



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

弹箭外弹道学

Exterior Ballistics of Projectiles and Rockets

韩子鹏 等 编著

 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

弹箭外弹道学

 北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书以引信机构为主线介绍了用于各类弹药引信的主要机构及其组成、作用特点。全书共分十二章，分别讲述引信在武器系统中的任务、引信基本功能及组成、现代战争及武器系统的发展对引信提出的要求，引信在各种环境下的受力环境，引信爆炸序列、发火机构、隔爆机构、保险机构、延期机构、自毁机构、辅助机构，引信电源，引信的电子发火控制装置，最后选择几种典型引信进行了全引信的构造与作用介绍。本书从引信典型机构的构造与作用出发，系统地分析了对各类机构的特殊要求和它们的机构特点与设计规律，还补充了国内近几年部分科技研究成果和国外的引信机构发展趋势。本书可作为高等学校引信及弹药、火工品等武器类专业的教科书，也可供从事引信和弹药系统设计、试验、研究和生产的技术人员参考。

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

引信机构学/张合, 李豪杰编著. —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 - 8696 - 1

I. ①引… II. ①张… ②李… III. ①引信 - 机构学 IV. ①TJ430. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 020650 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 / 17.5

字 数 / 325 千字

版 次 / 2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷

定 价 / 64.00 元

责任编辑 / 徐春英

孟雯雯

文案编辑 / 徐春英

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

2 火箭外弹道学 ■

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

弹箭外弹道学是武器系统有关专业共有的一门基础课，如火炮和火箭炮、炮弹、火箭弹与航空炸弹、引信、雷达、火控、制导和导航、靶场试验与测控专业都在不同程度上需要外弹道知识；武器系统从论证、设计、加工、试验、定型、生产到作战指挥、战斗使用、长期储存每个环节都涉及外弹道知识和理论。因此，外弹道书籍在满足相关专业技术人员、机关人员、军队干部工作需要以及培养大学生、研究生方面都是十分重要的，这是编写这本书的主要目的。

此外，近 20 年来，由于计算机技术、光电测控技术、信息技术、材料加工技术的突飞猛进，加上数学力学、控制理论的发展，以及现代战争对武器要求的强力推动，使武器系统与弹箭的研制和装备大为改观，这一方面对外弹道学提出了许多新问题、新要求，另一方面也给外弹道学的发展创造了条件，出现了许多新理论、新成果，需要及时归纳、总结、提升，这是编写本书的另一个目的。

当今世界各国弹箭发展的总趋势是增大射程、提高命中精度和打击效果，因此，出现了一大批已装备部队或正在研制的新型弹箭，如末敏弹、弹道修正弹、简易控制火箭、制导火箭和炸弹、末制导炮弹、火箭助推远程滑翔增程弹、布撒器和巡飞弹等。它们既不是普通的无控弹，也不是一般意义下带有火箭发动机、全程制导的导弹，而是仍以普通火炮、火箭炮发射或飞机投放，通常不带动力，只在全弹道部分弧段上采用简易控制、弹道修正、弹道末端制导或目标敏感的信息化、智能化、制导化弹箭。这些弹箭除了在作用原理和结构上不同于普通弹箭外，在其飞行原理、运动规律和弹道特性上也区别于普通弹箭，例如，末敏弹要形成对地面目标区的螺旋扫描运动；弹道修正弹在受到脉冲作用或阻力器作用后，要改变飞行姿态和轨迹，向目标靠拢；主动段简易控制火箭利用燃气流作用产生控制力矩，抑制弹轴的摆动，抵消外界的干扰，提高射击密集度；滑翔增程弹箭的全弹道既有无控自由飞行段，又有火箭助推段，还有有控滑翔飞行

段；末制导炮弹从火炮中射出，先经过短暂延迟时间火箭点火加速，再经过自由飞行，然后进入惯性制导滑翔增程，最后转入自动导引；制导炸弹和制导火箭常采用捷联惯导+GPS联合制导方式大幅度提高轰炸精度。一维修正弹、卫星制导迫弹和PGK制导弹的大部分弹道还是无控的，其射击精度不仅与控制有关，还与射表的精度、适时弹道预测、弹道解算的精度有关。

总之，由火炮和火箭发射的新型弹箭已不是完全自由飞行了，而是在一条弹道上既有无控飞行段，又有火箭助推或火箭底排助推段，还有有控滑翔段、弹道修正段或制导段，或自动导引段。因此，在进行外弹道设计计算和分析时，既需要无控炮弹外弹道方面的知识，又要有火箭外弹道、底排外弹道知识，还要有有控弹道及修正弹道方面的知识，缺少其中部分知识就形成不了新型弹箭全弹道的概念，就会在工作中造成障碍。但将这些理论和知识分散在几本书中，符号各成系统，不利于搞清它们之间的关联，而且可能造成重复叙述，增大了学习时间。

因此，本书根据新型弹箭的弹道特点和发展需要，将火炮外弹道、火箭外弹道、底排外弹道、有控弹箭飞行理论和知识有机地融合到一起，统一讲述，能基本满足读者今后工作中对外弹道理论和知识的需求，并为进一步学习研究打下基础。

在书稿内容选取上，一方面保留和加深了那些十分成熟的、现在还在广泛应用的、行之有效的基本理论和内容，同时也增加了许多新内容和成果，例如弹箭非线性运动及稳定性理论、底部排气弹内弹道与减阻率计算、装液弹飞行稳定性理论、末敏弹扫描运动参数设计、弹道滤波和弹道预测理论、最优方案弹道设计、弹道气动力综合优化设计与射击仿真等。

另外，本书还十分注意收集那些在实际设计计算、分析和靶场试验中常遇到的与外弹道有关的知识，例如关于弹道一致性检验方法、试验中大误差别除的准则、目视法估计射弹散布的中间偏差、气象通报的识别和应用、准确弹道层权的实际应用方法、风力等级与风速的换算、地面摩擦层风速随高度变化的计算方法、WGS-84坐标系向弹道坐标系的转换、不同类型弹箭的静稳定度、振荡频率和一些特性数的参考值等，这既满足了工作需要，也有利于增加读者对外弹道的感性知识。

最后，本书还编制了工作中经常要用到的地面火炮弹道表、高射火炮弹道表、低伸弹道表、火箭外弹道特征函数表、装液弹本征频率和留数表（即斯图瓦特森表）的计算程序及说明，读者可发E-mail至hanzipeng802@sina.com向作者索要。

本书由韩子鹏等编著，其中赵子华教授编写了第16章，刘世平研究员参加了第15章外弹道测试仪器和测试方法的编写，李磊研究员参加了第17章的编写，钱龙军教授

编写了第 19 章第 19.6 节的伪谱法，丁松滨博士、舒敬荣博士、张帮楚博士、李臣明博士、曹小兵博士参与了第 19 章的编写，余军教授编写了附录，其他章节由韩子鹏编写。全书由韩子鹏统稿。本书还参考了大量国内外专家、学者、工程技术人员和研究生发表的著作、论文，在此向这些同志、同行表示衷心的感谢！

南京理工大学郭锡福教授、总装 32 基地阎章更将军、研究员对本书进行了详细的审阅，提出了宝贵的修改意见，特在此致以谢意！

由于著者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

编著者

2013 年 7 月于南京理工大学

目 录

绪论	1
第 1 章 有关地球和大气的知识	4
1.1 重力和重力加速度	4
1.2 地球旋转产生的科氏惯性力	6
1.3 大气的组成与结构	7
1.3.1 大气的组成	7
1.3.2 大气的结构	8
1.4 虚温、气压、密度、声速和黏性系数沿高度的分布	10
1.4.1 空气状态方程和虚温	10
1.4.2 气压、气温随高度的分布	11
1.4.3 空气密度随高度的变化	13
1.4.4 声速随高度的变化	13
1.4.5 黏性系数随高度的变化	14
1.5 风的分布	14
1.5.1 自由大气中的地转风	16
1.5.2 近地面层中风速的对数分布	17
1.5.3 上部边界层的爱克曼螺线	17
1.5.4 大气环流和季风	18
1.6 标准气象条件	19
1.6.1 国际标准大气和我国国家标准大气	20
1.6.2 我国炮兵标准气象条件	20
1.6.3 我国空军航弹标准气象条件	22
1.6.4 海军标准气象条件	22
第 2 章 作用在弹箭上的空气动力	25
2.1 弹箭的气动外形和两种飞行稳定方式	25

2.2	空气阻力的组成	27
2.2.1	旋转弹的零升阻力	27
2.2.2	尾翼弹的零升阻力	36
2.3	阻力系数、阻力定律、弹形系数和阻力系数的雷诺数修正	36
2.3.1	阻力系数曲线变化的特点	37
2.3.2	阻力定律和弹形系数	37
2.3.3	阻力系数的雷诺数修正	40
2.4	空气阻力加速度, 弹道系数和阻力函数	41
2.5	有攻角时弹箭的静态空气动力和力矩	43
2.5.1	弹体的法向力 R_n 和轴向力 R_A	43
2.5.2	弹体(或弹身)的阻力系数 c_x 和升力系数 c_y	44
2.5.3	弹翼、尾翼、前翼的升力和阻力	44
2.5.4	全弹的升力系数和阻力系数	47
2.5.5	静力矩 M_z 和压力中心 x_p	50
2.6	作用在弹箭上的动态空气动力和力矩	53
2.6.1	赤道阻尼力矩 $M_{z\omega}$	53
2.6.2	极阻尼力矩 $M_{z\alpha}$	54
2.6.3	尾翼导转力矩 $M_{z\omega}$	55
2.6.4	马格努斯力 R_z	56
2.6.5	马格努斯力矩 M_y	59
2.6.6	非定态阻尼力矩(或下洗延迟力矩) M_z^d	61
2.6.7	其他空气动力和力矩	62
2.7	作用在有控弹箭上的气动力和力矩	62
2.7.1	作用在有控弹箭上的气动力	64
2.7.2	作用在有控弹箭上的空气动力矩	66
第3章	标准条件下弹箭质心运动方程组及弹道特性	74
3.1	基本假设	74
3.2	质心运动方程组的建立	75
3.2.1	直角坐标系里的弹箭质心运动方程组	76
3.2.2	自然坐标系里的弹箭质心运动方程组	76
3.2.3	以 x 为自变量的弹箭质心运动方程组	77
3.3	抛物线弹道的特点	78
3.3.1	抛物线弹道诸元公式	78
3.3.2	真空弹道的特点	79

3.4	空气弹道的一般特性	82
3.4.1	速度沿全弹道的变化	82
3.4.2	空气弹道的不对称性	84
3.4.3	最大射程角	84
3.4.4	空气弹道由 c, v_0, θ_0 三个参数完全确定	86
第4章	非标准条件下的质心运动方程组、弹道修正和散布	88
4.1	标准条件和修正理论概述	88
4.1.1	标准条件	88
4.1.2	修正理论概述	88
4.2	考虑弹道条件和气象条件非标准时的弹箭质心运动方程组	90
4.3	考虑地形、地球条件非标准时的弹箭质心运动方程组	91
4.4	初速、弹重、药温非标准时的微分修正	94
4.5	对气温气压非标准的微分法修正, 弹道相似原理	94
4.5.1	弹道相似原理的导出	95
4.5.2	气温、气压非标准时的射程和飞行时间微分修正公式	97
4.6	气温气压修正和密度声速修正的匹配问题	98
4.6.1	对单独空气密度偏差的修正	99
4.6.2	对声速非标准的修正	99
4.7	对风的修正	100
4.7.1	横风产生的侧偏 (运动方程求解法)	101
4.7.2	横风产生的侧偏 (相对运动法)	101
4.7.3	纵风对射程的修正	102
4.8	弹道准确层权和近似层权	103
4.8.1	弹道平均值和层权	103
4.8.2	准确层权的计算方法和特点	103
4.8.3	近似层权	106
4.8.4	准确层权与近似层权的比较	110
4.9	气象探测和气象通报	110
4.9.1	编报规则	111
4.9.2	地炮气象通报	111
4.9.3	高射炮兵弹道气象通报	112
4.9.4	地炮计算机气象通报	113
4.10	火炮运动时的修正	114
4.11	炮耳轴与炮身轴线不垂直及炮耳轴倾斜时的修正	115

4 弹箭外弹道学 ■

4.11.1	炮耳轴与炮身轴线不垂直时的修正	115
4.11.2	炮耳轴倾斜时的方向修正	116
4.12	弹道散布、射击精度及其影响因素分析	118
4.12.1	距离散布及其影响因素分析	119
4.12.2	方向散布及其影响因素分析	121
4.12.3	火箭弹散布及其影响因素分析	121
4.12.4	密集度、准确度和精度的概念及其影响因素汇集	121
4.12.5	用圆概率误差 CEP 表示精度与用 CEP 表示密集度的区分， 球概率误差	124
4.13	火箭弹道修正和低空弹道风计算	125
4.13.1	低空风修正和低空弹道风计算	126
4.13.2	对比冲的修正	127
4.13.3	对药量的修正	128
4.13.4	对火箭药温的修正	128
第5章	弹道解法	130
5.1	弹道方程的数值解法	130
5.1.1	龙格-库塔 (Runge-Kutta) 法	130
5.1.2	阿当姆斯预报-校正法	131
5.2	弹道表解法	131
5.3	级数解法	133
5.3.1	引言	133
5.3.2	任意点弹道诸元公式	134
5.4	直射距离、有效射程和危险距离	136
第6章	弹箭刚体弹道方程的建立	138
6.1	坐标系及坐标变换	138
6.1.1	坐标系	138
6.1.2	各坐标系间的转换关系	140
6.2	弹箭运动方程的一般形式	143
6.2.1	弹道坐标系上的弹箭质心运动方程	143
6.2.2	弹轴坐标系上弹箭绕质心转动的动量矩方程	144
6.2.3	弹箭绕质心运动的动量矩计算	145
6.2.4	有动不平衡时的惯性张量和动量矩	146
6.2.5	弹箭绕心运动方程组	148
6.2.6	弹箭刚体运动方程组的一般形式	148

6.3	有风情况下的气动力和力矩分量的表达式	148
6.3.1	相对气流速度和相对攻角	149
6.3.2	有风时的空气动力	149
6.3.3	有风时的空气动力矩	150
6.4	弹箭的 6 自由度刚体弹道方程	153
6.5	弹箭的角运动方程及角运动的几何描述	154
6.5.1	角运动的几何描述, 球坐标和复数平面	155
6.5.2	等效力的概念	156
6.5.3	弹箭角运动方程的建立	157
6.5.4	弹箭攻角方程的建立	159
第 7 章	旋转稳定弹的角运动及对质心运动的影响	162
7.1	引言	162
7.2	弹箭速度和转速的变化	162
7.2.1	弹箭质心速度的变化规律	163
7.2.2	旋转稳定炮弹的自转和转速的衰减	163
7.3	攻角方程齐次解的一般形式——二圆运动	165
7.3.1	攻角方程解的一般形式	165
7.3.2	攻角模 δ 、进动角 ν 与二圆运动间的一些关系	166
7.3.3	气动参数与角运动参数间的关系	167
7.3.4	一圆运动和二圆运动产生的原因	167
7.3.5	高速自转物体陀螺效应的物理解释	168
7.4	仅考虑翻转力矩时攻角方程的齐次解——起始扰动产生的角运动	170
7.4.1	由起始攻角速度 $\dot{\delta}_0$ 产生的角运动	171
7.4.2	由起始攻角 δ_0 产生的角运动	173
7.5	起始扰动对初速方向的影响——气动跳角	174
7.5.1	由起始扰动 $\dot{\Delta}_0$ 产生的平均偏角 (或气动跳角)	175
7.5.2	由起始扰动 Δ_0 产生的气动跳角	177
7.6	起始扰动对质心运动轨迹的影响——螺线弹道	178
7.7	攻角方程的非齐次解——重力产生的动力平衡角	180
7.7.1	动力平衡角的数学推导	181
7.7.2	动力平衡角沿全弹道的变化	183
7.7.3	动力平衡角的物理解释和简易推导方法	185
7.7.4	马也夫斯基方程与刚体运动方程的简化	186
7.8	简化刚体运动方程	188
7.9	动力平衡角对弹道轨迹的影响——偏流	189

7.10	修正质点弹道方程	191
7.10.1	自然坐标系里的修正质点弹道方程	192
7.10.2	直角坐标系里的修正质点弹道方程	193
7.10.3	北约 (NATO) 国家修正质点弹道方程	194
7.11	考虑全部外力和力矩时起始扰动产生的角运动	197
7.12	非对称因素产生的角运动及对质心运动的影响	198
7.12.1	动不平衡产生的角运动及对质心运动的影响	199
7.12.2	气动外形不对称产生的角运动及对质心运动的影响	202
7.13	风引起的角运动及对质心运动的影响	203
第 8 章	尾翼稳定弹的角运动及对质心运动的影响	206
8.1	概述	206
8.2	非旋转尾翼弹由起始扰动产生的角运动及对质心运动的影响	206
8.2.1	非旋转尾翼弹的空间运动形式	206
8.2.2	非旋转尾翼弹的平面运动形式	209
8.2.3	起始扰动对速度方向的影响——气动跳角	210
8.3	低旋尾翼弹的导转和平衡转速	210
8.4	低旋尾翼弹由起始扰动引起的角运动及对质心运动的影响	211
8.5	尾翼弹的动力平衡角及偏流	213
8.5.1	非旋转尾翼弹的动力平衡角及滑翔效应	213
8.5.2	低旋尾翼弹的动力平衡角及偏流	215
8.6	尾翼弹由非对称性产生的角运动及对质心运动的影响	215
8.6.1	不旋转情况	216
8.6.2	旋转情况	216
8.7	风引起的角运动及对质心运动的影响	217
8.7.1	非旋转情况	217
8.7.2	旋转情况	218
第 9 章	火箭运动方程组的建立	219
9.1	概述	219
9.2	推力、比冲、喷管导转力矩、推力偏心力矩和推力侧分力	222
9.2.1	推力、比冲及其测量	222
9.2.2	涡轮式火箭的推力和喷管导转力矩	224
9.2.3	推力偏心力矩和推力侧分力	225
9.3	火箭作为变质量物体的质心运动方程和转动运动方程	226
9.3.1	火箭质心运动方程	226
9.3.2	火箭绕质心转动运动方程	228

9.4	火箭刚体运动方程组	228
9.4.1	自由飞行段刚体运动方程组	228
9.4.2	滑轨段运动方程	230
9.4.3	半约束期重力矩引起的角运动解析解	231
9.4.4	炮口碰撞问题	232
9.5	火箭的角运动方程组和攻角方程	232
9.5.1	火箭的角运动方程	232
9.5.2	火箭的攻角方程	234
第 10 章	尾翼式火箭的角运动和散布分析	236
10.1	角运动方程的齐次解——起始扰动产生的角运动和散布	236
10.1.1	起始扰动产生的攻角和偏角	236
10.1.2	有效定向器长的概念	239
10.1.3	起始扰动产生的攻角和偏角的性质	239
10.1.4	由起始扰动产生的散布计算	246
10.2	推力偏心产生的角运动和散布	247
10.2.1	非旋转尾翼式火箭由推力偏心产生的攻角和偏角	248
10.2.2	低旋尾翼式火箭由推力偏心产生的攻角和偏角	252
10.2.3	由推力偏心产生的散布计算	257
10.3	风对火箭角运动的影响和散布计算	257
10.3.1	垂直风产生的攻角和偏角	258
10.3.2	非旋转尾翼式火箭由风产生的角运动和风偏	259
10.3.3	影响尾翼式火箭风偏的因素分析	261
10.3.4	低旋尾翼式火箭由风产生的角运动和风偏	262
10.3.5	低空随机风产生的散布	263
10.4	动不平衡引起的角运动和散布	263
10.4.1	动不平衡对火箭主动段角运动的影响	263
10.4.2	影响因素分析	264
10.4.3	散布计算分析	265
第 11 章	旋转稳定火箭的角运动和散布分析	266
11.1	概述	266
11.2	起始扰动引起的角运动和散布	266
11.2.1	旋转稳定火箭的角运动方程及齐次方程的解	266
11.2.2	攻角和偏角的分析	268
11.2.3	影响偏角的因素分析	270
11.2.4	涡轮式火箭的“倾离”效应和定偏	271

11.3	推力偏心引起的角运动和散布	272
11.3.1	推力偏心产生的攻角和偏角	272
11.3.2	影响因素分析	272
11.4	风引起的角运动和散布	273
11.4.1	垂直风产生的攻角和偏角	273
11.4.2	垂直风引起的攻角和偏角曲线变化特点	274
11.4.3	影响风偏的因素分析	276
11.5	动不平衡的影响	277
第 12 章	弹箭的飞行稳定性	279
12.1	弹箭飞行稳定性的基本概念	279
12.2	静稳定、陀螺稳定和动态稳定	280
12.3	动态稳定性判据	282
12.3.1	炮弹动态稳定性判据的推导	282
12.3.2	动态稳定域的划分	284
12.3.3	火箭主动段动态稳定性条件	285
12.3.4	关于动态稳定性判据的讨论	286
12.4	弹箭在曲线弹道上的追随稳定性	290
12.4.1	尾翼弹的追随稳定性	290
12.4.2	旋转稳定弹的追随稳定性	291
12.5	低速旋转尾翼弹的共振不稳定	291
12.6	转速闭锁及灾变性偏航	294
12.6.1	诱导滚转力矩和诱导侧向力矩	294
12.6.2	转速闭锁问题	297
12.6.3	转速闭锁情况下的角运动稳定性	300
第 13 章	弹箭的非线性运动及稳定性	302
13.1	弹箭非线性运动概述	302
13.1.1	弹箭非线性运动的特点	302
13.1.2	微分方程的定性分析方法	303
13.1.3	奇点理论	303
13.1.4	非线性微分方程的近似解法	306
13.2	尾翼弹平面非线性运动的极限环	306
13.2.1	运动方程	306
13.2.2	非线性角运动方程的第一次近似解	307
13.2.3	相平面分析	309
13.2.4	极限运动的能量解释	312