



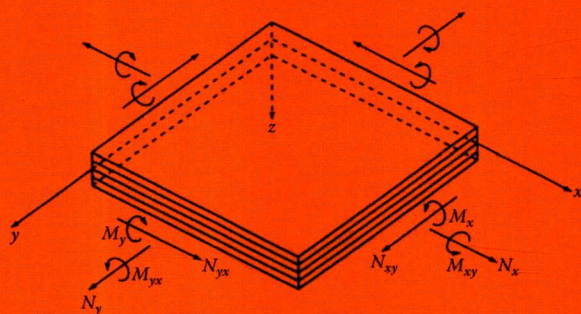
大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

复合材料力学基础

Principles of Composite
Material Mechanics

【美】罗纳德·F·吉布森 著
张晓晶 余音 吕新颖 译



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

复合材料力学基础

Principles of
Composite Material Mechanics

【美】罗纳德·F·吉布森 著
张晓晶 余音 吕新颖 译



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

内容提要

本书为《复合材料力学基础》第四版的译著,内容主要包括复合材料单向板应力-应变关系,连续纤维增强单向板的有效模量和强度等;同时对单向板和层压板吸湿行为、粘弹特性和动力学行为进行了详细阐述;最后介绍了材料的断裂分析以及性能测试方法。每章节设有例题和习题,以帮助读者理解和掌握相关知识,并附有参考答案。

本书对复合材料力学方面的知识表述逻辑清晰,语言浅显易懂,非常适合复合材料及力学领域的初学者,同时可供材料领域及其相关专业的高等院校师生、工程技术人员、研发人员等参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料力学基础 / (美) 罗纳德·F·吉布森
(Ronald F. Gibson) 著; 张晓晶, 余音, 吕新颖译. —
上海: 上海交通大学出版社, 2019
(大飞机出版工程)
ISBN 978-7-313-20656-5

I. ①复… II. ①罗… ②张… ③余… ④吕… III.
①复合材料力学 IV. ①TB330.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 273638 号

复合材料力学基础

著 者: [美] 罗纳德·F·吉布森 (Ronald F. Gibson)
出版发行: 上海交通大学出版社
邮政编码: 200030
印 制: 上海盛通时代印刷有限公司
开 本: 710 mm × 1000 mm 1/16
字 数: 614 千字
版 次: 2019 年 4 月第 1 版
书 号: ISBN 978-7-313-20656-5
定 价: 298.00 元

译 者: 张晓晶 余音 吕新颖
地 址: 上海市番禺路 951 号
电 话: 021-64071208
经 销: 全国新华书店
印 张: 36
印 次: 2019 年 4 月第 1 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: 021-37910000

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 CRJ929 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 and 不断创新,也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

作者简介

罗纳德·吉布森博士目前是内达华大学的机械工程兼职教授。他在明尼苏达大学获得力学博士学位,在田纳西大学获得机械工程硕士学位,在佛罗里达大学获得机械工程本科学位。他的工业和政府经历包括担任联合碳化物公司开发工程师、核分部和 NASA 兰利研究中心夏季教员研究员职位。他曾在爱荷华州立大学、爱达荷大学、韦恩州立大学全职工作,在斯坦福大学、佛罗里达大学和密西根州立大学做访问学者。他被选为美国机械工程师协会、美国复合材料学会、美国材料和工艺工程促进协会会员。他也是美国工程师教育协会、AIAA 和实验力学协会会员。他曾担任 2004—2005 年美国复合材料协会主席及 2002—2003 年的副主席。

吉布森博士曾获得的奖项包括实验力学协会年度最佳研究论文 Hetenyi 奖、爱达荷大学工程学院杰出教师奖、杰出教师奖学金、DeVlieg 教授和 WSU 的杰出研究生院导师奖。他的研究成果已发表在许多学术期刊中,并在各种国内和国际会议上发表。他当前的研究方向包括复合材料和结构的力学表征、复合材料的噪声和振动控制、复合材料的设计和制造、吸能材料的表征、多功能复合材料和纳米复合材料。

译 序

复合材料是指由有机高分子、无机非金属或金属等几类不同材料通过复合工艺组合而成的新型材料。各种材料在性能上互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料,因此可以满足各种不同的要求。由于其优良的特性,因此复合材料已广泛应用于航空航天、电子、超导、汽车及建筑等领域。

复合材料力学是固体力学的一个新兴分支,它主要研究复合材料的力学问题。复合材料力学已形成独立的学科体系并蓬勃发展,国内外不少高等院校已将“复合材料力学”列为力学及相关理工科专业本科生和研究生的必修和选修课程。在国家大力发展航空航天的背景下,了解和掌握复合材料力学性能已成为领域内工程技术人员和研发人员的要求之一。

本书为英文书籍《Principles of Composite Material Mechanics》第四版的译著,主要阐述了复合材料单向板应力-应变关系,连续纤维增强单向板的有效模量和强度,单向板和层压板吸湿行为、粘弹特性和动力学行为,材料的断裂分析以及性能实验方法等内容。本书非常适合复合材料力学专业的初学者了解复合材料力学的基本概念;此外,本书的语言通俗易懂,通过适量例题和习题讲述复合材料力学的基本原理和概念、公式推导及性能实验等内容,图文并茂,并且引用了多篇参考文献,也非常值得读者仔细研读。

参加翻译的人员的分工如下:张晓晶负责翻译序,附录,第1、6、7、9、11章;余音负责翻译第2、3、4章;吕新颖负责翻译第5、8、10章;全书的统稿工作由张晓晶完成。同时,本书的编写也得到了马林、陈欣华、王其政、李崇等研究生们的热情帮助,在此表示感谢。本书在编写过程中难免有疏漏错误之

处,恳请读者指正。

谨将此书奉献给复合材料领域的工作者和学子们,祝愿我国复合材料领域人才辈出。

全体译者
2018 年于上海

本 版 序

本书第三版于2012年出版之后,我与学生和同事的互动以及我继续进行的复合材料相关活动,都激励我去思考如何改进这本书,由此促成了第四版的出版。在之前的版本中,我试图保持传统经典和当前最先进的技术报道之间的实际平衡,以前的改进强调了当前最先进的技术。与之不同的是,本版更重于教育。我仔细地记录了第三版中的错误,这些都在本版中得到了订正。大部分章节都增加了更多的例题和课后习题,其中例题增加了大约20%,达到95个,而课后习题增加了大约12%,达到212个。不再将课后习题都放在每章的最后,而是将其集成到章节的相关部分,类似于例题。这样,教师和学生就能更加清楚地了解章节与习题之间的相关性。这是一个很多力学教科书里都用的教学方法。学生最频繁提出的要求之一是提供部分习题的答案。很多课程中,我都会在课程网站中给出答案,但是第四版中我将这些答案放在了书的后面。

最后,我很感激我的学生和同事以及其他学校采用本书的教师提出的建设性反馈意见。我的夫人和好朋友,Maryanne,持续以最大的热情支持我,没有她我不可能完成本书。

罗纳德·吉布森

第三版序

第三版的出版目标是继续展现经典和最先进的复合材料技术和力学的独特混合,并介绍关于复合材料力学的所有可用教科书中最成功的例题和课后习题,努力写出一本容易被学生理解的教科书。教学的改进包含 81 个例题(其中 25 个为第三版新增);177 个课后习题(其中 25 个为新增);388 幅图片(其中 46 个为新增);一个关于矩阵概念和运算的附录;包含颗粒复合材料、纳米复合材料、纳米增强纤维复合材料、混杂多层复合材料;以及对于有限元建模和实验方法的介绍。尽管本书作为教科书来编写,但也包含了对当前最先进的复合材料技术和研究发现的频繁引用。本书包含很多当前期刊论文以及经典的和历史性的出版物,可以为相关从业人员提供广泛的参考。

我要继续感谢我的同事、研究生和资助人这么多年对我的鼓励和帮助。最近,WSU 和 UNR 为我提供了必要的良好环境进行教学和科研,使得新版本的出现成为可能。我非常受益于我在 WSU 和 UNR 与学生的交流。同本书第一版一样,我的夫人和好朋友,Maryanne,持续以最大的热情支持我,没有她我万万不可能完成本书。

罗纳德·吉布森

第二版序

本书第一版出版之后,复合材料力学已有了很大的进展。相应地,第二版增加了针对纳米复合材料、复合材料格栅结构和复合材料夹层结构新应用的章节。为强调力学基本原理,我在绪论中增加了对材料力学基本方程的复习,以及在附录中涵盖了基于弹性理论进行应力平衡方程和应变位移方程的推导。第3章中细观力学部分已被修订,包含详细的对弹性和有限元模型的讨论。更新了第4章强度分析的内容,包含失效分析全球比对(world wide failure exercise)的结果。第8章中增加了理解复合材料线性粘弹性行为的现象学方法。更新了第9章断裂力学部分,包含有限元虚拟裂纹闭合技术。第10章中关于复合材料及其组分的实验部分,被大幅修改以包含新的和修订版的 ASTM 标准。最后,对大部分章节都增加了更多的例题和课后习题,并且增加了新的参考文献。

和第一版一样,我对很多同事、研究生和资助人都非常感激。感谢 WSU 为我提供教学和研究的,良好环境以及批准我的休假,这对于我完成本书非常关键。非常感谢我的研究生帮助我发现第一版中不可避免的错误,并且他们的论文研究使得我可以在第二版中增加重要的新内容。同第一版一样,我的夫人和好朋友, Maryanne, 持续坚定地支持着我,我永远感谢她的爱、鼓励、耐心和理解。

罗纳德·吉布森

第一版序

复合材料是真正的跨学科课程,且学习此课程的学生日益增多。多数针对这一课程的书着重于介绍复合材料力学或是材料科学,而本书以力学为导向。复合材料技术对于许多在此领域内没有接受过培训的工程师而言是非常陌生的,因此,无论是对于新进工程师的培训,还是对于有经验的工程师的继续教育,或是作为参考,一本针对复合材料力学的教科书都应是有用的。对于复合材料浓厚的兴趣、课程的跨学科本质、对有经验工程师的再教育以及业内对于一本新的入门级别的复合材料教科书的需求,都是促使我写这本书的原因。

第1~7章构成第一学期本科高年级或研究生级别力学课程的基础,我已经教授了15年。第8~10章以及从学术期刊选取的一些论文和学生研究课题和展示,构成了第二学期课程的基础,仅面向研究生讲授,我也已经教授了4年。本书通过进行一定删减,也可作为两季度课程的教材。本课程的预备知识包括材料力学、材料工程导论和常微分方程,并且对线性代数进行预先了解也是很有益处的。对于一些研究生级别的学习,高等材料力学、弹性力学和偏微分方程的先修课程也是推荐的,但不强求。

本书所涵盖的复合材料力学的一些基本要素,在20世纪60年代起出现的本学科的早期书籍中就已涉及,我也尽量使用那些已经得到认可的术语和名称。如第2章中各向异性材料的应力-应变关系和性能的转换和第7章中经典层压板理论都与早期的教科书保持一致,如Ashton、Halpin和Petit编写的《复合材料基础》和Jones编写的《复合材料力学》。然而,我已总结出一个更好的教学方式,即并非直接进入经典层压板理论来开始层压板的学习,而是先通过纯弯曲层合梁的简化理论来介绍基本层压板的概念。并且我相

信,之前仅在高等的材料力学书籍,如 Christensen 编写的《复合材料力学》中,才会介绍的等效均质材料有效模量的概念,对于非均质复合材料细观力学的合理发展是必要的。因此,有效模量的概念自第2章中的介绍起一直到第8章中在粘弹性和动力学行为的应用,都被着重强调。

尽管很多基本概念在早先的教科书中都已讲到,两个世纪以来无数复合材料力学的新进展仍让我觉得按照自己的想法来增补变得越来越必要。因此,我增加了对重要内容的介绍,诸如第5章中的湿热效应、第6章中的不连续纤维增强的复合材料、第8章中的粘弹性行为和动力学行为、第9章中的断裂以及第10章中的力学实验。对复合材料力学实验的涵盖,已经扩展至包含重要的 ASTM 标准实验方法的总结,其中的很多标准在早期复合材料力学书籍出版时还未问世;也包含各种例题和课后作业,其中许多都与实际复合材料结构相关。

本书的内容是与同事及学生超过25年交流的积累,并尽全力做到面面俱到。我对复合材料的热爱始于1965年,在我的第一个工程职位(所在单位现在是田纳西的橡树岭国家实验室的一部分)中,我参与设计和改进一种高速旋转设备。那时,我意识到就像在很多其他应用中那样,在旋转设备中使用复合材料的好处是无穷的。我在橡树岭力学研发课题组与 Dean Waters 及其他同事的工作经历,对我之后着重于复合材料研究与教学的决定有着很大的影响。我在明尼苏达大学与 Robert Plunkett 进行关于复合材料振动-阻尼特性的博士课题研究,加强了我继续在复合材料领域工作的愿望,并最终促成了我在大学进行教学和研究。

在1975年于爱荷华州立大学开始我的学术生涯之后,我开始了与 C. T. Sun 长时间的合作,成果颇丰,并且之后有了为期一年的在佛罗里达大学与 C. T. Sun 及其同事 Robert Sierakowski 和 Shive Chaturvedi 工作的机会。我将很多对复合材料的理解归功于和他们的交流。本书的原稿出自我在爱荷华州立大学、爱达荷大学、佛罗里达大学、密西根州立大学、韦恩州立大学(WSU)讲授复合材料力学课程的讲义,我也很感激这些年参加我课程的学生,他们帮助我订正了这些讲义,如韦恩州立大学的学生找出了我讲义中在所难免的错误。这些年与研究生的交流加深了我对复合材料力学的理解,并且部分学生的工作也在本书中做了引用。我尤其感激 Stalin Suarez、Lyle Deobald、Raju Mantena 和 Jimmy Hwang,以及所有爱达荷大学的研究生。

本书写作实际始于1987年我在密西根州立大学的休假期间,非常感谢

Larry Drzal 及其同事在那一年与我进行的很多讨论。尤其重要的是与 Cornelius Horgan 的交流,我和他共同讲授高等复合材料力学课程。最近,我与福特科学研究实验室的 John Sullivan 及其同事的合作已被证明是非常有益的,非常感谢 John 对本书的审阅及有益的评价。我还要对福特科学研究实验室 Carl Johnson 的鼓励、支持以及提供第 1 章中的一些图片表示感激。WSU 的强烈支持使得 1989 年高等复合材料研究实验室的建立成为可能,也是非常令我感激的;我的系主任 Ken Kline 的支持与鼓励尤其重要;基金对我的慷慨支持也有助于本书的实现;空军科研办公室、国家科学基金会、陆军研究办公室、波音公司以及福特汽车公司的资助也都非常重要。

McGraw-Hill 和我想要感谢以下人士的审阅及其很多的评价和建议:俄克拉荷马大学的 Charles W. Bert; 伦斯勒理工学院的 Olivier A. Bauchau; 俄亥俄州立大学的 Shive Chaturvedi; 新墨西哥州立大学的 Vincent Choo; 克莱姆森大学的 John M. Kennedy; 德州农工大学的 Vikram K. Kinra; 佛罗里达大学的 C. T. Sun 和克拉克森大学的 Steven W. Yurgartis。

最后,我的夫人和好朋友, Maryanne, 自我开始这项工作起就一直是我最强的后盾,没有她的爱、鼓励、耐心和理解,我万万不可能完成本书。

罗纳德·吉布森

目 录

1 绪论 1

1.1 基本概念 1

1.2 复合材料组分材料 5

1.2.1 包含纳米增强体的增强体材料 9

1.2.2 基体和填充材料 10

1.3 复合材料的结构应用 14

1.4 复合材料的多功能应用 23

1.5 制造工艺 26

1.6 复合材料力学行为要素 34

1.7 材料力学基本方程回顾 36

参考文献 44

2 单层板的应力-应变关系 46

2.1 引言 46

2.2 应力-应变关系中的有效模量 47

2.3 应力-应变关系中的对称性 50

2.4 正交各向异性和各向同性的工程常数 56

2.5 特别正交各向异性单层板 60

2.6 一般正交各向异性单层板 63

参考文献 77