

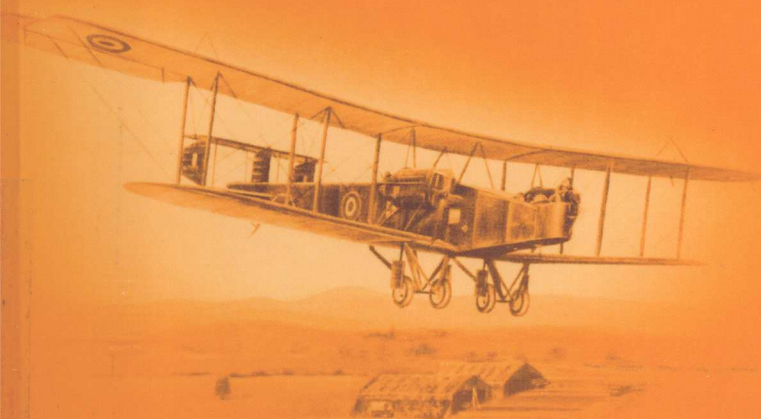


大飞机出版工程  
总主编 顾诵芬

# 飞机气动弹性力学 及载荷导论

Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads

【英】J·R·赖特 J·E·库珀 著  
姚一龙 译  
崔尔杰 校



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



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程  
总主编 顾诵芬

# 飞机气动弹性力学及载荷导论

---

Introduction to Aircraft Aeroelasticity and Loads

【英】J·R·赖特 J·E·库珀 著

姚一龙 译

崔尔杰 校



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

## 内 容 提 要

本书论述了飞机气动弹性力学和载荷的基础概念、技术背景和应用情况,内容覆盖了飞机设计部门可能遇到的各类基本气动弹性和载荷问题。所涉及的技术领域包括结构动力学、定常和非定常空气动力学、操纵、静气弹效应、颤振、有限元方法飞行机动、地面机动、遭遇突风和湍流等各种情况下的载荷计算。同时还介绍了航空航天行业进行适航审定所采用的典型方法。

本书适用于航空航天专业大学高年级学生、研究生以及有关技术人员。

(飞机气动弹性力学及载荷导论)

© J. R. Wright J. E. Cooper

This translation of *Introduction to Aircraft Aeroelasticity and loads* is published by arrangement with John Wiley & Sons Ltd in Chichester, England.

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Shanghai Jiaotong University Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

上海市版权局著作权合同登记章图字:09-2010-488

## 图书在版编目(CIP)数据

飞机气动弹性力学及载荷导论/(英)赖特(Wright, J. R.), (英)库珀(Cooper, J. E.)著;姚一龙译.—上海:上海交通大学出版社,2010

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-06899-6

I. ①飞… II. ①赖…②库…③姚… III. ①飞机—气动弹性力学②飞机—载荷 IV. ①V215

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 207862 号

## 飞机气动弹性力学及载荷导论

[英]J·R·赖特 J·E·库珀 著

姚一龙 译

崔尔杰 校

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 33.75 字数: 672 千字

2010 年 12 月第 1 版 2010 年 12 月第 1 次印刷

印数: 1~2030

ISBN 978-7-313-06899-6/V 定价: 138.00 元

版权所有 侵权必究

大飞机出版工程

## 丛书编委会

### 总主编:

顾诵芬(中国航空工业集团公司科技委副主任、两院院士)

### 副总主编:

金壮龙(中国商用飞机有限责任公司董事长、总经理)

马德秀(上海交通大学党委书记、教授)

### 编委:(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、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教授)

许金泉(上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、教授)

杨育中(中国航空工业集团公司原副总经理、研究员)

吴光辉(中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员)

汪海(上海交通大学航空航天学院副院长、研究员)

沈元康(国家民航总局原副局长、研究员)

陈刚(上海交通大学副校长、教授)

陈迎春(中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员)

林忠钦(上海交通大学副校长、教授)

金兴明(上海市经济与信息化委副主任、研究员)

金德琨(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

崔德刚(中国航空工业集团公司科技委委员、研究员)

敬忠良(上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授)

傅山(上海交通大学航空航天学院研究员)

# 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、重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,应用和体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 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起我国自主航空事业,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。大型客机项目其产业链长、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 B737 和

空客 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,集成了数学、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“大型飞机”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《飞机性能捷算法》,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飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了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“大型飞机”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”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5000问》、《英汉航空双向词典》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

# 原版前言

气动弹性力学研究气动力、弹性力和惯性力的相互作用。对于固定机翼飞机,该学科主要有两个研究领域:(1)静气动弹性力学。研究由飞机变形引起的升力分布而导致的静不稳定发散现象以及操纵面操纵效率的降低现象。(2)气动弹性力学,包括对颤振临界区域的研究。此种情况下,当飞机的结构从气流中汲取能量时,飞机将处于动力不稳定状态。

各种飞行机动(平衡/定常状态和动态)、地面机动以及遭遇突风/湍流都能产生一定的静动载荷作用于飞机,其中一些载荷状态常成为飞机结构的临界设计载荷而影响整个结构设计。这些载荷的确定涉及气动、弹性和惯性效应的研究以及动力响应问题的求解。由此可见气动弹性力学和载荷之间存在着密切的关系。

飞机振动特性以及响应特性是由飞机弹性模态结合刚体动力学特性以及可能存在的飞行控制系统特性确定的。飞机飞行控制系统作用时,飞机是一个闭环系统。飞行控制系统将同时影响气动弹性力学和载荷特性,气动伺服弹性力学研究飞行控制系统和气弹系统的相互作用。

本书力图覆盖飞机设计部门可能遇到的各类基本气弹和载荷问题,并阐明相关理论背景。航空航天行业同事经常指出,让新入行的工程师阅读气动弹性力学经典书籍甚为不妥,因为他们而言,现有太多的专业书籍过于理论化。事实上本书作者也发现,其中很多书的内容作为大学课程水平来讲授过于艰深。另一方面,气动弹性力学和载荷的内容在教科书中有分开讲授的趋势,而航空航天行业的各研究领域却更多地要求整合在一起。可以看到,本书提供了气弹和载荷分析中基本分析方法的基础知识。掌握这些知识后通过更高深的教科书、



技术论文和业界报告可对这些方法予以补充。

本书部分内容来自伦敦大学玛丽皇后学院和曼彻斯特大学的大学课程。在英国,许多航空航天行业的新入行者并无行业工作背景,并几乎可肯定他们也无气动弹性力学和载荷领域的知识。作为解决这一问题的起点,早在1990年代初期本书作者就为英国航空航天行业年轻的工程师们举办过几期气动弹性力学和结构动力学方面的短期课程,这些课程内容影响了本书内容和阐述方法。影响本书更重要的因素,是来自 Hancock, Simpson 和 Wright (1985)在颤振教育领域中的教育经验以及他们在颤振基础原理研究中取得的工作经验。这一基础研究采用一个具有扑动和俯仰自由度的简化机翼颤振理论模型(采用片条气动力理论,同时还建立了一个简化的非定常气动力模型)进行颤振基础原理的描述。本书采用的静气弹和颤振研究方法沿用了这一研究思路,并通过对全机简化弹性模型的集中研究,突出模型化和分析中的关键特征,并将之拓展到载荷研究领域。

本书旨在为读者提供技术背景,使之了解飞机气动弹性力学和载荷问题的基础概念和应用情况。尽量采用简化弹性飞机数学模型来阐述各种气弹现象,并揭示理论分析模型、航空航天行业应用实际以及适航审定过程之间的联系。本书采用基于少量假设模态(以避免出现偏微分方程组)且较为简单的连续模型,因而书中大部分内容均基于片条理论的气动力学方法和 Rayleigh - Ritz 假设模态方法。对于一个最多三自由度系统的大部分气弹概念,都可用这种方法进行描述。在引入这些连续模型之后,还介绍了若干基本结构、气动离散型模型,以让读者对当今航空航天行业实际应用情况窥见一斑。本书适用于大学最后一学年的学生、具有硕士水平的学生或者刚涉足这一工作领域的工程师。本书可为气动弹性力学和载荷两个教育单元提供基础内容。期望本书能在提供丰富的气弹和载荷基础研究方法方面填补空白。

为实现编写本书的初衷,本书收集的众多题材内容广泛,其中包括结构动力学、定常和非定常空气动力学、载荷、操纵、静气弹效应、颤振、飞行机动(含定常/平衡和动力情况)、地面机动(如着陆,滑行)、遭遇突风和湍流、载荷计算以及有限元方法和三维面元方法等。本书还简要介绍了航空航天行业在以上各个领域中进行适航审定所采用的典型方法。本书论述的大部分问题集中在商用飞机而

非军用飞机上,当然两者采用的所有基本原理以及大部分应用方法都是相同的。

本书符号的命名没有采用简单的直观命名方法,因为许多命名规则仍是倾向于允许不同的变量采用同样的符号来表示。正因为这样,符号命名方法必然是一种折中的方法。美国气动弹性力学教科书用  $k$  来表示非定常气动力的减缩频率,不同于世界其他各地常用的  $\nu$ ,这种现象的趋势更增加了问题的复杂性。本书所采用减缩频率的符号,与气动弹性力学经典教科书中的符号一致。

本书分成三个部分。第一部分在简单地引入气动弹性力学和载荷的概念后,介绍了有关离散参数系统和连续参数系统(Rayleigh-Ritz方法和有限元方法)的单自由度和多自由度振动基础背景材料,以及定常空气动力学、载荷和操纵的有关知识。这部分内容并非十分详细,因为作者认为本书读者具有工程学位,对所涉及的大部分题材已有一定的基础知识,并且在需要时有能力阅读更深入各类文献。

第二部分是本书的主要部分,涵盖的基本原理和概念都是理解当前航空航天行业实际应用方法的敲门砖。本部分有关气动弹性力学的章节有静气动弹性力学(升力分布、发散和操纵效率)、非定常空气动力学、动气动弹性力学(即颤振)以及气动伺服弹性力学等内容。大部分的分析处理方法基于一个简单的机翼扑动/俯仰二自由度模型,有时还考虑了附着于具有自由沉浮和俯仰刚体运动的机身情况。本部分有关载荷的章节包括平衡和动力飞行机动、遭遇突风和湍流、地面机动和内载荷等内容。绝大部分载荷分析基于一个具有沉浮和俯仰刚体运动以及一个自由-自由弹性模态(其模态特性可变化,以允许出现机身弯曲、机翼弯曲或机翼扭转变形的主导模态)的三自由度全机模型。第二部分最后的内容介绍了三维气动面元法以及离散气动/结构简单耦合模型的建立,以适应从Rayleigh-Ritz假设模态法和片条理论方法向更先进方法的发展,而这些更先进的方法正是当今许多航空航天行业实际方法的基础。

上述两部分介绍的基本理论是理解第三部分内容的基础。第三部分给出了飞机设计和适航审定过程中航空航天行业实际应进行的典型工作:包括气弹建模、静气弹和颤振、飞行机动以及突风/湍流载荷、地面机动载荷以及与气动弹性力学和载荷相关的各种试验工作。以下因特网网站 <http://www.wiley.com/go/wright&cooper> 给出了几个与本书有关的 MATLAB/SIMULINK 程序。

感谢来自英国各大学诸多同事 (John Ackroyd、Philip Bonello、Grigorios Dimitriadis、Zhengtao Ding、Dominic Diston、Barry Lennox 以及 Gareth Vio) 的帮助。同时作者十分珍视 Mark Hockenhull、Tom Siddall、Peter Denner、Paul Bruss、Duncan Patrick、Mark Holden 以及 Norman Wood 所提供的关于航空航天行业实际方面的宝贵内容。作者十分感激与曼彻斯特大学来自航空航天行业的访问学者 (Rob Chapman、Brian Caldwell、Saman Samarasekera、Chris Fielding 以及 Brian Oldfield) 有益的讨论。书中一些图形和计算是由 Colin Leung、Graham Kell 以及 Gareth Vio 提供的。书中的图片由 Airbus、Messier - Dowty、DLR、DGA/CEAT、ONERA、Royal Aeronautical Society 以及 ESDU 等公司和部门友好提供。应用的软件则由 MATLAB 提供。

作者在过去几年从事的结构动力学、飞机结构、载荷以及气动弹性力学研究和教学活动中受到了来自 Alan Simpson (布里斯托尔大学)、Mike Turner (已去世, 英国飞机公司)、Geoff Hancock 和 David Sharpe (玛丽皇后学院)、Colin Skingle、Ian Kaynes 和 Malcolm Nash (RAE Farnborough, 现在 QinetiQ)、Jer - Nan Juang (NASA Langley)、Peter Laws (曼彻斯特大学)、Geof Tomlinson (谢菲尔德大学, 以前在曼彻斯特大学)、Otto Sensburg (MBB) 和 Hans Schwieger (EADS) 等人的支持和鼓励。作者对此表示衷心感谢。

Jan Wright、Jonathan Cooper

曼彻斯特, 英国

# 目 录

绪论 1

## 第一部分 背景资料 7

- 1 单自由度系统振动 9
  - 1.1 单自由度系统运动方程的建立 9
  - 1.2 单自由度系统自由振动 11
  - 1.3 单自由度系统强迫振动 12
  - 1.4 谐和强迫振动——频率响应函数 13
  - 1.5 瞬态/随机强迫振动——时域解 16
  - 1.6 瞬态强迫振动——频域解 19
  - 1.7 随机强迫振动——频域解 21
  - 1.8 习题 22
- 2 多自由度系统振动 24
  - 2.1 运动方程的建立 24
  - 2.2 无阻尼自由振动 26
  - 2.3 阻尼自由振动 30
  - 2.4 模态坐标的变换 32
  - 2.5 “自由-自由”系统 36
  - 2.6 谐和强迫振动 36
  - 2.7 瞬态/随机强迫振动——时域解 38
  - 2.8 瞬态强迫振动——频域解 39
  - 2.9 随机强迫振动——频域解 39
  - 2.10 习题 39
- 3 连续系统振动——假设形态法 42

- 3.1 RAYLEIGH-RITZ 假设形态法 43
- 3.2 广义运动方程——基本方法 44
- 3.3 广义运动方程——矩阵方法 48
- 3.4 根据“分支”模态建立飞机“自由-自由”模态 50
- 3.5 全机“自由-自由”模态 53
- 3.6 习题 55
- 4 连续系统振动——离散法 57
  - 4.1 有限元法(FE)简介 57
  - 4.2 弯曲梁元公式 59
  - 4.3 梁元结构的组装和求解 62
  - 4.4 扭转元 67
  - 4.5 弯曲/扭转组合元 68
  - 4.6 关于建模的意见 68
  - 4.7 习题 70
- 5 定常空气动力学导论 72
  - 5.1 标准大气 72
  - 5.2 空气速度对气动特性的影响 73
  - 5.3 对称翼型的绕流和压力 75
  - 5.4 作用在翼型上的力 77
  - 5.5 翼型具有攻角时的升力变化 77
  - 5.6 俯仰力矩变化和气动中心 78
  - 5.7 三维机翼上的升力 79
  - 5.8 三维机翼上的阻力 83
  - 5.9 操纵面 84
  - 5.10 超声速空气动力学——活塞理论 85
  - 5.11 跨声速流 85
  - 5.12 习题 85
- 6 载荷导论 87
  - 6.1 运动定律 87
  - 6.2 D'ALEMBERT 原理——惯性力和惯性力偶 90
  - 6.3 外载荷/反作用载荷 93
  - 6.4 自由体图 94
  - 6.5 内载荷 95

- 6.6 连续模型结构的内载荷 95
- 6.7 离散模型结构的内载荷 99
- 6.8 部件间载荷 101
- 6.9 由内载荷确定应力——具有简单载荷路径的结构构件 101
- 6.10 习题 101
- 7 控制导论 105
  - 7.1 开环和闭环系统 105
  - 7.2 LAPLACE 变换 106
  - 7.3 开环、闭环系统在 Laplace 域和频域内的模型化 108
  - 7.4 系统稳定性 109
  - 7.5 PID 控制 115
  - 7.6 习题 116

## 第二部分 气动弹性力学和载荷导论 117

- 8 静气动弹性力学——机翼弹性对升力分布和发散的影响 119
  - 8.1 具有弹簧约束二维刚体翼型的静气弹特性 120
  - 8.2 根部固支弹性机翼的静气弹特性 122
  - 8.3 配平对静气弹特性的影响 125
  - 8.4 机翼后掠对静气弹特性的影响 129
  - 8.5 习题 134
- 9 静气动弹性力学——机翼弹性对操纵效率的影响 135
  - 9.1 弹性机翼的滚转操纵效率——定常滚转情况 135
  - 9.2 弹性机翼的滚转操纵效率——根部固支机翼情况 140
  - 9.3 操纵面展向位置的影响 143
  - 9.4 全机模型下的操纵效率分析 143
  - 9.5 配平对反效速度的影响 144
  - 9.6 习题 145
- 10 非定常空气动力学导论 146
  - 10.1 准定常空气动力学 146
  - 10.2 非定常空气动力学 147
  - 10.3 谐和振荡翼型的气动力和气动力矩 151
  - 10.4 振荡气动导数 152
  - 10.5 气动阻尼和气动刚度 153

- 10.6 与突风有关的非定常气动力学 154
- 10.7 习题 158
- 11 动气动弹性力学——颤振 159
  - 11.1 非定常气动力简化模型 159
  - 11.2 二元气弹模型 161
  - 11.3 气动弹性方程的一般形式 163
  - 11.4 颤振方程的特征值求解 163
  - 11.5 二元模型的气弹特性 164
  - 11.6 弹性机翼的气弹特性 173
  - 11.7 多模态系统的气弹特性 174
  - 11.8 二元系统颤振速度预测 174
  - 11.9 颤振二次曲线 176
  - 11.10 气弹系统的发散问题 178
  - 11.11 非定常减缩频率影响的计入 180
  - 11.12 操纵面颤振 183
  - 11.13 全机模型——刚性模态的计入 186
  - 11.14 跨声速流中的颤振 186
  - 11.15 超声速流中的颤振问题——机翼颤振和壁板颤振 187
  - 11.16 非线性的影响——极限环振荡 189
  - 11.17 习题 191
- 12 气动伺服弹性力学 193
  - 12.1 带操纵面简单气弹系统的数学模型化方法 194
  - 12.2 突风项的计入 195
  - 12.3 控制系统的实施 196
  - 12.4 闭环系统稳定性的确定 196
  - 12.5 闭环系统的突风响应 198
  - 12.6 频率依赖的控制率应用于稳定性计算 199
  - 12.7 频域内的响应分析 200
  - 12.8 状态空间的模型化方法 200
  - 12.9 习题 201
- 13 平衡机动 202
  - 13.1 平衡机动——具有法向加速度的刚性飞机 204
  - 13.2 机动包线 208

- 
- 13.3 平衡机动——刚性飞机俯仰 209
  - 13.4 平衡机动——弹性飞机俯仰 216
  - 13.5 刚性飞机俯仰导数的弹性修正 229
  - 13.6 平衡机动——飞机滚转和偏航 230
  - 13.7 飞行控制系统(FCS)的模型化 233
  - 13.8 习题 233
  - 14 动力学机动的飞行力学模型 235
    - 14.1 飞机轴系 236
    - 14.2 运动变量 237
    - 14.3 轴系变换 238
    - 14.4 运动轴系中的速度和加速度分量 239
    - 14.5 刚性飞机的飞行力学运动方程 242
    - 14.6 扰动力和扰动力矩的模型化 244
    - 14.7 弹性飞机纵向运动方程 246
    - 14.8 飞行力学方程的求解 251
    - 14.9 飞行控制系统(FCS) 252
  - 15 动力学机动 254
    - 15.1 动力学机动——由升降舵输入产生的刚性飞机沉浮/俯仰 255
    - 15.2 动力学机动——由升降舵输入产生的弹性飞机沉浮/俯仰 261
    - 15.3 纵向运动方程的一般形式 267
    - 15.4 动力学机动——由副翼输入产生的刚性飞机滚转 268
    - 15.5 动力学机动——由副翼输入产生的弹性飞机滚转 272
    - 15.6 飞行力学方程的弹性修正 278
    - 15.7 飞行控制系统(FCS)的模型化 279
    - 15.8 习题 279
  - 16 遭遇突风和湍流 281
    - 16.1 突风和湍流 282
    - 16.2 时域内的突风响应 283
    - 16.3 时域突风响应——刚性飞机沉浮 285
    - 16.4 时域突风响应——刚性飞机沉浮/俯仰 291
    - 16.5 时域突风响应——弹性飞机 295
    - 16.6 时域内运动方程的一般形式 301
    - 16.7 频域内的湍流响应 301



- 16.8 频域湍流响应——刚性飞机沉浮 304
- 16.9 频域湍流响应——刚性飞机沉浮/俯仰 308
- 16.10 频域湍流响应——弹性飞机 310
- 16.11 频域内运动方程的一般形式 312
- 16.12 飞行控制系统(FCS)的模型化 313
- 16.13 习题 313
- 17 地面机动 315
  - 17.1 起落架 315
  - 17.2 滑行、起飞和着陆滑跑 319
  - 17.3 着陆 326
  - 17.4 刹车 331
  - 17.5 “起旋”和“回弹”条件 334
  - 17.6 转弯 335
  - 17.7 摆振 336
  - 17.8 飞行控制系统(FCS)的模型化 338
  - 17.9 习题 338
- 18 飞机内载荷 340
  - 18.1 限制载荷和极限载荷 341
  - 18.2 飞机内载荷 341
  - 18.3 内载荷的一般表达式——连续机翼 342
  - 18.4 翼置发动机/起落架的影响 345
  - 18.5 内载荷——连续弹性机翼 345
  - 18.6 内载荷的一般表达式——离散机翼 351
  - 18.7 内载荷——离散机身 354
  - 18.8 内载荷——遭遇连续湍流 357
  - 18.9 临界载荷的产生和筛选 358
  - 18.10 确定飞机尺寸的临界情况 360
  - 18.11 由内载荷求取应力——复杂载荷路径 361
  - 18.12 习题 361
- 19 势流气动力学 364
  - 19.1 无黏不可压缩流动分析的基本方法 364
  - 19.2 涡的计入 368
  - 19.3 二维薄翼定常气动力的数值模型化 371