

兵器科学与技术



国防科工委「十五」规划教材

弹箭外弹道学

● 韩子鹏 等 编著



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



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

弹箭外弹道学

韩子鹏 等 编著



北京理工大学出版社

北京航空航天大学出版社 西北工业大学出版社
哈尔滨工业大学出版社 哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本教材较全面地讲述了无控弹箭和有控弹箭的无控、有控飞行外弹道理论,其中包括:有关地球和大气的知识;弹箭空气动力简介;标准条件下的弹箭质心运动及非标准条件下的弹道修正;旋转稳定和尾翼稳定炮弹的角运动及散布分析;尾翼式火箭和涡轮式火箭的角运动及散布分析;弹箭飞行的线性运动稳定性;弹箭的非线性角运动规律及稳定性;外弹道设计和外弹道试验;底部排气弹和装液弹外弹道;有控弹箭飞行及控制的理论以及一些新型弹箭的外弹道特点。本教材既保留和统一讲述了原有外弹道学和火箭外弹道教材的基本内容,又增加了许多新内容,将传统外弹道学的研究领域拓宽,知识加深,适应了现代弹箭向远程精确打击方向发展的需要。

本教材适用于外弹道、飞行力学、火炮、弹箭、火控、引信、制导、雷达等专业的本科生和研究生的教学,也可供有关专业技术人员和军队干部参考。

图书在版编目(CIP)数据

弹箭外弹道学/韩子鹏等编著. —北京:北京理工大学出版社,2008.7

国防科工委“十五”规划教材. 兵器科学与技术

ISBN 978-7-5640-1618-0

I. 弹… II. 韩… III. ①导弹飞行力学-高等学校-教材②火箭弹
外弹道学-高等学校-教材 IV. TJ760.12 TJ013.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 073576 号

弹箭外弹道学

韩子鹏 主编

责任编辑 唐 爽

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(批销中心) 68911084(读者服务部)

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

北京圣瑞伦印刷厂印制 各地新华书店经销

开本:787×960 1/16

印张:36.75 字数:740千字

2008年7月第1版 2008年7月第1次印刷

印数:3000册.

ISBN 978-7-5640-1618-0 定价:58.00元



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、中北大学、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

弹箭外弹道学是武器系统有关专业共有的一门专业基础课,如火炮和火箭炮、炮弹、火箭弹和航弹、引信、雷达、火控、制导与导航、靶场试验与测控等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,外弹道学的教学和教材建设在培养大学生和研究生及满足相关专业技术人员和机关、军队指挥干部工作需要上是十分重要的。国家和院校也十分重视这方面的教材建设。1978年前后系统地出版了几本外弹道学方面的教材,较全面地讲述了外弹道基本理论,总结此前二十几年在外弹道领域的研究成果,此后于1990年前后又经过了一次再版,内容略有增删,但基本保留了原书的风貌。

但是近20年来由于计算机技术、光电测控技术、信息技术、材料与加工技术的突飞猛进,加上数学力学和控制理论的发展,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,在新一轮教材中必须适应这种变化。根据当前武器系统研制的需要和考虑到今后的发展,为使新的外弹道学教材既能给本科生以系统、丰富的基本知识,满足今后的需要,又能给研究生进行深入理论研究、拓展学术空间打下基础,并能成为工程技术人员的一本有价值的参考书,为此必须对教材的结构和内容进行调整。

首先,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和全程制导的导弹,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、弹道修正或目标敏感的智能化管理、信息化、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,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；主动段筒控火箭利用燃气产生控制力矩，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，先经过自由飞行，再进入惯性制导滑翔增程，最后转入自动导引；制导炸弹常采用捷联惯导+GPS联合制导方式大幅度提高轰炸效果等。

总之，由火炮和火箭炮发射的新型弹箭已不完全是自由飞行了，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、弹道修正段和自动导引段。因此在进行弹道设计计算和分析时既需要无控炮弹外弹道的知识，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成若干门课，分散在几本教材中，公式、符号各成系统，既增大了学习时数，也不利于迅速搞清它们之间的关联，而且实际上由于这些课程在基本理论、处理问题的方法上有许多相同的地方，因而课程内容也会过于重复。因此，本教材根据新型弹箭的弹道特点和发展需要，在结构上作了较大的调整，将火炮外弹道、火箭外弹道、底排外弹道、有控弹飞行理论和知识有机地融合到一起统一讲述，删去彼此重复的部分，突出各自的核心部分，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必要的基础。

在2001年由国防工业出版社出版的俄罗斯鲍曼大学教科书《外弹道学(中译本)》中就已将普通外弹道学、火箭外弹道学、有控弹箭弹道学有关知识都编写在一本教材中，并且还含有末敏弹、弹道修正弹、滑翔增程弹、集束子弹等新型弹箭外弹道知识。近十几年来国际弹道学会论文集中关于新型弹箭外弹道的论文也逐步增多。可见，对本教材作上述结构上的调整，是顺应弹箭发展需求的结果，是十分必要的。

其次，在教材内容选取上，一方面保留和加深了那些十分成熟的、现在还广泛应用、行之有效的基本理论和内容，同时也增加了许多新的内容和成果，如弹箭非线性运动理论，底部排气弹内弹道与减阻率计算，装液弹飞行稳定性理论，末敏弹扫描运动形成及滑翔增程弹弹道方案等内容；另一方面删去了一些现在已经不用了的内容，而代之以相应的新内容，如鉴于计算机的飞速发展，删去了过去外弹道学中占篇幅较大的大多数近似解法和较简单的弹道设计方法而代之以微分方程数字解法、外弹道气动力综合优化设计和外弹道数字仿真等。



最后,本教材中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,如关于弹道一致性检验方法,试验中大误差剔除的准则,目视法估计射弹散布的中间偏差,气象通报的识别和应用,弹道层权的实际应用,风力等级与风速的换算,地面摩擦层风随高度变化的计算方法,不同类型弹箭静稳定度、振荡频率和一些特性数的参考值等。这既方便了工作需要,也有利于使学生早些接触到一些实际工作经验和知识。

另外,外弹道设计计算常要用到一些函数表,如1943年阻力定律表、阻力函数 $G(V)$ 表、大气参数沿高度分布表、火箭弹道特征函数表 $\psi_{\varphi_0}^*$, R_L 、装液弹的本征频率和留数表,还有工作中十分有用的地炮弹道表、高炮弹道表、低伸弹道表等。为了方便应用,这些表在北京理工大学出版社网站(www.bitpress.com.cn)上提供下载。其中三个弹道表以三个弹道计算软件的执行程序方式给出,只要执行该程序,按屏幕提示回答所需计算的初速 v_0 、弹道系数 c_{43} 和射角 θ_0 的范围,就可获得所需弹道诸元的表格。

本教材适合于外弹道、飞行力学、火炮、火箭炮、弹箭、火控、引信、制导、飞行器总体、箭控、雷达等专业本科生及研究生教学使用,同时也可作为有关专业工程技术人员和军队干部参考书。

本教材由韩子鹏等编著,其中赵子华教授编写了第十六章,刘世平研究员参加了第十五章的编写,李磊研究员参加了第十七章的编写,丁松滨博士、舒敬荣博士、张邦楚博士、李臣明博士、曹小兵博士参加了第十九章的编写,俞军教授编写了附录1,其他部分由韩子鹏编写。本教材还大量参阅了国内外专家、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,特在此致以感谢!

由于著者水平有限,缺点和错误在所难免,敬请读者指正。

编著者

2005年9月于南京理工大学

目 录

绪论	1
第一章 有关地球和大气的知识	4
第一节 重力和重力加速度	4
第二节 地球旋转产生的科氏惯性力	6
第三节 大气的组成与结构	7
第四节 虚温、气压、密度、声速和黏性系数沿高度的分布	9
第五节 风的分布	14
第六节 标准气象条件	19
第二章 作用在弹箭上的空气动力学	23
第一节 弹箭的气动外形和两种飞行稳定方式	23
第二节 空气阻力的组成	25
第三节 阻力系数、阻力定律、弹形系数和阻力系数的雷诺数修正	34
第四节 空气阻力加速度,弹道系数和阻力函数	39
第五节 有攻角时弹箭的静态空气动力和力矩	41
第六节 作用在弹箭上的动态空气动力和力矩	51
第七节 作用在有控弹箭上的气动力和力矩	60
第三章 标准条件下弹箭质心运动方程组及弹道特性	71
第一节 基本假设	71
第二节 质心运动方程组的建立	72
第三节 抛物线弹道的特点	75
第四节 空气弹道的一般特性	79
第四章 非标准条件下的质心运动方程组、弹道修正和散布	84
第一节 标准条件和修正理论概述	84
第二节 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	86
第三节 考虑地形、地球条件非标准时的弹箭质心运动方程组	87
第四节 初速、弹重、药温非标准时的微分修正	89
第五节 对气温气压非标准的微分法修正,弹道相似原理	90
第六节 气温气压修正和密度声速修正的匹配问题	94
第七节 对风的修正	96
第八节 弹道准确层权和近似层权	98
第九节 气象探测和气象通报	105

第十节	火炮运动时的修正	109
第十一节	炮耳轴与炮身轴线不垂直及炮耳轴倾斜时的修正	110
第十二节	弹道散布及其影响因素分析	113
第十三节	火箭弹道修正和低空弹道风计算	116
第五章	弹道解法	120
第一节	弹道方程的数值解法	120
第二节	弹道表解法	121
第三节	级数解法	123
第四节	直射距离和有效射程	126
第六章	弹箭刚体弹道方程的建立	127
第一节	坐标系及坐标变换	127
第二节	弹箭运动方程的一般形式	132
第三节	有风情况下的气动力和力矩分量的表达式	137
第四节	弹箭的6自由度刚体弹道方程	141
第五节	弹箭的角运动方程及角运动的几何描述	143
第七章	旋转稳定弹的角运动及对质心运动的影响	150
第一节	引言	150
第二节	弹箭速度和转速的变化	150
第三节	攻角方程齐次解的一般形式——二圆运动	153
第四节	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	157
第五节	起始扰动对初速方向的影响——气动跳角	162
第六节	起始扰动对质心运动轨迹的影响——螺线弹道	166
第七节	攻角方程的非齐次解——重力产生的动力平衡角	168
第八节	简化刚体运动方程	175
第九节	动力平衡角对弹道轨迹的影响——偏流	176
第十节	修正质点弹道方程	178
第十一节	考虑全部外力和力矩时起始扰动产生的角运动	180
第十二节	非对称因素产生的角运动及对质心运动的影响	182
第十三节	风引起的角运动及对质心运动的影响	186
第八章	尾翼稳定弹的角运动及对质心运动的影响	189
第一节	概述	189
第二节	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	189
第三节	低旋尾翼弹的导转和平衡转速	193
第四节	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	194
第五节	尾翼弹的动力平衡角及偏流	196
第六节	尾翼弹由非对称性产生的角运动及对质心运动的影响	198
第七节	风引起的角运动及对质心运动的影响	200

第九章 火箭运动方程组的建立	202
第一节 概述	202
第二节 推力、比冲、喷管导转力矩、推力偏心力矩和推力侧分力	205
第三节 火箭作为变质量物体的质心运动方程和转动运动方程	209
第四节 火箭刚体运动方程组	210
第五节 火箭的角运动方程组和攻角方程	215
第十章 尾翼式火箭的角运动和散布分析	219
第一节 角运动方程的齐次解——起始扰动产生的角运动和散布	219
第二节 推力偏心产生的角运动和散布	230
第三节 风对火箭角运动的影响和散布计算	240
第四节 动不平衡引起的角运动和散布	246
第十一章 旋转稳定火箭的角运动和散布分析	248
第一节 概述	248
第二节 起始扰动引起的角运动和散布	248
第三节 推力偏心引起的角运动和散布	253
第四节 风引起的角运动和散布	255
第五节 动不平衡的影响	258
第十二章 弹箭的飞行稳定性	260
第一节 弹箭飞行稳定性的基本概念	260
第二节 静稳定、陀螺稳定和动态稳定	261
第三节 动态稳定性判据	263
第四节 弹箭在曲线弹道上的追随稳定性	270
第五节 低速旋转尾翼弹的共振不稳定	271
第六节 转速闭锁与灾变性偏航	273
第十三章 弹箭的非线性运动及稳定性	281
第一节 弹箭非线性运动概述	281
第二节 尾翼弹平面非线性运动的极限环	285
第三节 强非线性静力矩作用下的椭圆函数精确解	291
第四节 振幅平面法 尾翼弹的极限平面运动	296
第五节 非旋转弹的极限圆锥运动	302
第六节 在非线性马格努斯力矩作用下弹箭的运动及稳定性	307
第七节 尾翼式低速旋转弹箭的非线性强迫运动	313
第十四章 外弹道设计	321
第一节 概述	321
第二节 旋转稳定炮弹的火炮膛线缠度设计	322
第三节 涡轮式火箭喷管倾斜角设计	326
第四节 尾翼炮弹和火箭静稳定性和转速的选择	327

第五节	火箭推力加速度与初速匹配的问题	330
第六节	地面火炮初速级的确定	335
第七节	外弹道优化设计与仿真	336
第十五章	外弹道试验和射表编制	342
第一节	概述	342
第二节	外弹道试验常用测试仪器和测试原理	342
第三节	外弹道试验项目、中间误差估计和反常结果剔除	355
第四节	从自由飞行试验数据提取空气动力系数的方法(Chapman-kirk 方法或参数微分法)	361
第五节	射表编制	367
第六节	平均弹道一致性和通用射表问题	375
第十六章	底部排气弹的弹道计算与分析	379
第一节	引言	379
第二节	底排装置内弹道理论和计算方法	380
第三节	底部排气减阻机理与底排减阻率计算	388
第四节	底部排气弹的弹道计算与弹道性能分析	395
第十七章	装液弹外弹道	401
第一节	概述	401
第二节	旋转装液弹的陀螺稳定性	403
第三节	圆柱容腔装液弹内液体运动的本征频率	405
第四节	斯图瓦特森不稳定性判据,留数公式	416
第五节	黏性修正、容腔形状修正和有中心爆管情况	420
第十八章	弹箭有控飞行的知识	429
第一节	控制飞行的一般知识	429
第二节	有控弹箭运动方程的建立	434
第三节	弹箭作为可操纵质点的运动方程,理想弹道	439
第四节	过载与机动性	440
第五节	方案飞行弹道	444
第六节	导引弹道的运动学分析	447
第七节	有控弹箭纵向扰动运动方程的建立及线性化	467
第八节	纵向动力系数、状态方程和特征根	470
第九节	纵向自由扰动运动两个阶段和短周期扰动运动方程	473
第十节	纵向短周期扰动运动的特点、传递函数和频率特性	475
第十一节	舵面阶跃偏转时导弹的纵向响应特性	483
第十二节	导弹侧向扰动运动方程和传递函数	489
第十三节	侧向自由扰动运动的特点和稳定性	492
第十四节	侧向扰动运动方程的简化和解耦	497
第十五节	弹箭运动的自动稳定与控制	499

第十六节	运动学环节传递函数、重力补偿和动态误差补偿	509
第十七节	单通道旋转弹箭的周期平均控制力和周期平均气动力	513
第十八节	有控弹箭飞行的计算机仿真和半实物仿真简介	519
第十九章	新型弹箭外弹道	523
第一节	概述	523
第二节	末敏弹外弹道	523
第三节	弹道修正弹外弹道	530
第四节	滑翔增程弹箭外弹道	539
第五节	筒控火箭、远程炮弹和制导航弹的弹道特点	549
附录和附表		553
附录 1	格林函数法与常数变易法的关系	553
附表 1	1943 年阻力定律 $C_{x_{on}}(Ma)$	555
附表 2	$G(v)$ 函数表(43 年阻力定律)	556
附表 3	饱和水汽压计算表	557
附表 4	我国标准大气简表(30 km 以下部分)	558
附表 5	1976 年美国标准大气简表(30~80 km 部分)	559
附表 6(a)	火炮直射程 $X_{直}$ 表(43 年阻力定律)	559
附表 6(b)	火炮直射角 $\theta_{0直}$ 表(43 年阻力定律)	560
附表 7(a)	最大射程 X_m 表	561
附表 7(b)	最大射程角 θ_{0xm} 表	561
附表 8	火箭外弹道 B_R, B_I 函数表	562
附表 9	火箭外弹道 $B_{R\infty}, B_{I\infty}$ 函数表	563
附表 10	火箭外弹道 R_L 函数表	565
附表 11	装液弹的斯图尔特森表	566
附表 12	中心爆管表	566
参考文献		568

供下载附表和弹道表计算执行程序目录^①

除上列的 12 个附表详细内容外,还有地炮弹道表计算程序、低伸弹道表计算程序、高炮弹道表计算程序、火箭外弹道 $B_R, B_I, B_{R\infty}, B_{I\infty}$ 函数计算程序、火箭外弹道 R_L 函数计算程序、斯图瓦特森表计算程序。

^① 请在北京理工大学出版社网站 (www.bitpress.com.cn)“弹箭外弹道学”函数表和计算程序,或发 E-mail 至 hanzipeng802@sina.com,向南京理工大学 802 教研室作者索要。

绪 论

弹箭外弹道学是研究弹箭在空中运动规律、飞行特性、相关现象及其应用的一门学科。

这里的弹箭泛指无控和有控炮弹、火箭、炸弹、灵巧弹等发射体。

作为刚体的弹箭在空中的飞行运动包括弹箭的质心运动和绕质心的转动。质心在空间的位置用三个坐标确定,质心的运动规律取决于作用在弹上的力,包括重力、发动机推力、空气动力等,质心运动的轨迹称为弹道。弹体在空间的方位用三个角度或称三个角坐标确定,通常其中两个是弹轴相对于地面坐标系的高低角和方位角,另一个是弹箭绕弹轴自转的自转角。三个角坐标的变化就可描述弹箭绕地面坐标系或绕质心的转动,转动规律取决于作用在弹箭上的力矩,包括空气动力矩、发动机推力对质心的力矩以及操纵力矩等。

但质心运动与绕质心的转动是互相影响的。当推力沿弹轴,而弹轴与质心速度方向保持一致时,可将弹箭看作一个质点,不考虑绕质心的转动,空气动力中只有与速度方向相反的阻力。然而,实际上弹箭飞行时弹轴并不能始终保持与速度方向一致,二者之间的夹角 δ 称为攻角,由于攻角的出现,增大了阻力,并且产生了升力、侧力以及对质心的空气动力矩,它们不仅改变了质心速度的大小和方向,而且引起弹箭绕质心的转动,改变了弹轴的方位,引起攻角变化,从而又使空气动力、推力和空气动力矩的大小及方向变化,进一步影响质心运动和绕质心的转动。如此反复交错使质心运动与绕质心的转动互相影响。

如果弹箭飞行中保持攻角 δ 很小(如小于 10°),则弹头与速度方向基本一致,弹箭就能平稳地向前飞行,我们称弹箭的运动是稳定的;反之,如果攻角很大,甚至越来越大,则称弹箭飞行是不稳定的。飞行不稳定的弹箭会使射程大减,飞行性能变坏,弹道散布增大,严重时甚至弹底着地不发火或在空中翻跟头坠落。因此,保证弹箭飞行稳定性是弹箭外弹道学研究的一个重要内容。

在攻角 δ 较小的情况下,空气动力和力矩是攻角 δ 的线性函数,弹箭空间运动的攻角变化方程是线性的,由此得出的稳定性条件是线性运动稳定条件,如陀螺稳定性、动态稳定性、追随稳定性、共振不稳定性等;如果考虑大攻角情况下空气动力和力矩的非线性,则弹箭的攻角变化方程是非线性的,弹箭非线性运动及其稳定性与线性运动稳定性有较大的差别,如其运动形态和稳定性与起始条件有关,存在非零的极限运动以及振动频率与振幅有关是最大的特点。在实际弹箭飞行中出现的一些奇怪现象,如出现极限圆锥摆动,舰艇上左发射火箭飞行稳定、右发射火箭飞行不稳定等,用线性理论解释不了,而非线性理论就可以得到解释,从而可进行运动规律预测和改变运动形态的气动力设计。

在飞行稳定的前提下,质心运动弹道决定了弹箭的射程、侧偏、最大弹道高、至落点或弹着



点的飞行时间、落点处速度大小及对目标的命中角等。对于弹箭设计这些是最重要的弹道数据指标,对于武器系统的作战使用,这些是最重要的弹道诸元。因此,研究准确实用的弹道数学模型,解决弹道计算、试验射程标准化、射表编制和火控弹道模型的建立是弹箭外弹道的重要任务。但是质心的弹道既与发射参数、发动机参数及起始条件有关,又与弹箭结构参数(例如弹重、重心位置、转动惯量、外形尺寸等)、空气动力参数(阻力、升力、力矩等)以及大气参数(如气温、气压、湿度、风等)有关。就各发弹而言这些参数是不可能完全相同的,而都是在其平均值附近随机变化的,这就形成弹道落点(或弹着点)的随机变化,我们称这种现象为射弹散布或弹道散布。弹道散布将影响到武器系统对目标的命中概率和毁伤概率以及毁伤目标所需弹药消耗量。如何减小由随机因素造成的弹道散布是弹箭外弹道的又一项重要研究内容,它甚至成了火箭外弹道研究的核心。显然,弹道散布不仅与弹箭本身有关,也与火炮或发射装置(它也可产生初速和射角的随机变化)有关,因而射弹散布是整个武器系统的,只是系统内各部分引起的散布在总散布中所占比例不同。根据对武器系统总散布的限制分配给弹、炮、火控等分系统以散布大小限制,这是武器系统精度分配中的一项重要工作,弹箭外弹道学在这个工作中也起着重要作用。

因此,弹箭外弹道学要研究弹箭飞行完整的和适用于各种不同应用下情况简化的弹道数学模型,建立弹箭飞行稳定性理论和进行散布分析,这是进行武器系统弹道计算、弹道设计、弹箭设计、射表编制、火控系统弹道数学模型建立、精度分配和分析的基础,也是弹箭外弹道学的一些重要应用,它们一起构成了弹箭外弹道学最基本的内容。

装有液体的弹箭不能简单地采用单纯刚体弹箭的外弹道理论,还必须用到充液刚体动力学理论,考虑弹腔内液体在弹体扰动下激起的运动以及液体运动对弹体的反作用,这时弹箭的运动方程除了一组刚体运动方程,还有一组流体运动方程,使问题在理论上变得复杂起来。幸运的是对于轴对称容腔高速旋转弹,当容腔内液体通过壁面摩擦带动随弹体一起做刚体旋转时,理论分析表明,弹体的摆动激起腔内液体的振动,具有许多本征频率,当其中之一与弹体俯仰频率相同时会产生很大的液体反作用力矩,即发生共振,这是造成装液弹飞行不稳的主要原因。由于本征频率只与容腔尺寸和液体装填率有关,这使得防止装液弹飞行不稳的工程设计变得简单可行,在本教材中主要介绍了液体本征频率和装液弹飞行不稳定条件的推导,并作了一些应用举例。

现代战争不断地要求弹箭增大射程,提高精度和威力,因此,研究弹箭增程理论和技术,进行弹箭信息化、灵巧化、制导化,实现精确打击是当今国际上弹箭发展的总趋势。在增程方面出现了诸如火箭增程、底部排气增程、滑翔增程、冲压发动机增程以及复合增程等弹箭,这使弹箭的飞行与发动机工作原理、底部排气内弹道、滑翔与自动控制理论紧密地联系到一起。此外由于远程火箭(150~300 km)的弹道高早已超过 30 km,在大高度上空气稀薄,气动力如何计算,标准气象条件如何确定,大高度范围内的弹道特性和飞行性能如何进行设计都成了外弹道学的新课题,极大地推动了外弹道学的发展。本教材在有关章节里作了一些初步介绍。



在精确打击方面出现了诸如末敏弹、弹道修正弹、主动段简易控制火箭、制导和末制导炮弹、制导炸弹、布撒器、惯性导航加末段修正远程火箭等新型弹箭,它们已与传统的弹箭有了很大的差别,其信息含量、技术含量大为提高,其飞行理论除了要用到力学知识,还需要控制、制导方面的知识,这大大促进了外弹道学与飞行力学之间的融合和渗透。

但应指出的是,弹箭精确化并不是要将普通弹箭都改成一般意义上的导弹。首先是各种新型弹箭仍以普通的火炮、火箭炮等为发射平台,要求其具有体积小,抗高过载能力强的特点;此外还应价格低廉,在战场上可以(与导弹相比)大量使用形成压制火力。因此精确化弹箭与导弹并不是谁可以取代谁的问题,而是在战场上需要互为补充的问题。

进行弹箭外弹道的理论研究、武器系统弹道参数测量及飞行性能评估、型号产品的研制和验收、射表编制等都离不开外弹道试验和测量。因此,外弹道测试技术、测试方法、测试仪器的研究和测试数据的处理等形成了实验外弹道学,它与弹箭外弹道学的理论研究相辅相成,从射击试验数据采用参数辨识技术提取空气动力的方法已成为除风洞吹风法和数值算法获取空气动力系数以外的第三种方法。由于实验外弹道学也是一门独立的学科,内容丰富而且所需知识面广,所以本教材中只能作一简单、综合性的介绍。

综上所述,弹箭外弹道是武器系统设计计算、性能分析、产品研制、定型和作战使用的一门基础课。炮弹、火箭、导弹、引信、火炮、火控、指控、雷达、制导与导航等专业都不同程度需要弹箭外弹道学知识,而学习这门课又需要数学、刚体力学、弹性体力学、流体力学、空气动力学、发动机原理、自动控制理论、地球与大气物理学等方面的知识。因此,为了学好这门课应经常地复习有关基础知识。

在计算机技术、弹道测试技术、控制理论及控制系统元器件、数学、力学进步的基础上,在强有力的军事需求牵引下外弹道学也得到很大的发展,从质点弹道、刚体弹道发展到弹性体弹道、充液刚体弹道和有控弹道,从线性角运动理论发展到非线性角运动理论,从单纯刚体弹道发展到有发动机工作、底排药剂燃烧、修正力间或作用的复合作用原理弹道,从单一弹箭参数设计到多参数综合优化设计和最优过程设计等都体现了弹箭外弹道学与时俱进的特点,它在武器系统研制和使用中将起越来越重要的作用,并得到更加深入、广泛的发展。

本教材采用由浅入深的方式,首先介绍地球、大气、空气动力方面的基础知识,再讲述标准条件下的质点弹道和非标准条件下的弹道修正,然后考虑无控弹箭绕质心的角运动规律和飞行稳定性、散布特性。在此基础上讲述了弹道设计、外弹道试验和射表编制以及底部排气弹、装液弹的特殊外弹道理论,最后讲述了有控弹箭飞行理论的主要内容,随时指出它与无控弹箭外弹道理论的区别与联系,便于读者在研究大多数无控弹道与有控弹道并存的新型弹箭时恰当地、融会贯通地应用这些理论。至于一些新型弹箭的弹道特点,因为还正在研究中,只能作一些简单的介绍。

第一章 有关地球和大气的知识

弹箭在地球周围大气里飞行,受到地心引力和空气动力的作用。因此,要想把弹箭的各种飞行特性搞清楚,必然涉及地球和大气方面的知识。本章将集中介绍其中在外弹道学和飞行力学中所必需的有关部分,为顺利讲述全书理论作好准备。

第一节 重力和重力加速度

牛顿第二定律指出:物体质量 m 与其加速度 a 的乘积等于物体所受的外力 F ,即

$$ma = F \quad (1.1.1)$$

但此定律是对惯性坐标系而言的,即在静止坐标系或作匀速直线运动的坐标系内才是正确的。由于我们关心的是弹箭相对于地球的运动,而地球不仅绕极轴自转,同时还绕太阳公转,因此与地球固连的坐标系都不是惯性坐标系,在此坐标系里不能直接应用牛顿第二定律。

由于地球距太阳很远,绕太阳转一周需一年,与炮弹飞行时间相比这个周期太长,角速度太小,在弹箭飞行时间内完全可以将地球绕太阳的公转看作是匀速直线运动,故可略去地球绕太阳公转的影响。然后再从地球中心引出三条坐标轴指向宇宙空间遥远的三个恒星,于是由此三轴组成的坐标系可以看作是惯性坐标系,而地球相对于此惯性坐标系绕极轴做定轴旋转。

在这个惯性坐标系里就能运用牛顿第二定理。但我们需要的是弹箭相对于不断旋转着的地球的运动,故需将地球取作动坐标系,求得在动坐标系里的弹箭运动。根据理论力学知,弹箭对于惯性坐标系的绝对加速度 a 应等于弹箭相对于动坐标系的相对加速度 a_r 与由于动坐标系旋转产生的牵连加速度 a_e 以及科氏加速度 a_k 三者之和,故方程(1.1.1)可写成

$$m(a_r + a_e + a_k) = F_R + F_i \quad (1.1.2)$$

式中, F_R 为指向地心的引力; F_i 为其他的外力。将弹箭相对于地球的速度以 v_r 表示,则

$$a_r = d\mathbf{v}_r/dt, \quad a_k = 2\boldsymbol{\Omega}_E \times \mathbf{v}_r \quad (1.1.3)$$

式中, $\boldsymbol{\Omega}_E = 7.2922 \times 10^{-5}$ (1/s) 为地球自转角速度,而由地球旋转产生的牵连加速度 a_e 是垂直于极轴并指向极轴的向心加速度,如图(1.1.1)所示。于是得

$$m \frac{d\mathbf{v}_r}{dt} = (F_R - ma_e) - ma_k + F_i \quad (1.1.4)$$

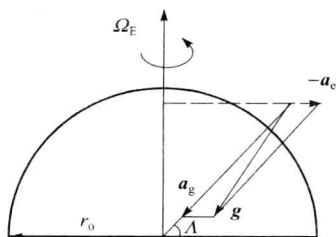


图 1.1.1 重力的组成