力系数的讨论 .....          | 174        |
| 9.3.1 液压阻力系数的变化规律和影响因素 ..... | 175        |
| 9.3.2 正面问题计算时液压阻力系数的确定 ..... | 176        |
| 9.3.3 反面问题计算时液压阻力系数的确定 ..... | 176        |
| 9.4 影响后坐运动的因素与极限射击条件 .....   | 178        |
| 9.4.1 影响后坐运动的主要因素 .....      | 178        |
| 9.4.2 极限射击条件 .....           | 179        |
| <b>第10章 制退复进机设计 .....</b>    | <b>181</b> |
| 10.1 制退复进机的结构类型 .....        | 181        |
| 10.1.1 短节制杆式制退复进机 .....      | 181        |
| 10.1.2 活门式制退复进机 .....        | 185        |
| 10.2 短节杆式制退复进机设计 .....       | 186        |



|        |                                                  |     |
|--------|--------------------------------------------------|-----|
| 10.2.1 | 后坐运动基本公式 .....                                   | 187 |
| 10.2.2 | 结构设计 .....                                       | 194 |
| 10.2.3 | 后坐反面问题计算 .....                                   | 196 |
| 10.2.4 | 复进时的液压阻力 .....                                   | 197 |
| 10.2.5 | 复进流液孔面积 $a_f$ 确定 .....                           | 199 |
| 10.2.6 | 复进反面问题计算 .....                                   | 200 |
| 10.3   | 活门式制退复进机设计 .....                                 | 201 |
| 10.3.1 | 后坐运动的基本方程 .....                                  | 202 |
| 10.3.2 | 主要参量和结构尺寸确定 .....                                | 208 |
| 10.3.3 | 后坐正面问题计算 .....                                   | 208 |
| 10.3.4 | 后坐反面问题计算 .....                                   | 210 |
| 10.3.5 | 复进问题 .....                                       | 211 |
| 第 11 章 | 炮口制退器设计 .....                                    | 212 |
| 11.1   | 概述 .....                                         | 212 |
| 11.2   | 炮口制退器的结构类型 .....                                 | 213 |
| 11.3   | 一维准定常理论 .....                                    | 214 |
| 11.3.1 | 基本方程 .....                                       | 215 |
| 11.3.2 | 一维定常等熵流的几个重要关系式 .....                            | 219 |
| 11.3.3 | 喷管的气流总反力 .....                                   | 221 |
| 11.4   | 后效期炮膛合力与火药气体作用系数计算 .....                         | 227 |
| 11.4.1 | 基本假设及其推论 .....                                   | 227 |
| 11.4.2 | 无炮口装置时的炮膛合力 $F_{pt}$ 的计算 .....                   | 231 |
| 11.4.3 | 火药气体作用系数 $\beta$ 的计算 .....                       | 236 |
| 11.4.4 | 有炮口装置时的炮膛合力 $F_{pt,T}$ 及火药气体作用系数 $\beta_T$ ..... | 239 |
| 11.5   | 炮口制退器结构特征量及效率的计算 .....                           | 241 |
| 11.5.1 | 炮口制退器结构特征量 $\alpha$ 计算 .....                     | 241 |
| 11.5.2 | 炮口制退器效率计算及步骤 .....                               | 250 |
| 11.6   | 炮口制退器结构设计的原则 .....                               | 253 |
| 11.7   | 炮口制退器效率计算的其他方法 .....                             | 254 |
| 11.7.1 | 斯鲁霍斯基方法 .....                                    | 254 |
| 11.7.2 | 美国工程设计手册方法 .....                                 | 255 |
| 第 12 章 | 前冲火炮技术 .....                                     | 258 |
| 12.1   | 概述 .....                                         | 258 |
| 12.2   | 前冲机典型结构 .....                                    | 263 |
| 12.2.1 | 美 XM204 - 105mm 榴弹炮前冲机 .....                     | 263 |
| 12.2.2 | 某 100mm 滑膛炮前冲机 .....                             | 264 |

|               |                         |            |
|---------------|-------------------------|------------|
| 12.2.3        | 某 130mm 加农炮前冲机 .....    | 264        |
| 12.3          | 液体气压式前冲机的运动方程 .....     | 269        |
| 12.4          | 液体气压式前冲机设计 .....        | 273        |
| <b>第 13 章</b> | <b>后坐阻力控制技术概述 .....</b> | <b>279</b> |
| 13.1          | 概述 .....                | 279        |
| 13.2          | 减小火炮后坐冲量技术 .....        | 280        |
| 13.2.1        | 炮口制退器 .....             | 282        |
| 13.2.2        | 膨胀波火炮 .....             | 283        |
| 13.2.3        | 前冲火炮 .....              | 284        |
| 13.3          | 后坐阻力控制技术 .....          | 285        |
| 13.3.1        | 增大后坐长度技术 .....          | 285        |
| 13.3.2        | 曲线后坐与二维后坐技术 .....       | 286        |
| 13.3.3        | 自适应控制技术 .....           | 287        |
| 13.3.4        | 电磁流变技术 .....            | 289        |
| <b>参考文献</b>   | <b>.....</b>            | <b>294</b> |

# 第1章 绪 论

火炮作为一个武器系统,可以分为火力系统、火控系统、运行系统和防护系统等子系统。火力系统又可分为发射装置和弹药系统。对于牵引火炮,发射装置主要由炮身和炮架两个大的部分组成。炮身主要完成发射弹丸的任务,炮架则实现火炮瞄准、装填、发射控制和运动等功能。炮架通常由反后坐装置、架体、平衡机、瞄准机构、瞄准装置、调平机构和运动体等组成。其中,反后坐装置是连接炮身与架体的部件,用以控制火炮射击时后坐部分的运动和传递到架体上的载荷。反后坐装置的结构形式有多种多样,一般沿身管方向、呈上下布置的结构形式,如图1-1所示。

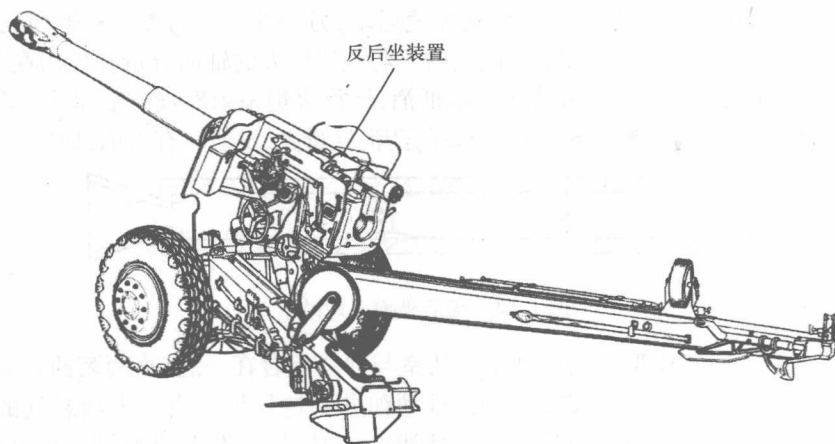


图1-1 牵引火炮

对于自行火炮,发射装置由炮身、摇架、反后坐装置、自动装填机构、托架、平衡机、瞄准机构、瞄准装置等组成。

在火炮技术发展的过程中产生了不同类型的火炮,形成了不同的发射原理或工作方式。这些不同发射原理或工作方式的火炮射击时在火炮炮架上产生不同的载荷,相应地有不同的结构形式和设计理论。有的火炮需要设置反后坐装置,有的则没有反后坐装置。

## 1.1 发射原理与作用到炮架上的载荷

利用火药能源发射的火炮武器一般有四种形式:普通火炮、平衡炮、无后坐炮和火箭炮。

图1-2为普通火炮原理模型。发射过程中,火炮身管内膛为一半封闭燃烧室,火药装药在其内燃烧膨胀做功,推动弹丸加速运动。该种火炮的特点是火药燃烧速度快、压力高,发射弹丸的初速大,初速稳定性好,射弹散布小,即火炮的威力大。但缺点是射击时火药燃气压力同时也作用到火炮身管底部,使火炮承受很大的发射载荷,炮架重,火炮的机动性差。

图1-3是平衡炮原理模型。其原理是在身管两端同时发射两个弹丸:一个是用于攻击目标

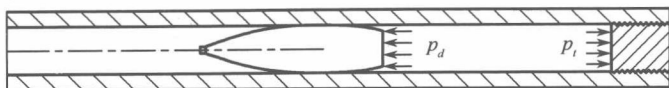


图 1-2 普通火炮原理模型

的弹丸,另一个是用于平衡后坐的平衡弹。通过两个弹丸的动量匹配可保证在发射过程中无后坐冲量的产生。这种火炮尽管可以做到彻底的无后坐,但其向前后两个方向发射弹丸带来明显的不利因素:①向后方发射的弹丸会对己方造成危险;②增加了火炮系统的身管长度和质量;③弹丸初速较低、射程较小。

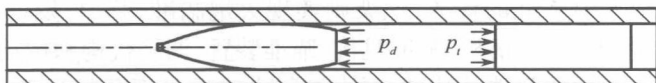


图 1-3 平衡炮原理模型

图 1-4 是无后坐炮原理模型。其原理是火炮身管内膛后部不再封闭,炮膛尾端设置一喷口,射击时火药燃气一部分作用于弹丸,推动弹丸加速运动;另一部分火药燃气从炮膛尾喷口喷出,产生一个向前的作用力。作用于膛底环形表面上的火药燃气压力的轴向分量和作用在喷管锥形表面上的火药燃气压力的轴向分量可以抵消或基本抵消,使得火炮发射时没有后坐力。其特点是火炮的炮架轻,机动性好,与普通火炮相比射程小、发射药消耗量大,发射时有火焰,烟尘大。

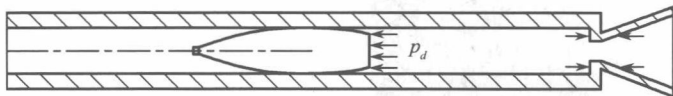


图 1-4 无后坐炮原理模型

图 1-5 是火箭炮原理模型。其原理是将药室与弹丸组合在一起,火药装药在弹丸尾部的燃烧室中燃烧,从尾喷口喷出,产生向前的推力,推动弹丸到达目标。由于火药燃气的作用力都在弹丸上,火炮发射时作用于发射架的力很小。其特点是射程远,发射装置轻。缺点是初速小,射弹散布大,发射药消耗量大,有烟雾和火焰。

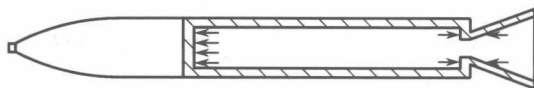


图 1-5 火箭炮原理模型

上述的几种火炮武器类型中,普通火炮的射击载荷最大。普通火炮射击时,一方面火药燃气作用于弹丸,推动弹丸加速运动达到所需要的初速;另一方面火药燃气作用于身管膛底产生一个很大的、向后的作用力,对火炮发射的平台——炮架(或底盘)施加一个很大的载荷,使得炮架(或底盘)笨重。但由于其威力大,仍然是坦克和炮兵武器的主要装备。

本书讨论的火炮指普通火炮。

## 1.2 火炮反后坐装置

火炮射击时,身管内膛火药燃气产生的压力一方面作用于弹丸,推动弹丸加速运动,使其达到所需的炮口动能。另一方面,膛内的火药燃气也同时作用于炮身(图 1-6),产生一个向后的作用力(称为膛合力,用  $F_{pt}$  表示),使炮身等构件向后运动,称为后坐运动。

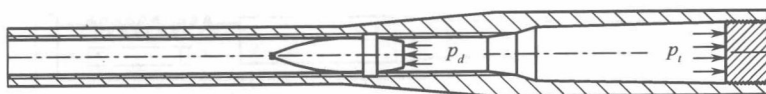


图 1-6 身管内膛的受力

如果通过架体的约束,使炮身相对炮架不运动,这种炮架称为刚性炮架。如果允许火炮身管及其相关的构件(称为后坐部分)相对于火炮架体运动,并通过一定的弹性力和制动力抑制后坐运动,使其在一定的位移上停止运动,这种炮架称为弹性炮架。由于火炮的身管相对于架体向后运动,在小口径武器中,常把这种火炮称为管退式武器。

在炮身与架体之间安装的、用来耗散和储存火炮射击时的后坐能量并使炮身复位的结构部件称为反后坐装置。在火炮技术发展的过程中,形成了各种各样结构类型的反后坐装置。图 1-7 是一种液体气压式反后坐装置的结构原理。

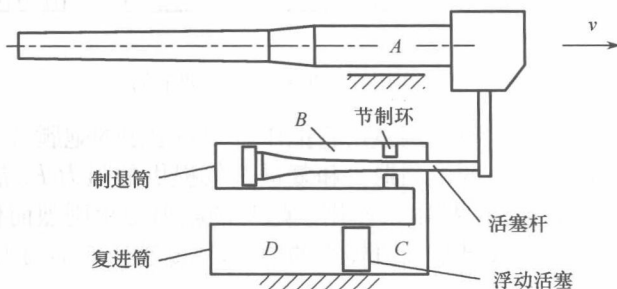


图 1-7 液体气压式反后坐装置的结构原理

火炮射击时,炮身 A 在膛内火药燃气压力的作用下向后运动,带动制退筒中的活塞杆一起运动,活塞杆上的活塞压缩制退机工作腔 B 中的液体,迫使液体从节制环与活塞杆之间的节流孔流过,孔的两侧形成压力差,在活塞上产生一个液压阻力使炮身的后坐运动减速。与此同时,从制退筒流出的液体进入复进筒 C 腔,推动浮动活塞向前运动压缩复进机工作腔 D 中的气体储存复进能量。当炮身的后坐运动停止后,复进机工作腔 D 中的压缩气体开始作用,推动浮动活塞向后运动,复进筒 C 腔中的液体被挤入制退筒,推动活塞杆上的活塞并带动炮身向前运动恢复到射击前的位置。

由于制退机所产生的液压阻力与节流孔的面积和液体流动的速度有关,因而可通过活塞杆截面的尺寸与液体的流速匹配来控制炮身后坐运动的阻力。此外,由于复进时,液体的流速很低,制退机的节流孔产生的液压阻力很小,对复进运动的作用有限,为了避免后坐部分在复进到位时的冲击,在多数火炮上还需设置专门的复进节制器。

### 1.3 反后坐装置的作用

火炮反后坐装置的功能是在火炮射击时提供弹性力和制动力控制后坐部分的后坐运动,并使之复位。弹性炮架火炮的模型可以简化成由弹性元件和阻尼元件将炮身和架体连接的模型,如图 1-8 所示。

当火炮射击时,身管膛内的火药燃气压力作用于身管内壁及膛底产生一个作用时间短、幅值变化大的炮膛合力  $F_p$ ,使后坐部分加速运动,与此同时反后坐装置产生一个阻力  $F_R$ (称为后坐阻力)对后坐部分进行制动,使其在一定的距离上(称为后坐长度)停止运动,然后反后坐装置的弹

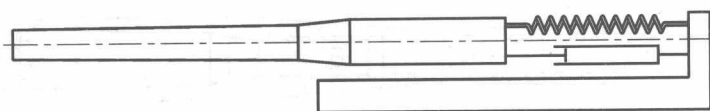


图 1-8 弹性炮架模型

性恢复力使后坐部分复位。显然,作用到炮架上的力等于  $F_R$ 。由于后坐阻力的作用过程(时间)长,在动量相等的情况下,  $F_R$  是一个变化较平稳、幅值小的力,其原理如图 1-9 所示。

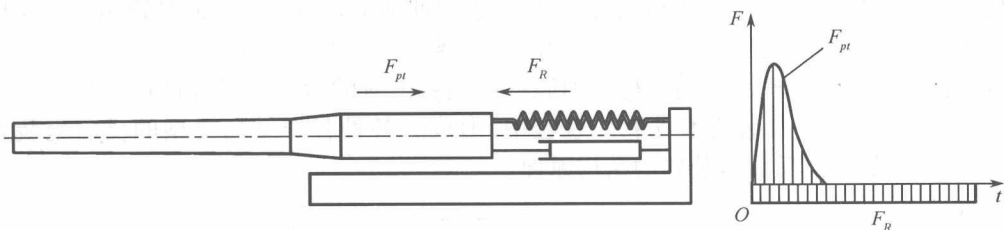


图 1-9 作用到后坐部分与炮架上的力

火炮反后坐装置实质上是一个缓冲装置,它把作用时间很短的炮膛合力  $F_{pt}$  所引起的全炮后坐运动,转化为一个相对时间较长的由制退机和复进机等提供的阻力  $F_R$  制动的炮身后坐运动,并最终停止在一定的后坐长度上。把本来作用于炮身的幅值变化剧烈而作用时间很短的  $F_{pt}$  变成了作用时间较长、幅度变化不大且最大值较小的力  $F_R$ 。传递到炮架的力是后坐阻力  $F_R$ ,因而可减小炮架的受力。

反后坐装置工作时的表现是力与运动的变化,同时也是一个能量转换的过程。后坐时,火药燃气的一部分能量转换为后坐部分的动能,反后坐装置将后坐部分动能的大部分转换为热能,小部分转换为弹性势能储存起来;复进时,将后坐时储存的弹性势能转换成后坐部分的复进动能,并将多余的能量转换为热能。

反后坐装置不仅影响火炮受力的大小和规律,还影响火炮射速和精度。和刚性炮架火炮相比,反后坐装置的作用主要有两个方面。

(1) 减小火炮架体在射击时的受力。采用反后坐装置,炮身通过弹性元件和阻尼元件与架体相连接。射击时,架体所受的载荷已不是火药燃气作用于身管的炮膛合力  $F_{pt}$ ,而是由反后坐装置弹性恢复力、阻尼制动力和摩擦力组成的后坐阻力  $F_R$ ,使架体的受力大为减小。一般火炮,后坐阻力最大值  $F_{Rmax}$  仅为炮膛合力最大值  $F_{ptmax}$  的十几分之一到几十分之一,如某 85J,  $F_{ptmax} = 1485\text{kN}$ ,  $F_{Rmax} = 75\text{kN}$ ,因而  $F_{Rmax}/F_{ptmax} = 1/20$ ;某 122J,  $F_{ptmax} = 3818\text{kN}$ ,  $F_{Rmax} = 210\text{kN}$ ,因而  $F_{Rmax}/F_{ptmax} = 1/18$ 。

由于架体受力的减小,使得火炮设计时的主要矛盾(威力与机动性)得到了改善,主要表现在:

- ① 架体受力减小,火炮的炮架质量可以减轻,火炮的机动性提高。
- ② 架体受力减小,火炮射击时的稳定性提高,有利于火炮射击精度的提高。
- ③ 架体受力减小,在火炮质量不变的情况下,可使火炮的口径增大或炮口动能增加,提高火炮的威力。

(2) 把射击时的全炮后坐运动变为可控的炮身后坐运动,并能自动复位。由于炮身在射击时只是沿摇架的导轨运动,后坐终了时能够自动复位,且架体可以保持静止或接近静止,使得火炮的操作简单,有利于提高射速。自动的后坐与复进为自动装填创造了条件。通过设计弹性元件和阻尼元件的参数可以控制火炮后坐的运动和力的规律,如后坐长度和最大后坐力等,并可满



足对火炮射击静止性和稳定性的要求。

由于将全炮后坐运动变为炮身后坐运动,给火炮带来以下好处:

- ①火炮重复射击时的操作简化,有利于提高射速。
- ②炮身后坐运动为自动装填提供了动力。
- ③控制炮身的后坐运动,可获得要求的后坐运动参数或结构参数。

## 1.4 后坐系统与反后坐装置的类型

使火炮能够进行后坐运动的结构件除反后坐装置外,还包括炮身和摇架。这些使火炮完成后坐和复进过程的结构件——炮身、反后坐装置和摇架导轨等构成了火炮的后坐系统。

后坐系统按其工作的特点有不同的类型。

### 1. 按射击循环分类

正常后坐系统——火炮射击时,击针击发弹药底火后,后坐部分按后坐、复进的顺序运动的后坐系统。大多数火炮采用这种后坐系统。

前冲后坐系统——火炮射击时,后坐部分先前冲,然后击发底火,后坐部分按前冲、后坐、复进的顺序运动的后坐系统。国外也称为软后坐(soft recoil)。

### 2. 按后坐层次分类

单一后坐系统——只有炮身及相应的构件后坐。大部分火炮都采用此种后坐系统。

双重后坐系统——除炮身等构件相对摇架后坐运动(有时也称为第一后坐系统)外,上架及其以上的构件相对下架也产生后坐运动(有时称为第二后坐系统)。

采用双重后坐系统,可有效地减小炮架受力,但是使火炮的结构复杂,在实际应用中较少采用。

### 3. 按后坐运动轨迹分类

直线后坐系统——后坐部分沿炮膛轴线进行运动。

曲线后坐系统——后坐部分质心按曲线轨迹进行运动。根据曲线轨迹的不同,又可分为平面曲线后坐系统和平面运动曲线后坐系统。

曲线后坐系统是近年来提出的一种后坐系统。当后坐部分进行曲线后坐运动时,其质心有一个向上的加速度,所产生的惯性力与火炮总体结构布置相匹配,可改善火炮的射击稳定性。

### 4. 按后坐长度与射角的关系分类

定后坐长后坐系统——制退机的流液孔不随火炮射角变化,后坐长度基本不变的后坐系统。

变后坐长后坐系统——制退机流液孔随火炮射角变化,后坐长度在不同的射角范围内变化的后坐系统。

一般反后坐装置由三部分组成:后坐制动器、复进机和复进节制器(通常将炮口制退器也归到反后坐装置中,其原因是炮口制退器也起减小后阻力的作用)。

后坐制动器——提供后坐阻力,控制火炮后坐部分按预定的力和运动规律后坐,以保证射击时火炮的稳定性和静止性。

复进机——存储部分后坐能量,在后坐终了时将后坐部分推回到待发位置。

复进节制器——提供复进阻力,控制火炮后坐部分按预定的力和运动规律复进,保证复进时火炮的稳定性和静止性。

反后坐装置的三个构成部件是有机地联系在一起的,相应的结构组成了反后坐装置的整体。但具体结构组成上,有多种变化。通常将后坐制动器和复进节制器放在一起组成一个部件,称为

制退机,复进机单独构成另一部件。也有将制退机与复进机组合在一起,称为制退复进机。

反后坐装置类型有多种。

### 1. 按结构形式分类

独立式反后坐装置——制退机和复进机单独布置,两个部件各自独立工作。

非独立式反后坐装置——制退机和复进机有机地组合在一起,形成一个部件。也称为有机联合式反后坐装置或制退复进机。

### 2. 按制退液的性质分类

不可压缩液体反后坐装置——反后坐装置所使用的液体近似于不可压缩。

可压缩液体反后坐装置——反后坐装置利用可压缩液体来工作。

反后坐装置中的复进机按储存能量介质不同可分为弹簧式、气压式、火药气体式和可压缩液体式等。其中,以弹簧式和液体气压式应用较多。

反后坐装置中的制退机的结构形式很多,可分为沟槽式、转阀式、多孔衬筒式、活门式和节制杆式。其中,沟槽式、转阀式和多孔衬筒式制退机出现在早期的火炮上,现已很少应用。节制杆式制退机和活门式制退机由于结构简单,性能易于控制,在现代火炮上应用较多。

制退复进机主要有两种类型——短节制杆式和活门式。

## 1.5 反后坐装置的设计

反后坐装置是火炮的关键部件之一,它的性能对火炮总体性能影响很大,甚至决定火炮能否可靠持续地工作。

由于反后坐装置的性能决定了火炮的后坐长度和后坐阻力的变化规律,是影响火炮后坐与复进稳定性和静止性主要因素,反后坐装置的设计对火炮的总体方案及参数有决定性的影响。例如,后坐阻力的幅值大小不但影响火炮架体的强度与刚度,而且还影响火炮的后坐稳定性、大架的长度与强度、火线高、全炮质量等参数;后坐长度将影响火炮架体的尺寸、火线高等参数。反过来,火炮总体的结构和主要参数也对反后坐装置的设计限定相应的约束。例如,弹药的种类、射击稳定性要求、炮架质量、火线高等将对后坐阻力的大小形成约束,火炮的类型、炮手的活动空间、火线高等将对后坐长度形成约束。

火炮反后坐装置设计的内容主要有火炮射击时的受力分析与射击稳定性和静止性计算,后坐与复进运动的动力学分析和液体通过节流孔流动的液压阻力计算,以及反后坐装置的结构设计等。

火炮反后坐装置的设计是在火炮的总体方案确定之后,并且在外弹道设计、内弹道设计和炮身设计完成后进行,主要设计工作有:

(1) 结构类型的选择。根据火炮总体方案的要求和结构特点,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) 制定火炮后坐与复进的受力和运动规律,进行设计计算,给出火炮后坐与复进时制退机流液孔和复进节制器流液孔面积变化的规律。

(3) 进行制退机和复进机的技术设计。

(4) 进行各种极限条件下的后坐与复进运动计算及全炮的动力学分析,为炮架各零、部件的强度和刚度计算提供数据。

(5) 进行反后坐装置的实验。验证或调整反后坐装置的性能。

在火炮反后坐装置设计过程中,根据设计阶段和设计要求的不同,可以将设计计算分为两类

问题,即设计问题和分析计算问题,在火炮设计中称为正面问题和反面问题。

后坐正面问题(设计问题):在正常射击条件( $\varphi = 0^\circ$ , 常温, 正装药)下, 已知后坐阻力的规律( $F_R = f(x)$  或  $F_R = f(t)$ ), 求解制退机的流液孔尺寸和反后坐装置的结构尺寸。

后坐反面问题(分析问题):在各种射击条件下, 已知反后坐装置的结构尺寸和制退机的流液孔尺寸, 计算实际的后坐阻力和后坐运动诸元( $F_R = f(x)$ ,  $v = v(t)$ ,  $x = x(t)$  等)。

后坐正面问题计算的过程如下:

(1) 根据给定的射击条件( $\varphi = 0^\circ$ , 常温, 正装药)和内弹道数据计算, 计算火药气体在不同作用时期的炮膛合力随时间的变化关系  $F_{pt} = f(t)$ 。

(2) 根据火炮总体设计的要求确定后坐阻力规律  $F_R = f(x)$  或  $F_R = f(t)$ , 求解后坐运动方程, 即

$$m_h \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{pt} - F_R$$

得到制退后坐运动的  $v = v(t)$ 、 $x = x(t)$  和  $v = v(x)$  的关系曲线。

(3) 根据火炮总体设计的要求进行复进机设计。

(4) 根据火炮总体设计的要求确定制退机的主要结构尺寸。

(5) 根据制退机的结构特点, 建立制退机液压阻力与结构参数关系的液压阻力方程, 利用已得到的后坐运动速度  $v$  和后坐阻力规律计算制退机流液孔的面积变化规律  $a_x = f(x)$ , 设计流液孔的结构尺寸。

后坐反面问题计算的过程如下:

(1) 根据火炮总体设计的要求和火炮实际工作的各种极限射击条件确定射击条件, 并由内弹道数据计算火药气体在不同作用时期的炮膛合力随时间的变化关系  $F_{pt} = f(t)$ 。

(2) 根据复进机的结构, 建立复进机力的计算公式, 计算复进机力  $F_f$ 。

(3) 根据制退机和复进机的结构特点, 计算密封装置摩擦力  $F$  和后坐运动导轨的摩擦力  $F_T$ 。

(4) 根据制退机的结构特点, 建立制退机液压阻力与结构参数关系的液压阻力方程, 求解后坐运动方程, 即

$$m_h \frac{d^2 x}{dt^2} = F_{pt} - F_R$$

$$F_R = F_{\phi h} + F_f + F + F_T - m_h g \sin \varphi$$

得到制退后坐运动的  $v = v(t)$ 、 $x = x(t)$  和  $F_R = f(x)$  的关系曲线。

对于火炮复进节制器设计也有类似的复进正面问题和复进反面问题。

对火炮反后坐装置设计的一般要求如下:

(1) 服从火炮总体方案的要求, 保证火炮总体性能的实现。在火炮总体确定的重要参数, 如战斗全重、外廓尺寸、火线高、最大射角等的条件下, 应满足总体方案所指定的后坐长度、最大后坐阻力、炮口制退器效率等的范围要求, 应保证在各种射击条件下火炮的后坐与复进稳定性和静止性。

(2) 机构动作可靠, 具有良好的环境适应性。在野战条件(气候恶劣、温度范围大、各种环境等)下, 反后坐装置应可靠地工作, 不漏液和漏气, 正常和可靠地后坐与复进, 并能向其他机构提供能量, 保证它们能可靠地工作。

(3) 勤务操作方便, 可维护性强。火炮反后坐装置的液量和气压检查应适用于野战条件下