



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

“十三五”国家重点图书规划项目

现代飞机飞行动力学 与控制 (第2版)

Flight Dynamics and Control of
Modern Aircrafts (Second Edition)

刘世前 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

现代飞机 飞行动力学与控制 (第2版)

Flight Dynamics and Control of
Modern Aircrafts
(Second Edition)

刘世前 编著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



大飞机读者俱乐部

内容提要

本书以现代飞机飞行动力学与飞行控制为核心内容,从飞行性能、飞机运动动力学、飞行稳定性、飞行控制系统的设计理论及现代飞行控制技术等角度,深入讲解现代飞机飞行动力学与控制中的基本概念、基本理论和设计方法及应用。每章列举了相关的实例及部分相关源码,附录为飞行力学与控制常用的一些工具和典型飞机气动数据,供读者方便时查阅。

本书可作为飞行力学,导航、制导与控制专业高年级本科生及低年级研究生教材,也可作为从事飞行控制等工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代飞机飞行动力学与控制/刘世前编著. —2 版. —上海:
上海交通大学出版社,2018
大飞机出版工程
ISBN 978-7-313-19674-3

I. ①刘… II. ①刘… III. ①飞行动力学—研究 IV. ①V212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 150236 号

现代飞机飞行动力学与控制(第2版)

编 著:刘世前

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出版人:谈毅

印 制:上海春秋印刷厂

开 本:710mm×1000mm 1/16

字 数:668千字

版 次:2014年12月第1版 2018年7月第2版

书 号:ISBN 978-7-313-19674-3/V

定 价:98.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:33.5

印 次:2018年7月第2次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-33854186

丛书编委会

总主编

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委原副主任、中国科学院和中国工程院院士）

副总主编

贺东风（中国商用飞机有限责任公司董事长）

林忠钦（上海交通大学校长、中国工程院院士）

编委会（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、中国工程院院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院副院长、教授）

任和（中国商飞上海飞机客户服务公司副总工程师、教授）

李明（中国航空工业集团沈阳飞机设计研究所科技委委员、中国工程院院士）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、中国工程院院士）

汪海（上海市航空材料与结构检测中心主任、研究员）

张卫红（西北工业大学副校长、教授）

张新国（中国航空工业集团副总经理、研究员）

陈勇（中国商用飞机有限责任公司工程总师、ARJ21飞机总设计师、研究员）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司 CR929 飞机总设计师、研究员）

陈宗基（北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授）

陈懋章（北京航空航天大学能源与动力工程学院教授、中国工程院院士）

金德琨（中国航空工业集团公司原科技委委员、研究员）

赵越让（中国商用飞机有限责任公司总经理、研究员）

姜丽萍（中国商用飞机有限责任公司制造总师、研究员）

曹春晓（中国航空工业集团北京航空材料研究院研究员、中国工程院院士）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学电子信息与电气工程学院研究员）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、比重大于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展和运用,体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索和不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个多世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音公司

B737 和空客公司 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

2008 年 5 月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教 1 时,亲自撰写了《飞机性能及算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》《飞机强度学》,从理论上保证了我们的飞机研制工作。我本人作为航空事业发展 50 多年的见证人,欣然接受上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理 50 多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机出版工程”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、工具书等几个模块;其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术

成果,也包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如:2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft* (《运输类飞机的空气动力设计》);由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion* (《飞机推进》)等国外最新科技的结晶;国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》《民用飞机气动设计》等专业细分的著作;也有《民机设计1000问》《英汉航空缩略语词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助,体现了国家对“大型飞机”项目以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命,凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果,具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性,既可作为实际工作指导用书,亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养,有益于航空工业的发展,有益于大飞机的成功研制。同时,希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空,并投身于中国航空事业做出一点贡献。

顾诵芬

2009年12月15日

前 言

本书以现代飞机飞行动力学与飞行控制为核心内容,从飞行性能、飞机运动动力学、飞行稳定性、飞行控制系统的设计理论及现代飞行控制技术等角度,深入解读了现代飞机飞行动力学中的基本概念,剖析了飞行动力学中的各种现象,并建立了飞行动力学与飞行控制之间的相互关系,运用古典和现代控制理论,进行飞行控制律设计,对重要知识点,运用实例分析,加深读者对飞行动力学与飞行控制的理解与运用,而且对飞行动力学与现代飞行控制技术的研究现状及未来趋势做了简要介绍。全书共分10章:第1~6章为现代飞机飞行动力学内容,包括质点动力学、姿态动力学、基本飞行性能、操纵性和稳定性等性能;第7~8章为飞机飞行控制设计方法内容,包括飞行品质设计要求,古典飞行控制理论及现代飞行控制理论;第9~10章为自动飞行控制系统分析与设计,包括纵向运动自动飞行控制系统设计和横侧向运动自动飞行控制系统设计,是1~8章内容的综合应用。本书内容涵盖了现代飞机飞行动力学与飞行控制的主要知识点,涉及对象包括大型民机、军用飞机、小型运输机及无人机等,并加入了一些近期发展的内容。各章列举了相关的事例及部分相关源码,附录为飞行力学与控制常用的一些工具和典型飞机气动数据,供读者方便时查阅。

本书的编著结合了作者在上海交通大学从事多年“飞行器控制”的教学实践和科研成果,并参考与引用了国内外飞行器动力学与飞行控制等相关专著与学术论文,在此向相关作者表示感谢。同时,本书得到了国家工信部民机专项,国家自然科学基金(No. 10577012)等项目的资助,也得到了上海交通大学航空航天学院唐长红院士、敬忠良教授、胡士强教授、李元祥教授、余文胜教授及飞行器控制实验室研究生的帮助,包括王素晓、柴树梁、范跃杰、郑凌霄、衣建臣、龚思杰、戚举鹏、吕聪、蒋雨航、斯夏依等人,在此一并感谢。作者还要感谢美国Iowa州立

大学的陆平教授,南京理工大学的郭治教授,清华大学的朱纪洪教授,中航工业自动飞行控制研究所的张汝麟研究员和王永研究员等一直关心和支持我们工作的人,特别要感谢我的家人,我的爱人金宏滨女士和儿子小马,给了我巨大的鼓励和支持。

本书可供从事飞机、航空发动机、燃气轮机和热能动力工程等专业的设计、试验、生产、维护和管理的技术人员参考,也可供高等院校航空航天类专业师生教学参考。由于时间匆忙及编者水平所限,书中存在的错误和疏漏,敬请读者批评指正。

读者若有任何意见和建议,请给编者发送电子邮件至:liushiqian@sjtu.edu.cn。

编者

2014年6月

主要符号表

符号	定义	单位
$L_g - O_g x_g y_g z_g$	地面(静)坐标系	
$L_b - O_b x_b y_b z_b$	机体(动)坐标系	
$L_a - O_a x_a y_a z_a$	气流(风轴)坐标系	
$L_s - O_s x_s y_s z_s$	稳定坐标系	
$L_k - O_k x_k y_k z_k$	航迹坐标系	
$V(V_a, V_t), V_0$	空速,配平速度	m/s
$V_g(V_k), V_w$	地速,风速	m/s
V_{bs}, V_z, V_{ld}	表速,垂直上升速度和离地速度	m/s
V_{tmax}, V_{Rmax}	久航速度,远航速度	m/s
a	声速	m/s
Ma	马赫数	
ρ	空气密度	kg/m ³
ν	气体压缩性系数	
μ	相对密度	
$\bar{q} = \frac{1}{2} \rho V^2$	动压	
S, S_w	机翼参考面积,机翼面积	m ²
b	机翼展长	m
c	机翼弦长	m
\bar{c}, c_A, C_{Aw}	机翼平均气动弦长	m
λ	展弦比 $\lambda = b/c$	m
σ	机翼剖面厚度	m
η	机翼最大弯度	m
Δ	后掠角	°
Γ	上反角	°
m	飞机质量	kg

g	重力加速度	m/s^2
G	飞机重力	N
$x_{cg}, h(h_{cg})$	飞机重心到平均几何弦前缘点距离与相对距离	m
x_{ac}, h_{nw}	机翼气动焦点到平均几何弦前缘点距离与相对距离	m
S_t	平尾面积	m^2
V_H	尾容	
$S_m = (x_{ac} - x_{cg}) / \bar{c}$ $= \bar{x}_{ac} - \bar{x}_{cg}$	纵向静稳定度	
θ	俯仰角	$^\circ, \text{rad}$
ψ	偏航角	$^\circ, \text{rad}$
ϕ	滚转角	$^\circ, \text{rad}$
γ	航迹倾角	$^\circ, \text{rad}$
χ	航迹方位角	$^\circ, \text{rad}$
$\mu(\phi_a)$	航迹滚转角	$^\circ, \text{rad}$
α	迎角(攻角)	$^\circ, \text{rad}$
β	侧滑角	$^\circ, \text{rad}$
ϵ	下洗角	$^\circ, \text{rad}$
p, q, r	滚转, 俯仰及偏航角速度	rad/s
$\bar{p}, \bar{q}, \bar{r}$	无因次滚转, 俯仰及偏航角速度	
u, v, w	V 在机体坐标系下分量	m/s
ΣF	飞机受到的总合力	N
ΣM	飞机受到的总合力矩	$\text{N} \cdot \text{m}$
F_x, F_y, F_z	力 F 在动坐标系上的分量	N
L, D, Y, T	升力, 阻力, 侧力, 推力	N
C_L, C_D, C_Y, C_T	升力系数, 阻力系数, 侧力系数, 推力系数	
$C_{L\alpha}(a)$	升力线斜率	
C_{L0}	迎角为零时的升力系数	
C_{D0}	零升阻力系数	
C_{Di}	升致阻力系数	
$C_{D\alpha} = \frac{\partial C_D}{\partial \alpha}$	阻力系数对迎角的偏导数	
$C_{Lu} = V \frac{\partial C_L}{\partial V}$	升力系数对速度的偏导数	
$C_{Du} = V \left(\frac{\partial C_D}{\partial V} \right)$	阻力系数对速度的偏导数	

$C_{mu} = V \left(\frac{\partial C_m}{\partial V} \right)$	俯仰力矩系数对速度的偏导数
$(C_L)_0, (C_D)_0, (C_m)_0$	基准运动下升力系数、阻力系数及俯仰力矩系数
$C_{y\beta}$	侧力导数
$C_{y\delta_r}$	方向舵侧力导数
C_{yp}	滚转角速度侧力导数
C_{yr}	偏航角速度侧力导数
C_l, C_m, C_n	滚转, 俯仰, 偏航力矩系数
$\delta_e, \delta_a, \delta_r$	升降舵, 副翼, 方向舵转角
F_e, F_a, F_r	驾驶杆的推拉杆力、压杆杆力、脚踏力
d_e, d_a, d_r	驾驶杆的推拉位移, 左右压杆位移及脚踏位移
δ_p	油门杆操纵量
i_t	平尾偏转角
k_q, k	平尾速度阻滞系数
$C_{m0}, C_{m0, w}$	飞机、机翼零升力矩系数
C_{mw}	机翼力矩系数
$C_{mt}, C_{m, wb}$	平尾力矩系数及翼身力矩系数
$C_{m\alpha}$	纵向静稳定导数
$C_{m\delta_e}$	升降舵操纵导数
$C_{l\beta}$	横向静稳定导数
$C_{n\beta}$	航向静稳定导数
$C_{l\delta_a}$	滚转操纵导数
$C_{l\delta_r}$	方向舵操纵交叉导数
C_{lp}	滚转阻尼导数
C_{lr}	交叉动导数
$C_{n\delta_a}$	副翼操纵交叉导数
$C_{n\delta_r}$	航向操纵导数
C_{np}	交叉动导数
C_{nr}	航向阻尼导数
$C_{Y\beta}$	侧力导数
$C_{Y\delta_r}$	方向舵侧力导数
C_{Yp}	滚转角速度侧力导数
C_{Yr}	偏航角速度侧力导数
C_{he}	铰链力矩系数

°, rad

$T, \Delta T$	发动机推力, 剩余推力	N
T_{ky}, T_{px}	可用推力, 平飞所需推力	N
q_{km}	公里耗油量	kg/km
q_{Nh}	发动机耗油率	kg/N/h
q_h	小时耗油量	kg/h
x_T, y_T, z_T	发动机推力作用点在机体坐标系的位置	m
φ_T	发动机纵向安装偏角	°
$I_x, I_y, I_z, I_{xy}, I_{yz}, I_{xz}$	飞机转动惯量和惯性积	kg · m ²
Δ	特征多项式	
λ	特征根	
ζ_{sp}, ζ_{ph}	短周期、长周期运动阻尼比	
$\omega_{nsp}, \omega_{nph}$	短周期、长周期运动固有频率	rad/s
T_{sp}, T_{ph}	短周期、长周期运动周期	s
τ_R	滚转衰减模态时间常数	s
τ_S	螺旋模态时间常数	s
$\omega_{nDR}(\omega_{nD})$	荷兰滚模态固有频率	rad/s
$\zeta_{DR}(\zeta_D)$	荷兰滚模态阻尼比	
n_z, n_y	法向过载, 侧向过载	
s	拉氏变换算子	

目 录

第1章 绪论 1

- 1.1 飞行动力学起源 1
- 1.2 飞行力学与控制的关系 1
- 1.3 飞行力学与飞行控制的发展历史 2
 - 1.3.1 航空飞行器的发展 2
 - 1.3.2 飞行控制的发展 8
- 1.4 飞行控制基本概念 12
- 1.5 飞行控制的应用及未来发展趋势 16
- 1.6 飞行动力学与控制基本内容 18
- 练习题 19
- 参考文献 19

第2章 飞行动力学基础 20

- 2.1 空气动力学基本知识 20
 - 2.1.1 基本概念 21
 - 2.1.2 空气的基本特性和国际标准大气 21
 - 2.1.3 低速空气动力学基本方程 25
 - 2.1.4 高速空气动力学的基本概念 27
- 2.2 飞机几何形状和参数 30
 - 2.2.1 飞机的布局与尺寸 30
 - 2.2.2 机翼的几何形状和参数 30
- 2.3 飞机运动分析 33
 - 2.3.1 飞机运动的自由度 33
 - 2.3.2 操纵机构 34
 - 2.3.3 飞机运动空气动力计算 37
- 练习题 39
- 参考文献 39

第3章 飞机的飞行性能 40

- 3.1 飞行过程中受力分析及角度定义 40
 - 3.1.1 飞机常用的坐标系 41
 - 3.1.2 飞行角度分析 45
 - 3.1.3 飞机受力分析 45
- 3.2 定常直线飞行性能 54
 - 3.2.1 定直平飞性能 55
 - 3.2.2 定直上升性能 61
 - 3.2.3 定直下滑性能 66
- 3.3 飞机的续航与起降性能 67
 - 3.3.1 航程和航时的基本关系式 67
 - 3.3.2 航程与航时计算 68
 - 3.3.3 上升与下降段的续航性能分析 72
 - 3.3.4 风对续航性能的影响 73
 - 3.3.5 超声速飞机续航性能的特点 74
 - 3.3.6 起飞和着陆性能 75
- 3.4 飞机的机动飞行性能 83
 - 3.4.1 机动的定义 83
 - 3.4.2 机动类型 84
 - 3.4.3 机动性能 84
 - 3.4.4 水平平面内的机动性能 85
 - 3.4.5 飞机机动飞行性能综合分析 88
- 练习题 90
- 参考文献 90

第4章 飞机的静稳定和控制 91

- 4.1 纵向定直飞行飞机力平衡和力矩平衡 91
 - 4.1.1 运动形式及其性能指标 92
 - 4.1.2 飞机的俯仰平衡 93
- 4.2 纵向曲线飞行中飞机的附加气动力矩及其平衡 109
 - 4.2.1 平尾的阻尼力矩 110
 - 4.2.2 下洗时差阻尼力矩 111
 - 4.2.3 拉升运动中的平衡问题 113
- 4.3 升降舵的铰链力矩和驾驶杆力 115
 - 4.3.1 压力分布与铰链力矩 116
 - 4.3.2 定直平飞的平衡杆力 116
 - 4.3.3 平衡杆力曲线 117

- 4.3.4 松杆问题 118
- 4.3.5 拉升运动的附加杆力 119
- 4.3.6 重心前后限 120
- 4.4 横侧向静稳定及力矩平衡 121
 - 4.4.1 侧力和横侧向力矩 122
 - 4.4.2 横侧向静稳定性 123
 - 4.4.3 侧滑产生的侧力 125
 - 4.4.4 影响滚转静稳定性导数的因素 126
 - 4.4.5 影响航向稳定性导数的因素 131
 - 4.4.6 副翼产生的横侧向力矩 133
 - 4.4.7 方向舵产生的横侧向力矩 135
- 4.5 定常直线侧滑飞行中飞机的侧力平衡和力矩平衡 135
 - 4.5.1 定常侧滑的力与力矩平衡 135
 - 4.5.2 不对称动力飞行 138
- 4.6 定常曲线飞行中飞机的侧力平衡和力矩平衡 139
 - 4.6.1 阻尼力、阻尼力矩与交感力矩 139
 - 4.6.2 定常曲线飞行的力矩平衡 140
 - 4.6.3 稳定横滚运动 141
 - 4.6.4 正常盘旋运动的受力平衡 141
 - 4.6.5 定常飞行中副翼和方向舵的平衡杆力 142
- 练习题 143
- 参考文献 144

第5章 刚体飞行器的运动方程 145

- 5.1 飞机运动假设 145
- 5.2 动力学方程的建立 145
 - 5.2.1 质心动力学 145
 - 5.2.2 刚体转动动力学 146
 - 5.2.3 刚体转动动力学方程推导 147
- 5.3 运动学方程 148
 - 5.3.1 运动学方程推导 148
 - 5.3.2 飞机运动学方程组 150
 - 5.3.3 动力学方程组讨论 150
- 5.4 飞机运动的纵横分离 151
 - 5.4.1 纵横分离 151
 - 5.4.2 纵向运动方程 151
 - 5.4.3 横侧向运动 156

- 5.4.4 飞行速度与机体速度转换关系 157
- 5.4.5 稳定轴系质心动力学方程 158
- 5.5 小扰动线性化动力学方程 158
 - 5.5.1 动力学方程组简化 159
 - 5.5.2 纵横分离的小扰动方程组 161
 - 5.5.3 稳定轴系的方程及其线性化 161
 - 5.5.4 力和力矩线性化 162
 - 5.5.5 稳定轴系的纵向耦合方程 163
 - 5.5.6 气动力和力矩线性化 163
 - 5.5.7 稳定轴系切向动力学方程线性化 164
 - 5.5.8 稳定轴系法向动力学方程线性化 164
 - 5.5.9 俯仰运动动力学方程线性化 166
 - 5.5.10 稳定轴系的横航向耦合方程 166
 - 5.5.11 质心动力学方程线性化 169
 - 5.5.12 质心运动方程的线性化 169
 - 5.5.13 力和力矩导数 170
 - 5.5.14 飞机的运动配平 171
 - 5.5.15 飞机线性状态方程分组 182
 - 5.5.16 横侧向小扰动的简化形式 188
 - 5.5.17 风扰条件下飞机线性模型 188
- 练习题 194
- 参考文献 194

第6章 飞机的运动稳定和控制 195

- 6.1 定常线性常微分系统的稳定性 195
- 6.2 纵向运动模态与稳定性分析 198
 - 6.2.1 纵向小扰动的两种典型运动模态 207
 - 6.2.2 飞机的纵向操纵运动 213
 - 6.2.3 飞行条件和气动参数对纵向动稳定性的影响 218
- 6.3 横侧向运动模态与稳定性分析 219
 - 6.3.1 横侧小扰动方程 219
 - 6.3.2 横侧扰动运动的典型模态分析 223
 - 6.3.3 气动参数的影响和稳定性边界的简略分析 226
 - 6.3.4 飞机的横侧向操纵运动 227
 - 6.3.5 纵横交感运动 233

练习题 234

参考文献 235