



国家出版基金项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

弹射内弹道学

INTERIOR BALLISTICS OF
CATAPULTS

谭大成 编著

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



国家出版基金项目



工业和信息化部“十二五”规划专著

航天发射科学与技术

弹射内弹道学

INTERIOR BALLISTICS OF
CATAPULTS

谭大成 编著



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

内 容 简 介

本书系统地论述了导弹弹射技术及弹射内弹道学的基本原理和基本理论、弹射器内弹道的计算方法和设计方法、弹射器内弹道参数测试和内弹道相似问题。本书主要内容属于经典内弹道学范畴,对现代内弹道学亦有讨论。

本书可供从事发射系统研究、设计和试验的有关工程技术人员阅读和使用,并可作为武器发射工程等专业本科生和兵器发射理论与技术等方向研究生的教材和参考资料。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

弹射内弹道学/谭大成编著. —北京:北京理工大学出版社, 2015. 6

(航天发射科学与技术)

国家出版基金项目 工业和信息化部“十二五”规划专著

ISBN 978-7-5682-0741-6

I. ①弹… II. ①谭… III. ①火箭弹道-内弹道学 IV. ①TJ013. 1

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第133418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)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 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/14.5

字 数/277千字

版 次/2015年6月第1版 2015年6月第1次印刷

定 价/56.00元

责任编辑/尹 暄

文案编辑/尹 暄

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

航天发射科学与技术

编写委员会

名誉主编：于本水 黄瑞松 刘竹生

主 编：杨树兴 包元吉

副主编：(按姓氏笔画排序)

万 全 王生捷 刘 浩

姜 毅 胡习明 贺卫东

葛令民

编 委：(按姓氏笔画排序)

于殿君 王东锋 邓 科

朱恒强 刘占卿 汤元平

李建冬 李 梅 何家声

赵瑞兴 荣吉利 党海燕

傅德彬 路 峰 谭大成

航天发射科学与技术

学术顾问委员会

(按姓氏笔画排序)

丁旭昶	于倩	于建平
王 缜	牛养慈	任跃进
刘淑艳	李喜仁	张泽明
陈亚军	陈登高	周凤广
赵长禄	郝志忠	秦 焯
唐胜景	曾智勇	

总序

世界各国为了进一步提高综合国力，都在大力开发空间资源和加强国防建设。作为重要运载器的火箭、导弹，以及相关的发射科学技术，也相应地都得到了广泛的重视。发射科学技术综合了基础科学和其他应用科学领域的最新成就，以及工程技术的最新成果，是科学技术和基础工业紧密结合的产物。同时，发射科学技术也反映了一个国家相关科学技术和基础工业的发展水平。

航天发射科学技术的发展历史漫长，我国古代带火的弓箭便是火箭的雏形。火箭出现后，被迅速用于各种军事行动和民间娱乐。随着现代科学技术的发展和人类需求的增加，美国、俄罗斯、中国、日本、法国、英国等航天大国，投入了大量的人力、物力进行航天发射的研究和开发，并取得了丰硕成果，代表了世界的先进水平。火箭、导弹的发射水平，决定了一个国家航天活动和国防保障区域的范围。因此，各航天大国均把发展先进的发射和运载技术作为保持其领先地位的战略部署之一。无论是空间应用、科学探测、载人航天、国际商业发射与国际合作，还是国防建设，都对发射技术提出了新的要求，促使航天发射科学技术向着更高层次发展。

综上所述，系统归纳、总结发射领域的理论和技术成果，供从事相关领域教学、研发、设计、使用人员学习和参考，具有重要的意义。这对提高教育水平、提升技术能力、推动科学发展和提高航天发射领域的研发水平将会起到十分重要的作用。

航天发射科学技术构成复杂，涉及众多学科，而且内容广泛，系列丛书的编写需要有关领域的专家、学者来共同完成。因此，北京理工大学、北京航天发射技术研究所、北京机械设备研究所、北京特种机械研究所、总装备部工程设计研究院等国内从事相关领域研究的权威单位组建了本丛书的作者队伍，期望将发射科学技术的

重要成果著作成册，帮助读者更深入地了解 and 掌握航天发射领域的知识和技术，推动我国航天事业的发展。

本丛书力求系统性、完整性、实用性和理论性的统一，从发射总体技术、发射装置、地面支持技术、发射场总体设计、发射装置设计、发射控制技术、发射装置试验技术、发射气体动力学、发射动力学、弹射内弹道学等多个相互支撑的学科领域，以发射技术基本理论，火箭、导弹发射相关典型系统和设备为重点，全面介绍国内外的相关技术和设备、设施。

本丛书作者队伍是一个庞大的教育、科研、设计团队，为了编写好本丛书，编写人员辛勤劳动，做出了很大努力。同时，得到了相关学会，以及从事编写的五个单位的领导、专家及工作人员的关心和大力支持，在此深表感谢！由于种种原因，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正！

编写委员会

本书是国家出版基金项目及工业和信息化部“十二五”规划专著《航天发射科学与技术》丛书的分册，主要论述导弹弹射技术及弹射内弹道学的基本原理和基本理论、弹射器内弹道的计算方法和设计方法、弹射内弹道参数测试和内弹道相似问题。

弹射又称外动力发射或冷发射，由发射装置（弹射器）提供发射动力将导弹发射出去，是一种重要的导弹发射方式，在各类战略战术导弹武器系统中被广泛采用。弹射内弹道学是研究弹射器工作原理、弹射过程现象和过程规律性的科学，其根本目的是为高性能导弹武器系统的研制提供理论基础和支持。

本书主要针对目前常见的燃气式弹射器讨论其内弹道问题，对燃气—蒸汽式弹射器、电磁式弹射器的基本原理和内弹道特性等亦有介绍。

全书共分6章，第1章主要介绍了导弹的自力发射与弹射方式、典型弹射器及其一般组成、弹射器内弹道特点和弹射内弹道学、电磁弹射基本原理等；第2章用一定篇幅介绍了装药的基本知识，重点在于火药的能特性、几何燃烧定律、燃气生成速率、燃速及其影响因素、装药形状与燃面变化规律等；第3章在建立相应基本假设和内弹道方程的基础上，分析弹射器高压室的内弹道性能，重点推导出不同燃面变化规律下的高压室平衡压力表达式及平衡压力的稳定性条件，讨论了装药性能、面喉比、初温等因素对平衡压力的影响；第4章分析弹射器低压室内弹道性能，分别建立了燃气式弹射器和燃气—蒸汽式弹射器低压室的基本假设和内弹道方程，讨论了低压室压力等内弹道参量的变化规律；第5章讨论弹射内弹道设计问题，给出了弹射内弹道设计的基本假设和基本方程，列出了弹

射器低压室和高压室内弹道设计的基本方法和步骤，并重点介绍了弹射器高压室常用的多根管状药设计方法；第6章简要介绍弹射内弹道综合性能实验中所涉及的内弹道参量测试问题，并对大型弹射器缩比模型试验中的内弹道相似问题做了讨论。

本书所建立的高压室和低压室零维内弹道模型及其解法属于经典内弹道学范畴，结合近年来的研究，在低压室内弹道分析中讨论了现代内弹道学所涉及的气体动力学三维模型及其解法。经典内弹道模型是内弹道学的基础，具有表达清晰、便于分析、计算简单的特点，现代内弹道学是内弹道学的发展方向，目前不能也没有必要以三维模型完全替代零维模型。

本书可供从事发射系统研究、设计和试验的有关工程技术人员阅读和使用，并可作为武器发射工程等专业本科生和兵器发射理论与技术等方向研究生的教材和参考资料。

北京航天发射技术研究所林禹研究员和北京理工大学宇航学院毕世华教授仔细审阅了书稿，提出了许多宝贵意见。本书编写过程中得到袁曾凤教授的关心和帮助。本书初稿曾作为北京理工大学武器系统与发射工程（武器发射工程）专业本科生课程弹射内弹道学的内部讲义，多位同学指出了书中错漏之处。在此一并向他们表示衷心感谢。

本书在编写过程中参考了大量国内外资料和有关教材，在此对原作者致以深深的谢意。

书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正。

编著者

主要符号表

1. 说明

下标 1 一般指高压室有关参量

下标 2 一般指低压室有关参量

下标 0 一般指初始时刻

下标 b 一般指已燃去的装药参量

下标 m 一般指导弹相关参量，也指缩比模型有关参量

下标 p 一般指装药相关参量

下标 t 一般指喷管喉部也指发射筒或弹射器相关参量

下标 e 一般指喷管出口

下标 k 一般指燃烧结束时刻

2. 符号

a ——装药燃速系数

c ——相似比，即相似定数

C_D ——流量系数

C_F ——推力系数

C_1 ——水孔流量系数

C^* ——装药燃气特征速度

c_p ——燃气比定压热容

c_v ——燃气比定容热容

D ——管状装药外径

d ——管状装药内径

e ——装药燃去厚度

e_1 ——装药肉厚

f_p ——装药定压火药力

f_v ——装药定容火药力

$\sum F$ ——导弹所受沿运动方向的合外力

F_e ——弹射力

F_f ——摩擦力

F_g ——弹射质量的重力分力

g ——重力加速度

h ——比焓

k ——绝热指数

K_0 ——与绝热指数 k 相关的常量

K_N ——高压室面喉比

L ——汽化潜热

L_p ——管状装药长度

l_m ——导弹在弹射器内的行程

l_t ——弹射器的后坐行程

m ——导弹质量或弹射质量

m_b ——时间 t 内装药已燃部分质量，即燃气生成质量

m_{ig} ——点火药量

m_p ——高压室装药质量

m_t ——发射筒或弹射器质量

m_{t1} ——时间 t 内高压室燃气的总流出量

m_{t2} ——时间 t 内并联无后坐式弹射器低压室燃气的总流出量

m_s ——干饱和蒸汽的质量

m_w ——饱和水的质量

\dot{m}_{t1} ——高压室喷管燃气秒流量

\dot{m}_{t2} ——并联无后坐式弹射器低压室喷管燃气秒流量

\dot{m}_1 ——喷水流量

Ma_t ——喷管喉部处燃气马赫数

Ma_{e1} ——高压室喷管出口处燃气马赫数

Ma_{e2} ——低压室喷管出口处燃气马赫数

$\overline{M^g}$ ——装药燃气平均相对分子质量

n ——装药燃速指数

n_p ——管状装药根数

n_1 ——水孔个数

p_1 ——某瞬时高压室内燃气压强

p_{e1} ——高压室喷管出口处压强

p_{eq} ——高压室平衡压强

p_2 ——某瞬时低压室内燃气压强

- p_c ——水蒸气临界点压强
 p_{ig} ——点火压强
 p_r ——临界压强比
 p_t ——发射筒的动量
 p_m ——导弹的动量
 p_{gr} ——后喷燃气的动量
 Q_V ——装药定容爆热
 Q_p ——装药定压爆热
 R ——装药气体常数
 R_0 ——通用气体常数
 S_b ——装药的燃烧表面积
 S_{b0} ——装药初始燃烧表面积
 S_{bc} ——管状装药的横截面积
 S_i ——高压室腔体横截面积
 S_1 ——每个水孔的面积
 S_{t1} ——高压室喷管喉部面积
 S_{t2} ——并联无后坐式弹射器低压室喷管喉部面积
 S_{e1} ——高压室喷口的出口截面积
 S_2 ——低压室承压面积
 t ——时间
 t_k ——装药燃烧时间，即高压室工作时间
 T_i ——装药初温
 T_0 ——装药定压爆温
 T_1 ——高压室内燃气温度
 T_{1k} ——燃烧结束点高压室燃气温度
 T_2 ——低压室内燃气温度
 T_{2s} ——水蒸气饱和温度
 T_{2t} ——过热蒸汽温度
 T_c ——水蒸气临界点温度
 T_V ——装药定容爆温
 T_p ——装药定压爆温
 u ——装药燃速
 v_m ——导弹在弹射器内的运动速度
 v_c ——水蒸气临界点比体积

- v_g ——导弹离筒速度
 V ——装药燃气比容
 V_1 ——高压室的自由容积
 V_{10} ——高压室的初始自由容积
 V_2 ——低压室的自由容积
 V_{20} ——低压室的初始自由容积
 V_g ——发射筒工作容积
 x ——干度
 ρ_1 ——高压室内的燃气密度
 ρ_2 ——低压室内的燃气密度
 ρ_1 ——水密度
 ρ_p ——装药密度
 α ——装药燃气余容
 δ ——高压室内燃气的每秒填充量与每秒生成量之比
 φ ——次要功系数，即虚拟质量系数
 φ_{21} ——高压室喷管流量修正系数
 φ_{22} ——并联无后坐式弹射器低压室喷管流量修正系数
 Ψ ——装药燃去质量百分比
 σ_p ——装药燃速温度敏感系数
 η ——装填系数
 η_{c_f} ——推力修正系数
 η_{m_p} ——装药利用系数
 η_{m_t} ——弹射器质量利用系数
 χ_1 ——高压室温度修正系数
 χ_2 ——低压室散热修正系数
 χ_e ——能量修正系数
 Δ ——高压室装填密度
 Δp_1 ——喷水压差

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	1
1.1 导弹的自力发射与弹射	1
1.1.1 自力发射和弹射基本原理	3
1.1.2 自力发射和弹射特点	5
1.1.3 发射方式选择	8
1.2 典型弹射器及其一般组成	8
1.2.1 弹射器分类	8
1.2.2 典型弹射器	9
1.2.3 弹射器基本组成	13
1.3 弹射内弹道学概述	15
1.3.1 内弹道学及其发展	15
1.3.2 弹射器内弹道特点	16
1.3.3 弹射内弹道学任务和研究对象	17
1.3.4 弹射内弹道学研究方法	18
1.4 电磁弹射简介	19
1.4.1 电磁发射主要方式	19
1.4.2 导弹电磁弹射器	21
第2章 装药一般知识	25
2.1 火药分类	25
2.1.1 均质火药	27
2.1.2 异质火药	28
2.1.3 叠氮/非叠氮化物气体发生剂	31
2.2 火药性能	32
2.2.1 能量特性	32

2.2.2	其他有关特性	36
2.3	火药燃烧	37
2.3.1	火药燃烧过程	37
2.3.2	火药燃烧基本特征	38
2.3.3	火药燃烧过程分类	38
2.3.4	双基药稳态燃烧机理	39
2.4	几何燃烧定律	41
2.5	燃气生成速率	42
2.6	火药燃烧速度及其影响因素	43
2.6.1	燃速计算公式	43
2.6.2	燃速影响因素	44
2.7	火药的几何形状及其燃烧表面积变化	48
2.7.1	药形与装药	48
2.7.2	按燃烧表面积变化规律划分的药形	48
2.7.3	按燃烧表面位置划分的药形及典型药柱	50
2.7.4	单孔管状药燃面变化规律	52
第3章	高压室内弹道性能分析	55
3.1	高压室内弹道模型	55
3.1.1	高压室压强曲线的特征	55
3.1.2	基本假设及经典内弹道模型	56
3.2	恒面装药高压室压强	61
3.2.1	高压室压强对时间的变化率	61
3.2.2	p_1-t 曲线分析	62
3.2.3	高压室平衡压强	66
3.2.4	平衡压强影响因素	68
3.2.5	高压室压强稳定性	71
3.3	非恒面装药的高压室压强	74
3.3.1	增面装药 p_1-t 曲线分析	74
3.3.2	增面装药高压室工作压强	75
3.4	高压室内弹道性能计算	77
3.4.1	高压室压强工程估算	77
3.4.2	高压室压强数值计算	82

第 4 章 低压室内弹道性能分析	84
4.1 燃气式弹射器低压室经典内弹道模型	84
4.1.1 低压室工作过程的分期	84
4.1.2 基本假设	86
4.1.3 低压室参量在空间上的平均值	87
4.1.4 经典内弹道方程组	87
4.1.5 低压室压强的变化规律	96
4.1.6 经典内弹道方程组数值解法	101
4.2 燃气—蒸汽式弹射器内弹道模型	102
4.2.1 燃气—蒸汽弹射器低压室基本组成和工作过程	102
4.2.2 水蒸气的性质	102
4.2.3 燃气—蒸汽式弹射器低压室基本假设	105
4.2.4 低压室内弹道方程组	106
4.3 引入气动模型的低压室内弹道模型和解法	110
4.3.1 弹射器三维内弹道模型	113
4.3.2 初始条件和边界条件	117
4.3.3 内弹道模型计算方法简介	118
4.3.4 划分计算网格	120
4.3.5 CFD 软件简介	121
第 5 章 弹射器内弹道设计	123
5.1 内弹道设计的基本假设	123
5.2 内弹道方案的评价标准	124
5.3 内弹道设计基本方程	126
5.4 低压室内弹道设计	128
5.4.1 低压室内径的选取	128
5.4.2 平均发射加速度允许值计算	128
5.4.3 低压室平均压强、平均发射加速度和导弹运动时间的计算	130
5.4.4 弹射器无后坐条件确定	131
5.4.5 低压室初始容积 V_{20} 的选取	135
5.5 高压室内弹道设计	136
5.5.1 火药种类选择	136
5.5.2 高压室工作压强的选取	137
5.5.3 装药时间、喷管尺寸等参数的计算和设计	138

5.6 装药设计	140
5.6.1 药形选择	140
5.6.2 多根管状药设计	141
5.7 点火药设计	161
5.7.1 点火药种类选择	161
5.7.2 主要点火参数的确定	162
第6章 内弹道参数测试和内弹道相似问题	164
6.1 内弹道参数测试	165
6.1.1 测试系统一般组成	165
6.1.2 内弹道参数测试方法	165
6.2 弹射内弹道相似问题	176
6.2.1 相似理论简介	177
6.2.2 弹射器内弹道相似问题	184
参考文献	199
索引	201