



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

航空航天科技出版工程

3

结构技术

[英] 理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美] 史维 (Wei Shyy) ©主编

杨超 熊克 齐艳丽 周思达 宋晨 等◎译



*ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 3
Structural Technology*

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

WILEY





国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

航空航天科技出版工程

3

结构技术

[英]理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美]史维 (Wei Shyy) ©主编

杨超 熊克 齐艳丽 周思达 宋晨 等◎译

*ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 3
Structural Technology*

图书在版编目 (CIP) 数据

航空航天科技出版工程. 3, 结构技术 / (英) 理查德·布洛克利 (Richard Blockley), (美) 史维 (Wei Shyy) 主编; 杨超等译. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 6

书名原文: Encyclopedia of aerospace engineering

国家出版基金项目 “十二五” 国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978 - 7 - 5682 - 2421 - 5

I. ①航… II. ①理… ②史… ③杨… III. ①航空工程-工程结构②航天工程-工程结构 IV. ①V
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 126206 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01 - 2013 - 1965 号

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 Beijing Institute of Technology Press Co., LTD 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.

封面图片来源:



源自 ONERA, France



源自 Shutterstock



源自 Shutterstock



源自 EADS Astrium

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 889 毫米×1194 毫米 1/16

印 张 / 37.75

字 数 / 1091 千字

版 次 / 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 228.00 元

责任编辑 / 李秀梅

文案编辑 / 杜春英

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

航空航天科技出版工程

译审委员会

主任 杜善义
副主任 李椿萱 余梦伦 黄瑞松 叶培建 唐长红 甘晓华
委员 (按姓氏笔画排序)
才满瑞 刘 莉 杨 超 昂海松 周志成 唐胜景 熊 克

翻译委员会

主任 刘 莉
副主任 朱春玲 赵 宁 江 驹
委员 (按姓氏笔画排序)
万志强 马东立 王晓芳 王焕瑾 王锁柱 毛军逵 古兴瑾
龙 腾 朱程香 向彩霞 刘东旭 齐艳丽 孙康文 孙慧玉
杜 骞 杜小菁 李 书 李 响 李世鹏 杨春信 肖天航
吴小胜 吴志刚 宋 晨 宋豪鹏 张景瑞 陈永亮 武志文
林 海 昂海松 周光明 周建江 周思达 周储伟 郑祥明
徐 军 徐 明 郭 杰 唐胜景 黄晓鹏 龚 正 韩 潮
韩启祥 谢 侃 谢长川 雷娟棉 谭慧俊 熊 克 冀四梅

审校委员会

主任 林 杰
副主任 樊红亮 李炳泉
委员 (按姓氏笔画排序)
于 勇 王佳蕾 王玲玲 王美丽 尹 晷 白照广 多海鹏
祁载康 杜春英 李秀梅 杨 侧 张云飞 张海丽 张鑫星
陈 竑 季路成 周瑞红 孟雯雯 封 雪 钟 博 梁铜华

推荐序

航空航天是国家的战略产业，其科技水平直接决定着综合国力和国家安全。近年来，我国航空航天科技水平得到显著提升，在若干领域取得了举世瞩目的成就。在建设航空航天强国的进程中，广大科技人员需要学习和借鉴世界航空航天科技的最新成就。《航空航天科技出版工程》是综合反映当今世界范围内航空航天科技发展现状和研究前沿的一套丛书，具有系统性、学术性、前沿性等特点。该丛书的翻译和出版，为我国科技工作者学习和借鉴世界航空航天科技提供了一个良好平台。

《航空航天科技出版工程》英文版由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版。全世界 34 位来自航空航天领域的顶级专家组成丛书顾问团，负责对丛书进行规划指导，来自美国、英国、德国、法国等国家的 600 多位著名专家参与丛书撰写。该丛书是当今世界上最为系统和权威的航空航天科技丛书，共有 9 卷、近 5000 页，涵盖航空航天科技的 43 个领域主题，442 个章节。该丛书对航空航天科技所涉及的重要概念、理论、计算、实验等进行了系统阐述，并配有大量工程实践案例，主要内容包括：流体动力学与空气热力学、推进与动力、结构技术、材料技术、动力学与控制、环境影响与制造、飞行器设计、系统工程等。最难能可贵的是，该丛书对航空航天工程的战略决策、实施路径、技术应用、实践验证和评价等方面进行了系统阐释，对未来二十年面临的挑战和机遇进行了深入分析。

该丛书中有些专题研究在我国尚属起步阶段，不少内容是国内紧缺的文献资料。例如，丛书对高超声速稀薄气体动力学、扑翼空气动力学、高超声速气动热弹性、多运动体协调控制、多种飞行器融合、深空探测、航天系统设计认证等领域的介绍颇有参考价值。丛书内容不仅适用于国防领域，而且适用于民用领域，对我国航空航天科技发展具有指导意义。

北京理工大学是我国首批设立火箭、导弹等专业的高校，曾为我国航天事业的创立和发展做出重要贡献，近年来又在深空探测、制导武器、空间信息处理等领域取得重要进展。该丛书英文版问世不久，北京理工大学出版社敏锐地预判到该丛书对我国航空航天科技发展具有重要借鉴作用，提出翻译这套巨著的设想。北京理工大学航空航天学科的教授们积极投身于翻译丛书的策划中，他们联合我国高校、研究机构中一



批长期从事航空航天科技工作的教师和工程技术人员组成团队，仅用一年多时间就将这套巨著译为中文。我帮助他们邀请到丛书英文版顾问、著名航天结构力学家杜善义院士担任译审委员会主任，邀请到我国航空航天科技领域的多位领军科学家、总设计师共同负责丛书译审，进而确保中文版的科学性、准确性、权威性。

作为长期从事航空航天科技工作的学者，看到这套丛书即将问世由衷高兴。我认为，该丛书将为我国航空航天科技工作者提供一套不可多得的工具书，有利于提升我国航空航天科技水平，有利于促进我国航空航天科技与世界航空航天科技的有效对接，有利于推动我国建设航空航天强国。因此，我郑重向航空航天科技界的同行们推荐这套丛书。

中国科学院院士
北京理工大学校长

译者序

航空航天的发展水平体现了一个国家的综合实力。我国高度重视航空航天技术的创新发展，将航空航天产业列入国家战略性新兴产业和优先发展的高技术产业。近年来，国家科技重大专项（如大型飞机、载人航天与探月工程、高分辨率对地观测、航空发动机与燃气轮机等）的实施带动了我国航空航天技术的迅猛发展。

航空航天技术的发展日新月异并呈现出跨学科化和国际化的特征，国内学者需要一套系统全面的丛书，来巩固现有的知识、了解国际前沿发展动态、紧盯航空航天科技前沿。《航空航天科技出版工程》正是这样的一套技术研究丛书。北京理工大学出版社在组织专家对英文版《航空航天科技出版工程》的章节标题及主要内容进行翻译和评审后，发现该丛书内容翔实、信息丰富、学科体系完整，具有较高的前瞻性、探索性、系统性和实用性，是一套对中国航空航天领域有较强学习与借鉴作用的专著。因此，出版社决定引进、出版本套丛书的中文版。

英文版《航空航天科技出版工程》由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版，主编为 Richard Blockley（英国克兰菲尔德大学航空航天顾问、英国 BAE 系统公司前技术总监）和 Wei Shyy（原美国密歇根大学航空航天工程系教授兼系主任），历经多年，完成了 9 卷的出版。各章均由活跃在全球航空航天各专业领域研究一线的专家执笔，集成了编写团队在航空航天科技领域的重要科学研究成果和宝贵的科学试验数据。

《航空航天科技出版工程》从力学、动力及推进技术、制导和控制技术、电子仪表技术、通信技术、计算机科学、系统工程、材料科学、加工和制造技术及空间物理学等多个相互支撑的学科技术领域，全面而系统地阐述航空航天领域所涉及的知识，综合体现了目前航空航天技术的国际水平。9 卷包括《流体动力学与空气热力学》《推进与动力》《结构技术》《材料技术》《动力学与控制》《环境影响与制造》《飞行器设计》《系统工程》《航空航天专业术语》。丛书中文版配有丰富的原版插图、表格以及大量的图片资料，最大程度地保留了原版书的编写风格。该丛书对于国内的科研和技术人员，以及承担着未来航空航天技术开发的年轻人和学生来说，都无疑是一套非常好的参考资料。



北京理工大学出版社依托北京理工大学、南京航空航天大学、北京航空航天大学、中国航天科工集团北京航天长征科技信息研究所、中国航天科技集团空间技术研究院等国内从事航空航天技术研究的高校和科研院所，组建了翻译团队和专家译审团队，对《航空航天科技出版工程》进行翻译。

《航空航天科技出版工程 3 结构技术》包含结构力学、气动弹性和气动伺服弹性、计算固体力学和流体-结构相互作用、结构力学试验技术、结构健康监测 5 个部分，由杨超、熊克、齐艳丽、周思达、宋晨、卞侃、万志强、吴志刚、谢长川、董威利、陈鑫、姜颀、刘璐、杨武、李昱霖、董晓龙、马志赛、刘焱、杜子亮、张仁嘉、马家骏、黄超、毕莹、马成骥、张新蕾、李航、张赫、张利娟、纪嘉琰、程昱、姚爽、刘耘臻、刘珊、唐健、刘超、王斐、尹会伟、王晓喆、赵黄达、高翔、杨开、王璐、陈思、康开华、韩洪涛、曲晶、曲婧、张绿云、陈允宗翻译。特别感谢出版社引进本书，更感谢各位院士学者们对此书出版的大力支持。译、校者虽在译文、专业内容、名词术语等方面进行了反复斟酌，并向有关专业人员请教，但限于译、校者的水平与对新知识的理解程度，谬误和不当之处恳请读者批评、指正。

翻译委员会

英文版序

能够受邀介绍这部航空航天丛书，我们和各自代表的学会都感到非常的荣幸和愉快。

毫无疑问，这部丛书体现了英国皇家航空学会和美国航空航天学会最大的期望。我们这两个学会都在寻求推进航空航天知识体系进步的方法，同时也都认识到航空航天领域具有动态、多学科和跨国界的特性。

这部丛书是一个独特的工具。它提供了涉及很多方面的快照，包含：全球共享的知识体系、全球企业共享的观念、共享的技术展望和挑战、共享的发展节奏、新方法和新视野，尤其是共享的对教育和培训重要性的关注——所有这些都是关于一个工业领域和一组学科，是它们塑造了并将继续改变我们所生活的世界。

这个共享的知识体系超出了国家的、商业的、组织的和技术学科的界限。在这个界限中我们进行着日复一日的工作，虽然这些工作必然引起经常的竞争，但也总是激发创新性和建设性的尝试。因此，我们怀着无比激动的心情看到了一项完全专业性工作的开展，它尝试着将这个知识体系的精华以全新的形式整理和出版。

航空航天领域对我们世界的影响是巨大的。早期的空气动力学创立者，从 George Cayley 爵士到 Wright 兄弟，都难以想象航空工业、更不必说太空飞行是如何彻底改变了我们的文明世界：它使我们的星球变成了一个很小的区域、允许瞬时联系全球任何地方、提供大范围的人和物资运输以及可以从外太空独特的视角来观看我们的星球和人类自己。航空航天工程师不仅直接为我们收集的知识体系做出了贡献，还驱动了广大的相关领域的进步，从基础的数学、电子学和材料科学到生物学和人因工程。因此，说这部丛书捕捉到了该领域当下的精华是非常恰当的。

对于内容广泛的航空航天工程技术和研究领域，提取其关键要素形成一个相互关联的框架结构，并不具备明显的可能性，更不要说涉及诸多细节。然而这部丛书正是要雄心勃勃地尝试做到这些，甚至更多。从这点看，这部丛书是一个勇敢的、有远见的、有胆识的计划。

这部丛书勾画出了我们领域最好和最醒目的专门技术，其成果是对发起者和作者们最好的回报，这些人值得我们向他们对航空航天行业做出的贡献表示祝贺。



虽然这部丛书的目标是达到相当的深度，但从实用的角度，这部丛书被设计成非常容易阅读和理解。我们希望读者看到这部丛书并可以广泛地应用，包括作为权威的参考书目、作为学习和专业发展的重要工具，或许可以作为课程作业和技术模块设计跨国界、跨机构可信赖的测试基准。

正值载人动力飞行第二个百年开始，太空的前景似乎正在不断复苏，这部丛书的出版是航空航天工程和科学持续发展的里程碑和标志。

我们非常自豪地、共同地将这部丛书推荐给你们。

Dr. Mark J. Lewis

美国航空航天学会主席

马里兰大学帕克分校航空航天工程系主任、教授，马里兰州，美国

Dr. Mike Steeden

英国皇家航空学会主席，英国

英文版前言

航空航天工程的历史可以追溯到早期希腊的哲学家亚里士多德和阿基米德，经哥白尼、伽利略、达·芬奇、牛顿、伯努利和欧拉到 19 世纪伟大的机械师纳威、斯托克顿和雷诺以及许多其他研究者，一直到 1903 年由莱特兄弟第一次成功地起飞了一台比空气重的动力机器。从普朗特、冯·卡门、惠特尔、冯·奥西恩、屈西曼、冯·布劳恩和科罗廖夫（这里只给出了少数的名字）等人开创性的成就，仅仅过去一个世纪的时间，航空器和航天器就以一种让最有远见的现代飞行预见者都震惊的速度得到了发展。超音速飞行（具有代表性的协和号客机、SR71 黑鸟式侦察机）、人类在月球上行走以及航天器向太阳系的远端航行，这些都是顽强不屈的技术探索的见证。

几代哲学家、科学家和工程师的工作使航空航天工程形成一个确定的学科，而且需要持续对新的商业、环境和安全相关因素、科学技术领域其他学科的进展、之前未探索的飞行器设计概念、推进、结构与材料、控制、导航和动力学、通信、航空电子、天基系统与旅行中的技术挑战等做出响应。航空航天工程产品是科学与技术多学科综合的产物，当航空器和航天器中的系统集成变得越来越复杂的时候，前所未有的设计挑战出现了，一个部门就需要借鉴不同领域的专业知识。因此，工程师们不仅需要专注于专门知识，还需要将他们的知识扩展到更广泛的学科领域。

本套书的主要目的是：为本科生、研究生以及学术界、工业界、研究机构和政府部门中的专业人士提供一个随手可得的、涵盖航空航天工程主要学科的专用参考书。本套书阐述了基本科学概念及其在当前工程实践中的应用，并将读者引导到更专业的书籍中。

本套书包含 442 篇文章，划分为 43 个领域主题，围绕科学基础和当前的工业实践，贯穿了航空航天工程的全部。当本套书被确定在同类著作中最先出版时，编辑团队从支撑航空航天科学、工程与技术研究和开发的专家们那里得到了原作稿件的授权。这些稿件包括力学、推进、导航与控制、电子器件和测量仪表、通信、计算机科学、系统工程、材料科学、生产与制造以及物理学。此外，考虑到当前围绕航空的担忧，环境科学、噪声与排放中的一些特定学科也被包含在本套书中。



本套书由热心的、杰出的国际顾问委员会指导编写，委员会由 34 名来自学术界、工业界和研究中心的委员组成。在顾问委员会的指导下，我们确定了一个主要作者团队，由他们来确定每个主题覆盖的范围，并选择了有能力来贡献他们文章的合适的作者。

在本套书的引导章节中，包含了系统思想的概念和在可预见的未来航空航天工程师们将面临的挑战。在顾问委员会和主要作者团队的大力帮助下，我们试图包含有人、无人航空器和航天器领域中所有的主题，然而我们意识到还有一些重要的主题没有涉及，或是因为我们没有及时注意到它们，或是由于作者没能赶上最后的出版期限。我们打算将后续的投稿和最新的进展放在每年的在线更新中。

非常遗憾，我们的一位主题作者 Philip Pugh 于 2009 年 1 月去世了，他为第 37 部分的规划和前期实施做出了难以估量的贡献。我们也非常感谢 David Faddy 继续完成了这一部分的工作。

Richard Blockley

克兰菲尔德大学航空航天顾问，克兰菲尔德，英国

BAE 系统公司前技术总监，法恩伯勒，英国

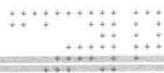
Wei Shyy

密歇根大学航空航天工程系，安娜堡，密歇根州，美国

目 录



Contents



第13部分 结构力学

■ 第121章 线弹性力学	3
1 引言	3
2 数学预备知识	3
3 变形的运动学	4
3.1 应变张量	4
3.2 线性应变张量	5
3.3 应变协调关系	6
4 平衡条件和应力张量	7
4.1 总体平衡条件	7
4.2 柯西应力张量	7
4.3 局部平衡方程	7
4.4 应变能函数	8
5 本构关系	8
5.1 各向同性弹性体	8
5.2 热效应	9
5.3 各向异性弹性体	9
6 弹性力学基本问题	10
7 平面问题, Airy 应力函数	10
8 实例	11
8.1 内外压强作用下的空心圆柱	11
8.2 空心圆柱的热应力	12
8.3 圆孔处的应力集中	12
9 总结	13
致谢	13
参考文献	13
■ 第122章 结构力学中的变分原理	14
1 引言	14
2 变分法	14
2.1 多元微积分概要	15

2.2 变分法	15
2.3 欧拉-拉格朗日方程	15
2.4 附加条件	16
3 结构力学中的变分原理	17
3.1 虚功原理	17
3.2 余虚功原理	19
3.3 势能原理	20
3.4 哈密顿原理	22
4 总结	23
致谢	24
注释	24
参考文献	24
扩展阅读	24

■ 第123章 杆的扭转和梁的弯曲	25
1 引言	25
2 扭转元件	25
2.1 实心截面杆	25
2.2 闭口薄壁截面杆	27
2.3 端部约束效应	27
3 弯曲部件	27
3.1 双向弯曲	27
3.2 薄壁截面中的弯曲剪流	28
4 总结	30
术语	31
扩展阅读	31

■ 第124章 板和壳	32
1 引言	32
2 板壳经典理论	34
3 各向同性薄板的弯曲与屈曲	34
3.1 几何线性问题	34
3.2 几何非线性问题	36



4 板壳结构的加强与开口	36
4.1 加筋板与壳	36
4.2 板壳结构中的开口和开孔	37
5 复合材料板壳和夹层板壳	37
5.1 复合材料结构	37
5.2 夹层结构	37
6 总结	38
相关章节	38
参考文献	38

■ 第 125 章 航空结构中的疲劳与断裂力学

1 疲劳发展史	40
2 安全寿命的工程描述	40
3 应力-寿命图 (S-N 曲线)	41
4 平均应力效应: 古德曼关系	41
5 变幅载荷: 帕姆格伦-迈因纳定律	42
6 疲劳设计方法: 安全寿命、破损安全和损伤容限	42
7 基于应力的断裂分析方法	44
8 基于能量的断裂分析方法	45
9 非线性断裂力学	46
10 疲劳裂纹的扩展 (Paris 公式)	47
11 总结与展望	47
术语	48
参考文献	48

■ 第 126 章 结构分析的有限元法

1 引言	50
1.1 模型问题: 轴向桁架	50
2 瑞利-里兹法	51
3 加权残值法	52
3.1 伽辽金近似法	52
4 有限元法	53
4.1 有限元法方程的建立	53
4.2 有限元组装和求解	54
5 梁弯曲	56
6 总结	57
相关章节	57
参考文献	57

■ 第 127 章 结构稳定性

1 引言	59
2 结构的静稳定性	59
2.1 结构的稳定性和不稳定性	59
2.2 连续变形弹性体	63

2.3 在轴向压缩作用下的两端简支梁屈曲分析	63
2.4 实验在结构稳定性中的作用	63
3 结构动力稳定性	64
3.1 引言及基本概念	64
3.2 突然加载系统的行为	65
4 总结	66
相关章节	66
参考文献	66

■ 第 128 章 结构动力学基础

1 引言	68
2 振动特性基础	68
3 多自由度结构系统	71
4 连续系统	72
4.1 哈密顿原理的应用	73
4.2 近似解法	76
5 有限元法	77
5.1 拉伸杆单元	79
5.2 梁弯曲的有限元模型	79
5.3 数值算例	80
6 其他航空航天领域	81
术语	81
相关章节	82
参考文献	82

■ 第 129 章 结构动力学中的阻尼

1 引言	83
2 模态阻尼	84
3 黏性阻尼	85
3.1 连续 (梁) 模型中的黏性阻尼	85
3.2 离散 (有限元) 模型中的黏性阻尼	86
4 结构或滞后阻尼	87
4.1 频率相关黏性阻尼	87
4.2 材料复模量	87
4.3 结构复模量	88
5 模态应变能方法	88
6 黏弹性材料模型	88
6.1 一般黏弹性模型	88
6.2 内变量黏弹性模型	89
6.3 分数次导数模型	90
6.4 非线性黏弹性模型	90
7 阻尼处理	90
7.1 分层阻尼处理	90
7.2 分路压电材料	91



7.3 阻尼复合材料	91	■ 第 132 章 静气动弹性与动气动弹性 ...	126
8 总结	92	1 引言	126
术语	92	2 飞行器结构动响应、稳定性和颤振	127
相关章节	93	3 静气动弹性和动气动弹性问题的起源 ...	129
参考文献	93	4 压缩性：马赫数效应	131
扩展阅读	94	5 操纵效率	131
■ 第 130 章 动力学响应计算	95	6 颤振和抖振的出现	132
1 典型的离散动力学模型	95	7 后掠翼气动弹性	132
2 经典阻尼结构	96	8 高速颤振问题	133
3 实例	101	9 颤振设计方案	134
4 非经典阻尼结构	103	10 控制和利用气动弹性：气动弹性剪裁和 气动伺服弹性	134
5 支座运动的影响	104	11 静稳定性或飞行动力学稳定性：发散或 颤振	135
6 应用与展望	104	12 总结	136
参考文献	105	参考文献	136
		扩展阅读	137
		■ 第 133 章 跨声速非线性气动弹性力学	138
第 14 部分 气动弹性和气动伺服弹性		1 引言	138
■ 第 131 章 固定翼飞行器气动弹性分析与 计算方法的发展	109	2 非线性气动弹性的一般表现	139
1 引言	109	3 跨声速颤振基础	140
2 开端	109	3.1 经典的或完全线性的理论缘何失效	140
3 非定常气动力：二维不可压情况	111	3.2 跨声速非线性	140
4 稳定性问题：颤振	113	3.3 跨声速颤振边界	141
5 结构动力学	115	4 飞行中经历的非线性气动弹性效应	142
5.1 等效梁及其偏微分方程的精确解	115	4.1 非线性气动弹性效应	142
6 近似方法：加权残项法（伽辽金法）和 瑞利-里兹法	115	4.2 间隙	142
7 假设模态和拉格朗日方程	115	4.3 结构的几何非线性	143
8 有限元建模	116	5 非线性的物理来源	143
9 非定常气动力：压缩性与有限展长效应	116	6 非线性气动力的有效计算：线性与非线性	143
10 非定常气动力：活塞理论	117	7 试验/理论修正	143
11 非定常气动力：升力面和广义平板面 元法	118	7.1 跨声速流中的颤振边界	143
12 网格到网格的插值方法	120	7.2 极限环振荡	146
13 频域到时域的转变	121	8 结论回顾	149
14 快速傅里叶变换（FFT）与时域分析	121	参考文献	149
15 基于 CFD 的计算气动弹性力学	122	■ 第 134 章 壁板颤振	152
16 总结	124	1 引言	152
相关章节	124	2 理论结构模型	152
参考文献	124	3 理论气动力模型	152
		4 理论与试验修正	153



5 特定结构几何模型与载荷条件下的颤振结果	153	2.1 基础性研究	176
5.1 平板	153	2.2 非定常气动力理论	176
6 横向与面内载荷作用下的平板	154	2.3 颤振分析	176
6.1 压力载荷下的平板	154	2.4 气动弹性响应的主动控制	176
6.2 屈曲的壁板	155	3 时域非定常气动力及频域气动力向时域非定常气动力的转化	177
6.3 曲形板	156	3.1 二维翼段	177
6.4 柱状板壳	157	3.2 准定常气动力	177
7 其他物理参数	158	3.3 颤振频率与颤振动压	178
7.1 正交各向异性	158	3.4 减缩频率的概念	178
7.2 偏航角	158	3.5 振荡气动力	179
7.3 被忽略的参数	158	3.6 非定常气动力有理函数近似	179
8 跨声速与亚声速壁板颤振	158	3.7 气动伺服弹性控制系统	180
9 壁板颤振的后果	161	3.8 伺服舵机模型	180
10 总结	161	3.9 加速度传感器模型	180
注释	161	3.10 随机阵风模型	181
参考文献	161	3.11 广义时域与频域矩阵方程	181
■ 第 135 章 高超声速气动弹性与热气动弹性	163	3.12 时域与频域的状态空间模型	181
1 引言	163	4 颤振抑制与阵风载荷减缓最优控制器系统设计方法	181
2 问题的基本原理和特征	164	4.1 线性二次调节器	182
3 建模方法	165	4.2 最优状态估计器(卡尔曼滤波)	182
3.1 结构动力学	166	4.3 线性二次高斯控制器	182
3.2 非定常气动力近似	166	4.4 满阶的 LQG 控制律	183
3.3 气动加热的近似建模	167	4.5 鲁棒性恢复	183
3.4 热传导计算	167	4.6 降阶控制器与约束优化	183
3.5 耦合 CFD-FEM 求解的高精度分析	167	5 柔性模态控制与主动载荷减缓实例	183
3.6 二自由度、典型菱形翼剖面的简单实例	167	6 验证颤振抑制与阵风载荷减缓的风洞与飞行试验案例	184
4 试验研究	168	6.1 遥控无人机气动弹性与结构试验	184
4.1 热气动弹性缩比	169	6.2 主动柔性机翼	185
5 计算研究	169	6.3 Benchmark 主动控制技术	186
5.1 不考虑热的分析	169	7 未来展望	188
5.2 热气动弹性力学研究	170	参考文献	189
6 未来发展	172	■ 第 137 章 叶轮机械气动弹性	190
致谢	172	1 引言	190
术语	172	2 航空力学问题分类	191
相关章节	172	3 涡轮转子的颤振问题	192
参考文献	173	3.1 涡轮颤振机理	192
扩展阅读	173	3.2 颤振方程的建立	192
■ 第 136 章 气动伺服弹性力学	175	3.3 颤振类型	193
1 引言	175	4 非定常流动产生的叶片激励问题(强迫响应)	195
2 气动伺服弹性力学(ASE)简史回顾	176		



4.1 压气机	195
4.2 涡轮	196
5 结构失谐	196
5.1 叶片结构失谐的影响	196
5.2 结构动力学建模和失谐	197
6 非定常气动力模型	198
6.1 概述	198
6.2 经典的半解析法	200
6.3 时域计算方法	200
6.4 频域计算方法	200
参考文献	201
第 138 章 气动弹性试验与认证	203
1 认证过程和适航条例介绍	203
2 地面振动试验	203
2.1 目的	203
2.2 飞机的支撑	204
2.3 试验设备	204
2.4 飞机的激励	205
2.5 数据采集及检查	205
2.6 试验原理与方法	205
2.7 模态对比	206
2.8 结构耦合试验	206
2.9 其他航空航天飞行器	206
3 气动弹性风洞模型试验和气动弹性缩比	206
3.1 风洞模型	206
3.2 气动弹性缩比	207
4 飞行颤振试验	207
4.1 试验程序	208
4.2 试验设备和方法	208
4.3 模态特性辨识	209
4.4 从试验数据中预测颤振速度	209
5 飞行载荷评估与验证	210
5.1 机动飞行	210
5.2 阵风和紊流	211
5.3 飞行载荷试验	211
6 未来展望	211
参考文献	211

第 139 章 旋翼气动弹性力学

1 引言	212
2 固定翼与旋翼气动弹性问题的本质区别	214
3 结构建模及其作用	215

4 惯性载荷	216
5 非定常气动力载荷	216
5.1 附着流的非定常空气动力学	216
5.2 分离流和动态失速	217
6 旋翼气动弹性问题的建模和求解	218
6.1 建模	218
6.2 求解方法	219
7 示例结果	220
8 综合性的直升机分析程序	222
9 未来发展	223
术语	223
参考文献	223

第 15 部分 计算固体力学和流体-结构相互作用

第 140 章 离散方法的基本原理

1 引言	229
2 基于单元的离散化	230
3 新型离散概念	231
3.1 自由网格离散化	231
3.2 整体分解概念	232
4 多尺度法	234
5 扩展至非线性	234
6 壳体方程式	235
7 界面单元	236
8 总结	236
参考文献	236

第 141 章 复合材料板和壳的有限元分析

1 引言	238
2 层合板的最小二乘有限元模型	239
2.1 引言	239
2.2 控制方程	239
3 最小二乘描述	240
4 有限元模型	241
5 数值算例	242
5.1 静力分析	242
5.2 自由振动分析	244
6 弱形式伽辽金有限元模型	246
6.1 理论公式	246
6.2 有限元模型	247
6.3 数值算例	248
7 总结	251