



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

# 枪炮内弹道学

*Interior Ballistics of Guns*

张小兵 编著  
金志明 主审

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代兵器火力系统丛书

# 枪炮内弹道学

张小兵 编著  
金志明 主审



 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 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、高低压火炮、膨胀波火炮和平衡炮的内弹道问题,以及内弹道两相流与安全性和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。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

枪炮内弹道学/张小兵编著. —北京:北京理工大学出版社, 2014. 2

(现代兵器火力系统丛书)

国家出版基金项目及“十二五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5640-8780-7

I. ①枪… II. ①张… III. ①枪炮内弹道学 IV. ①TJ012.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第020655号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

82562903 (教材售后服务热线)

68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 787毫米×1092毫米 1/16

印 张 / 26.5

字 数 / 495千字

版 次 / 2014年2月第1版 2014年2月第1次印刷

定 价 / 92.00元

责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

# 现代兵器火力系统丛书

## 编委会

---

主任 王兴治

副主任 王泽山 朵英贤

编委 (按姓氏笔画排序)

王亚平 王志军 王保国 尹建平 冯顺山

吕春绪 刘吉平 肖忠良 张合 张小兵

张相炎 陈国光 林杰 欧育湘 金志明

周长省 胡双启 姜春兰 徐诚 谈乐斌

董素荣 韩子鹏 韩峰 蔡婷婷 樊红亮

# 总 序

---

国防科技工业是国家战略性产业，是先进制造业的重要组成部分，是国家创新体系的一支重要力量。为适应不同历史时期的国际形势对我国国防力量提出的要求，国防科技工业秉承自主创新、与时俱进的发展理念，建立了多学科交叉，多技术融合，科研、实验、生产等多部门协作的现代化国防科研生产体系。兵器科学与技术作为国防科学与技术的一个重要分支，直接关系到我国国防科技总体发展水平，并在很大程度上决定着国防科技诸多领域的成果向国防军事硬实力的转化。

进入 21 世纪以来，随着兵器发射技术、推进增程技术、精确制导技术、高效毁伤技术的不断发展，以及新概念、新原理兵器的出现，火力系统的射程、威力和命中精度均大幅提升。火力系统的技术进步将推动兵器系统的其他分支发生相应的革新，乃至促使军队的作战方式发生变化。然而，我国现有的国防科技类图书落后于相关领域的发展水平，难以适应信息时代科技人才的培养需求，更无法满足国防科技高层次人才的培养要求。因此，构建系统性、完整性和实用性兼备的国防科技类专业图书体系十分必要。

为了解决新形势下兵器科学所面临的理论、技术和工程应用等问题，王兴治院士、王泽山院士、朵英贤院士带领北京理工大学、南京理工大学、中北大学的学者编写了《现代兵器火力系统》丛书。本丛书以兵器火力系统相关学科为主线，运用系统工程的理论和方法，结合现代化战争对兵器科学技术的发展需求和科学技术进步对其发展的推动，在总结兵器火力系统相关学科专家学者取得主要成果的基础上，较全面地论述了现代兵器火力系统的学科内涵、技术领域、研制程序和运用工程，并按照兵器发射理论与技术的研究方法，分述了枪炮发射技术、火炮设计技术、弹药制造技术、引信技术、火炸药安全技术、火力控制技术等内容。

本丛书围绕“高初速、高射频、远程化、精确化和高效毁伤”的主题，梳理了近年来我国在兵器火力系统相关学科取得的重要学术理论、技术创新和工程转化等方面的

成果。这些成果优化了弹药工程与爆炸技术、特种能源工程与烟火技术、武器系统与发射技术等专业体系，缩短了我国兵器火力系统与国外的差距，提升了我国在常规兵器装备研制领域的理论水平和技术水平，为我国兵器火力系统的研发提供了技术保障和智力支持。本丛书旨在总结该领域的先进成果和发展经验，适应现代化高层次国防科技人才的培养需求，助力国防科学技术研发，形成具有我国特色的“兵器火力系统”理论与实践相结合的知识体系。

本丛书入选“十二五”国家重点出版物出版规划项目，并得到国家出版基金资助，体现了国家对兵器科学与技术，以及对《现代兵器火力系统》出版项目的高度重视。本丛书凝结了兵器领域诸多专家、学者的智慧，承载了弘扬兵器科学技术领域技术成就、创新和发展兵工科技的历史使命，对于推进我国国防科技工业的发展具有举足轻重的作用。期望这套丛书能有益于兵器科学技术领域的人才培养，有益于国防科技工业的发展。同时，希望本丛书能吸引更多的读者关心兵器科学技术发展，并积极投身于中国国防建设。

丛书编委会

# 前 言

---

本书系统地介绍了经典弹道领域的相关理论和知识，并加入了近 10 年来经典弹道理论取得的新进展，同时对教学实践中的新内容进行了调整，并加入了相关两相流内弹道的内容，力求在理论体系和内容方面更完整。全书除绪论外共分 8 章，第 1 章是枪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解法，即  $t_d$  解法和梅逸尔—哈特简化解法。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膛内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 章是特种发射技术内弹道理论。分别介绍了无后坐火炮、迫击炮、膨胀波火炮、平衡炮以及高低压发射技术等内弹道理论。第 7 章是内弹道两相流及发射安全性分析。本章先介绍了为什么要

研究两相流研究，同时介绍了压力波及其影响因素，并结合具有代表性的某大口径坦克炮一维两相流和某舰炮的混合颗粒床中一维颗粒轨道模型进行了数值模拟，最后介绍了装药安全性评估方法。第8章是火炮身管烧蚀磨损与寿命。身管的烧蚀磨损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，并讲述了通过内弹道装药的合理设计，提高火炮身管的寿命。

枪炮内弹道学是初涉内弹道学领域者的必读教材，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。本书适用于科研院（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。

本书是集体劳动的产物，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4章由金志明撰写，第5章由王浩撰写，第6章由张小兵、金志明撰写，第7章由张小兵、金志明撰写，第8章由杨均匀、张莺撰写，绪论由金志明撰写。全书由张小兵审阅和定稿。本书在编写过程中，许多研究生都付出了辛勤的劳动，如马昌军、程诚、陈青、罗乔、薛涛、赵小亮、肖元陆、胡朝斌、孙玉佳、于盈、曹润铎、苏听听、秦琼瑶等。本书一些新内容的编入，使教材体系更完整，但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。

编者



# 主要符号

$A$	流量系数	$l_{\psi}$	药室自由容积缩径长
$b$	1/2 火药宽度	$l_{v_0}$	药室长
$B$	装填参量	$L_{sh}$	炮身全长
$C$	弹道系数	$L_{nt}$	内膛全长
$c$	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）	$N_t$	身管寿命
$d'$	阴膛线的直径	$n$	燃速指数，多孔火药孔数
$d_0$	管状或多孔火药内孔起始直径	$p$	压力，平均压力
$D_0$	管状或多孔火药的起始外径	$p_t$	膛底压力
$e$	药粒已燃厚度	$p_d$	弹底压力
$e_1$	1/2 火药起始厚度，也称弧厚	$p_0$	挤进压力
$E$	燃气内能	$p_g$	炮口压力
$E_g$	炮口动能	$p_m$	最大压力
$E_1$	弹丸直线运动的动能，亦称火药气体所做的主要功	$\dot{r}$	燃速
$E_2$	弹丸旋转运动的动能	$R$	气体常数
$E_3$	弹丸沿膛线运动的摩擦功	$S$	炮膛断面积，火药燃烧至某一瞬间的药粒表面积
$E_4$	火药气体运动的动能	$S_j$	喷管喉部面积

$E_5$	炮身后坐部分的动能	$S_1$	火药颗粒起始面积
$f$	火药力	$t$	时间
$I$	定容条件下火药气体压力冲量	$T$	燃气温度
$I_k$	火药燃烧结束瞬间的压力全冲量	$T_1$	定容燃烧温度
$k$	绝热指数	$u_1$	正比燃烧定律中的燃速系数
$l$	弹丸行程长	$v$	弹丸运动的相对速度, 气体比容
$l_g$	弹丸全行程长	$v_0$	实测的弹丸出炮口瞬间速度, 即初速
$l_0$	药室容积缩径长	$v_g$	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
$V_0$	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
$\gamma_g$	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	20
1.3.3 形状函数	21
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	33

## 2 枪炮内弹道学 ■

1.3.6	固体火药燃烧机理及影响燃烧的因素	38
1.3.7	燃速方程	41
1.3.8	火药实际燃烧规律的研究	45
§ 1.4	膛内射击过程中的能量守恒方程	50
1.4.1	能量守恒方程的建立	50
1.4.2	弹丸极限速度及弹道效率	54
§ 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	56
1.5.2	挤进阻力	57
1.5.3	膛线导转侧作用在弹带上的力	62
1.5.4	弹前空气阻力	65
1.5.5	平均压力表示的弹丸运动方程	66
1.5.6	次要功和次要功计算系数	67
§ 1.6	膛内火药气体压力的变化规律	72
§ 1.7	内弹道方程组	76
1.7.1	基本假设	76
1.7.2	单一装药内弹道方程组	77
1.7.3	混合装药内弹道方程组	78
第 2 章	内弹道方程组的解法	80
§ 2.1	内弹道方程组的数学性质	80
§ 2.2	$l_{\bar{v}}$ 分析解法	81
2.2.1	减面形状火药的弹道解法	82
2.2.2	多孔火药的弹道解法	94
2.2.3	混合装药的弹道解法	102
§ 2.3	梅逸尔—哈特简化解法	106
2.3.1	简化假设及方程组	106
2.3.2	求解过程	107
§ 2.4	数值解法	109
2.4.1	量纲为 1 的内弹道方程组	109
2.4.2	龙格—库塔法	110

2.4.3	内弹道计算步骤及程序框图 .....	110
2.4.4	特殊点的计算方法 .....	111
2.4.5	计算例题 .....	114
§ 2.5	枪内弹道解的特殊问题 .....	116
§ 2.6	内弹道表解法 .....	116
2.6.1	内弹道相似方程 .....	116
2.6.2	内弹道表解法简介 .....	118
§ 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 .....	121
2.7.1	装填条件变化对内弹道性能的影响 .....	121
2.7.2	最大压力和初速的修正公式 .....	127
第 3 章	膛内气流及压力分布 .....	132
§ 3.1	引言 .....	132
§ 3.2	内弹道气动力简化模型 .....	132
§ 3.3	比例膨胀假设下的压力分布 .....	133
3.3.1	比例膨胀假设及推论 .....	133
3.3.2	膛底封闭情况下弹后空间的压力分布 .....	136
§ 3.4	拉格朗日假设条件下的近似解 .....	142
3.4.1	拉格朗日假设 .....	142
3.4.2	膛底封闭条件下的压力分布 .....	142
3.4.3	有气体流出情况下膛内压力分布 .....	144
3.4.4	考虑膛内面积变化的膛内压力分布 .....	148
3.4.5	内弹道计算中应用的压力换算关系 .....	154
§ 3.5	毕杜克极限解 .....	155
§ 3.6	三种假设下压力分布的讨论 .....	164
第 4 章	内弹道势平衡理论 .....	168
§ 4.1	内弹道势平衡理论基本概念 .....	168
4.1.1	态能势 $\pi$ .....	168
4.1.2	势平衡及势平衡点 .....	169
4.1.3	势平衡点的火药已燃百分数 $\psi_E$ .....	170

## 4 枪炮内弹道学 ■

§ 4.2 膛内火药实际气体生成函数 .....	172
4.2.1 实际燃烧定律的表示方法 .....	172
4.2.2 主体燃烧阶段的燃气生成函数 .....	172
4.2.3 碎粒燃烧阶段的燃气生成函数 .....	173
§ 4.3 应用实际燃烧规律的内弹道解法 .....	175
4.3.1 关于解法的几点说明 .....	175
4.3.2 以势平衡点为标准态的内弹道相似方程组 .....	176
4.3.3 势平衡点各弹道量的确定 .....	179
§ 4.4 确定燃气生成系数的弹道方法 .....	179
4.4.1 主体燃烧阶段 .....	180
4.4.2 碎粒燃烧阶段 .....	182
§ 4.5 最大膛压和初速的模拟预测 .....	183
4.5.1 势平衡点参量与 $p_m$ 及 $v_0$ 的关系式 .....	183
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 .....	184
第 5 章 内弹道设计与装药设计 .....	190
§ 5.1 内弹道设计 .....	190
5.1.1 引言 .....	190
5.1.2 内弹道设计基本方程 .....	193
5.1.3 设计方案的评价标准 .....	195
5.1.4 内弹道设计指导图与最小膛容 .....	201
5.1.5 内弹道设计步骤 .....	205
5.1.6 加农炮内弹道设计的特点 .....	217
5.1.7 榴弹炮内弹道设计的特点 .....	220
5.1.8 枪的内弹道设计特点 .....	223
§ 5.2 内弹道优化设计 .....	225
5.2.1 优化设计的目的 .....	225
5.2.2 优化设计步骤 .....	225
5.2.3 应用举例 .....	229
§ 5.3 装药设计 .....	232
5.3.1 火药装药及装药元件 .....	233

5.3.2	装药设计的一般步骤 .....	234
5.3.3	装药结构及分类 .....	236
5.3.4	装药中的点火系统设计 .....	247
第 6 章 特种发射技术内弹道理论 .....		268
§ 6.1	无后坐炮内弹道理论 .....	268
6.1.1	无后坐炮发射原理及内弹道特点 .....	268
6.1.2	无后坐条件 .....	271
6.1.3	无后坐炮内弹道方程 .....	274
6.1.4	无后坐炮内弹道方程组的数值解法 .....	276
6.1.5	无后坐炮的次要功计算系数 .....	279
§ 6.2	迫击炮内弹道 .....	281
6.2.1	迫击炮及其弹药结构 .....	281
6.2.2	迫击炮的弹道特点 .....	282
6.2.3	基本假设和内弹道方程 .....	285
6.2.4	迫击炮内弹道计算 .....	286
§ 6.3	膨胀波火炮内弹道理论 .....	289
6.3.1	膨胀波火炮的发射机理 .....	290
6.3.2	膨胀波火炮的特点 .....	290
6.3.3	膨胀波火炮发射过程的研究现状 .....	291
6.3.4	后喷装置的设计要求及打开方式 .....	292
6.3.5	膨胀波火炮内弹道模型建立及数值模拟 .....	294
6.3.6	膨胀波波速仿真及最佳开尾时间的确定 .....	297
§ 6.4	平衡炮内弹道理论及数值模拟 .....	300
6.4.1	引言 .....	300
6.4.2	平衡炮内弹道模型 .....	301
6.4.3	平衡炮数值模拟及结果分析 .....	303
§ 6.5	高低压火炮内弹道 .....	307
6.5.1	高低压发射原理与假设 .....	307
6.5.2	基本方程 .....	308
6.5.3	高低压火炮内弹道方程求解方法 .....	310

## 6 枪炮内弹道学 ■

§ 6.6 超高射频串联发射内弹道模拟与仿真 .....	310
6.6.1 引言 .....	310
6.6.2 超高射频弹幕武器发射原理 .....	311
6.6.3 超高射频串联发射内弹道模型的建立 .....	312
6.6.4 超高射频火炮数值模拟结果与分析 .....	314
第7章 内弹道两相流及发射安全性分析 .....	323
§ 7.1 引言 .....	323
§ 7.2 膛内压力波及其影响因素 .....	324
7.2.1 膛内压力波现象 .....	324
7.2.2 压力波形成机理 .....	325
7.2.3 影响压力波的因素分析 .....	327
§ 7.3 内弹道两相流数值模拟及安全性分析 .....	332
7.3.1 某大口径坦克炮一维两相流数值模拟 .....	332
7.3.2 混合颗粒床中一维颗粒轨道模型及其数值模拟 .....	339
§ 7.4 装药安全性评估方法 .....	346
第8章 火炮身管烧蚀磨损与寿命 .....	350
§ 8.1 引言 .....	350
§ 8.2 身管烧蚀磨损现象 .....	350
8.2.1 内膛表面的变化 .....	351
8.2.2 白层和热影响层 .....	354
8.2.3 内膛尺寸的变化 .....	354
8.2.4 药室长度的变化 .....	356
8.2.5 膛线形状的变化 .....	356
§ 8.3 内膛烧蚀与磨损机理 .....	357
8.3.1 快速冷、热循环使内膛表面产生裂纹 .....	357
8.3.2 火药气体的热作用和机械作用是烧蚀的主要因素 .....	358
8.3.3 火药气体与内膛表面金属的化学作用 .....	358
§ 8.4 防火炮烧蚀磨损的技术措施 .....	359
8.4.1 采用低爆温的火药 .....	359



8.4.2 采用缓蚀添加剂 .....	360
8.4.3 减小挤进压力和改进弹带材料 .....	361
8.4.4 应用身管内膛表面强化技术 .....	362
8.4.5 激光热处理身管镀铬层新工艺 .....	362
§ 8.5 身管寿命 .....	363
8.5.1 身管寿命判别条件及分析 .....	364
8.5.2 火炮寿命终止时寿命发数的计算公式 .....	366
8.5.3 身管寿命的预测方法 .....	368
8.5.4 影响身管寿命的因素 .....	375
8.5.5 提高身管寿命的技术措施 .....	378
参考文献.....	381
索引.....	383