

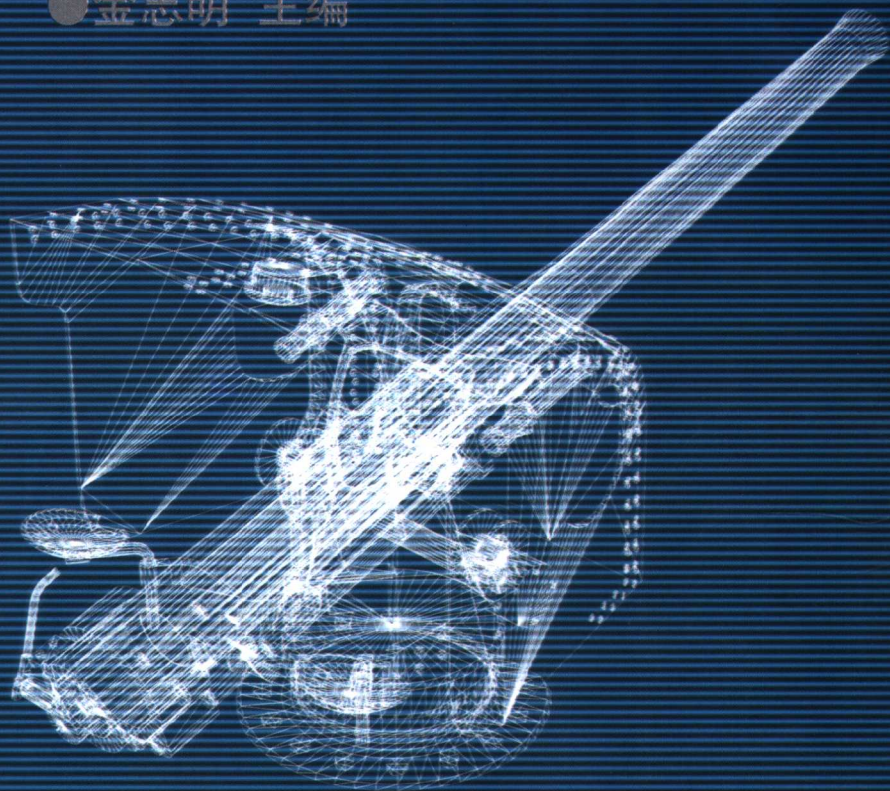
兵器科学与技术



国防科工委「十五」规划  
**教材**

# 枪炮内弹道学

●金志明 主编



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·兵器科学与技术

# 枪炮内弹道学

金志明 主 编

**北京理工大学出版社**

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

西北工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

## 内容简介

本书主要论述经典内弹道学范畴所涉及的枪炮内弹道理论、弹道计算和弹道设计方法及其在武器火力系统设计中的应用。对内弹道势平衡理论,无后坐炮、迫击炮和高低压火炮的内弹道问题,以及火炮身管烧蚀与寿命也作了系统的讨论。

本书可作为内弹道专业的教科书,也可以作为火炮、轻武器、弹丸、引信和火药等专业的技术基础课的教材,并可供从事武器系统研究、设计、制造和试验的工程技术人员参考和使用。

## 图书在版编目(CIP)数据

枪炮内弹道学/金志明主编. —北京:北京理工大学出版社, 2004.10

普通高等教育“十五”国家级规划教材 国防科工委“十五”规划教材. 兵器科学与技术专业

ISBN 7-5640-0350-2

I. 枪… II. 金… III. 枪炮内弹道学-高等学校-教材  
IV. TJ012.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第075454号

## 枪炮内弹道学

金志明 主编

责任编辑 张玉荣

责任校对 陈玉梅

北京理工大学出版社出版发行

北京市海淀区中关村南大街5号(100081)

电话:010-68914775(办公室) 68944990(发行部)

<http://www.bitpress.com.cn>

E-mail:chiefedit@bitpress.com.cn

北京圣瑞伦印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:22.25 字数:451千字

2004年10月第1版 2004年10月第1次印刷

印数:2000册

ISBN 7-5640-0350-2 定价:39.00元



# 国防科工委“十五”规划教材编委会

(按姓氏笔画排序)

主 任	张华祝				
副主任	王泽山	陈懋章	屠森林		
编 委	王 祁	王文生	王泽山	田 蔚	史仪凯
	乔少杰	仲顺安	张华祝	张近乐	张耀春
	杨志宏	肖锦清	苏秀华	辛玖林	陈光禡
	陈国平	陈懋章	庞思勤	武博祎	金鸿章
	贺安之	夏人伟	徐德民	聂 宏	贾宝山
	郭黎利	屠森林	崔锐捷	黄文良	葛小春



# 总 序

国防科技工业是国家战略性产业,是国防现代化的重要工业和技术基础,也是国民经济发展和科学技术现代化的重要推动力量。半个多世纪以来,在党中央、国务院的正确领导和亲切关怀下,国防科技工业广大干部职工在知识的传承、科技的攀登与时代的洗礼中,取得了举世瞩目的辉煌成就。研制、生产了大量武器装备,满足了我军由单一陆军,发展成为包括空军、海军、第二炮兵和其他技术兵种在内的合成军队的需要,特别是在尖端技术方面,成功地掌握了原子弹、氢弹、洲际导弹、人造卫星和核潜艇技术,使我军拥有了一批克敌制胜的高技术武器装备,使我国成为世界上少数几个独立掌握核技术和外层空间技术的国家之一。国防科技工业沿着独立自主、自力更生的发展道路,建立了专业门类基本齐全,科研、试验、生产手段基本配套的国防科技工业体系,奠定了进行国防现代化建设最重要的物质基础;掌握了大量新技术、新工艺,研制了许多新设备、新材料,以“两弹一星”、“神舟”号载人航天为代表的国防尖端技术,大大提高了国家的科技水平和竞争力,使中国在世界高科技领域占有了一席之地。十一届三中全会以来,伴随着改革开放的伟大实践,国防科技工业适时地实行战略转移,大量军工技术转向民用,为发展国民经济作出了重要贡献。

国防科技工业是知识密集型产业,国防科技工业发展中的一切问题归根到底都是人才问题。50多年来,国防科技工业培养和造就了一支以“两弹一星”元勋为代表的优秀的科技人才队伍,他们具有强烈的爱国主义思想和艰苦奋斗、无私奉献的精神,勇挑重担,敢于攻关,为攀登国防科技高峰进行了创造性劳动,成为推动我国科技进步的重要力量。面向新世纪的机遇与挑战,高等院校在培养国防科技人才,生产和传播国防科技新知识、新思想,攻克国防基础科研和高技术研究难题当中,具有不可替代的作用。国防科工委高度重视,积极探索,锐意改革,大力推进国防科技教育特别是高等教育事业的发展。

高等院校国防特色专业教材及专著是国防科技人才培养当中重要的知识载体和教学工具,但受种种客观因素的影响,现有的教材与专著整体上已落后于当



今国防科技的发展水平,不适应国防现代化的形势要求,对国防科技高层次人才的培养造成了相当不利的影 响。为尽快改变这种状况,建立起质量上乘、品种齐全、特点突出、适应当代国防科技发展的国防特色专业教材体系,国防科工委全额资助编写、出版 200 种国防特色专业重点教材和专著。为保证教材及专著的质量,在广泛动员全国相关专业领域的专家学者竞投编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的近 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出近 200 种教材和学术专著,覆盖航空宇航科学与技术、控制科学与工程、仪器科学与工程、信息与通信技术、电子科学与技术、力学、材料科学与工程、机械工程、电气工程、兵器科学与技术、船舶与海洋工程、动力机械及工程热物理、光学工程、化学工程与技术、核科学与技术等学科领域。一批长期从事国防特色学科教学和科研工作的两院院士、资深专家和一线教师成为编著者,他们分别来自清华大学、北京航空航天大学、北京理工大学、华北工学院、沈阳航空工业学院、哈尔滨工业大学、哈尔滨工程大学、上海交通大学、南京航空航天大学、南京理工大学、苏州大学、华东船舶工业学院、东华理工学院、电子科技大学、西南交通大学、西北工业大学、西安交通大学等,具有较为广泛的代表性。在全面振兴国防科技工业的伟大事业中,国防特色专业重点教材和专著的出版,将为国防科技创新人才的培养起到积极的促进作用。

党的十六大提出,进入 21 世纪,我国进入了全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的新发展阶段。全面建设小康社会的宏伟目标,对国防科技工业发展提出了新的更高的要求。推动经济与社会发展,提升国防实力,需要造就宏大的人才队伍,而教育是奠基的柱石。全面振兴国防科技工业必须始终把发展作为第一要务,落实科教兴国和人才强国战略,推动国防科技工业走新型工业化道路,加快国防科技工业科技创新步伐。国防科技工业为有志青年展示才华,实现志向,提供了缤纷的舞台,希望广大青年学子刻苦学习科学文化知识,树立正确的世界观、人生观、价值观,努力担当起振兴国防科技工业、振兴中华的历史重任,创造出无愧于祖国和人民的业绩。祖国的未来无限美好,国防科技工业的明天将再创新高。

张华祝



# 前 言

本书主要论述经典内弹道学范畴所涉及的枪炮内弹道问题,它是内弹道学的基础,也是兵器发射理论与技术的基础理论之一,是兵器火力系统设计者必备的知识。经典内弹道学(Classical Interior Ballistics)是以平衡态热力学为基础,研究膛内弹道参量平均值变化规律的理论。经典内弹道学的提出和发展有着漫长的历史时期,到19世纪中叶才建立起比较完善的理论体系。主要标志为:法国弹道学家雷萨尔(Resal H)应用热力学第一定律建立起内弹道能量方程;英国的物理学家诺贝尔(Noble A)和化学家阿贝尔( Abel F)应用密闭爆发器进行火药定容燃烧试验,确定高温高压条件下的火药燃气状态方程;法国学者维也里(Vielle P)和皮奥伯特(Piobert)等人在总结前人研究黑火药的成果及无烟火药的平行层燃烧现象的基础上提出几何燃烧定律。到了20世纪中叶,经典内弹道学已经进入相当成熟的时期,出版了一些有影响的内弹道学专著。近一个世纪的实践证明,在膛压和初速不太高,装填密度不太大,或者相对装药量 $\omega/m < 1$ 的情况下,膛内的混合气体密度、流速和压力梯度都比较小,流速接近于线性分布,压力波现象也比较弱。因此采用弹后空间每一瞬间的弹道参量平均值来描述内弹道过程不会产生明显的偏差。在此条件下,经典内弹道学理论是能够比较准确地反映膛内的射击现象并能用于枪炮弹药系统的设计。由于经典内弹道学的基本方程是属于零维模型,它由常微分方程和代数方程组成。在一定条件下,可以获得解析解,能得到弹道量相互联系的函数关系式,如初速公式和最大压力公式。这些公式不仅直观,而且便于分析,计算简单,应用方便,所以它是目前广泛用于武器弹药系统设计的一种内弹道理论。

根据当前兵器人才培养的需要和以往的教学实践的经验,作者对经典内弹道学的内容作了适当的调整和更新。增加近期教学和科研中所取得的新成果,删去某些陈旧的内容。全书共分8章,第1章是枪炮膛内射击现象和基本方程。在分析膛内射击现象的基础上,根据火药燃烧、气体生成、状态变化、能量转换等燃烧和热力学过程,以及对弹丸在膛内受力状态的分析,建立起包括燃烧方程、状态方程、能量方程和弹丸运动方程的内弹道基本方程组。第2章是内弹道方程组的解



法。在讨论内弹道方程组数学性质的基础上,着重阐述解析解和数值解两种方法。解析解只能在某些简化条件下才能获得,本书着重介绍两种比较典型的方法,即 $1/v$ 解法和梅逸尔-哈特(Mayer-Hart)简化解法。一般情况下,内弹道方程组只能采用数值解法。根据内弹道方程组的性质,应用四阶龙格-库塔法即能满足其计算精度。数值解是依赖电子计算机执行计算程序来完成的。本章对枪的内弹道特点和内弹道相似与模拟也作了比较深入的讨论。第3章是膛内气流及压力分布。着重讨论在拉格朗日假设下封闭的和有气体流出的压力分布以及炮膛断面积变化对压力分布的影响。对比例膨胀假设下的压力分布和毕杜克极限解也作了一些简要的讨论。第4章是内弹道势平衡理论,它有别于几何燃烧定律条件下的经典内弹道理论。本章着重讨论势平衡理论的基本概念,膛内实际燃烧定律以及以势平衡点为标准态的内弹道数学模型。另外对内弹道势平衡理论的实际应用——最大膛压和初速的模拟预测也作了详细的介绍。第5章是内弹道设计与装药设计。弹道设计是弹道解法的反面问题,而装药设计又是弹道设计的继续。本章主要讨论弹道设计方程、设计步骤、弹道设计的评价标准、弹道优化设计以及装药元件的配置和点火系统的合理匹配。弹道设计是武器弹药系统设计的先导。第6章是无后坐炮内弹道理论。在讨论无后坐炮发射原理及内弹道特点的基础上,建立起无后坐条件的关系式和无后坐炮内弹道基本方程。介绍无后坐炮数值解的特点和方法,通过计算例题讨论无后坐炮膛内滞止点的变化规律。对高低压火炮内弹道问题也作了介绍。第7章是迫击炮内弹道理论。本章根据迫击炮装药结构的特点建立起迫击炮内弹道基本方程,并用混合装药的方法,讨论了迫击炮内弹道方程的数值解法。第8章是身管烧蚀与寿命。身管的烧蚀与内弹道过程密切相关,改善内弹道环境可以明显减小身管的烧蚀。随着火炮内弹道性能的提高,身管寿命已引起人们日益的关注。本章讨论了身管烧蚀与磨损的机理以及防烧蚀的技术措施。通过内弹道装药的合理设计,提高火炮身管的寿命。

本书是在电子计算机技术相当普及条件下编写的,它必然反映出电子计算机时代的内弹道学特征。与以往的经典内弹道学著作相比,这是本书的一个特点。以往,由于内弹道手工计算所遇到的各种困难,不得不对内弹道过程进行简化,提出一些不尽合理的简化假设,以期在无需经过太复杂的计算就能得到某些结果。电子计算机出现后,使一些复杂的内弹道问题获得足够准确的定量结果,它把弹道工作者从繁杂而冗长的计算中解放出来。原来由于数学的复杂性而不得不作





出不尽合理的假设,现在则可以取消或修改这些假设,使内弹道理论更趋于完善。虽然经典内弹道学已有了一百多年的历史,但随着科学技术的进步和武器弹药系统的不断发展,对经典内弹道学的发展也起了推动作用,不仅更新一些原来比较陈旧的内容,而且还开拓了新的研究领域。因此本书在编写过程中也十分注意吸收近期的一些研究成果,如内弹道势平衡理论,弹道设计优化理论,考虑气体流出和炮膛断面积变化的拉格朗日问题,以及采用混合装药方法的迫击炮内弹道数值计算和包括压力分布的无后坐炮内弹道数值计算等内容。

经典内弹道学是初涉内弹道学领域者必读教材。它与武器弹药系统的研究、设计、生产和试验都有密切的联系。读者对象为科研院(所)、工厂、靶场、部队的工程技术人员。也可以作为高等院校的弹道、火炮、弹丸、引信及火药专业的教科书。

本书第1章由翁春生撰写,第2章由余永刚撰写,第3章由张小兵撰写,第5章由王浩撰写,第8章由张莺撰写,绪论、第4,6,7章由金志明撰写。全书由金志明审阅和定稿。由于作者学识水平有限,书中缺点甚至错误在所难免,恳请读者批评指正。

还要深切感谢所有参加撰写的作者,由于他们深厚的内弹道学造诣、辛勤劳动和密切的合作,使本书得以圆满完成。

金志明

2004年于南京理工大学

## 主要符号

$A$	流量系数	$l_0$	药室容积缩径长
$b$	1/2 火药宽度	$l_\psi$	药室自由容积缩径长
$B$	装填参量	$l_{v_0}$	药室长
$C$	弹道系数	$L_{sh}$	炮身全长
$c$	1/2 火药长度	$m$	弹丸质量
$c_v$	定容比热	$M$	火炮后坐部分质量
$c_p$	定压比热	$N$	作用在膛线导转侧上的力
$C_F$	推力系数	$N_{ij}$	火炮条件寿命
$d$	口径(阳膛线的直径)	$n$	燃速指数,多孔火药孔数
$d'$	阴膛线的直径	$p$	压力,平均压力
$d_0$	管状或多孔火药内孔起始直径	$p_i$	膛底压力
$D_0$	管状或多孔火药的起始外径	$p_d$	弹底压力
$e$	药粒已燃厚度	$p_o$	挤进压力
$e_1$	1/2 火药起始厚度,也称弧厚	$p_g$	炮口压力
$E$	燃气内能	$p_m$	最大压力
$E_g$	炮口动能	$\dot{r}$	燃速
$E_1$	弹丸直线运动的动能,亦称火药气体所做的主要功	$R$	气体常数
$E_2$	弹丸旋转运动的动能	$S$	炮膛断面积,火药燃烧至某一瞬间的药粒表面积
$E_3$	弹丸沿膛线运动的摩擦功	$S_j$	喷管喉部面积
$E_4$	火药气体运动的动能	$S_1$	火药颗粒起始面积
$E_5$	炮身后坐部分的动能	$t$	时间
$f$	火药力	$T$	燃气温度

$I$	定容条件下火药气体压力冲量	$T_1$	定容燃烧温度
$I_k$	火药燃烧结束瞬间的压力全冲量	$u_1$	正比燃烧定律中的燃速系数
$k$	绝热指数	$v$	弹丸运动的相对速度, 气体比容
$l$	弹丸行程长	$v_0$	实测的弹丸出炮口瞬间速度, 即初速
$l_k$	弹丸全行程长	$v_x$	计算的弹丸出炮口速度
$v_j$	弹丸极限速度	$\theta$	$k-1$
$V$	药粒已燃体积	$\lambda, \lambda_s$	火药形状特征量
$V_1$	药粒起始体积	$\Delta$	弹丸相对行程长
$V_v$	药室容积	$\mu$	火药形状特征量
$V_{nt}$	炮膛容积	$\Pi$	相对压力
$x$	空间坐标	$\pi$	态能势
$Y$	气体总流量	$\rho_g$	气体密度
$Z$	火药已燃相对厚度	$\rho_p$	火药密度
$\alpha$	火药气体余容, 缠角	$\sigma$	火药相对燃烧面积
$\gamma_k$	弹道效率	$\tau$	相对温度
$\gamma'_k$	火炮热效率	$\varphi$	次要功计算系数
$\Gamma$	气体生成猛度	$\varphi_1$	阻力系数
$\Delta$	装填密度	$\varphi_2$	流量修正系数
$\varepsilon$	态能	$\chi, \chi_s$	火药形状特征量
$\eta$	相对流量	$\chi_k$	药室扩大系数
$\eta_k$	火药燃烧结束相对流量	$\psi$	火药已燃百分数
$\eta_w$	装药利用系数	$\psi_E$	势平衡点火药已燃百分数
$\eta_k$	炮膛工作容积利用系数	$\omega$	装药质量
$\eta_Q$	火炮金属利用系数	$\Omega$	角速度

# 目 录

绪论	1
0.1 枪炮射击过程中的内弹道循环	1
0.2 内弹道研究内容及任务	2
0.3 内弹道学的研究方法	3
0.4 内弹道学在枪炮设计中的作用与地位	4
0.5 基础科学和武器的发展对内弹道学的推动作用	5
0.6 内弹道学发展史的回顾	6
第 1 章 枪炮膛内射击现象和基本方程	9
§ 1.1 枪炮发射系统及膛内射击过程	9
1.1.1 发射系统简介	9
1.1.2 膛内射击过程	10
§ 1.2 火药燃气状态方程	11
1.2.1 高温高压火药气体状态方程	11
1.2.2 定容状态方程及应用	12
1.2.3 变容状态方程	18
§ 1.3 火药燃烧规律与燃烧方程	19
1.3.1 几何燃烧定律及其应用条件	19
1.3.2 气体生成速率	21
1.3.3 形状函数	22
1.3.4 多孔火药	24
1.3.5 包覆火药与弧厚不均火药的形状函数	34
1.3.6 固体火药燃烧机理及影响燃烧的因素	39
1.3.7 燃速方程	42
1.3.8 火药实际燃烧规律的研究	46
§ 1.4 膛内射击过程中的能量守恒方程	51
1.4.1 能量守恒方程的建立	51
1.4.2 弹丸极限速度及弹道效率	55
§ 1.5 弹丸运动方程	56
1.5.1 弹丸在膛内运动过程中的受力分析	57
1.5.2 挤进阻力	58
1.5.3 膛线导转侧作用在弹带上的力	63
1.5.4 弹前空气阻力	66

1.5.5	平均压力表示的弹丸运动方程	67
1.5.6	次要功和次要功计算系数	68
§ 1.6	膛内火药气体压力的变化规律	74
§ 1.7	内弹道方程组	78
1.7.1	基本假设	78
1.7.2	单一装药内弹道方程组	78
1.7.3	混合装药内弹道方程组	79
<b>第 2 章</b>	<b>内弹道方程组的解法</b>	<b>81</b>
§ 2.1	内弹道方程组的数学性质	81
§ 2.2	$I_0$ 分析法	82
2.2.1	减面形状火药的弹道解法	83
2.2.2	多孔火药的弹道解法	97
2.2.3	混合装药的弹道解法	102
§ 2.3	梅逸尔-哈特简化解法	107
2.3.1	简化假设及方程组	107
2.3.2	求解过程	108
§ 2.4	数值解法	110
2.4.1	量纲为 1 的内弹道方程组	110
2.4.2	龙格-库塔法	111
2.4.3	内弹道计算步骤及程序框图	112
2.4.4	特殊点的计算方法	113
2.4.5	计算例题	115
§ 2.5	枪内弹道解的特殊问题	117
§ 2.6	内弹道相似与模拟	118
2.6.1	内弹道相似方程及相似准则	118
2.6.2	内弹道表解法简介	120
2.6.3	内弹道模拟及应用	121
§ 2.7	装填条件变化对内弹道性能影响及最大压力和初速的修正公式	124
2.7.1	装填条件变化对内弹道性能的影响	124
2.7.2	最大压力和初速的修正公式	130
<b>第 3 章</b>	<b>膛内气流及压力分布</b>	<b>135</b>
§ 3.1	引言	135
§ 3.2	内弹道气动力简化模型	135
§ 3.3	比例膨胀假设下的压力分布	136
3.3.1	比例膨胀假设及推论	136
3.3.2	膛底封闭情况下弹后空间的压力分布	139
§ 3.4	拉格朗日假设条件下的近似解	145

3.4.1	拉格朗日假设	145
3.4.2	膛底封闭条件下的压力分布	146
3.4.3	有气体流出条件下膛内压力分布	147
3.4.4	考虑膛内面积变化的膛内压力分布	152
3.4.5	内弹道计算中应用的压力换算关系	157
§ 3.5	毕杜克极限解	159
§ 3.6	三种假设下压力分布的讨论	168
<b>第 4 章</b>	<b>内弹道势平衡理论</b>	172
§ 4.1	内弹道势平衡理论基本概念	172
4.1.1	态能势 $\pi$	172
4.1.2	势平衡及势平衡点	173
4.1.3	势平衡点的火药已燃百分数 $\phi_c$	174
§ 4.2	膛内火药实际气体生成函数	176
4.2.1	实际燃烧定律的表示方法	176
4.2.2	主体燃烧阶段的燃气生成函数	176
4.2.3	碎粒燃烧阶段的燃气生成函数	177
§ 4.3	应用实际燃烧规律的内弹道解法	179
4.3.1	关于解法的几点说明	179
4.3.2	以势平衡点为标准态的内弹道相似方程组	180
4.3.3	势平衡点各弹道量的确定	183
§ 4.4	确定燃气生成系数的弹道方法	184
4.4.1	主体燃烧阶段	184
4.4.2	碎粒燃烧阶段	187
§ 4.5	最大膛压和初速的模拟预测	188
4.5.1	势平衡点参量与 $\rho_m$ 及 $v_c$ 的关系式	188
4.5.2	膛内燃烧性能参数与密闭爆发器燃烧性能参数之间的对应关系	189
<b>第 5 章</b>	<b>内弹道设计与装药设计</b>	194
§ 5.1	内弹道设计	194
5.1.1	引言	194
5.1.2	内弹道设计基本方程	197
5.1.3	设计方案的评价标准	199
5.1.4	内弹道设计导图与最小膛容	205
5.1.5	内弹道设计步骤	210
5.1.6	加农炮内弹道设计的特点	222
5.1.7	榴弹炮内弹道设计的特点	224
5.1.8	枪的内弹道设计特点	228
§ 5.2	内弹道优化设计	230

5.2.1	优化设计的目的	230
5.2.2	优化设计步骤	230
5.2.3	应用举例	234
§ 5.3	装药设计	237
5.3.1	火药装药及装药元件	238
5.3.2	装药设计的一般步骤	239
5.3.3	装药结构及分类	241
5.3.4	装药中的点火系统设计	252
5.3.5	装药设计安全性评估	272
<b>第 6 章</b>	<b>无后坐炮内弹道理论</b>	<b>280</b>
§ 6.1	无后坐炮发射原理及内弹道特点	280
6.1.1	无后坐炮发射原理	280
6.1.2	无后坐炮的内弹道特点	281
§ 6.2	无后坐条件	283
§ 6.3	无后坐炮内弹道方程	286
6.3.1	流量和相对流量	286
6.3.2	气体状态方程	286
6.3.3	能量平衡方程	287
6.3.4	无后坐炮内弹道方程组	287
§ 6.4	无后坐炮内弹道方程组的数值解法	288
§ 6.5	无后坐炮的次要功计算系数	292
§ 6.6	高低压火炮内弹道	293
6.6.1	高低压发射原理与假设	293
6.6.2	基本方程	295
6.6.3	高低压火炮内弹道方程求解方法	296
<b>第 7 章</b>	<b>迫击炮内弹道</b>	<b>298</b>
§ 7.1	迫击炮及其弹药结构	298
§ 7.2	迫击炮的弹道特点	299
§ 7.3	基本假设和内弹道方程	302
7.3.1	基本假设	302
7.3.2	基本方程	302
§ 7.4	迫击炮内弹道计算	304
<b>第 8 章</b>	<b>身管烧蚀与寿命</b>	<b>308</b>
§ 8.1	引言	308
§ 8.2	身管烧蚀现象	308
§ 8.3	身管烧蚀与磨损机理	310
8.3.1	热因素	310

8.3.2	化学因素	311
8.3.3	机械因素	312
§ 8.4	防烧蚀的技术措施	312
8.4.1	降低炮膛内壁温度	312
8.4.2	采用低爆温的火药	316
8.4.3	缓蚀添加剂	316
8.4.4	采用身管新材料的镀覆技术	318
8.4.5	减小挤进压力和弹带对膛线的作用	320
§ 8.5	身管寿命	322
8.5.1	身管寿命判别条件及其分析	322
8.5.2	影响身管寿命的因素	324
8.5.3	提高身管寿命的技术措施	327
附录 I	$\lg Z^{-1}(\beta, \gamma)$ 函数表	330
附录 II	$\lg Z'(\beta', \gamma')$ 函数表	333
附录 III	$L = f(\bar{B}, \bar{\zeta})$ 表	334
参考文献		335



# 绪 论

## 0.1 枪炮射击过程中的内弹道循环

枪炮射击过程中的内弹道循环包括击发开始到弹丸射出膛口所经历的全部过程。击发是内弹道循环的开始。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,产生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,这就是内弹道循环开始阶段的点火和传火过程。点传火过程是内弹道循环中最复杂的阶段。当点火开始后,在膛内燃气中产生初始的压力梯度,随着火焰的传播,火药床不断被点燃,压力梯度也被不断地加强,形成一个由膛底向弹底的压力波阵面的传播过程。在压力波阵面的驱动下,一方面火药床被逐层地点燃,在火药床中形成一个火焰波的传递过程。另一方面,火药床又被逐层地挤压,在火药床中产生了颗粒间应力,形成的应力波以固相声速向弹底方向传播。火焰波的传播使压力波不断地增强。压力波增强使颗粒间应力增大,由此发生部分火药颗粒的破碎,造成燃烧表面突然增加而加速火焰的传播,因而引起气体生成速率急剧增大。这是膛内产生异常压力的重要原因,严重情况下可能产生灾难性的膛炸事故。

在完成点、传火过程之后,随着火药的燃烧,产生了大量的高温高压燃气,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,当弹带或枪弹的圆柱部全部挤进时,即达到最大阻力,其相应的燃气压力则称为挤进压力。这个过程也称之为挤进过程。

弹带全部挤入膛线后,阻力突然下降。以后随着火药继续燃烧而不断补充高温燃气,并急速膨胀做功,从而使膛内产生了多种形式的运动。除弹丸沿炮轴方向作直线运动外,还沿着膛线作旋转运动;同时,正在燃烧的药粒和燃气,也随弹丸一起向前运动,而炮身则产生后坐运动。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。

在膛内这些复杂现象的相互制约和相互作用下,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,直至弹丸射出膛口,完成了整个内弹道循环。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 0-1 所示。