

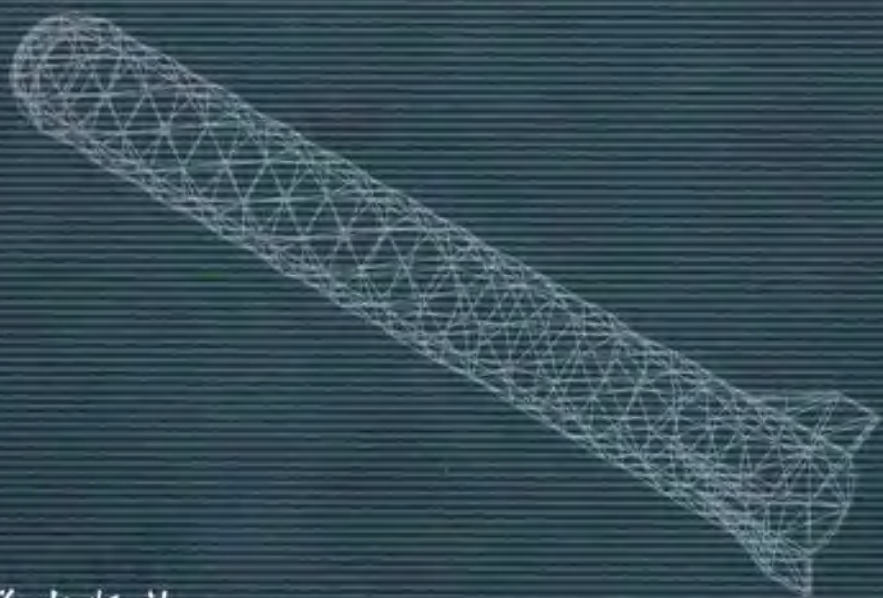
兵器科学与技术



国防科工委「十五」规划教材

火箭外弹道学

●徐朋友 著



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社



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



责任编辑:尹继荣
书籍装帧:彩多设计

ISBN 7-5603-2090-2



9 787560 320908 >

ISBN 7-5603-2090-2
TJ·2 定价: 39.00 元



国防科工委“十五”规划教材·兵器科学与技术

火箭外弹道学

徐明友 著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社

西北工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书系统地论述了火箭的弹道计算、扰动运动、飞行稳定性、弹道优化理论、弹道修正和射表编制,并简要地阐明了有控飞行理论。

本书取材于国内外火箭外弹道学方面的最新成果,并加以综合深化而成。书中内容新颖,构成了独特而完整的理论体系;并具有突出的系统性、科学性、先进性和实用性。本著作可作为大专院校的教材,同时也可作为从事火箭武器和弹药研究、设计、生产及靶场试验的工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火箭外弹道学/徐明友著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.11

ISBN 7-5603-2090-2

I.火… II.徐… III.火箭外弹道学

IV.TJ013.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 102193 号

火箭外弹道学

徐明友 著

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451—86414749

印 刷 哈尔滨工业大学印刷厂

开 本 787×960 1/16 印张 30.25 字数 640 千字

版 次 2004 年 11 月第 1 版 2004 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-2090-2/TJ·2

印 数 1~2 000

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 陈光祚
陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祯 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,为发展国民经济做出了重要贡献。

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技编著工作的基础上,以陈懋章、王泽山、陈一坚院士为代表的 100 多位专家、学者,对经各单位精选的进 550 种教材和专著进行了严格的评审,评选出适 200 种教材和学术专著;覆盖航空宇航科学与技术、校制科学与工程、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、北京现工大学、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,进入二十一世纪,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的发展阶段。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辉煌。

张华祝



前 言

1976年,国防工业出版社为填补弹道专业图书的空白,特委托我撰写一本《火箭外弹道学》专著。原著定稿时,由于教学急需,1980年便以教材类书目出版,后由兵器工业出版社于1989年再版。20多年来的教学和科研实践表明,该书的理论体系是正确的,与国外同类著作相比,该书有独具特色的理论体系,完整地揭示了各类火箭的运动规律,以统一的数学力学方法处理和分析飞行动力学问题,而且尽可能地沟通了无控与有控火箭运动理论之间的关系。

作为著作品牌之一的《火箭外弹道学》被列入“十五”国家级规划教材和国防科工委规划教材,为提高教材质量,作者对书中的内容重新做了审核、修改和补充,以满足新形势的需要。作为高等学校专业基础教科书,首先考虑到的是如何引导初学者学习火箭外弹道学的基本知识,认识火箭运动规律及总体性能,掌握建立教学力学模型的方法和技巧,建立必要的物理概念。尽管有了快速计算机,解析分析还是非常重要的。足够精确的解析式不仅能直观地反映出各物理量之间的函数关系,便于分析影响运动规律的各种因素,从而打下坚实的专业知识基础,而且也是数值结果是否正确的判别依据。实践表明,坚实的基础理论和系统的专业知识是以深厚的理性认识为前提的,本书特别重视物理概念的阐述,旨在提高分析和解决问题的能力。

本书仍以较大篇幅求解火箭的运动规律,同时力求以简捷的方法推导出精确的弹道模型,为准确的数值计算奠定可靠的基础。与前两版相比,本书把重点放在建立精确而实用的运动模型方面。所建立的运动模型计及了地球表面曲率和重力加速度随高度的变化,使之不仅对近程弹,而且对远程弹亦能适用。给出了各类坐标系速用的转换模式,可以将任一坐标系内的几何量和力学量很方便地转换到所需要的坐标系中,书中具体给出了特换网络图及坐标转换矩阵的相关表述式。速种转换也可以



直接由计算机完成,而不必人工推导,避免出错。导弹运动模型中的气动力还考虑了风这一重要因素,并给出了对各坐标系的转移关系;火箭在有风存在条件下的气动力也更精确化。本书的另一重要贡献是沟通并统一了有控与无控弹道的动稳定性理论,建立了导弹新的传递函数,由此不仅可得出通用的动稳定性判据,也便于简明地对滚转导弹做系统性的稳定性分析。外弹道优化理论增加了具有广泛用途的制导律的推导,并给以应用实例。

现代战争要求实施远程精确打击,射程较远的火箭在飞行全过程中,已逐渐应用主动段姿态控制、弹道修正技术以及末段制导等措施,特别是对远程火箭是很现实的问题。还有其他灵巧弹,均有不同形式的控制飞行过程。可见所谓“有控弹道”已不专属于导弹,其涉及面较为广泛。书中所述“有控弹”亦不是专指导弹。本书适当地论述有控弹道,不仅是必要的,而且国外有的优秀外弹道著作也是这样做的。作为一末外弹道理论著作,以统一的理论体系和系统的分析方法,阐述各运动过程的共同规律及其特性,为总体性能设计论证与试验分析奠定坚实的理论基础,这就是撰写本书的宗旨。

本书共17章,从内容安排上力求做到由浅入深、循序渐进。第一章至第六章为无控及有控过程的火箭质心运动规律,即质点弹道学,述及弹道的一些基本概念和计算分析方法。第七章至第十二章研究无控火箭的绕心运动,差不多占据了全书二分之一的篇幅,是本书的重点。在此将火箭作为六自由度力学对象,进行了全面的受力分析,尤其给出了气动力和力矩的精确表达式,建立了统一的运动模型,该模型精确度高,适用范围广,具有很大的实用价值。对各类弹箭的扰动运动做到了方程、变量、运动模式和公式形式四统一。既揭示了共性,又比较出各类弹的特点,做到了举一反三,加强了火箭扰动运动规律和散布理论的系统性。第十三章到第十五章研究运动稳定性,包括无控及有控弹道,给出了通用的稳定性判据并做了较全面分析。第十六章外弹道优化理论,为读者简略介绍寻求最佳运动状态的基本原理和弹道优化方法。第十七章阐述无控火箭弹



道修正量的内涵及射表编制的基本原则。鉴于本书是大学本科兵工专业的教材,对其内容的广度和深度必须加以适当控制。而且作为专业基础教科书,不可能也没有必要对武器系统各方面的弹道问题做全面深入的探讨,其侧重点应该是分析和处理问题的原理和方法。至于弹箭武器设计中所涉及到的一些专门问题,则是专业课的任务。对无控和有控弹道学中更深层次的理论及应用问题,则纳入研究生教材或其他专著。比如起始扰动的计算与分析,既是外弹道学的内容,又属于发射动力学的范畴;任一武器的发射动力学问题均处于学术研究的前沿,而且需要撰写大量的篇幅,对此,本书只能给予一些初步知识。

在撰写本书过程中,始终得到南京理工大学教务处和弹道研究所领导的有力支持和深切关怀;马殿荣将军(教授、博导)、李鸿志院士、朵英贤院士、宋丕极教授、康新中研究员、苗瑞生教授、郑民达研究员、杨绍卿总工、徐中信总工、马怀义总师等著名学者和我的同事们,各以不同方式给予了热情帮助,在此对他们表示衷心的感谢!

限于作者水平,难免有错,望读者不吝赐教。

徐明友

2003 年 8 月于南京理工大学

目 录

绪 论	1
第一章 火箭质心运动方程	4
1.1 质心运动惯性参考系	4
1.2 火箭质心运动矢量方程的一般形式	4
1.3 推力及推力加速度	6
1.4 重力及重力加速度	8
1.5 标准大气和炮兵标准气象条件	10
1.6 空气阻力及阻力加速度	15
1.7 在基本假设下的火箭质心运动矢量方程	19
1.8 火箭质心运动的标量方程组	21
1.9 空气弹道特性	25
附录 火箭质心运动的一般方程	28
第二章 火箭弹道主动段的解析解	31
2.1 运动方程组	31
2.2 K 点弹道诸元的计算公式	33
2.3 计算顺序	36
2.4 增程弹道增速段解法	40
第三章 火箭弹道被动段解法	42
3.1 前言	42
3.2 分段解法	42
3.3 虚速法	45
3.4 西亚切解法及其应用	51
第四章 椭圆理论	58
4.1 方程的组成和积分	58
4.2 弹道方程的讨论	61
4.3 任意点弹道诸元	62
4.4 射程与最大射程角	63
4.5 给定射程下所必需的最小初速的解	64



第五章 自动瞄准弹道	66
5.1 引言	66
5.2 自动瞄准导弹相对运动方程	68
5.3 追踪弹道	71
5.4 平行接近路线	75
5.5 比例导引法	77
第六章 遥控弹道	83
6.1 概述	83
6.2 反坦克导弹的三点法导引弹道	85
6.3 三点法导引弹道的法向加速度	88
6.4 导弹速度变化和目標机动时对三点法导引特性的影响	90
6.5 前置量法和半前置量法	91
第七章 尾翼式火箭弹摆动理论	95
7.1 前言	95
7.2 运动方程的建立	96
7.3 扰动方程组的变量变换	104
7.4 起始扰动所引起的攻角和偏角	106
7.5 再论有效滑轨(定向器)长度	114
7.6 计算散布的方法及散布与射程的关系	115
7.7 推力线偏心的影响	118
7.8 风的影响	122
7.9 火箭在被动段内的摆动运动	129
附录 几个次要因素对主动段的影响	131
第八章 旋转火箭弹及轴对称飞行器一般运动方程组	135
8.1 概述	135
8.2 火箭外弹道学中常用的坐标系及其相互关系	136
8.3 火箭运动方程组的一般形式	143
8.4 诸外力和外力矩	150
8.5 扰动运动方程组及其简化	163
8.6 含有其他次要力和力矩以及扰动因素的扰动运动方程组	168
第九章 尾翼式旋转火箭弹的扰动运动	172
9.1 前言	172
9.2 运动微分方程的变量变换	172
9.3 起始扰动所引起的攻角和偏角	174



9.4 推力线偏心的影响	181
9.5 低速旋转范围内推力线偏心引起偏角的另一--散布公式	187
9.6 风的影响	189
9.7 动不平衡的影响	192
9.8 散布计算与分析小结	195
9.9 野战尾翼式火箭弹低速旋转范围的判据	196
第十章 涡轮式火箭弹的扰动运动	204
10.1 概述	204
10.2 起始扰动所引起的攻角和偏角	205
10.3 推力偏心的影响	212
10.4 风的影响	215
10.5 动不平衡的影响	220
10.6 散布小结	222
第十一章 发射过程——起始扰动计算	224
11.1 前言	224
11.2 在半约束期内旋转火箭弹的扰动方程	224
11.3 质量分布不均衡引起的起始扰动	225
11.4 定向器振动所引起的起始扰动	228
11.5 只考虑重力矩时运动方程的解	229
11.6 弹炮间隙存在下的运动方程	231
第十二章 火箭增程弹的扰动运动	234
12.1 前言	234
12.2 野战尾翼式增程弹的散布分析	234
12.3 起始扰动引起偏角的极限值	240
12.4 周期性扰动因素引起的散布	246
12.5 合理点火条件的选择	251
12.6 反坦克增程弹的立靶密集度	259
第十三章 无控火箭的运动稳定性	263
13.1 引言	263
13.2 扰动运动方程的简化与变换	264
13.3 动态稳定条件的推导	265
13.4 稳定性区域	269
13.5 几个主要参量对动态稳定性的影响	271
13.6 共振效应	274



13.7 无控火箭的追随稳定性	276
13.8 尾翼式火箭弹的转速范围	279
13.9 涡轮式火箭弹的转速范围——喷管倾斜角的确定	280
第十四章 有控弹一般运动方程组	282
14.1 概述	282
14.2 导弹飞行力学中的惯用坐标系及其相互关系	282
14.3 运动方程	287
14.4 联系方程	288
14.5 诸力和力矩	290
14.6 控制方程	294
14.7 导弹运动方程组	294
14.8 机动性与过载	297
第十五章 有控弹飞行稳定性和操纵性	299
15.1 引言	299
15.2 扰动运动方程组	299
15.3 纵向运动的动态稳定性	302
15.4 有控弹的操纵性	307
15.5 有控滚转火箭的飞行稳定性	311
15.6 有控弹道系统稳定性分析	315
第十六章 外弹道优化理论	318
16.1 概述	318
16.2 变分法简介	318
16.3 变分法的应用举例	322
16.4 最小值原理简介	326
16.5 最小值原理的应用举例	329
16.6 线性系统最优制导律	333
第十七章 无控火箭弹道偏差量及射表编制	337
17.1 序言	337
17.2 主动段的弹道偏差量	338
17.3 被动段的修正系数	344
17.4 偏流简介	348
17.5 火箭射表编制的基本原则	349
主要符号汇编	353



附表	363
附表 1 $\tau-y$	363
附表 2 $\pi(y) = \frac{p(y)}{p_{0n}} = \exp\left(-\frac{1}{R_1} \int_0^y \frac{dy}{\tau}\right)$	364
附表 3 $H(y) = \frac{\rho}{\rho_{0n}}$	365
附表 4 饱和蒸汽压力	366
附表 5 1943 年阻力定律 $C_{xon}(Ma)$	366
附表 6 1943 年阻力定律 $F(v_\tau)$	367
附表 7 $K_1(\mu) = (1-\mu)\ln(1-\mu) + \mu$	371
附表 8 $K_2(\mu) = -\int_{0.01}^{\mu} \frac{d\mu}{\ln(1-\mu)}$	371
附表 9 $L(v) = \int_0^v F(v)dv$	372
附表 10 $R(v) = \frac{L(v)}{v}$	372
附表 11 $\xi(\theta) = \int_0^\theta \frac{d\theta}{\cos\theta} = \ln \frac{1+\sin\theta}{\cos\theta}$	373
附表 12 $\phi(x) = 1-x-\ln 1-x $	379
附表 13 $K_k = \sqrt{\frac{2}{f_1 f_6}}$	381
附表 14 $R(u_0, u) \times 10^5 = 10^5 \int_{u_0}^u \frac{1}{2u} \sqrt{\frac{u_0}{u}} \exp[i(u-u_0)] du$	384
附表 15 $R_L(u_0, u) \times 10^5 = 10^5 \int_{u_0}^u \frac{B_L(y, u)}{2y} dy$	421
附表 16 $\psi_\pi^*(u_0, u) \times 10^3 = \frac{10^3}{2} \int_{u_0}^u \frac{1}{y} [1 - R_R(y, u)] dy$	443
附表 17 $S_C(c, v_0, \theta_0)$	447
参考文献	463

绪 论

火箭外弹道学属于外弹道学的一个组成部分。外弹道学是研究弹箭的运动规律和总体性能的科学。这里的“弹箭”泛指各类有控或无控火箭弹、枪弹和炮弹。有人曾把有控弹道称为“导弹飞行力学”。“火箭外弹道学”或“火箭飞行原理”是研究各类无控和有控火箭的运动规律的。在现代武器不断发展的条件下,有控和无控弹道是不可截然分开的。就无控火箭及炮弹而言,目前已着手采用简易制导,而对有控火箭(导弹)而言,也有一段弹道是无控飞行过程。因此本书在主要论述无控火箭运动的同时,对导弹飞行理论亦作简明阐述。

火箭的运动可区分为质心运动和围绕质心运动(简称绕心运动)两部分。前者主要解决弹道计算问题,后者主要解决飞行稳定性及射弹散布的计算与分析问题。所谓飞行稳定性,大致说来,就是弹箭受到外界干扰因素作用,引起了运动状态的变化;当干扰去掉之后,弹箭能够自身恢复到既定运动状态的能力。对无控火箭弹,保证飞行稳定性的基本条件,就是要求把弹轴与速度矢量之间的夹角(即攻角)数值,限制在额定范围之内,以使弹轴在全弹道上能大致与速度方向一致。对导弹来说,其稳定性乃要求在其飞行过程中,大致沿既定的规律运动;如果外界扰动使其运动状态发生改变,那么导弹将具有迅速消除这一偏差的能力。外弹道学的任务就是具体建立保证飞行稳定性的条件,并寻求飞行不稳定的原因所在。这不仅需要借助外弹道学理论分析,而且需要必要的外弹道试验手段。

现代无控火箭的主要问题是散布较大,保证其飞行稳定性,是力求减小散布的一个必要条件。无控火箭弹保持飞行稳定性的方法,不外乎装设尾翼,或是高速旋转。前者为尾翼式,后者为涡轮式。弹体的气动外形布局,对飞行稳定性的影响很大,因此空气动力学与外弹道学的关系是非常密切的。为了减少散布,还必须在稳定性基础上具体研究各类扰动因素对运动状态的影响规律,从而合理地选取各设计参数。本书将用较大的篇幅研究无控火箭弹的散布理论。

对火箭的弹道计算,必须确定一定的条件,比如气象条件、地理条件及弹道条件(依赖于火箭的参数)。目前弹道计算多是采用电子计算机进行,这样就可以得到准确的结果。然而,近似的解析计算便于分析各种因素间的相互关系,在做估算时比较方便,其重要性也是不可忽视的。就导弹弹道学而言,解析分析法是寻求最优控制弹道的主要手段之一。

综合上述,火箭外弹道学担负的主要任务为:

——根据已知的数据计算弹道,或根据给定的战术技术要求决定弹箭的弹道特性,寻求最佳弹道设计方案;