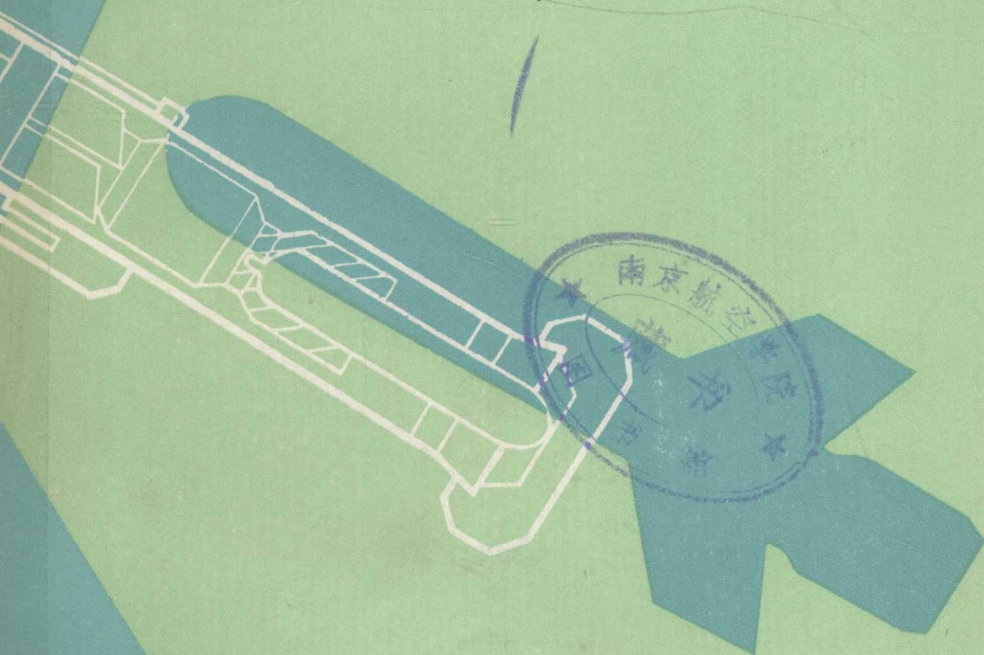


火箭导弹 弹射内弹道学

袁曾风 编著



北京工业学院出版社

V413

1004

火箭导弹弹射内弹道学

袁曾凤 编著



30271515

北京工业学院出版社

627931

内 容 简 介

本书系统地介绍了火箭导弹弹射内弹道学的基本内容。包括火药与燃烧的一般知识,高压室压力曲线的计算,次要功系数计算,反后坐装置反作用力计算,无后坐条件的建立,低压室内弹道计算,内弹道设计等内容。本书以并联无后坐式弹射装置为重点研究对象,对串联无后坐式、自弹式、燃气蒸汽式弹射装置的内弹道问题也作了必要的介绍。

本书主要按照“火箭导弹发射技术与设备”专业教学大纲的要求编写,兼顾其它方面的需要。书中原理及解决内弹道正反面问题的方法亦适用于火箭导弹以外的其它弹射装置内弹道的设计计算。

本书可作为高等学校有关专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。

袁曾凤 编著



火箭导弹弹射内弹道学

袁曾凤 编著

*

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

清河东升印刷厂印刷

北京工业学院出版社

787×1092毫米 16开本 12.25印张 302千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数:1-2,000册

统一书号:15434·74 定价:2.10 元

前 言

火箭导弹的弹射技术是近二十余年来发展起来的一门发射技术,目前已广泛应用于不同类型的战术战略导弹的发射。迄今为止,据不完全统计,国内外已有近四十种已经研制成功或正在研制的火箭导弹采用了弹射技术。弹射与自力发射相比,其根本的不同是火箭导弹的发射动力不是由箭弹自身提供,而是改由发射装置提供,因而在弹射装置的组成中需增设弹射动力系统,这样就提出了弹射内弹道学的问题。

为了适应发展的需要,我们开展了“火箭导弹弹射内弹道学”的课题研究,并在1981年编写了《弹射装置内弹道》试用教材。鉴于目前无论是教学工作或产品研制工作都需要一本系统叙述弹射内弹道学的书籍,因此在几年科研和教学实践的基础上,收集了国内外有关资料和科研成果,参考其它有关教材,编写了本书。

本书是为“火箭导弹发射技术及设备”专业讲授“火箭导弹弹射内弹道学”选修课程编写的教材,亦可供从事弹射装置研制、生产和使用的工程技术人员参考。

本书以并联无后坐式弹射器为典型代表,重点讲述其高、低压室内弹道的正、反两方面的问题。在此基础上,结合串联无后坐式、自弹式、燃气、蒸汽式弹射装置的特点,分别讲述了它们的内弹道正、反面问题中带个性的问题。编者期望能在有限的篇幅内使读者掌握弹射装置内弹道设计、计算的一般方法。

由于“火箭导弹发射技术与设备”专业的学生在先修课中没有学习过有关火药的知识,故在第一章中适当叙述了火药及燃烧方面的内容。除此而外,还介绍了几何燃烧定律、燃烧速度定律及与之有关的燃气生成速率、形状函数等内容。

第二章讲述了高压室正面问题的解决方法,包括不计侵蚀、燃面不变及燃面变化时的压力计算以及计侵蚀、燃面变化时的压力计算。

第三章讲述了低压室内弹道的一般问题,包括次要功系数的计算,反后坐装置反作用力计算,并、串联无后坐条件的建立等内容。本章是讲述第四、五章的基础。

第四章讲述了低压室正面问题的解决方法。其中以并联无后坐式为研究重点,同时对串联无后坐式、自弹式、燃气蒸汽式的低压室内弹道方程组也作了必要的介绍。

第五章的内容为弹道设计。装药设计部分重点介绍了多根($n=3\sim 200$)管状药的排列方式及 n 值的优选与设计。其它装药设计方法限于篇幅,且因为一般固体火箭发动机及火炮的书籍上均有介绍,故在本书中不再赘述。

本教材的先修课程为工程热力学,气体动力学和导弹发射装置构造。有关弹射装置的工作原理和各种结构形式认为读者已有了清楚的了解。

本书由刘晋彦主审,赵承庆审阅,操连成审阅了部分章节,他们都提出了许多宝贵意见。本书编写过程中曾得到陈月峥、常武、赵伯华、刘佐庭、柳星炎等同志的热情支持和帮助。在此谨向以上同志表示由衷的感谢。

由于编者的水平有限,书中定有不少错误和不妥之外,敬请读者批评指正。

目 录

主要符号表	(1)
绪论	(4)
一、火箭导弹弹射器的基本组成, 基本工作原理及分类	(4)
二、弹射内弹道学的研究对象和任务	(8)
三、研究弹射内弹道学的方法	(9)
第一章 高压室内弹道理论基础	(10)
§ 1-1 火药的一般知识	(10)
一、火药的分类	(10)
二、火药的药型与标记	(13)
三、火药的基本性能	(15)
四、火药的能量特征量	(16)
五、火药的弹道特征量	(19)
§ 1-2 火药的燃烧	(20)
一、火药的燃烧过程	(20)
二、双基药的稳态燃烧机理	(24)
§ 1-3 火药的几何燃烧定律	(27)
§ 1-4 燃气生成速率	(28)
§ 1-5 形状函数	(30)
一、带状药的 σ - z , ψ - z	(31)
二、管状药的 σ - z , ψ - z	(32)
三、 σ - z 图解	(34)
四、 ψ - z 图解	(35)
五、 ψ - z , σ - z 的二项式	(37)
§ 1-6 燃烧速度及影响因素	(38)
一、燃烧速度	(38)
二、影响燃速的因素	(39)
第二章 高压室内弹道方程组及解法	(48)
§ 2-1 压力曲线的特征	(48)
§ 2-2 基本假设及内弹道方程组	(49)
一、基本假设	(49)
二、内弹道方程组	(50)
§ 2-3 压力对时间的变化率	(53)

一、装药燃烧阶段的 dp_1/dt 表达式	(53)
二、 p_1-t 的实质	(55)
三、装药燃烧结束后计算 p_1-t 的微分方程	(57)
§ 2-4 平衡压力	(57)
一、平衡压力表达式	(57)
二、影响平衡压力的因素	(59)
三、高压室压力的稳定性	(61)
§ 2-5 不计侵蚀、燃面不变时的 p_1-t 计算	(64)
一、上升段	(65)
二、平衡段	(68)
三、排气段	(68)
四、 p_1-t 计算步骤	(71)
§ 2-6 不计侵蚀、燃面变化时的 p_1-t 计算	(72)
一、上升段	(72)
二、平衡段	(77)
三、排气段	(79)
§ 2-7 计侵蚀影响、燃面变化时的 p_1-t 计算	(79)
一、侵蚀对 p_1-t 的影响	(79)
二、压力曲线的计算	(81)
§ 2-8 误差修正	(87)
附录	(88)
第三章 弹射器低压室内弹道的一般问题	(93)
§ 3-1 弹道特点	(93)
§ 3-2 次要功系数	(95)
§ 3-3 反后坐装置反作用力计算	(101)
一、制动小火箭式反后坐装置反作用力计算	(102)
二、尾喷管式反后坐装置反作用力计算	(104)
§ 3-4 无后坐条件	(108)
一、并联无后坐式弹射器的无后坐条件	(109)
二、串联无后坐式弹射器的无后坐条件	(110)
第四章 并联无后坐式弹射器低压室内弹道方程组及解法	(112)
§ 4-1 基本假设	(112)
§ 4-2 内弹道方程组	(113)
一、弹射过程分析	(113)
二、方程组	(114)
§ 4-3 内弹道解法	(120)
一、等温解法	(121)
二、非等温解法	(126)
§ 4-4 其它形式弹射器的低压室内弹道问题	(129)

一、串联无后坐式弹射器的低压室内弹道方程.....	(129)
二、自弹式弹射器低压室内弹道方程.....	(130)
三、燃气蒸汽式弹射器低压室内弹道方程.....	(132)
附录 欧拉方法简介.....	(134)
第五章 并联无后坐式弹射器内弹道设计.....	(137)
§ 5-1 内弹道设计的任务.....	(137)
§ 5-2 弹道方案的评价标准.....	(137)
§ 5-3 内弹道设计的基本方程.....	(139)
§ 5-4 压峰比及其限制准则.....	(141)
§ 5-5 低压室内弹道设计.....	(144)
§ 5-6 高压室内弹道设计.....	(149)
一、火药选择.....	(149)
二、药型选择.....	(150)
三、高压室工作压力 p_1 的选取.....	(152)
四、 S_{x,p_1} 的确定.....	(153)
五、装药初始燃烧面积 S_0 的确定.....	(154)
六、肉厚 $2e_1$ 的确定.....	(154)
七、装药量 ω 的确定.....	(154)
八、装药设计.....	(154)
§ 5-7 其它形式弹射器的内弹道设计问题.....	(178)
一、串联无后坐式弹射器的内弹道设计基本方程.....	(178)
二、自弹式弹射器内弹道设计基本方程.....	(179)
三、自弹式弹射器无后坐条件.....	(180)
四、燃气蒸汽式弹射装置中的立管喷水孔设计.....	(181)
参考文献.....	(188)

主要符号表

一、说明

1. 各符号按英文字母及希腊字母顺序排列。
 2. 对于与特定时间相对应的变量用注脚表示，常用的有以下几种
- o ——导弹开始运动的瞬间
 om ——尾喷管打开、气体开始流出的瞬间
 m ——火药气体达到最大压力的瞬间
 k ——火药燃烧结束的瞬间
 g ——火箭导弹离筒瞬间
 kp ——气流为临界状态
 $1, 2$ ——分别指高压室及低压室。

二、符号表

- a^* ——发射加速度允许值
 $\bar{a}$ ——实际的平均发射加速度
 $\bar{a}^*$ ——常温下平均发射加速度允许值
 A ——高压室通气面积
 b ——火药宽度的一半（直角柱体形状系统）
 c ——火药长度的一半（直角柱体形状系统）
 C_D ——流量系数
 G_w ——气体的定容比热
 C_p ——气体的定压比热
 D ——管状药外径
 d ——管状药内径
 d ——导弹直径
 $d_{筒}$ ——发射筒内径
 D_i ——高压室外径
 e_1 ——火药单体起始厚度（或称肉厚）的一半
 e ——某瞬间火药单体燃去厚度
 f ——定容火药力
 f_0 ——定压火药力
 G_1 ——高压室燃气秒流量
 G_2 ——低压室燃气秒流量
 J ——喉通比
 k ——比热比或绝热指数

K_N ——面喉比
 l ——某瞬时导弹行程
 l_g ——导弹全行程长
 L ——管状药长度
 m ——导弹质量
 M ——后坐部分质量
 n ——装药中火药单体的数目
 N ——某瞬时低压室中燃气质量
 p_1 ——某瞬时高压室压力
 p_2 ——某瞬时低压室压力 (瞬时平均压力)
 $\bar{p}_2$ ——低压室平均压力
 p_0 ——导弹起动压力
 p_{om} ——尾喷管起喷压力
 p_g ——筒口压力 (低压室)
 p_r ——压峰比
 p_{cr} ——火药临界压力
 q ——导弹发射重量
 $Q_{筒}$ ——发射筒重量
 Q ——弹射器重量
 $Q_{W(i)}$ ——水为液态的定容爆热
 R ——火药的气体常数
 S ——发射筒断面面积
 s ——装药燃烧至某瞬间的表面积
 s_0 ——装药的起始表面积
 S_{pk_1} ——高压室喷喉面积
 S_{pk_2} ——尾喷管喉部面积
 S_e ——喷管出口面积
 s_{σ_0} ——装药燃烧侧面积
 t ——时间
 t_c ——燃烧结束瞬间
 t_g ——导弹离筒瞬间
 T_i ——装药初温
 T_1 ——某瞬时高压室燃气温度
 T_2 ——某瞬时低压室燃气温度
 T_0 ——定压燃烧温度
 T_w ——定容燃烧温度
 u ——火药燃烧速度
 v ——某瞬时导弹运动速度
 v_g ——导弹离筒速度

$\bar{V}$ ——发射筒后坐速度

W_{ψ} ——某瞬时高压室的自由容积

W_{10} ——高压室初始容积

W_{20} ——低压室初始容积

w_1 ——标准状态下火药气体的比容

w ——气体的比容

Y_1 ——高压室在时间 t 内的总流出量，或低压室在时间 t 内的总流入量

Y_2 ——低压室在时间 t 内的总流出量

z ——火药燃去相对厚度， $Z=e/e_1$

α ——火药气体余容

$(\alpha_u)_{t,i}$ ——燃速温度系数

$(\alpha_p)_{t,i}$ ——压力温度系数

γ ——火药密度

Δ ——装填密度， $\Delta=w/W_{10}$

η ——装填系数

η_w ——装药利用系数

η_g ——充满系数

η_o ——金属利用系数

λ ——内外通气参量比

λ ——药形系数

λ ——药形系数

μ ——药形系数

ξ ——尾喷管推力系数

ξ_0 ——发射筒口的推力系数

ρ ——燃气密度

σ ——装药相对表面积

τ_2 ——低压室相对温度

φ ——侵蚀燃速系数

φ ——次要功系数

φ_2 ——流量消耗系数

χ_1 ——高压室散热修正系数

χ_2 ——低压室散热修正系数

ψ ——火药燃烧掉的百分数

ω ——装药量

ω_{YR} ——某一瞬间火药燃去部分的质量

α ——通气参量

α^* ——临界通气参量

$\alpha_{内}$ ——内通气参量

$\alpha_{外}$ ——外通气参量



绪 论

一、火箭导弹弹射器的基本组成、基本工作原理及分类

发射技术中利用火箭导弹以外的力源将火箭导弹发射出去的技术称为弹射技术, 采用弹射技术发射火箭导弹的装置称为弹射装置。弹射装置中产生弹射动力并将火箭导弹发射出去的部分称为弹射器。

1. 基本组成

尽管弹射器的种类很多, 但仍可概括出它们的基本组成。当然并不是每一种弹射器都具有每一基本组成部分。

(1) 发射筒 一般说, 弹射装置大多具有发射筒, 即其定向器为筒式。这是因为发射筒易于密闭气体, 以形成所需要的弹射力; 而且发射筒可兼作包装筒, 给导弹提供所要求的温度、湿度环境, 具有贮存、运输、发射导弹等多种功能, 使导弹平时得到良好的保护, 简化维修保障工作, 战时减少战前检测, 战术使用简便。

(2) 高压室与低压室 以燃气或压缩空气为工质的弹射器均具有高压, 低压两个工作室, 其原因是火药必须在高压下才能正常燃烧, 而导弹在发射过程中, 为了保护弹上仪器, 其所受发射加速度不允许过大, 为了解决导弹纵向加速度不能过大与火药正常燃烧, 或压缩空气贮气设备不能过重过大的矛盾, 弹射器分设高压室与低压室。火药在高压室中得到正常燃烧所必需的压力环境, 而导弹在低压室中受低压推动向前运动。仅有高压室或低压室的弹射器可看作某些条件下的特例, 前者如炮式弹射器, 后者如液压式弹射器。

高压室用以形成弹射动力源。对于以燃气为工质者, 高压室即半密闭的火药燃烧室, 火药燃烧后通过其上不同形式的喷管或管道阀门系统将高压燃气排送到低压室中去。高压室可以固定在发射筒中, 也可在弹后随弹一起运动。

高压室喷管在未点火工作时由喷口膜片密封, 当点火工作后, 点火药气体在高压室中建立起压力 p_1 。当 p_1 达到使装药点燃的点火压力 p_{ig} 时, 一般要求所有喷口膜片亦同时破膜, 即点火压力 p_{ig} 等于破膜压力 $p_{破}$ 。此后高压室即成为一个半密闭的燃烧室, 燃气顺利进入低压室, 低压室开始建立压力 p_2 , 故高、低压室压力曲线的关系如图1所示。

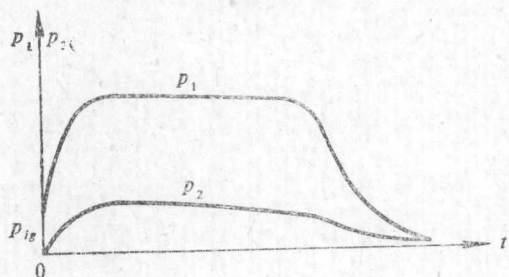


图1 高、低压室压力曲线

低压室是形成弹射力的密闭或半密闭空间, 一般就是发射筒内的导弹后部空间。通过高压室喷口或管道送来的工质在此建立起低压室压力, 作用在导弹承压面上形成弹射力。低压室的压力远低于高压室压力, 一般为几个兆帕, 随着导弹的运动, 低压室容积不断扩大。

(3) 反后坐装置 其作用是产生向前的推力以抵消发射筒的后坐力, 这样可以改善发射支架的受力情况, 保持瞄准精度。倾斜发射

的小型战术导弹弹射器常具有反后坐装置，因为对于这类弹射器要求运动机动性好，无论便携使用或车载，均希望重量小；且其跟踪瞄准装置常与发射筒安装在一起，发射筒的后坐将影响瞄准精度。

水下垂直发射或地下井弹射战略导弹以及从飞机上横向弹射机载导弹，均可不设反后坐装置，因为后坐力对潜艇这样重量很大的载体及高速飞行的载机不会产生很大的影响。

反后坐装置一般为尾喷管式或制动小火箭式。

(4) 隔热装置或冷却装置

为防止高温燃气损伤导弹，需要在弹后采用隔热装置或燃气冷却装置。隔热装置即在弹后放置隔热活塞或用尾罩将导弹尾部笼罩起来。活塞或尾罩的作用除隔离高温燃气外，还可通过外圆上的密封措施密封燃气并承受、传递弹射力。弹射过程中，活塞或尾罩随弹运动至发射筒口，而后止动于筒口或随弹飞出后，与弹体分离，自行坠落。尾罩的重量比较大，需用侧向发动机使其在指定的地点坠落。

战略导弹的活动底座(相当于活塞)或尾罩无论止动于筒口或坠落地面，其动能均相当大，处理好这部分能量是一个复杂的问题。为了避免这个问题发生而出现了使燃气降温的办法，即采用冷却装置。当燃气温度降至足够低时就可以不要活动底座或尾罩了。据报导，美国“三叉戟”潜地导弹及 MX 陆基机动发射导弹均无尾罩，后者的燃气温度可冷却至 $204\sim 260^{\circ}\text{C}$ 。常用的冷却剂是水，燃气通过水室后温度大大降低，并使水汽化，燃气与水蒸汽混合后共同作为弹射工质，因而称为燃气蒸汽式弹射器。

除此之外，弹射器的组成还包括筒口止动装置、密封装置等。

2. 基本工作原理

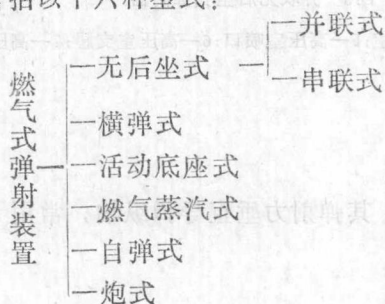
尽管弹射装置的型式各异，工作过程也不完全相同，但它们的基本工作原理是相同的。

无论哪种弹射装置都有一个形成弹射力的外动力源(高压室)。由于受到导弹纵向发射加速度的限制以及不允许高温气体直接接触导弹，从高压室产生出来的大量高压气体(如压缩空气)或高温高压气体(如燃气)不能直接用来推动导弹运动，而必须经过降温降压环节，如喷管、冷却系统或阀门管路等，然后进入低压室形成弹射力，将导弹弹射出筒。一般情况下，导弹第一级发动机在出筒口或出地面、出水面之后才点火工作。

3. 分类

根据不同的准则可对弹射装置进行不同的分类，按照做功工质的不同可将弹射装置分为四大类：燃气式弹射装置、压缩空气式弹射装置、液压式弹射装置、电磁式弹射装置。其中电磁式弹射装置不是靠气压或液压来形成弹射力，而是用完全不同的一种力——电磁力来作为弹射力，因而不存在做功工质的问题。它是一种最新发展起来、尚处于实验室研究阶段的特殊弹射方式。

燃气式弹射装置又含括以下六种型式：



这六种型式中的前四种（无后坐式、横弹式、活动底座式、燃气蒸汽式）具有共同的特点，即都具有一个固定在弹射器上的燃气发生器（高压室），所以亦可称为固定高压室式弹射装置；自弹式则不同，它的高压室不是固定在弹射器上，而是随弹一起运动，所以称为运动高压室。运动高压室可以是在弹后附加一个小燃烧室，也可以直接由第一级发动机兼任。由于形成弹射力的燃气工质是由随弹运动的高压室或导弹自身的发动机流出的，故取名为自弹式弹射器。自弹式本质上是自力发射与弹射的结合，因弹射力为其发射动力的主要成分，故亦归为弹射的一种。

无后坐式弹射装置由于具有尾喷管（反后坐装置），故根据高、低压室配置关系的不同又可分为并联无后坐式与串联无后坐式。

图2及图3分别为串联无后坐式及并联无后坐式弹射器的原理图。

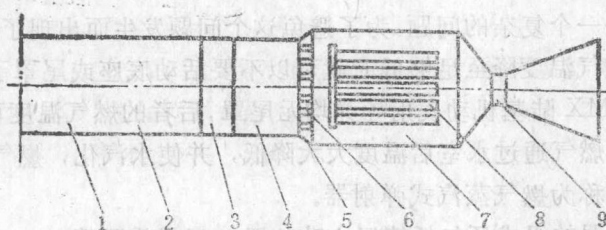


图2 串联无后坐式弹射器

1—发射筒；2—导弹；3—活塞；4—低压室；5—前隔板；6—前喷口；7—高压室；8—火药；9—尾喷管。

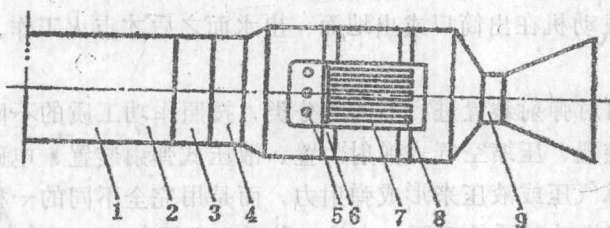


图3 并联无后坐式弹射器

1—发射筒；2—导弹；3—活塞；4—低压室；5—高压室喷口；6—高压室支腿；7—高压室；8—火药；9—尾喷管。

图4为横弹式弹射装置原理图，其弹射力垂直导弹纵轴，常用于空空、空地及空舰等机载导弹的弹射。

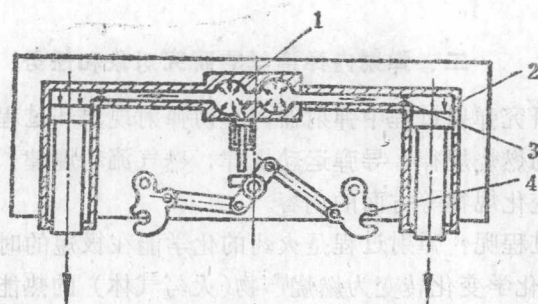


图4 横弹式弹射装置

1—高压室；2—低压室；3—一节流口；4—挂弹钩。

图5为井下发射战略导弹用的活动底座式弹射装置原理图。

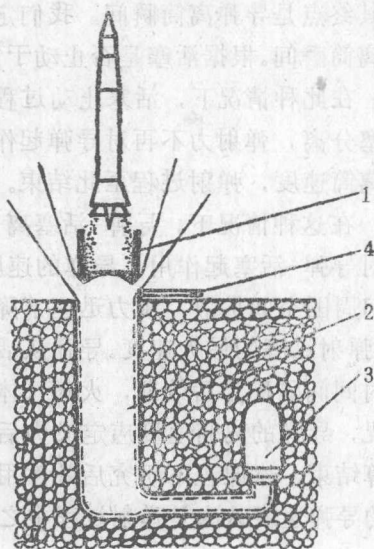


图5 活动底座式弹射装置

1—活动底座；2—发射筒；3—高压室；4—筒口顶盖。

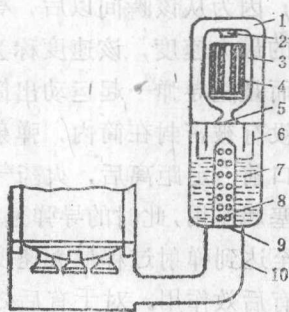


图6 燃气蒸汽式弹射装置

1—外壳；2—点火器；3—高压室；4—装药；5—喷管；
6—分流圆筒；7—水室；8—立管上的小孔；9—隔膜；
10—弯管。

图6为燃气蒸汽式弹射装置，水下发射或陆基机动发射战略导弹时常用此类弹射装置。

限于篇幅，我们不可能逐一地研究每一种弹射装置的内弹道问题，而是选择最具代表性的并联无后坐式弹射器的内弹道问题作为重点研究对象，在此基础上再结合各自的特点对串联无后坐式、自弹式、燃气蒸汽式弹射器的内弹道问题中带个性的问题兼作一定的叙述。书中有关内弹道基础理论部分及解决问题的方法对于以燃气为动力源的其它弹射器也都是适用的。

二、弹射内弹道学的研究对象和任务

弹射内弹道学是研究弹射过程中弹射器内一切弹射现象和过程规律性的科学。它包括火药在弹射器高压室内的燃烧规律, 导弹运动规律, 燃气流动规律, 能量转化规律以及弹射器高、低压室内的压力变化规律等方面的内容。

那么什么是弹射过程呢? 弹射过程是火药的化学能在极短的时间内(百分之几秒或千分之几秒)经过燃烧这种化学变化转变为燃烧产物(火药气体)的热能, 然后通过燃烧产物膨胀做功又转变为导弹、燃气以及发射筒等的运动动能的过程。火药是使导弹、发射筒运动起来的能源。

由工程热力学知, 能量从一个物体到另一个物体的传递有两种方式: 一为传热, 一为做功。传热过程中无能量形式的转化(由内能 $\rightarrow$ 内能); 借做功来传递能量时总是和物体的宏观位移有关, 在做功的过程中往往伴有能量形式的转化(内能 $\rightarrow$ 机械能)。从能量传递的观点来看, 弹射过程中, 在高压室内由于火药燃烧生成大量燃烧产物及大量的热, 这些热传递给燃烧产物而得到高温燃气, 故燃烧产物的加热过程属于传热的过程; 高温燃气在低压室膨胀做功推动活塞—导弹—发射筒运动的过程则属于能量传递的另一过程——做功过程, 即火药气体的内能转化为机械能的过程。

弹射过程的起点亦即点火过程的起点, 而其终点是导弹离筒瞬间。我们定义导弹运动至发射筒口、弹射力不再起作用的瞬间为导弹的离筒瞬间。根据活塞是否止动于筒口, 又可分别出现两种情况。一是活塞止动于筒口的情况, 在此种情况下, 活塞止动过程开始的瞬间是导弹离筒瞬间, 因为从该瞬间以后, 导弹与活塞分离, 弹射力不再对导弹起作用, 导弹速度达到弹射过程的最大速度, 该速度称为导弹的离筒速度, 弹射过程至此结束。二是活塞并不止动于筒口, 而是随导弹一起运动出筒的情形, 在这种情况下, 导弹—活塞离开筒口后, 筒内火药气体并没有被密封在筒内, 弹射力继续对导弹—活塞起作用, 导弹的速度继续增加, 当导弹到达筒口前一定距离后, 火药气体迅速向周围空间扩散, 压力迅速下降, 火药气体不再对导弹—活塞起作用, 此时的导弹速度才达到弹射过程的最大速度。导弹从活塞承压面到达筒口截面瞬间至达到弹射过程最大速度瞬间的时间间隔称为后效期, 火药气体在这一期间对导弹—活塞仍有后效作用。对于有后效期的情况, 导弹的离筒速度应定义为后效期结束时之导弹速度, 弹射过程也应延至后效期结束时才算结束。本课程不研究后效作用, 故仍认为活塞承压面到达筒口截面瞬间为离筒瞬间, 此时的导弹速度认为是弹射过程中之最大速度(离筒速度), 弹射过程至此结束。

综上所述, 弹射过程的起点是点火过程的起点, 终点则分别有两种情况: 当活塞止动于筒口时, 活塞开始止动瞬间即为离筒瞬间, 亦即弹射过程终点; 当活塞随弹出筒时, 由于不考虑后效期, 故离筒瞬间(弹射过程终点)指的是活塞承压面到达筒口截面的瞬间。

离筒瞬间的导弹速度称为离筒速度。

我们研究发射筒内的弹射现象和过程, 是为了有效地控制弹射过程, 以便改进现有的弹射器和设计更新的弹射器。分析研究弹射过程就是要弄清楚弹射过程中各因素之间的关系, 具体说, 就是: 装填条件(火药种类、形状、尺寸、火药重量、导弹重量等), 弹射器内部结构诸元(如发射筒口径 $d_{筒}$, 发射筒断面积 S , 高、低压室的初始容积 W_{10} 、 W_{20} , 导弹全行程长 l_g 等)与高、低压室的压力变化规律、导弹速度变化规律之间的关系。内弹道学的任

务就是从理论和实验两个方面来研究上述因素间的关系，找出它们的规律，而后应用到弹射装置的设计中去。

具体说，内弹道学包含两个基本问题，其一是在已知装填条件和高、低压室内部结构诸元的条件下求得高、低压室的压力变化规律及火箭导弹运动规律 (p_1-t , p_2-t , p_2-l , $v-t$, $v-l$)，特别是高、低压室的最大压力及火箭导弹离筒速度这三个重要的弹道诸元。这个问题称为内弹道学的正面问题或弹道解法问题。其二是求得装填条件和弹射装置内部结构诸元的合理和可能的方案，以使规定重量和直径的火箭导弹在不超过允许发射加速度的条件下获得规定的离筒速度。这个问题称为内弹道学的反面问题或弹道设计问题。

在对新的弹射装置进行内弹道设计时，是以弹道解法为基础的，即利用弹道解法所提供的内弹道公式，计算出能满足总体给定条件（火箭导弹重量，火箭导弹直径，离筒速度，发射加速度允许值）的弹射器结构数据和装填条件。应该指出，能满足给定条件的弹道设计方案不是唯一的，而是可以有多个，这就需要在设计过程中对它们进行分析比较，选择其中最合理的方案，然后，还需要对该方案作出正面问题的解，即计算出该方案的压力曲线和速度曲线。正面问题不是多解的，它的解只有一个。这样求得的弹道设计方案以及压力曲线和速度曲线将是进一步设计高压室、发射筒、反后坐装置以及弹体、引信等的重要原始数据。

三、研究弹射内弹道学的方法

当研究弹射器内错综复杂的物理、化学过程时，将遇到许多常量、变量，在建立这些量之间的相互关系时，必须抓住过程的本质，并将其作必要的简化，在某些有时并非完全正确的假设下建立起一系列方程式，而后再进一步研究积分的方法，把内弹道正面问题解出来。有了正面问题所建立的各种内弹道公式，便可进行反面问题的计算。

正是由于简化和假设的存在，因而所建立的数学模型还不能逼真地描述弹射器内发生的所有物理化学现象。为了验证理论计算的正确性，并对理论计算进行修正，必须发展实验内弹道学。理论内弹道学与实验内弹道学的研究及相互补充，使我们有可能比较合理地解决弹射器的内弹道问题。

第一章 高压室内弹道理论基础

§1-1 火药的一般知识

目前,除压缩空气式弹射器、液压式弹射器及电磁式弹射器之外,凡以燃气为动力源的弹射器均以火药为其能源。

什么是火药?火药是通过化学或物理的方法,将氧化剂和燃烧剂结合在一起的固体含能材料,它在一定的激发能量作用下,能在没有外界助燃剂(如氧)的参加下,以迅速而有规律的燃烧形式进行爆发变化,生成大量的高温气体。

火药和一般固体燃料如煤的主要不同是:火药本身含有氧,可以在没有外界供氧的条件下燃烧,而一般固体燃料燃烧时必须依靠外界供氧。

火药和炸药都是含有不稳定基团、分子结构较不稳定的物系。火药的燃烧与炸药的爆炸都是激烈的化学反应,反应速度很快,放出的热量足以维持反应持续不断地进行。从这一点上说,它们之间没有本质的差别,火药也可归为炸药的一类。但燃烧和爆炸又是各有特点的两种不同的变化过程,后者的传播速度要比前者迅速得多,燃烧的传播速度一般仅为每秒几毫米到几十毫米,而爆炸则可达每秒数千米,因而燃烧在时间上,约为万分之一秒至几十秒(根据武器的要求而不同),而爆炸却是在几十万分之一秒或更短的时间内完成,其瞬间压力可达 $1\sim 4$ 万兆帕。

火药的用途十分广泛,不论在军事工业、民用或宇航工业中都得到多方面的应用。

在军事上,火药主要用作各种发射武器的发射能源以及各种飞行器的推进能源。前者如枪、炮、弹射装置等的发射药,后者如固体火箭发动机的推进剂。

由于火药具有独特的优点,因此到目前为止,在作为武器系统的能源方面仍占有稳固的地位。首先,火药是一种固态物质,使用比较方便。平时火药不工作时,体积较小,当点燃工作后,可在极短的时间内发生剧烈的化学变化(燃烧反应),一方面放出大量的热提供了能量的来源;另一方面产生大量的火药气体而成为作功的工质来源。此外,火药的另一个优点是可以通过火药成份、形状和尺寸的变化来控制其燃烧规律,从而达到所要求的内弹道性能。

在生产过程中,总是将火药加工成一定的形状和尺寸,我们将具有一定几何形状和尺寸并装填于燃烧室内的火药称为装药。

一、火药的分类

火药的分类方法很多,不同的准则可以有不同的分类。比如:按用途分,可分为枪炮发射药、火箭固体推进剂及其它用途火药;按成型工艺分,可分为压制成型火药及浇铸成型火药。枪炮及中小型火箭多采用前者,大型火箭、导弹多采用后者,弹射装置多采用前者。按火药燃烧时的外部特征可分为有烟药与无烟药。目前最常用的是按火药的结构及基本能量成分进行分类,可分为均质火药、异质火药及复合改性双基火药三大类: