

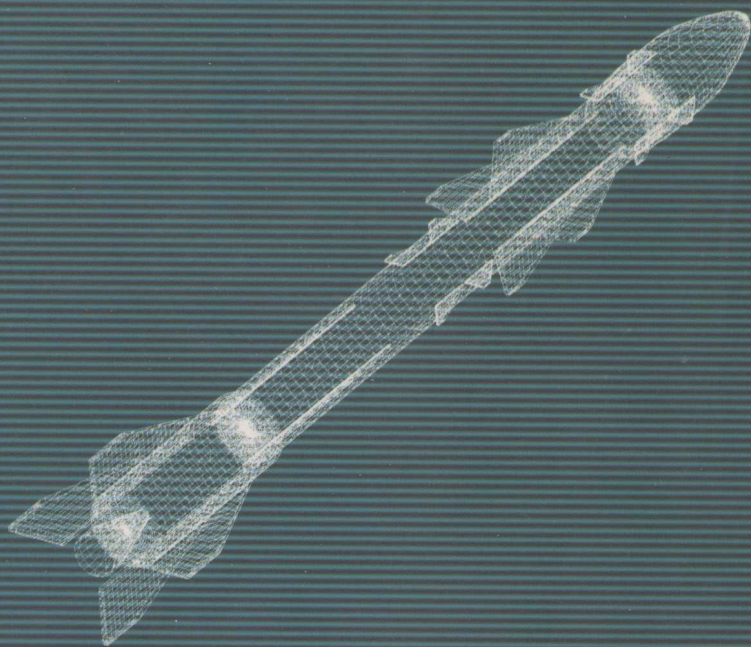
航空宇航科学与技术



国防科工委「十五」规划
教材

有翼导弹飞行动力学

●李新国 方群 编著



北京工业大学出版社

北京航空航天大学出版社

哈尔滨工业大学出版社

北京理工大学出版社

哈尔滨工程大学出版社

内容简介

本书从理论和实践结合的角度,系统地介绍了有翼导弹飞行动力学的基本理论和方法。全书分为上、下两篇。上篇介绍有翼导弹的弹道学问题,包括气动力计算、导弹运动方程组、导引方法、弹道设计和飞行轨迹仿真等;下篇介绍有翼导弹动态特性分析方法,包括扰动运动方程组、稳定性和操纵性分析等内容。

本书主要作为高等院校飞行器设计和相关专业的本科生、研究生教材,也可供从事导弹设计和控制的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

有翼导弹飞行动力学/李新国,方群编著. —西安:西北工业大学出版社,2004.10
国防科工委“十五”规划教材. 航空宇航科学与技术
ISBN 7-5612-1806-0

I. 有… II. ①李…②方… III. 有翼运载火箭—飞行力学—高等学校—教材 IV. V475.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 064112 号

有翼导弹飞行动力学

李新国 方群 编著

责任编辑 傅高明 雷 军

责任校对 高立新

西北工业大学出版社出版发行

西安市友谊西路 127 号(710072)

发行部电话:029-88493844 88491757

<http://www.nwpup.com>

陕西向阳印务有限公司印制 各地书店经销

开本:787 mm×960 mm 1/16

印张:21.625 字数:536 千字

2005 年 1 月第 1 版 2005 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~3 000 册

ISBN 7-5612-1806-0 定价:30.00 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 陈光禡

陈国平 陈懋章 庞思勤 武博祎 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。党的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、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 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

面对飞行力学学科的飞速发展和 21 世纪我国导弹的发展方向以及应用背景,现有的有关导弹飞行力学书籍和教材已经不能满足培养适应 21 世纪导弹设计高水平人才的需要,也不能适应飞行力学专业及其相关专业的大纲和学时要求。因此,编写、出版以满足和适应国家为培养导弹设计人才所急需的导弹飞行力学教材迫在眉睫。同时,本书还可作为现已从事导弹设计的研究人员进行科学研究的参考书籍。

本书涉及有翼导弹研究、设计、试验和应用中主要的飞行动力学理论和方法。研究对象以近程有翼导弹为主,研究内容包括:有关导弹运动轨迹的基本概念;导弹作为有控飞行器作用在其上的作用力和力矩特性分析;建立导弹运动方程组的方法,导弹运动的数学模型;过载的概念及其与导弹设计的关系;各种导引规律的弹道特性分析;飞行轨迹优化设计方法;弹体动态特性分析的基本概念;导弹纵向扰动运动模型的建立及处理方法;导弹弹体的纵向动态特性分析;导弹弹体的侧向动态特性分析;倾斜运动的自动稳定;纵向运动的自动稳定与控制;导引飞行的动态特性;工程实际中应用飞行力学解决典型问题的范例;导弹飞行动力学的一些特殊问题。

本书注重理论联系实际,且包含的内容比较全面。与已有的类似专著和教材相比,增添了一些既能启发和开阔学生思路,又能对设计高技术含量的导弹有较高的实际指导意义和参考价值的内容。如:弹道计算常用算法、飞行视景仿真、虚拟样机、蒙特卡洛模拟打靶、最优导引律等等。在编写过程中力求循序渐进、内容全面、论述严谨、实用性强。本书既可作为航空航天高等院校、军事院校飞行力学及其相关专业本科生教材,又可作为有关专业的教师、学生以及研究生的参考书,还可作为从事导弹研



究、设计、试验和应用单位的飞行力学、自动控制、总体设计以及其他有关专业工程技术人员的主要参考书和常用手册使用。

本书第1~5章由李新国编写,第6~11章由方群编写,全书由李新国统稿。在编写过程中,得到了西北工业大学航天工程学院飞行轨迹与仿真实验室、GPS研究中心的教师和研究生的大力支持,在此表示衷心的感谢!

编著者

2004年5月于西北工业大学

目 录

上篇 有翼导弹弹道学

绪 论	2
第 1 章 导弹飞行的力学环境	4
1.1 空气动力	4
1.2 气动力矩、压力中心和焦点	9
1.3 俯仰力矩	10
1.4 偏航力矩	16
1.5 滚转力矩	17
1.6 铰链力矩	22
1.7 推力	22
1.8 重力	23
思考题 1	25
第 2 章 导弹运动方程组的建立	26
2.1 导弹运动的建模基础	26
2.2 常用坐标系及其变换	28
2.3 导弹运动方程组	37
2.4 导弹运动方程组的简化与分解	49
2.5 导弹的质心运动	53
2.6 过载	58
思考题 2	63
第 3 章 方案飞行与方案弹道	65
3.1 铅垂平面内的方案飞行	65
3.2 水平面内的方案飞行	74
3.3 方案飞行应用实例	81
思考题 3	83
第 4 章 导引飞行与弹道	84
4.1 导引飞行综述	84
4.2 追踪法	88
4.3 平行接近法	94



4.4 比例导引法	97
4.5 三点法导引	102
4.6 前置量法	109
4.7 导引飞行的发展	112
4.8 最优制导律	114
思考题 4	118
第 5 章 弹道计算与飞行仿真	120
5.1 仿真的基本概念	120
5.2 弹道仿真的基本方法	122
5.3 插值方法	127
5.4 蒙特卡洛模拟打靶	129
5.5 飞行视景仿真	136
5.6 飞行器设计与试验的虚拟样机技术	145
思考题 5	150

下篇 有翼导弹动态特性分析

第 6 章 导弹动态特性分析的基本概念	152
6.1 引言	152
6.2 导弹动态特性分析中的典型问题	153
6.3 干扰力和干扰力矩	153
6.4 导弹的稳定性和操纵性	159
6.5 导弹运动方程的线性化	163
思考题 6	174
第 7 章 导弹纵向扰动运动方程组的建立及求解	176
7.1 纵向扰动运动的数学模型	176
7.2 计算纵向扰动运动的解析方法	182
7.3 纵向特征方程及其根值	186
7.4 导弹纵向传递函数	193
思考题 7	196
第 8 章 导弹纵向扰动运动动态性质的分析	197
8.1 扰动运动的稳定域	197
8.2 导弹纵向自由扰动运动的特点	199
8.3 导弹纵向短周期扰动运动的分析	208
8.4 纵向短周期扰动运动的传递函数	215
8.5 舵面阶跃偏转时导弹的纵向操纵性	221
思考题 8	



第 9 章 导弹弹体的侧向动态特性	229
9.1 侧向扰动运动的数学模型	230
9.2 侧向扰动运动的模态	235
9.3 导弹弹体的侧向稳定边界图及其讨论	242
9.4 导弹弹体的侧向扰动运动的传递函数	252
9.5 轴对称导弹侧向扰动运动的特性	258
思考题 9	262
第 10 章 导弹扰动运动的自动稳定与控制	263
10.1 倾斜运动的自动稳定	263
10.2 纵向运动的自动稳定与控制	278
10.3 自动驾驶仪惯性对纵向扰动运动的影响	289
10.4 纯积分形式的调节规律	293
10.5 法向加速度反馈的纵向动态特性分析	296
10.6 飞行高度的稳定与控制	299
思考题 10	305
第 11 章 导引飞行的动态特性分析	306
11.1 自动导引飞行	306
11.2 自动导引的运动学传递函数	308
11.3 自动导引扭角计算和分析	313
11.4 遥控飞行	316
11.5 遥控的运动学传递函数	319
11.6 遥控空间扭角的计算和动态分析	323
11.7 遥控导引的重力影响和动态误差	329
参考文献	332

上 篇

有翼导弹弹道学

绪论

自从 1903 年美国莱特兄弟完成了人类第一次重于空气的飞行器动力飞行以来,飞行安全性、飞行器的稳定性与操纵性成为人们普遍关注的问题,由此出现了飞行力学。第二次世界大战以前的飞行器主要是一些低速飞机,因而,飞机飞行力学得到了很大的发展。但是,当时的飞行力学还附属在空气动力学里面,是空气动力学的一部分。第二次世界大战期间和战后,在高性能飞机、导弹、制导兵器、无人驾驶飞行器、人造地球卫星和航天器发展的带动下,在 20 世纪 40~60 年代,飞行力学获得了突飞猛进的发展,形成了相对独立的分支,如飞机飞行力学、直升机飞行力学、火箭动力学、有翼导弹飞行力学、航天动力学、宇宙飞行力学等等。从传统的飞行力学发展到有控飞行力学再发展到计算飞行力学,飞行力学学科的发展实现了两次大的飞跃,经历了三个大的阶段,已成为人类解决飞行问题的强有力的工具。从 20 世纪 50 年代中期至今,在导弹事业迅速发展的引导下,我国导弹飞行力学得到了空前的发展,为型号的研制和应用解决了大量的飞行力学课题。飞行力学作为指导飞行器研制和应用的理论基础,一方面,在飞行器发展的“需求牵引”下,学科本身获得了空前的发展;另一方面,作为一门专业学科,飞行力学对飞行器的发展又发挥了巨大的“专业推动”作用。现在,飞行力学已经发展成为一门研究飞行器运动规律的边缘交叉的应用力学学科。

导弹飞行力学是一门研究导弹运动规律的学科,属一般力学范畴。按气动外形不同,导弹可分为有翼和无翼两大类,有翼导弹一般在大气中飞行。有翼导弹飞行力学主要研究有翼导弹在大气中的飞行力学问题。

导弹飞行时,既有导弹整体的运动,又有部件(如舵面、陀螺等)和喷流介质的相对运动,因此,导弹飞行问题的研究是非常复杂的。为了方便起见,通常将其分为三个阶段进行研究。

第一阶段,将导弹视为一个变质量的可控质点。该质点的质量等于导弹的瞬时质量,作用在质点上的力包括重力、发动机推力和空气动力;导弹控制系统用理想操纵关系式来描述。经过上述简化处理后,关于导弹运动的研究,就是通常所说的弹道学。它是导弹技术/战术指标和系统设计的基础。

第二阶段,将导弹作为质点系(或刚体)进行研究。此时,我们所关心的是导弹弹体对操纵机构(如升降舵、方向舵和副翼等)偏转和各种外界干扰(干扰力和干扰力矩)作用的反应,也就是导弹的操纵性和稳定性问题。这一部分内容称为动态特性分析。它是导弹控制系统设计与分析的前提条件。

第三阶段,将导弹作为可控对象,研究整个制导系统闭合回路的特性,即导弹飞行的准确度。此时,需要考虑的问题很多,如:控制系统元/部件的误差、非线性环节、随机干扰因素、弹



体的惯性、导引误差等等,甚至还要考虑弹体的弹性变形、储箱液体的晃动等问题。本书主要研究第一、二两个阶段的一些问题,即关于弹道学和动态特性分析的内容。

有翼导弹飞行动力学是一门应用学科,它以数学、理论力学、空气动力学、控制理论和计算机技术为理论基础和研究手段;同时,它也是一门重要的专业基础课。对于从事导弹总体设计和导弹控制系统设计的专业人员而言,飞行力学是必修课。

飞行力学的研究方法可分为理论研究和试验研究两大类。试验研究又包括仿真试验和飞行试验。本书内容以理论研究为主,关于试验研究方面的内容不多,只是在第 5 章简单地介绍了进行数字计算机仿真试验的一些初步知识。

第 1 章 导弹飞行的力学环境

在飞行过程中,作用在导弹上的力主要有空气动力、发动机推力和重力。

空气动力(简称为气动力)是空气对在其中运动的物体的作用力。当可压缩的黏性气流流过导弹各部件的表面时,由于整个表面上压强分布的不对称,出现了压强差;空气对导弹表面又有黏性摩擦,产生黏性摩擦力。这两部分力合在一起,就形成了作用在导弹上的空气动力。

推力是发动机工作时,发动机内燃气流高速喷出,从而在导弹上形成与喷流方向相反的作用力。它是导弹飞行的动力。

作用于导弹上的重力,严格地说,应是地心引力和因地球自转所产生的离心惯性力的合力。

空气动力的作用线一般不通过导弹的质心,因此,将形成对质心的空气动力矩。

推力矢量通常与弹体纵轴重合。若推力矢量的作用线不通过导弹的质心,还将形成对质心的推力矩。

本章将扼要介绍作用在导弹上的空气动力、空气动力矩、推力和重力的有关特性。

1.1 空气动力

一、两个坐标系

空气动力的大小与气流相对于弹体的方位有关。其相对方位可用速度坐标系和弹体坐标系之间的两个角度来确定。习惯上常把作用在导弹上的空气动力 R 沿速度坐标系的轴分解成三个分量来进行研究。而空气动力矩 M 则沿弹体坐标系的轴分解成三个分量。因此,下面先介绍两个与导弹速度矢量及弹体相联系的坐标系。

1. 速度坐标系 $Ox_3y_3z_3$

原点 O 取在导弹的质心上; Ox_3 轴与导弹速度矢量 V 重合; Oy_3 轴位于弹体纵向对称面内与 Ox_3 轴垂直,向上为正; Oz_3 轴垂直于 x_3Oy_3 平面,其方向按右手定则确定(见图 1.1)。此坐标系与导弹速度矢量固联,是一个动坐标系。

2. 弹体坐标系 $Ox_1y_1z_1$

原点 O 取在导弹的质心上; Ox_1 轴与弹体纵轴重合,指向头部为正; Oy_1 轴在弹体纵向对称平面内,垂直于 Ox_1 轴,向上为正; Oz_1 轴垂直于 x_1Oy_1 平面,方向按右手定则确定(见图 1.1)。此坐标系与弹体固联,也是动坐标系。

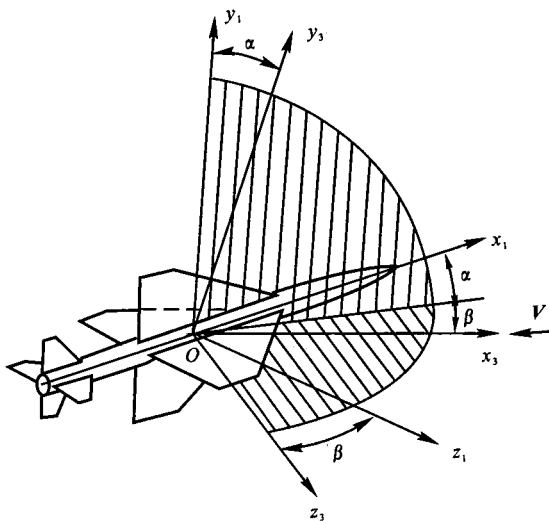


图 1.1 速度坐标系与弹体坐标系

3. 速度坐标系与弹体坐标系之间的关系

由上述坐标系的定义可知,速度坐标系与弹体坐标系之间的相对关系可由两个角度确定(见图 1.1),分别定义如下:

攻角 α : 速度矢量 V 在纵向对称平面上的投影与纵轴 Ox_1 的夹角,当纵轴位于投影线的上方时,攻角 α 为正;反之为负。

侧滑角 β : 速度矢量 V 与纵向对称平面之间的夹角,若来流从右侧(沿飞行方向观察)流向弹体,则所对应的侧滑角 β 为正;反之为负。

二、空气动力的表达式

空气动力 R 沿速度坐标系分解为三个分量,分别称之为阻力 X (沿 Ox_3 轴负向定义为正)、升力 Y (沿 Oy_3 轴正向定义为正)和侧向力 Z (沿 Oz_3 轴正向定义为正)。实验分析表明:空气动力的大小与来流的动压头 q 和导弹的特征面积(又称参考面积) S 成正比,即

$$\left. \begin{aligned} X &= C_x q S \\ Y &= C_y q S \\ Z &= C_z q S \\ q &= \frac{1}{2} \rho V^2 \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中, C_x, C_y, C_z 为无量纲比例因数,分别称为阻力系数、升力系数和侧向力因数(总称为气动因数); ρ 为空气密度; V 为导弹飞行速度; S 为参考面积,通常取弹翼面积或弹身最大横截