

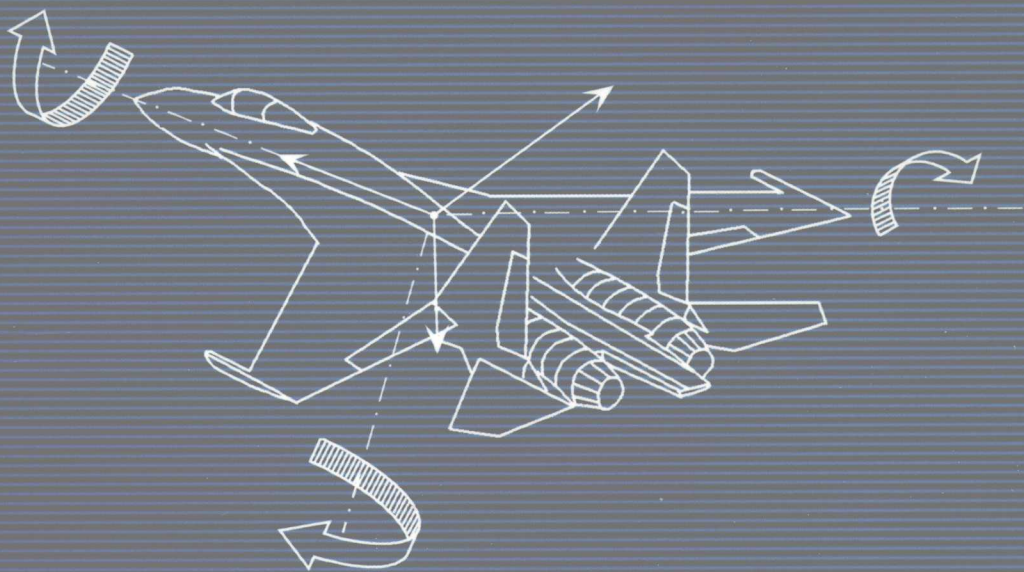
航空宇航科学与技术



国防科工委「十五」规划教材

航空飞行器 飞行动力学

●方振平 陈万春 张曙光 编著



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

哈尔滨工业大学出版社

哈尔滨工程大学出版社



国防科工委“十五”规划教材·航空宇航科学与技术

航空飞行器飞行动力学

方振平 陈万春 张曙光 编著

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

本书系统地介绍航空飞行器(飞机、有翼导弹)的飞行动力学特性,内容结合工程实际,反映现代飞行动力学的一些新现象、新特点。全书分两大部分。前5章着重分析飞行器质心运动规律,确定飞机的基本飞行性能、机动性能、敏捷性和导弹的轨迹特性。后7章着重分析刚性飞行器的运动特性,讨论飞行器的平衡、静稳定性和静操纵性、动稳定性和动操纵性;飞行器+自动器系统动力学特性;飞机飞行品质和导弹命中准确度分析等。

本书可作为飞行器设计专业大学本科生的教材,对于飞行器设计和使用部分的工程技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

航空飞行器飞行动力学/方振平等编著. —北京:北京航空航天大学出版社,2005.11

ISBN 7-81077-670-3

I. 航… II. 方… III. 航空器—飞行力学
IV. V212.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 086352 号

航空飞行器飞行动力学

方振平 陈万春 张曙光 编著

责任编辑 刘晓明

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(100083)

发行部电话:010-82317024 传真:010-82328026

<http://www.buaapress.com.cn> E-mail: bhpress@263.net

涿州市新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×960 1/16

印张:28 字数:627千字

2005年11月第1版 2005年11月第1次印刷

印数:3 000册

ISBN 7-81077-670-3 定价:37.00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。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,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、仪器科学与技术、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

本书是为飞行器设计专业本科生编写的教材,也可作为航空飞行器设计单位、工厂和部队从事飞行力学研究工作的科研人员的参考书。

飞行动力学是应用力学的一个分支,是研究飞行器在大气层内运动规律的学科,是以空气动力学、刚体力学、结构力学、控制理论和计算数学等作为主要理论基础,对飞行器动力学特性进行综合的学科。它是直接为飞行器设计和使用服务的。

由于涉及的研究对象不同,所研究的飞行动力学问题性质也不完全相同,因而有飞机飞行动力学、直升机飞行动力学和导弹飞行动力学等研究学科。这里考虑飞机和有翼导弹运动原理是基本相同的;目前航空技术的发展,飞机自动化飞行程度的提高,面对称导弹机动能力的发展,使这类飞行器特点更趋接近,故合在一起编写,书名取为《航空飞行器飞行动力学》。当然对于两者相异的一些特点,则另立章节单独予以介绍。

根据教材编写宗旨,对于本科生教材,仍然本着“少而精”的原则,以基础知识和基本原理为主,结合工程实践,突出重点。同时,增加因采用新气动布局、先进的飞控技术给飞行器动力学特性带来新变化、新特点的内容,以扩充知识面,适应航空事业发展需要。其中有一小部分内容,是为实施因材施教,满足不同学生要求而编入的,可不作为必读内容。

全书分两大部分。前5章为第一部分,着重分析在已知外力作用下飞行器质心的运动规律,即确定飞行器的性能和轨迹特性。这类问题常将飞行器作为一可操纵质点处理。其中第1章介绍作用在飞行器上的外力特性和飞行操纵原理;建立飞行器质心运动数学模型。第2章确定飞机的飞行性能,包括基本飞行性能、续航性能和起落性能等,并分析其主要影响因素。第3章研究飞机的非定常运动飞行性能,讨论飞机的机动性及其综合评价指标,介绍飞机的敏捷性及其评价尺度。第4章和第5章分别叙述方案飞行导弹和导引导弹的弹道特性,以及相应的弹道设计方法。

后7章为本书的第二部分,着重分析在外界扰动和操纵作用下飞行器的动力学特性,即飞行器保持和改变飞行状态的能力,常称之为飞行器的稳定性和操纵性。这类问题必须考虑飞行器绕质心的转动运动,需将飞行器作质点系——刚体或弹性体来处理。其中第6章建立刚性飞行器运动数学模型,是研究后面章节内容的基础。第7章和第8章分别介绍作用在飞行器上纵向、横侧向的外力矩,讨论飞行器定常飞行平衡特性、静稳定性和静操纵性。第9章和第10章则分别讨论飞机固有的纵、横向模态特性,飞控系统的功能和效果,纵、横向飞行品质指标等。第11章介绍飞机空间运动中各类非线性耦合因素,典型非线性运动机理、稳定判据及相应的飞控系统。第12章探讨导弹的动态特性,包括导弹的固有特性,倾斜、俯仰稳定回路特性,导弹控制回路特性和命中准确度分析等。

全书由三位作者共同编写,第1~3章和6~8章由方振平执笔;第4,5,12章由陈万春执笔;第9~11章由张曙光执笔。最后统稿由方振平完成。

限于作者水平,书中出现的不妥和错误之处,欢迎读者批评指正,以使本书逐步完善。

目 录

第 1 章 飞行器质心运动方程

1.1 作用在飞行器上的外力	1
1.1.1 升阻特性	1
1.1.2 发动机推力	6
1.2 飞行器飞行操纵概念	12
1.2.1 常规飞机的飞行操纵	13
1.2.2 现代飞机的飞行操纵	13
1.2.3 导弹的飞行操纵	14
1.3 常用的坐标轴系及其转换	16
1.3.1 常用的坐标轴系	16
1.3.2 坐标转换矩阵	17
1.3.3 常用坐标系之间的关系	20
1.4 飞行器质心运动方程	22
1.4.1 一般动坐标系中质心动力学方程	23
1.4.2 航迹坐标系中质心动力学方程	24
1.4.3 飞行器质心运动学方程	25
1.4.4 飞行器质心运动方程讨论	26
1.4.5 质心在铅垂平面内的运动方程	28
1.4.6 质心在水平面内的运动方程	30
复习思考题	32

第 2 章 飞机的飞行性能

2.1 平飞性能	33
2.1.1 定常平飞时的运动方程	33
2.1.2 最大平飞速度 V_{\max}	38
2.1.3 最小平飞速度 V_{\min}	40
2.1.4 平飞速度范围	41
2.2 上升、下滑性能	42
2.2.1 定常直线上升运动方程	42
2.2.2 定常直线上升运动性能	43
2.2.3 非定常上升运动性能	47
2.2.4 定常下滑运动性能	50
2.3 定常飞行状态及其与操纵的关系	51



2.3.1	平飞范围的划分	51
2.3.2	飞行状态与操纵的关系	53
2.3.3	定常飞行状态的主要因素分析	56
2.4	续航性能	58
2.4.1	航程和航时的基本关系式	58
2.4.2	等高高速巡航时的航程和航时	60
2.4.3	飞机的最佳续航性能	64
2.4.4	最大活动半径	68
2.4.5	风对续航性能的影响	69
2.5	起落性能	70
2.5.1	起飞性能	70
2.5.2	着陆性能	74
2.5.3	单发停车故障的对策	78
2.5.4	改善起落性能的措施	80
2.5.5	风切变下的起落过程	82
2.6	涡轮螺旋桨飞机的飞行性能	83
2.6.1	平飞和上升性能	84
2.6.2	涡轮螺旋桨飞机的续航性能	85
2.7	滑翔性能	85
	复习思考题	90

第3章 飞机的机动性和敏捷性

3.1	机动飞行时的过载	92
3.1.1	运动与过载的关系	93
3.1.2	过载限制	94
3.2	铅垂平面内的机动性能	95
3.2.1	平飞加减速	96
3.2.2	跃升	97
3.2.3	俯冲	99
3.3	水平平面内的机动性能	102
3.3.1	正常盘旋	102
3.3.2	最优盘旋	105
3.3.3	非正常盘旋	113
3.4	飞机的空间机动飞行	114
3.4.1	常见的空间机动飞行	115
3.4.2	空间机动轨迹的一般计算方法	116
3.5	机动性能的综合分析	116
3.5.1	能量机动性	117



3.5.2	定常或极限角速度	118
3.5.3	定常或瞬态转弯半径	119
3.5.4	综合机动性指标	121
3.6	飞机的敏捷性	123
3.6.1	敏捷性概念	123
3.6.2	敏捷性分类	125
3.6.3	瞬态敏捷性尺度	126
3.6.4	功能敏捷性尺度	128
3.6.5	敏捷性潜力	130
3.7	过失速机动	131
3.7.1	尾冲和眼镜蛇机动	132
3.7.2	Herbst 机动	133
	复习思考题	134
第 4 章 方案飞行与弹道		
4.1	按给定迎角或俯仰角的方案飞行	136
4.1.1	按给定迎角的方案飞行	138
4.1.2	按给定俯仰角的方案飞行	139
4.2	按给定弹道倾角的方案飞行	139
4.2.1	直线飞行弹道	140
4.2.2	垂直上升弹道	140
4.2.3	等高飞行弹道	140
	复习思考题	142
第 5 章 导引飞行与弹道		
5.1	导弹的相对运动方程	143
5.1.1	自动导引相对运动方程	143
5.1.2	遥控导引相对运动方程	146
5.2	平行接近法	148
5.2.1	直线弹道问题	148
5.2.2	弹道法向加速度特性	149
5.3	比例导引法	151
5.3.1	直线弹道的条件、条数	152
5.3.2	直线弹道的稳定性	155
5.3.3	弹道需用法向加速度	157
5.3.4	一般情况下的导引弹道特性	158
5.4	三点法	160
5.4.1	导引弹道的一般特性	161
5.4.2	弹道需用法向加速度	161



5.5 角度法	165
5.5.1 前置量法(矫直系数法)	165
5.5.2 半前置量法(半矫直系数法)	167
5.6 选择导引方法的一般原则	168
5.7 攻击区	169
复习思考题	173
第6章 刚性飞行器运动方程	
6.1 刚性飞行器动力学方程	174
6.1.1 飞行器质心移动的动力学方程	174
6.1.2 飞行器绕质心转动的动力学方程	177
6.2 刚性飞行器运动学方程	180
6.2.1 飞行器质心运动学方程	180
6.2.2 飞行器绕质心转动运动学方程	181
6.3 刚性飞行器运动方程讨论	184
6.3.1 “机体-机体体系”运动方程组	184
6.3.2 “航迹-机体体系”运动方程组	184
6.3.3 飞行力学的几类主要问题	185
6.3.4 多操纵机构情况	186
6.4 运动方程组线性化	186
6.4.1 小扰动法	186
6.4.2 外力和外力矩的线性化	189
6.4.3 运动方程的线性化	193
6.5 纵向小扰动运动方程组	196
6.5.1 纵向小扰动方程的自然形式	196
6.5.2 纵向小扰动方程的矩阵形式	198
6.5.3 纵向小扰动方程的简化形式	199
6.6 横侧小扰动运动方程组	201
6.6.1 横侧小扰动方程的自然形式	201
6.6.2 横侧小扰动方程的矩阵形式	202
6.6.3 横侧小扰动方程的简化形式	203
复习思考题	204
第7章 飞行器的纵向平衡、静稳定和静操纵	
7.1 静稳定力矩	206
7.1.1 静稳定力矩的组成	206
7.1.2 定速静稳定性	211
7.1.3 定载静稳定性	213
7.2 操纵力矩	214



7.2.1	气动操纵力矩	215
7.2.2	推力矢量操纵力矩	216
7.3	定常直线飞行时的飞行器平衡特性	217
7.3.1	升降舵平衡曲线	217
7.3.2	舵面静操纵性指标	220
7.3.3	飞行器的自动俯冲现象	221
7.4	阻尼力矩	222
7.5	洗流时差力矩	223
7.6	定常拉升飞行时的飞行器平衡特性	224
7.6.1	升降舵偏转变化规律	225
7.6.2	舵面静操纵性指标	226
7.7	铰链力矩和杆力特性	227
7.7.1	铰链力矩	227
7.7.2	杆力特性	229
7.8	影响飞行器纵向平衡、静稳定和静操纵的其他因素	237
7.8.1	动力装置影响	237
7.8.2	飞行器构形变化的影响	239
7.8.3	弹性变形的影响	240
7.8.4	大迎角飞行和地面效应的影响	241
7.9	飞行器质心的变化范围	242
7.9.1	常规飞行器	243
7.9.2	放宽静稳定性飞行器	245
7.9.3	影响因素讨论	246
7.10	助力器操纵时的杆力特性	247
7.10.1	助力器操纵系统简介	247
7.10.2	助力操纵时杆力特性	249
	复习思考题	252
第 8 章 飞行器的横航向平衡、静稳定和静操纵		
8.1	静稳定力矩	255
8.1.1	静稳定力矩的组成	255
8.1.2	横航向静稳定性	260
8.2	操纵力矩	263
8.2.1	滚转操纵力矩	263
8.2.2	偏航操纵力矩	264
8.3	阻尼力矩和交感力矩	265
8.3.1	滚转角速度 p 引起的横侧力矩	266
8.3.2	偏航角速度 r 引起的横侧力矩	267



8.4	斜吹力矩	269
8.5	非对称定常飞行时飞行器的平衡	270
8.5.1	定常直线侧滑飞行时的平衡和静操纵	270
8.5.2	正常盘旋飞行时的平衡和静操纵	274
8.5.3	稳定滚转时的平衡和静操纵	276
8.6	铰链力矩和操纵力特性	277
8.6.1	副翼和方向舵铰链力矩	277
8.6.2	横侧操纵力特性	279
8.6.3	助力器操纵时的杆力特性	282
8.7	影响飞行器横航向平衡、静稳定和静操纵的其他因素	283
8.7.1	动力装置的影响	283
8.7.2	构形变化的影响	283
8.7.3	弹性变形的影响	284
8.7.4	大迎角、地面效应的影响	285
	复习思考题	287
第9章 飞机的纵向稳定性和操纵性		
9.1	飞机纵向运动稳定性	288
9.1.1	纵向扰动运动方程和基本求解理论	288
9.1.2	模态特性分析方法	290
9.1.3	典型的纵向运动模态	294
9.1.4	短周期模态分析	297
9.1.5	长周期模态分析	298
9.1.6	现代飞机纵向模态特点	300
9.2	飞机纵向动操纵性	302
9.2.1	时域响应指标	303
9.2.2	飞行操纵系统	304
9.2.3	纵向动操纵性	307
9.3	带自动器飞机的纵向操纵性和稳定性特性	310
9.3.1	俯仰阻尼器	311
9.3.2	纵向增稳系统	313
9.3.3	纵向控制增稳系统	315
9.3.4	高度稳定系统	316
9.4	飞机的纵向飞行品质	320
	复习思考题	322
第10章 飞机的横航向稳定性和操纵性		
10.1	飞机横航向运动稳定性	324
10.1.1	横航向扰动运动方程	324



10.1.2	典型的横航向运动模态	325
10.1.3	滚转收敛模态分析	328
10.1.4	螺旋模态分析	329
10.1.5	荷兰滚模态分析	331
10.1.6	横航向静稳定性和动稳定性的关系	332
10.1.7	现代飞机横航向模态特性	333
10.2	飞机横航向动操纵性	334
10.2.1	对副翼的操纵反应	335
10.2.2	对方向舵的操纵反应	336
10.3	带自动器飞机的横航向操纵性和稳定性特性	338
10.3.1	滚转阻尼器	338
10.3.2	滚转角控制系统	339
10.3.3	偏航阻尼器	340
10.3.4	偏航增稳系统	341
10.3.5	副翼-方向舵交联	343
10.3.6	飞行航线稳定系统	343
10.4	飞机横航向飞行品质	344
	复习思考题	346
第 11 章 飞机空间运动稳定性和操纵性		
11.1	纵横向运动耦合机理	348
11.1.1	运动耦合	348
11.1.2	惯性耦合	349
11.1.3	陀螺耦合	350
11.1.4	气动耦合	350
11.2	急滚动力学	351
11.3	偏离动力学	354
11.3.1	纵向偏离	355
11.3.2	横航向偏离	355
11.3.3	偏离预测判据	357
11.3.4	机翼摇晃	362
11.4	尾旋动力学	363
11.4.1	进入尾旋	364
11.4.2	定常阶段	365
11.4.3	改出尾旋	366
11.4.4	尾旋运动的模拟和试验	367
11.5	空间运动的自动控制	369
11.5.1	飞行边界限制系统	369



11.5.2	尾旋自动防止系统	371
11.5.3	放宽静稳定系统	374
11.5.4	直接力操纵系统	375
	复习思考题	381
第 12 章 导弹的飞行控制		
12.1	导弹飞行控制特点	382
12.1.1	舵回路	382
12.1.2	稳定回路	383
12.1.3	控制回路	383
12.2	滚转稳定回路	384
12.2.1	无控时导弹的横侧扰动运动	384
12.2.2	滚转角稳定回路	385
12.2.3	滚转角速度稳定回路	388
12.3	俯仰和偏航稳定回路	390
12.3.1	无控时导弹的俯仰扰动运动	390
12.3.2	姿态稳定回路	393
12.3.3	加速度稳定回路	395
12.4	导弹控制回路	405
12.5	导弹精度分析	409
12.5.1	脱靶量模型及其线性化	410
12.5.2	干扰及噪声模型	411
12.5.3	蒙特卡洛法	413
12.5.4	协方差分析法	416
12.5.5	伴随分析法	419
12.5.6	统计线性化伴随法	423
	复习思考题	426
参考文献		