



普通高等教育“十三五”规划教材

# Ballistics

# 弹道学

侯保林 高旭东 编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

普通高等教育“十三五”规划教材

# 弹 道 学

侯保林 高旭东 编

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书包括内弹道学和外弹道学两大部分。内弹道学部分主要阐述经典内弹道理论的基本假设、火药的燃烧规律、弹丸在膛内的运动规律、内弹道求解方法、不同装填条件对内弹道性能的影响、内弹道设计及内弹道学在枪炮武器系统设计中的应用等问题。外弹道学部分介绍了无控弹丸外弹道的基础理论和知识,包括与外弹道相关的大气知识、作用在弹丸上的空气动力和力矩、标准条件和非标准条件下弹丸的质点弹道方程、弹丸外弹道的基本特性、散布和射击误差分析、刚体弹道一般方程和弹丸飞行稳定性理论、射表的编拟和使用、外弹道试验方法等。

本书着重强调对内、外弹道重要物理概念的分析和理解,同时也兼顾了工程分析和设计的实用性,可作为高等院校有关专业的教材,也可作为从事枪炮武器研究、设计、生产及试验的工程技术人员参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

弹道学/侯保林,高旭东编. —北京:国防工业出版社,2016.12  
ISBN 978-7-118-11142-2

I. ①弹… II. ①侯… ②高… III. ①枪炮内弹道学  
②枪炮外弹道学 IV. ①TJ012

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第003904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)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16¼ 字数 370 千字

2016年12月第1版第1次印刷 印数 1—2000册 定价 39.80元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 前 言

内弹道学和外弹道学是枪炮、弹药等军工技术领域的一门基础理论和实用学科,涉及武器系统的论证、设计、加工、试验、作战指挥、战斗使用等各个环节。

本书将内弹道学和外弹道学融合于一体,以适应相关专业短学分(2~2.5学分)的需要。与其他类似教科书相比,本书概念阐述更加细致,理论推导更加严谨,在强调内、外弹道物理概念理解的基础上,同时兼顾了工程分析和设计的实用性。

全书共14章。第1~6章为内弹道学部分,第7~14章为外弹道学部分。绪论介绍了枪炮发射的整个弹道过程;第1章介绍了火药的基本知识以及内弹道学的研究内容、研究任务以及经典内弹道学的研究方法;第2章建立了密闭爆发器条件下火药燃烧的基本方程,包括火药的燃烧速度定律和几何燃烧定律,详细阐述了内弹道学的若干基本概念;第3章建立了弹丸在膛内运动时期的内弹道基本方程,包括弹丸运动方程、弹后空间压力分布以及内弹道基本方程等内容;第4章阐述了内弹道方程组及其求解方法,分析了装填条件的变化对内弹道性能的影响;第5章阐述了内弹道设计的基本原理和方法;第6章介绍了火炮火药装药结构及其对内弹道性能的影响,供课外阅读使用;第7章介绍了与外弹道学紧密相关的基础知识,包括地球和大气的相关知识以及外弹道学中的标准气象条件;第8章从空气动力学的基本概念出发,阐述了无控弹丸的空气动力和力矩的形成机理与计算方法;第9章建立了标准条件下的弹丸质点弹道基本方程;第10章进一步给出了弹道、气象以及地形等非标准条件下的质点弹道方程;第11章从加深对弹丸外弹道特性理解的角度,分析了射角、弹道系数、初速以及气象条件等因素对弹道的影响,同时阐述了落点散布、直射弹道的基本知识;第12章基于坐标变换和受力分析,建立了刚体弹道的一般方程,并运用相关物理概念讨论了陀螺稳定、尾翼稳定、动态稳定和追随稳定性的基本概念;第13章介绍了射表编拟及其使用方法;第14章简要介绍了外弹道常用试验方法。

本书主要作为高等院校武器系统与工程及相关专业的教材,也可作为从事枪炮武器研究、设计、生产及试验的工程技术人员参考书。

本书由南京理工大学侯保林和高旭东共同编写。绪论、第1~6章由侯保林撰写,第7~14章由高旭东撰写。由于作者水平有限,书中错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2016年7月

# 目 录

绪论 .....	1
----------	---

## 内弹道学部分

第 1 章 内弹道学概述及火药的基本知识 .....	6
1.1 内弹道学概述 .....	6
1.1.1 内弹道学的研究内容及任务 .....	6
1.1.2 内弹道学的研究方法 .....	7
1.1.3 内弹道学在武器设计中的应用 .....	8
1.2 火药的基本知识 .....	8
1.2.1 火药的化学成分、制造过程和性能特点 .....	8
1.2.2 火药的能量特征量 .....	11
第 2 章 密闭爆发器条件下火药燃烧的基本方程 .....	14
2.1 密闭爆发器以及火药在密闭爆发器内燃烧的气体状态方程 .....	14
2.1.1 密闭爆发器 .....	14
2.1.2 火药气体的状态方程 .....	15
2.2 火药燃烧的物理化学过程与火药的燃烧速度定律 .....	16
2.2.1 火药的燃烧过程和影响燃速的因素 .....	16
2.2.2 火药的燃烧速度定律 .....	19
2.3 火药的几何燃烧定律 .....	19
2.4 火药燃烧线速度、火药气体生成速率与形状函数 .....	22
2.4.1 火药燃烧线速度 .....	22
2.4.2 气体生成速率 $d\psi/dt$ .....	23
2.4.3 相对燃烧表面积 $\sigma=f(z)$ 的确定与形状函数 .....	23
2.5 火药的增面燃烧和减面燃烧以及形状函数系数的计算 .....	24
2.5.1 火药的增面燃烧和减面燃烧 .....	24
2.5.2 增面燃烧和减面燃烧火药的形状函数系数计算 .....	24
2.6 火药的几何形状对相对燃烧表面积与火药已燃质量百分比的影响 .....	28
2.7 压力全冲量与火药气体生成速率的另一种表达形式 .....	29
2.7.1 压力全冲量概念及燃烧速度函数的试验确定 .....	29

2.7.2	火药气体生成速率的另一种表达形式	30
2.8	热力学第一定律在密闭爆发器中的应用与火药力的基本概念	32
2.9	药室中混合装药燃烧的基本方程	35
2.10	火药在药室中燃烧时弹道参数的计算方法	38
<b>第3章</b>	<b>弹丸在膛内运动时期的内弹道基本方程</b>	<b>42</b>
3.1	弹丸挤进压力	42
3.2	弹后空间气体速度与膛内气体压力分布	43
3.2.1	弹后气体速度分布	43
3.2.2	弹丸受力与膛内气体压力分布	45
3.3	弹丸运动方程	49
3.4	膛底、弹底及平均膛压之间的关系	51
3.5	弹丸在膛内运动过程中火药气体所做的各种功	52
3.5.1	射击过程中火药能量的转换,各种机械功	52
3.5.2	膛线作用在弹带上的力与枪炮射击过程中的各种功	52
3.6	次要功计算系数 $\varphi$ 与内弹道学基本方程	57
3.6.1	次要功计算系数 $\varphi$	57
3.6.2	内弹道学基本方程	58
3.6.3	膛内气体平均温度	59
3.7	弹丸极限速度的概念	59
<b>第4章</b>	<b>内弹道方程组及其求解</b>	<b>60</b>
4.1	火炮射击过程的不同时期	60
4.1.1	前期	60
4.1.2	热力学第一时期	60
4.1.3	热力学第二时期	61
4.1.4	后效期	61
4.2	内弹道方程组	61
4.3	计算例题	65
4.4	内弹道方程组的解析解法	69
4.4.1	前期解析解法	69
4.4.2	热力学第一时期	71
4.4.3	热力学第二时期	74
4.5	装填条件的变化对内弹道性能的影响及最大压力和初速的修正公式	75
4.5.1	装填条件的变化对内弹道性能的影响	75
4.5.2	最大压力和初速的经验修正公式	81
<b>第5章</b>	<b>内弹道设计</b>	<b>83</b>
5.1	引言	83

5.2	设计方案的评价标准 .....	83
5.3	内弹道设计的基本步骤 .....	86
5.3.1	起始参量的选择 .....	86
5.3.2	内弹道方案的计算步骤 .....	88
5.4	加农炮内弹道设计的特点 .....	91
5.5	榴弹炮内弹道设计的特点 .....	91
<b>第6章</b>	<b>火炮火药装药结构及其对内弹道性能的影响 .....</b>	<b>95</b>
6.1	火炮火药装药结构 .....	95
6.1.1	药筒定装式火炮装药结构 .....	95
6.1.2	药筒分装式火炮装药结构 .....	97
6.1.3	药包分装式火炮装药结构 .....	100
6.1.4	模块装药 .....	101
6.2	装药结构对内弹道性能的影响 .....	108
6.2.1	膛内压力波形成的机理 .....	108
6.2.2	装药设计因素对压力波的影响 .....	111
6.2.3	抑制压力波的技术措施 .....	117
6.3	提高弹丸初速的装药技术 .....	119
6.3.1	提高装药量 .....	119
6.3.2	提高火药力 .....	121
6.3.3	改变燃气生成规律 .....	122
6.3.4	降低装药温度系数 .....	125

## 外弹道学部分

<b>第7章</b>	<b>外弹道学概述与基础知识 .....</b>	<b>129</b>
7.1	外弹道学研究内容与发展历史 .....	129
7.2	外弹道学在武器研制中的作用 .....	130
7.2.1	弹道计算与射表编制 .....	130
7.2.2	武器系统设计 .....	131
7.2.3	武器系统测试与试验 .....	131
7.3	重力与科氏惯性力 .....	131
7.4	大气的特性 .....	132
7.4.1	大气状态方程与虚拟温度 .....	133
7.4.2	气压随高度的变化 .....	133
7.4.3	气温随高度的变化 .....	134
7.4.4	声速随高度的变化 .....	134
7.5	标准气象条件 .....	135
7.5.1	国际标准大气和我国国家标准大气 .....	135

7.5.2	我国炮兵标准气象条件 .....	136
7.5.3	我国空军标准气象条件 .....	137
7.5.4	我国海军标准气象条件 .....	137
<b>第8章</b>	<b>作用在弹丸上的空气动力和力矩 .....</b>	<b>138</b>
8.1	弹丸的气动外形与飞行稳定方式 .....	138
8.2	空气阻力的组成 .....	139
8.2.1	旋转弹的零升阻力 .....	139
8.2.2	尾翼弹的零升阻力 .....	148
8.3	作用在弹丸上的力和力矩 .....	149
8.3.1	有攻角时的空气动力和空气动力矩 .....	149
8.3.2	与自转和角运动有关的空气动力和力矩 .....	151
<b>第9章</b>	<b>质点弹道及外弹道解法 .....</b>	<b>154</b>
9.1	阻力系数、阻力定律、弹形系数 .....	154
9.1.1	阻力系数曲线变化的特点 .....	154
9.1.2	阻力定律和弹形系数 .....	154
9.2	阻力加速度、弹道系数和阻力函数 .....	157
9.3	弹丸质心运动矢量方程 .....	159
9.4	笛卡儿坐标系的弹丸质心运动方程 .....	159
9.5	自然坐标系里的弹丸质心运动方程组 .....	160
9.6	以 $x$ 为自变量的弹丸质心运动方程组 .....	161
9.7	抛物线弹道的特点 .....	162
9.7.1	抛物线弹道诸元公式 .....	162
9.7.2	抛物线弹道的特点 .....	164
9.8	空气弹道一般特性 .....	165
9.8.1	速度沿全弹道的变化 .....	165
9.8.2	空气弹道的不对称性 .....	168
9.8.3	空气弹道基本参数及外弹道表 .....	168
9.9	外弹道解法 .....	170
9.9.1	弹道表解法 .....	170
9.9.2	弹道方程的数值解法 .....	171
<b>第10章</b>	<b>非标准条件下的质点弹道 .....</b>	<b>173</b>
10.1	弹道条件非标准时的弹丸质心运动微分方程 .....	173
10.2	气象条件非标准时的弹丸质心运动微分方程 .....	173
10.2.1	气温、气压非标准时的处理 .....	173
10.2.2	纵风、横风和垂直风的处理 .....	174
10.2.3	气象条件非标准时的弹丸质心运动微分方程 .....	175



10.3	地形条件非标准时的弹丸质心运动微分方程 .....	176
10.3.1	计及科氏效应时的弹丸质心运动微分方程 .....	176
10.3.2	考虑地球表面曲率和重力加速度变化时的弹丸质心运动 微分方程 .....	177
10.4	考虑所有非标准条件时的弹丸质心运动微分方程 .....	180
<b>第 11 章</b>	<b>弹道特性及散布和射击误差分析 .....</b>	<b>182</b>
11.1	概述 .....	182
11.2	射角对弹道的影响 .....	182
11.2.1	射角对射程的影响及最大射程角 .....	182
11.2.2	射角误差产生的原因及跳角形成的机理 .....	183
11.2.3	射程对射角的敏感程度 .....	184
11.3	弹道系数对弹道的影响 .....	185
11.3.1	口径和弹丸质量对弹道的综合影响 .....	185
11.3.2	弹道系数对散布的影响 .....	185
11.4	初速对弹道的影响 .....	186
11.4.1	初速误差产生的原因 .....	186
11.4.2	射程对初速的敏感程度 .....	186
11.5	气象条件对弹道的影响 .....	187
11.5.1	气象条件对散布和射击误差的影响 .....	187
11.5.2	弹道对气象条件的敏感程度 .....	187
11.6	散布的计算与分析 .....	189
11.6.1	射程散布的计算 .....	189
11.6.2	方向散布的计算 .....	190
11.6.3	散布随射程的变化规律 .....	191
11.6.4	射击误差及其与散布的相互关系 .....	191
11.7	直射弹道特性与立靶散布 .....	192
11.7.1	弹道刚性原理及炮目高低角对瞄准角的影响 .....	192
11.7.2	立靶散布分析 .....	193
11.7.3	直射射程及有效射程 .....	194
<b>第 12 章</b>	<b>刚体弹道学与飞行稳定性简介 .....</b>	<b>196</b>
12.1	坐标系及坐标变换 .....	196
12.1.1	坐标系 .....	196
12.1.2	各坐标间的转换关系 .....	198
12.2	弹丸运动方程的一般形式 .....	201
12.2.1	弹道坐标系上的弹丸质心运动方程 .....	201
12.2.2	弹轴坐标系上弹丸绕质心转动的动量矩方程 .....	202
12.2.3	弹丸绕质心运动的动量矩计算 .....	203

12.2.4	有动不平衡时的惯性张量和动量矩	205
12.2.5	弹丸绕心运动方程组	207
12.2.6	弹丸刚体运动方程组的一般形式	207
12.3	有风情况下的气动力和力矩分量的表达式	207
12.3.1	相对气流速度和相对攻角	208
12.3.2	有风时的空气动力	209
12.3.3	有风时的空气动力矩	210
12.4	弹丸的6自由度刚体弹道方程	213
12.5	稳定飞行原理及飞行稳定性理论概述	214
12.5.1	稳定飞行的原理及飞行稳定的必要条件	215
12.5.2	飞行稳定条件	218
12.6	动力平衡角和偏流产生的原因及追随稳定条件	219
12.6.1	动力平衡角和偏流产生的原因	219
12.6.2	追随稳定条件	220
<b>第13章</b>	<b>射表编拟和使用简介</b>	<b>221</b>
13.1	有关射表的基本知识	221
13.1.1	射表的作用与用途	221
13.1.2	标准射击条件	221
13.1.3	射表的内容与格式	222
13.1.4	射表体系	225
13.2	射表编拟方法简介	226
13.2.1	概述	226
13.2.2	确定射表编拟方法时应考虑的几个问题	227
13.2.3	射表编拟过程	228
13.2.4	射表编拟的一般程序	229
13.3	射表的使用	231
13.4	射表误差初步分析	233
<b>第14章</b>	<b>外弹道试验</b>	<b>235</b>
14.1	弹丸飞行速度的测定	235
14.2	迎面阻力系数的射击试验测定	237
14.3	弹丸空间坐标和飞行时间的测定	238
14.4	弹丸转速的测定	238
14.5	立靶密集度试验与地面密集度试验	240
<b>附录</b>		<b>242</b>
表1	虚温随高度变化表	242
表2	气压函数表	242

表 3	空气密度函数表 .....	243
表 4	声速随高度数值表 .....	244
表 5	43 年阻力定律 $c_{x0n}$ .....	244
表 6	$G(v)$ 函数表(43 年定律) .....	245
表 7	火炮直射距离表(43 年阻力定律) .....	246
表 8	火炮直射射角表(43 年阻力定律) .....	246
表 9	最大射程表(43 年阻力定律) .....	247
表 10	最大射程角表(43 年阻力定律) .....	247
参考文献	.....	249

## 绪 论

从手枪到重型火炮,存在各种各样的管式武器,尽管它们的技术性能表现出明显的差异,但是,从弹道的观点来看,它们却都是相似的。大部分管式武器都采用传统火炮的发射原理,即一种利用火药在身管中燃烧所产生的高温高压气体膨胀做功将弹丸抛射出身管的发射装置。其中身管为工作机,火药为能源,而弹丸是做功的对象,三者即构成了弹丸发射子系统。

所有枪炮的共同特征部分是身管(炮管、枪管),在身管内弹丸被赋予期望的运动速度和方向。装药根据结构形式的不同,可以分为药筒定装式(图 0-1)、药筒分装式、药包分装式及模块装药等类型。不管装药采用什么形式,发射时都要放在身管的药室中。除采用火箭原理的无后坐炮外,一般枪炮的身管尾端都设置有炮尾、炮闩,用于发射时密闭身管尾部的火药气体,另外,还提供了供输弹药的通道。

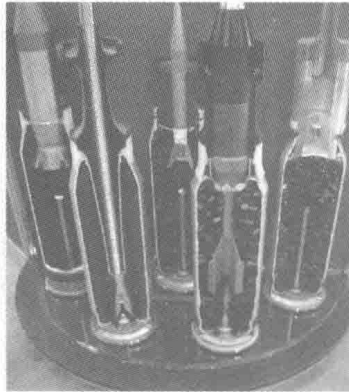


图 0-1 药筒定装式弹药

火药(发射药)为发射弹丸提供了能源。在适当的外界能量作用下,火药自身能在密闭条件下进行迅速而有规律的燃烧,同时生成大量高温燃气。在内弹道过程中,身管中的固体火药通过燃烧将蕴涵在火药中的化学能转变为热能,弹后空间中的热气急剧膨胀驱动弹丸在身管内高速前进。图 0-2 表示了一种典型药粒,图 0-3 是用于大口径火炮的模块装药。

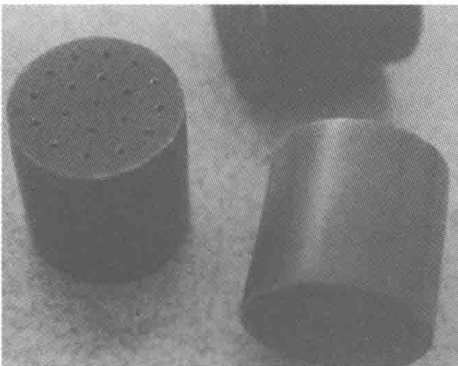


图 0-2 19 孔三基药粒



图 0-3 大口径压制火炮用模块装药

为了发射弹丸,首先要点燃发射药。击发是整个弹道过程的开始,通常利用机械方式(或用电、光)作用于底火(或火帽),使底火药着火,图0-4显示了不同尺寸和类型的点火和传火管。在现代大口径或者大威力火炮中普遍采用中心传火管,这对于提高药床的点火一致性、减小压力波、提高发射的安全性,具有非常重要的意义。

传统底火被击发后,底火产生的火焰穿过底火盖而引燃火药床中的点火药,使点火药燃烧产生高温高压的燃气和灼热的固体微粒,通过对流换热的方式,将靠近点火源的发射药首先点燃。而后,点火药和发射药的混合燃气逐层地点燃整个火药床,这就是内弹道过程开始阶段的点火和传火过程。

在完成点火、传火过程之后,随着火药的燃烧,产生大量高温高压燃气,推动弹丸运动。弹丸开始启动瞬间的压力称为启动压力。弹丸启动后,因弹带的直径略大于膛内阴线的直径,弹带必须逐渐挤进膛线。当弹带全部挤进时,弹带已被膛线刻成沟槽并与膛线紧密吻合(图0-5),此时相应的燃气压力称为挤进压力。这个过程也称为挤进过程。

弹带全部挤入膛线后,弹后空间的火药固体仍在继续燃烧并不断补充高温燃气,高温高压气体的急速膨胀做功,使火炮以及身管膛内产生了多种形式的复杂运动,包括弹丸的直线运动和旋转运动(对于线膛身管)、弹带与膛线之间的摩擦、正在燃烧的药粒和燃气的运动、火炮后坐部分的后坐运动、火药气体与身管、身管与外界的热交换、身管的弹性振动等。所有这些运动既同时发生又相互影响,形成了复杂的射击现象。不同阶段的内弹道过程如图0-6所示。

膛内不同现象的相互制约和相互作用,形成了膛内燃气压力变化的特性。其中,火药燃气生成速率和由于弹丸运动而形成的弹后空间增加的速率,是决定这种变化的两个主要因素。前者的增加使压力上升,后者的增加使压力下降,而压力的变化又反过来影响火药的燃烧和弹丸的运动。在开始阶段,燃气生成速率的因素超过弹后空间增长的因素,压力曲线将不断上升。当这两种相反效应达到平衡时,膛内达到最大压力 $p_m$ 。而后随弹丸速度不断的增大,弹后空间增大的因素超过燃气生成速率的因素,膛内压力开始下降。当火药全部燃完时,膛压曲线随弹丸运动速度的增加而不断下降,直至弹丸射出炮口,完成了整个内弹道过程。这时的燃气压力称为炮口压力 $p_g$ ,弹丸速度称为炮口速度 $v_g$ 。典型的内弹道曲线如图0-7所示。

当弹丸飞出炮口之后,在它后面的火药气体也随着一起流出(图0-8),因为这时气体的速度大于弹丸的速度,所以对弹丸仍然起一定的推动作用,从而使弹丸的速度继续增

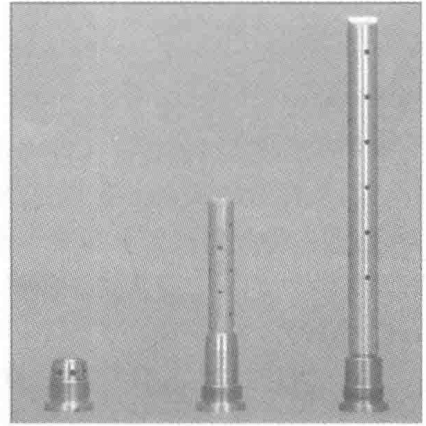


图0-4 不同尺寸的底火和传火管



图0-5 被雕刻的弹带

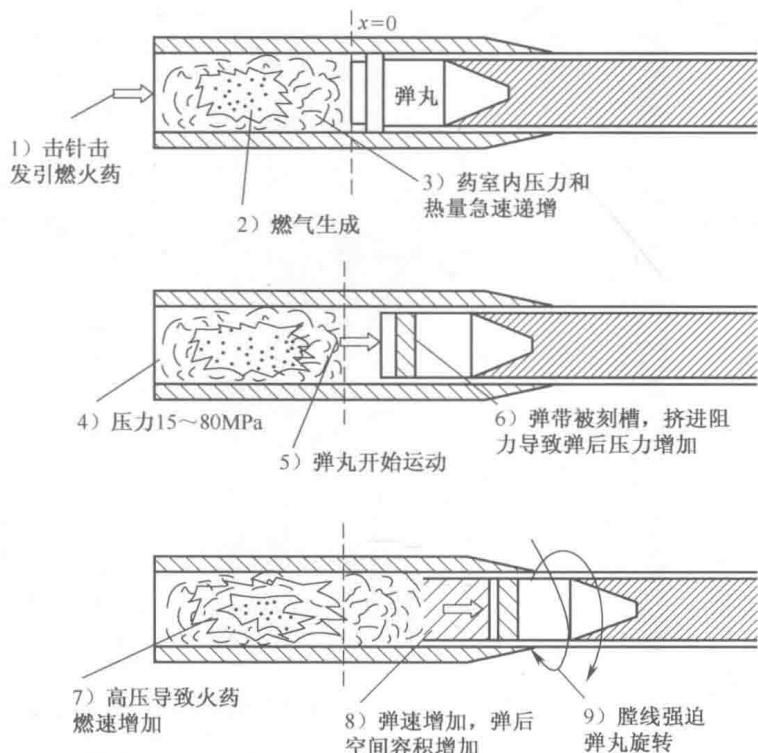


图 0-6 内弹道过程简图

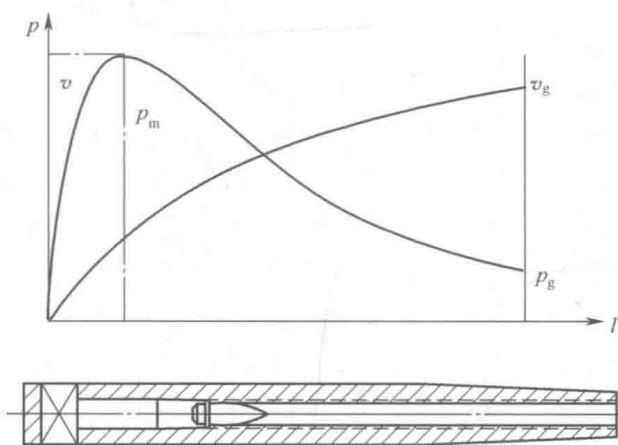


图 0-7 典型膛压与弹丸速度曲线图

加。但是,气体出炮口之后,要向四周迅速扩散,因而在炮口前的一定距离上,火药气体的速度即很快地衰减到小于弹丸运动的速度,对弹丸不再起加速作用,这时弹丸就达到射击过程中的最大速度。

弹丸的内弹道过程结束后,并不是直接进入外弹道过程,而是要经历一个短暂的中间弹道过程。中间弹道学就是研究从内弹道学向外弹道学过渡的弹道学分支学科。中间弹道学研究弹丸穿越枪炮膛口流场时的受力和运动规律,研究伴随膛内火药燃气排空过程发生的各种物理现象,并研究膛口流场的形成与发展机理、火药燃气对弹丸的后效作用、火药燃气对武器的后效作用、膛口气流对周围环境的影响等方面。弹丸飞出枪炮膛口时,高温、高压的火药燃气被突然释放,在膛口外急剧膨胀,超越并包围弹丸,形成气动力结构



图 0-8 弹丸出炮口瞬间的烟圈

异常复杂的膛口流场,继续对武器及弹丸产生后效作用。同时在膛口周围形成膛口冲击波、噪声及膛口焰,并构成对周围环境的危害。

当刚体弹丸在空中飞行的时候,弹丸受到与弹丸飞行特性及大气特性紧密相关的复杂空气动力和力矩的作用,弹丸的真实运动为六个自由度的刚体运动。外弹道学就是研究弹丸在空中运动规律、飞行特性、相关现象及其应用的一门学科。

作为刚体的弹丸,其在空中的飞行运动包括弹丸的质心运动和绕质心的转动。质心在空间的位置用三个坐标确定,质心的运动规律取决于作用在弹丸上的力,包括重力、空气动力与力矩等,对于有控或无控火箭弹,还要受到发动机推力以及其他操纵力矩的作用。弹丸质心运动的轨迹称为弹道。弹体在空间的方位则用三个角度或称三个角坐标来确定,通常其中两个是弹轴相对于地面坐标系的高低角和方位角,另一个是弹丸绕弹轴自转的自转角。三个角坐标的变化就可描述弹丸绕地面坐标系或绕质心的转动,转动规律取决于作用在弹丸上的力矩,包括空气动力矩、发动机推力对质心的力矩以及操纵力矩等。

但实际上质心运动与绕质心的转动是互相影响的。当弹轴与质心速度方向保持一致时,可将弹丸看作一个质点,不考虑绕质心的转动,空气动力中只有与速度方向相反的阻力。然而,实际上弹丸飞行时弹轴并不能始终保持与速度方向一致,二者之间的夹角 $\delta$ 称为攻角,由于攻角的出现,增大了阻力,并且产生了升力、侧力以及对质心的空气动力矩,它们不仅改变了质心速度的大小和方向,而且引起弹丸绕质心的转动,改变了弹轴的方位,引起攻角变化,从而又使空气动力和空气动力矩的大小及方向变化,进一步影响质心运动和绕质心的转动。如此反复交错,使质心运动与绕质心的转动互相影响。图 0-9 表示了一个旋转弹丸在空中运动的复杂性。

如果弹丸在飞行中保持攻角 $\delta$ 很小(如小于 $10^\circ$ ),则弹轴与速度方向基本一致,弹丸就能平稳地向前飞行,我们称弹丸的运动是稳定的;反之,如果攻角很大,甚至越来越大,则称弹丸飞行是不稳定的。飞行不稳定的弹丸会使射程大减,飞行性能变差,弹道散布增

大,严重时甚至弹底着地不发火或在空中翻跟头坠落。因此,保证弹丸飞行稳定性是外弹道学研究的一个重要内容。

在攻角  $\delta$  较小的情况下,空气动力和力矩是攻角  $\delta$  的线性函数,由此得出的稳定性条件是线性运动稳定条件,如陀螺稳定性、动态稳定性、追随稳定性、共振不稳定性等;如果考虑大攻角情况下空气动力和力矩的非线性,则弹丸的攻角变化方程是非线性的,弹丸非线性运动及其稳定性与线性运动及其稳定性有较大的差别。

在飞行稳定的前提下,质心运动弹道决定了弹丸的射程、侧偏、最大弹道高、至落点或弹着点的飞行时间、落点处速度大小及对目标的命中角等。对于弹丸设计,这些是最重要的弹道数据指标;对于武器系统的作战使用,这些是最重要的弹道诸元。因此,研究准确实用的弹道数学模型,解决弹道计算、试验射程标准化、射表编制和火控弹道模型的建立是外弹道学研究的重要任务。但是质心的弹道轨迹既与发射参数及起始条件(如火炮发射时的炮口扰动)有关,又与弹丸结构参数(例如弹重、重心位置、转动惯量、外形尺寸等)、空气动力参数(阻力、升力、力矩等)以及大气参数(例如气温、气压、湿度、风等)有关。就各发弹而言,这些参数是不可能完全相同的,而都是在其平均值附近随机变化的,这就形成弹道落点(或弹着点)的随机变化,称这种现象为射弹散布或弹道散布。弹道散布将影响到武器系统对目标的命中概率和毁伤概率以及毁伤目标所需弹药消耗量。如何减小由随机因素造成的弹道散布是外弹道学的又一项重要研究内容,它现在甚至成了外弹道研究的核心。显然,弹道散布不仅与弹丸本身有关,还与火炮或发射装置(其也可产生初速和射角的随机变化)有关,所以射弹散布是属于整个武器系统的,只是系统内各部分引起的散布在总散布中所占比例不同。根据对武器系统总散布的限制,分配给弹、炮、火控、气象测量和炮位、目标位置测量等分系统以散布大小限制,这是武器系统精度分配中的一项重要工作,外弹道学在这个工作中也起着重要作用。

当弹丸在空中飞行结束去打击目标时,就变成了终点弹道学的研究范畴。终点弹道学是研究弹丸或战斗部在目标区域的运动规律、对目标的作用机理及威力效应的弹道学分支学科。它涉及连续介质力学、爆炸动力学、冲击动力学、弹塑性理论等学科领域。

本课程包括内弹道学和外弹道学两大部分。内弹道学部分主要阐述经典内弹道理论的基本假设、火药的燃烧规律、弹丸在膛内的运动规律、内弹道求解方法、不同装填条件对内弹道性能的影响、内弹道设计及内弹道学在武器系统设计中的应用等问题;外弹道学部分主要阐述弹丸在空中飞行过程中所受的空气动力和力矩、弹丸质心运动微分方程组及其解法、弹丸飞行稳定性的基本概念、外弹道修正的基本原理、外弹道设计的基本概念、弹丸的起始扰动和射击散布分析、射表编制及外弹道试验等内容。通过本课程的学习,使学生熟悉并系统掌握武器弹道学基础理论知识,培养学生综合运用弹道学基本知识解决实际工程技术问题的能力。

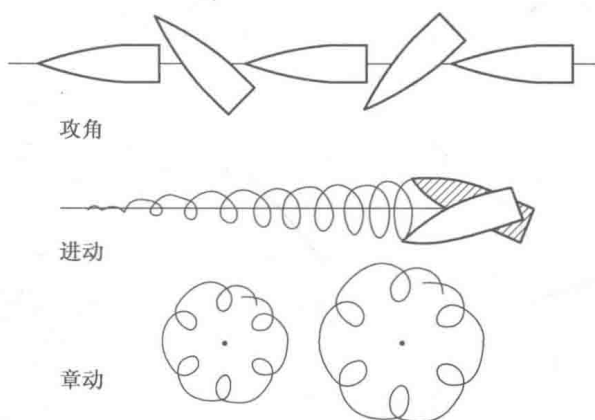


图 0-9 旋转弹丸在空气中的复杂运动



# 内弹道学部分

## 第1章 内弹道学概述及火药的基本知识

### 1.1 内弹道学概述

#### 1.1.1 内弹道学的研究内容及任务

在火炮发射时,发生了复杂的物理、化学、传热以及机械现象,不同形式能量之间发生了非常迅速的转化。固体火药的化学能首先转化为火药燃气的热能,然后转化为“弹丸—火药—后坐部分”系统运动的动能。

内弹道过程所经历的时间是非常短暂的,只有几毫秒到十几毫秒的时间。因此,从一般力学的范围来看,膛内的各种相互作用和输运现象具有瞬态特征,它属于瞬态力学范畴。从热力学范围来看,膛内射击过程是一个非平衡态不可逆过程。从流体力学的观点来看,膛内射击现象又属于一个带化学反应的非定常的多相流体力学问题。

根据内弹道过程中所发生的各种现象的物理实质,内弹道学所要研究的内容可归纳为以下几个方面的问题:

- (1) 有关点火药和火药的热化学性质、燃烧机理以及点火、传火的规律。
- (2) 有关火药燃烧及燃气生成的规律。
- (3) 有关枪炮膛内火药燃气和火药颗粒的多维多相流动及其相间输运现象。
- (4) 有关膛内压力波产生机理、影响因素及抑制技术。
- (5) 有关弹带挤进膛线的受力变形现象,弹丸以及炮身的运动规律。
- (6) 有关膛内能量转换及传递的热力学现象和燃气与膛壁之间的热传导现象。

在这些现象研究的基础上,建立起反映内弹道过程中物理化学实质的内弹道数学模型和相应方程。

根据内弹道理论和实践的要求,内弹道学研究的主要任务有以下三个方面:

(1) 弹道计算,也称为内弹道正面问题。即已知枪炮内膛结构诸元和装填条件,计算膛内燃气压力变化规律和弹丸运动规律,为武器弹药系统设计及弹道性能分析提供基本数据。

(2) 弹道设计,也称为内弹道反面问题。在已知口径  $d$ , 弹丸质量  $m$ , 初速  $v_0$  及指定最大膛压  $p_m$  的条件下,计算出能满足上述条件的武器内膛构造诸元(如药室容积  $W_0$ 、弹丸行程长  $l_g$ 、药室长度  $l_w$  及内膛全长  $L_m$  等)和装填条件(如装药质量  $\omega$ 、火药的压力全冲量  $I_k$ 、火药厚度  $2e_1$  等)。弹道设计是多解的,在满足给定条件下可有很多个设计方案。因此,在设计过程中需对各方案进行比较和选择。

(3) 装药设计。在内弹道设计的基础上,为实现给定的武器内弹道性能,保证内弹道性能的稳定性和射击安全性,必须对选定的发射药、点火系统及装药辅助元件进行合理匹