

高等飞行动力学

THE ADVANCED FLIGHT DYNAMICS

高 浩 朱培申 高正红 编著

国防工业出版社

<http://www.ndip.cn>

高等飞行动力学

The Advanced Flight Dynamics

高浩 朱培申 高正红 编著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

高等飞行动力学/高浩等编著. —北京:国防工业出版社, 2004. 7

ISBN 7-118-03513-0

I. 高... II. 高... III. 飞行力学 IV. V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 061388 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

京南印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 10 $\frac{1}{4}$ 273 千字

2004 年 7 月第 1 版 2004 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—3000 册 定价:35.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于 1988 年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

IV

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金
评审委员会**

国防科技图书出版基金 第四届评审委员会组成人员

名誉主任委员 陈达植

顾问 黄 宁

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 张又栋

秘书长 张又栋

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 于景元 王小谟 甘茂治 冯允成

(按姓氏笔划排序) 刘世参 杨星豪 李德毅 吴有生

何新贵 佟玉民 宋家树 张立同

张鸿元 陈火旺 侯正明 常显奇

崔尔杰 彭华良 韩祖南 舒长胜

序

飞行动力学是研究飞机飞行的一门应用力学。早在 1903 年莱特兄弟所以能实现动力飞行,除了在空气动力学、航空发动机方面有技术突破外,在飞机的飞行动力学特别是飞机的操纵性方面也取得了重大突破,使飞机在飞行中能对绕飞机三个轴的运动进行控制,这样飞机就能在人的控制下飞行。但是这种自发性的感性认识,并不能解决日益扩大的飞机使用中的所有飞行安全和随心所欲的驾驶问题。这样就有一批学者潜心研究飞机的运动和驾驶规律,奠定了飞行力学的基础。由于飞机是六个自由度的刚体运动,因此在计算手段还不发达的 20 世纪中叶以前,只能将运动方程简化进行解析解,对飞行动力学的现象只能做定性解释,即使这样还是推动了飞行动力学的发展,如 20 世纪 30 年代解决了威胁飞行安全的最大问题——尾旋。到了 20 世纪 50 年代,由于超声速飞机的出现,飞机布局上有了很大变化,一是质量集中在机身上,使飞机的绕三个轴的惯矩差别很大;再加上超声速时飞机方向稳定性的自然减少,因此当飞机为空战需要做急滚拉起时发生惯性耦合的发散运动,多次发生撕掉垂直尾翼而失事事故。飞行力学专家们做了深入研究,终于找到了失事的原因,以后设计飞机和使用飞机都注意了如何防范,以至采用自动控制系统来保证安全。

随着飞机飞行速度和高度的不断扩展,单靠气动力布局保证不了在全飞行范围内的飞机操纵稳定性。如 20km 高空的空气密度只有海平面的 7%,保证不了飞机受扰后的动稳定性,即有很好的阻尼。因此从 20 世纪 50 年代开始研究飞行动力学就需与自动控制结合起来。50 年代开始对高空高速飞机都装上了人工增稳器。

另外要保证飞机在广阔的飞行范围,从海平面到 20km 以上,

从亚声速到马赫数 $Ma = 2$ 以上都有良好的飞行性能和驾驶特性。随着控制技术的发展,使飞机设计者越来越借助于可靠的自动控制系统,来代替一部分气动操纵面的作用,此即所谓“随控布局”设计。但飞机是由人驾驶的,随着高增稳系统飞机的使用,常常发生开始设计时没有注意到的飞机的人激振荡问题。几乎所有装主动控制系统的机种都发生过飞行事故。所以现在飞行动力学的研究又扩展到研究人机结合的大系统的稳定性和控制品质问题。

飞机诞生以来的历次战争,特别是最近几次的局部战争,越来越显示出军用飞机的决胜作用,2003 年伊拉克战争更突显了飞机的作用,尤其突出的是它的精确打击能力,即出动数量不多的飞机,消耗很少的弹药,在误伤又很少的前提下,摧毁了对方的关键设施而使战争迅速结束。在运动的飞机上,要使所投放的武器准确命中目标是个非常复杂的动力学问题。苏联吸取了第二次世界大战的经验教训,认为要在空战中战胜对手,必须研究飞机的作战效能,一方面从概率论入手,另一方面即从飞行动力学、火力控制理论入手。于是组织了航空系统研究院(ГОСНИИАС)和中央空气流体动力研究院(ЦАГИ)的科技人员一起攻关,终于研制出像米格—31、苏—27 这样高效的航空武器系统。而在这方面我们是很欠缺的,搞飞行动力学的专业人员和搞火控的专业人员还没有很好地结合。

本书从飞行动力学的基本理论讲起,涉及了控制原理、人机动力学、火控原理及攻击运动学等,这些材料都讲到了前沿热点,因此是与时俱进的。最后还讲了飞行动力学实验的难题——仿真技术,这都是从事飞行力学研究的人所必备的知识。

本书的作者们都有丰富的教学和科研经验,特别是搞飞机和搞火控的同志合作编写,这在国内是首创,其内容是理论和实践的结合。本书对在航空科研院、所的科研设计人员是一个重要的参考。

中国科学院院士
中国工程院院士

顾诵芬

前 言

本书主要讨论飞机飞行动力学近年来的进展。飞机飞行动力学是一门综合性的力学分支。早期它是从空气动力学学科衍生出来的,目的是为了评估飞机的使用(作战)性能和飞行的安全性以及驾驶员实现预定性能的难易程度(或称飞行品质),在飞机发展的最初年代里,这种评估工作是在空气动力学(飞机外形布局)、发动机特性以及飞机有关特性(几何、重量、操纵系统特性)等学科基础上,用动力学概念进行综合的。

20 世纪 70 年代以来,随工程控制理论和电-液压反馈控制系统在飞机操纵系统中的应用,飞机的飞行品质评估工作又涉及到控制论与飞行控制系统学科等领域。近年来,随着信息及其传输(雷达、红外探测、卫星探测)系统在飞机作战中的使用,机载计算机及其在火力、飞行控制系统中的应用,各类空对空、空对面(地)导弹的出现,第三代和第四代作战飞机已经发展成为一种高精度武器系统。因此,为了评估这类作战飞机的性能和飞行品质,除了早期评估工作所涉及的各种学科以外,还应增加信息探测、火力与飞行控制、导弹飞行动力学等新领域来进行多学科综合。显然,这一多学科综合的动力学系统建模以及评估的手段均与以往有较大区别。

编写本书的目的,就是力图反映近年来飞行动力学在这些方面的进展。为了叙述方便起见,首先说明飞行动力学的基本分析方法;第二章介绍评估飞机性能的动力学模型和当代战斗机性能的新指标;第三章介绍武器发射条件和由此得出对飞机攻击目标的要求;第四章介绍评估飞机飞行性能的飞行动力学仿真系统;第五章说明飞行品质的驾驶员评估,即人机系统动力学;第六章至第

九章讨论飞机作为刚体的飞行动力学问题、考虑飞行控制系统的飞机动力学以及近年来开展较多研究的大迎角飞行动力学问题等。

以上各章内容由三位作者共同讨论后分工写成。其中第一、二、九章由高正红执笔,第三章和第四章的航空综合火力控制系统部分请朱培申同志编写,其余内容及统稿工作由高浩完成。我们希望通过本书的出版能对我国从事飞机设计、使用的工作者有所帮助。但由于作者学识有限,书中谬误难免,诚恳地希望各位读者批评指正。

在本书定稿过程中,中国科学院和中国工程院院士顾诵芬、北京航空航天大学方振平教授以及南京航空航天大学刘昶教授曾多次审阅书稿,福建师范大学数学系黄启宇教授、高慧贞教授也审阅了第九章书稿并提出了许多宝贵意见,谨在此表示衷心的感谢。

编著者

目 录

第一章 飞行动力学分析的基本方法	1
1.1 引言	1
1.2 飞机动力学的数学模型	2
1.2.1 坐标轴系	2
1.2.2 飞机动力学的数学模型	3
1.2.3 飞机动力学数学模型的说明	6
1.3 飞机稳定性和操纵性的分析方法	12
1.3.1 各种近似条件下运动方程的简化	14
1.3.2 自动控制系统的数学描述法	17
1.4 稳定性和操纵性的评价方法	17
1.4.1 评价体制	18
1.4.2 飞机纵向飞行品质要求	20
1.4.3 飞机横侧向飞行品质要求	22
1.4.4 等效系统拟配	23
1.4.5 其它飞行品质	25
第二章 飞机的机动飞行性能	26
2.1 引言	26
2.2 飞机机动飞行特性的定义	27
2.2.1 改变能量的能力	27
2.2.2 改变飞行方向的能力	29
2.2.3 改变空间位置的能力	30
2.3 飞机机动飞行性能指标	31
2.3.1 飞机机动特性的总体指标	31
2.3.2 部分机动性指标的算法	38

2.4 战斗机机动飞行性能的特点	43
2.4.1 现代战斗机改变能量的能力	43
2.4.2 改变飞行方向的能力与改变飞行方向所需空间的大小	44
2.5 战斗机的敏捷性及其评估方法	46
2.5.1 瞬态敏捷性尺度	48
2.5.2 功能敏捷性尺度	59
2.5.3 潜力敏捷性尺度	64
第三章 飞机的攻击运动学	67
3.1 导弹的导引运动学	68
3.1.1 导弹的制导方式	68
3.1.2 导弹攻击目标的运动学关系	70
3.1.3 导弹的导引律	71
3.1.4 空对空导弹的发射区	74
3.2 空对空导弹攻击的飞机攻击运动学	75
3.2.1 空战中飞机的作战方式	76
3.2.2 中远距导弹攻击时飞机的攻击运动学	81
3.2.3 近距导弹攻击时飞机的纯追踪攻击路线	84
3.3 空对地攻击的飞机运动学	87
3.3.1 空对地攻击的作战任务剖面	87
3.3.2 空对地导弹攻击时飞机的攻击运动学	89
3.3.3 轰炸时飞机的攻击运动	91
第四章 评估飞行性能的飞行动力学仿真系统	98
4.1 引言	98
4.2 空战仿真软件	102
4.2.1 空战的基本模式	102
4.2.2 仿真软件的组成	103
4.2.3 综合火控系统的功能	106
4.2.4 飞机和导弹动力学系统	112
4.2.5 作战效能的评估原则	119
4.3 空战仿真系统	120

4.3.1 仿真系统简介	120
4.3.2 飞机动力学系统	123
4.3.3 其它子系统	136
第五章 人机系统动力学	140
5.1 引言	140
5.2 驾驶员行为的数学模型	141
5.2.1 驾驶员控制任务的分类	141
5.2.2 单自由度跟踪时驾驶员行为的数学模型	145
5.3 驾驶员控制滚转角和俯仰角示例	148
5.3.1 驾驶员控制滚转角	148
5.3.2 驾驶员控制俯仰角	151
5.4 俯仰姿态控制中驾驶员对飞机飞行品质的评价	153
5.4.1 采用的数学模型和飞行品质评价的原则	153
5.4.2 驾驶员超前或滞后补偿的作用	156
5.4.3 T_{10} 变化的影响	158
5.4.4 短周期频率变化的影响	160
5.5 滚转角控制中驾驶员的作用	161
5.5.1 采用单自由度滚转数学模型的分析	161
5.5.2 荷兰滚模态根位置的影响	163
第六章 飞机的纵向稳定性和操纵性	165
6.1 引言	165
6.1.1 超声速飞机气动力和力矩变化的特点	165
6.1.2 电传操纵控制增稳系统的组成及其基本要求	167
6.1.3 电传操纵系统与飞机组件的动态特性分析方法	171
6.2 改善纵向稳定性的增稳系统	172
6.2.1 纵向阻尼器	172
6.2.2 放宽静稳定性飞机的增稳器	176
6.3 积分式指令控制增稳系统	179
6.3.1 俯仰角速度指令式控制增稳系统	180
6.3.2 过载指令式控制增稳系统	189

6.4 比例式指令控制增稳系统	198
第七章 控制系统元件的特性对飞机纵向稳定性和操纵性的影响	205
7.1 控制系统元件的动态特性	205
7.1.1 反馈传感器的信号	205
7.1.2 控制增稳系统传感器信号的滤波	211
7.1.3 机载数字式计算机实现功能计算时引入的动态效应	214
7.1.4 执行机构的动态特性	222
7.2 控制系统元件的动态特性对飞机纵向动态特性的影响	224
7.2.1 过载反馈通道中低通滤波器的影响	224
7.2.2 俯仰角速度通道中滤波器动态特性的影响	229
7.2.3 比例式控制增稳系统反馈系数的选择	233
7.3 极限飞行状态的限制器	234
7.4 执行机构的非线性特性对飞机稳定性的影响	236
7.4.1 预备知识	236
7.4.2 执行机构的非线性特性对飞机稳定性的影响	245
7.4.3 飞机稳定性对执行机构死区型非线性特性的要求	250
7.4.4 飞机稳定性对执行机构饱和型非线性特性的要求	251
第八章 飞机的横侧稳定性和操纵性	255
8.1 横侧运动的近似分析	255
8.1.1 超声速飞机的横侧气动力和力矩变化的特点	255
8.1.2 横侧运动稳定性的近似分析	261
8.2 飞机的横侧操纵特性	267
8.2.1 飞机的横向操纵特性	267
8.2.2 飞机的航向操纵特性	274
8.3 具有控制增稳系统飞机的横侧稳定性和操纵性	276
8.3.1 偏航阻尼器	276
8.3.2 滚转阻尼器	280
8.3.3 副翼方向舵交连	283

8.3.4 航向增稳器	285
第九章 空间运动动力学	289
9.1 引言	289
9.2 非线性动力学研究的定性方法	290
9.2.1 预备知识	292
9.2.2 平衡面的连续算法	296
9.3 急滚飞行动力学	298
9.3.1 线性近似分析方法	299
9.3.2 急滚的非线性动力学分析	303
9.4 偏离飞行动力学	305
9.4.1 大迎角飞行的一些现象	306
9.4.2 线性近似分析方法	308
9.4.3 偏离的非线性特点	311
9.5 尾旋动力学	313
9.5.1 稳态尾旋的近似分析	314
9.5.2 尾旋的全局稳定性分析	317
参考文献	321

Contents

Chapter 1 The Fundamental Analytics of Flight	
Dynamics	1
1.1 Introduction	1
1.2 The Mathematical Model of Aircraft Dynamics	2
1.2.1 Coordinate System	2
1.2.2 The Mathematical Model of Aircraft Dynamics	3
1.2.3 The Explanations of Aircraft Dynamic Model	6
1.3 The Analysis Method of Aircraft Stability and Control	12
1.3.1 The Simplification of Aircraft Equations of Motion	14
1.3.2 The Mathematical Description Methods of Flight Control System	17
1.4 The Evaluation Methods of Aircraft Stability and Control	17
1.4.1 The Evaluation System	18
1.4.2 The Requirements of Longitudinal Flying Qualities	20
1.4.3 The Requirements of Lateral-Directional Flying Qualities	22
1.4.4 The Matching Methods of Equivalent System	23
1.4.5 Other Flying Qualities Requirements	25
Chapter 2 Aircraft Maneuverability	26
2.1 Introduction	26
2.2 The Definition of Aircraft Maneuvering Characteristics	27
2.2.1 The Aircraft Ability of Changing Its Energy	27
2.2.2 The Aircraft Ability of Changing Its Flying Direction	29

2.2.3	The Aircraft Ability of Changing Its Spatial Position	30
2.3	Aircraft Maneuverability Index	31
2.3.1	The Overall Index of Aircraft Maneuverability	31
2.3.2	The Calculation Method of Some Maneuverability Indexes	38
2.4	The Characteristics of Fighter Maneuvering	43
2.4.1	Ability of Modern Fighter to Change Its Energy	43
2.4.2	Ability of Modern Fighter to Change Its Direction and the Requiring Spatial Dimension	44
2.5	The Agility of Fighter and Its Evaluation Method	46
2.5.1	Transient Agility Matrices	48
2.5.2	Functional Agility Matrices	59
2.5.3	Potential Agility Matrices	64
Chapter 3	The Kinematics of Fighter in Combat	67
3.1	Missile Guided Kinematics	68
3.1.1	Missile Guiding Modes	68
3.1.2	Kinematic Relations between Missiles and Targets	70
3.1.3	Missile Guided Law	71
3.1.4	Air-to-Air Missile Permissible Launch Field	74
3.2	Aircraft Kinematics When They Launching Air-to-Air Missiles	75
3.2.1	Aircraft Fight Modes During Air-to-Air Combat	76
3.2.2	Aircraft Kinematics When They Launching Medium or Long Range Missiles	81
3.2.3	Aircraft Pure Pursuit Course When They Launching Short Range Missiles	84
3.3	Aircraft Kinematics During Air-to-Ground Attacks	87
3.3.1	Mission Profile During Air-to-Ground Combat	87
3.3.2	Aircraft Kinematics When They Launching Air-to-Ground Missile	89
3.3.3	Aircraft Kinematics When They Releasing Bombs	91