

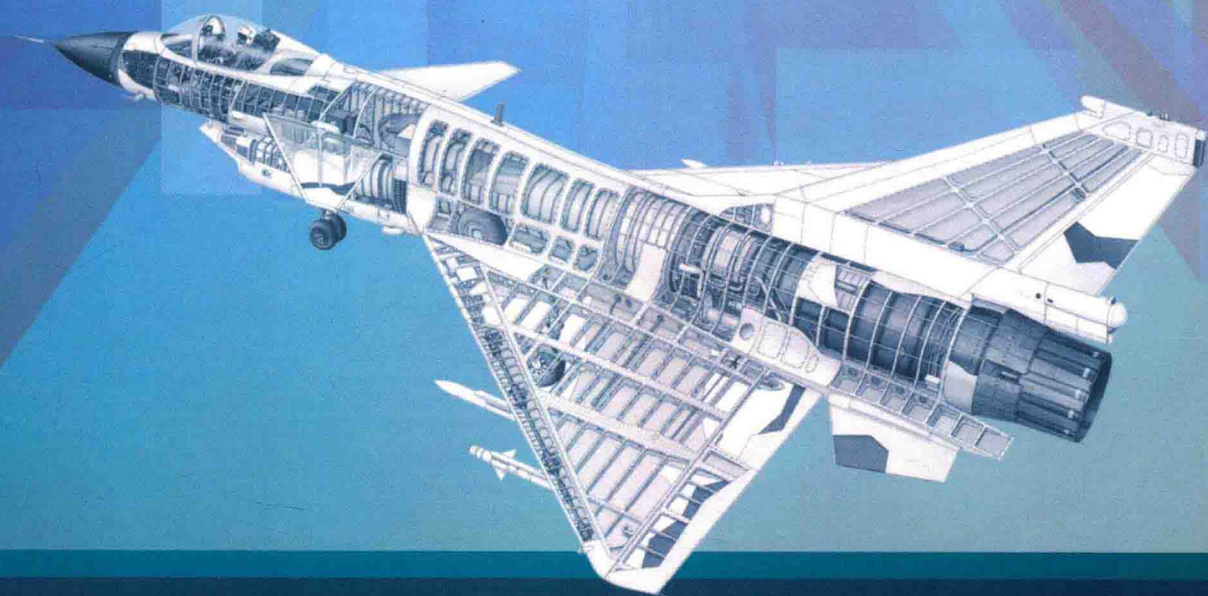
飞机强度技术丛书

FEIJI JIEGOU QIANGDU XINJISHU

# 飞机结构强度

## 新技术

孙侠生 主编



航空工业出版社

# 飞机结构强度新技术

孙侠生 主编

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

本书共分12章,主要阐述了21世纪以来在飞机结构强度各专业技术点上的突破和发展,包括结构分析与优化设计、耐久性/损伤容限、复合材料结构强度、飞机结构动强度、航空声学及振动环境、飞行器结构热强度、全尺寸结构静强度/疲劳试验、飞机结构强度虚拟试验、飞机气候试验、飞机结构无损检测和飞机结构健康监测等技术。

本书可供从事飞机结构强度研究的科技人员、装备制造领域的设计和验证人员,以及航空航天高等院校结构强度相关专业研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞机结构强度新技术/孙侠生主编. --北京:航空工业出版社,2017.10

ISBN 978-7-5165-1137-4

I. ①飞… II. ①孙… III. ①飞机—结构强度—高技术 IV. ①V22

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第280623号

## 飞机结构强度新技术

Feiji Jiegou Qiangdu Xinjishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2017年10月第1版

2017年10月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:38.75 字数:1011千字

印数:1—1500

定价:150.00元

# 《飞机强度技术丛书》编审委员会

主任：王彬文

副主任：尚忠弟 王育鹏 段世慧（常务）

编著委员会委员：（按姓氏笔画为序）

王世廉 方新文 仝永喆 冯建民 成竹 刘小川  
牟让科 李磊 李曙光 杨宇 杨胜春 杨海  
宋鹏飞 张建锋 张积广 聂小华 柴亚南 唐吉运  
黄文超 曹琦 董登科 蒋军亮 傅威 强宝平  
滕申科 潘凯

审校委员会委员：（按姓氏笔画为序）

王铁军 王浩伟 王斌团 庄茁 孙侠生 李玉龙  
李刚 李航航 李曙光 杨旭 杨智春 张卫红  
张立新 陈平剑 林建鸿 罗琳胤 周良道 郑晓玲  
袁慎芳 徐吉峰 曹奇凯 龚旭东 崔德刚 舒成辉  
蔡小斌 廖连芳 谭申刚

办公室主任：弓云昭

副主任：徐浩

成员：宁玲 张妍

# 总 序 言

强度专业属于哪个领域？这是必须思考的第一个问题。在人类科学发展的早期，科学家和工程师是无法分开的，比如牛顿不仅是物理学家，还是一位结构工程师。随着人类发展进入 19 世纪，科学在资本主义时代得到了迅速发展，科学家和工程师分手了，两者之间交流与合作愈来愈少。进入 20 世纪，人类在实践中逐步认识到对科学的认识和应用不可能从自然科学直接跨越到工程技术，而必须历经技术科学这一中间阶段，以适应人类科技发展从工程推动科学发展向科学引领工程前进的重大转变，发展至此，人类形成了自然科学、技术科学和工程技术三大范畴相辅相成的科学技术体系认识。强度专业从力学衍生而来，深耕于工程技术，得到了快速发展，以技术科学诞生为界，之前其属于力学领域（自然科学范畴）和工程技术领域，之后则属于工程力学领域（技术科学范畴）和工程技术领域，飞机强度专业自然属于工程力学领域和航空技术领域。但这是基于传统理念的分析界定，已不再符合现代飞机强度专业的研究内容，因为飞机强度专业的输入已经从狭义的机械力演进为广义的自然力，从这个意义讲，现代飞机强度专业应属于广义力学领域和航空技术领域。研究领域在发生变化的同时，飞机强度专业研究的重点也在发生变化，从人类实现飞行梦想到 19 世纪末，飞机强度专业研究的重点在技术科学范畴，而且其研究成果有力地推动了自然科学的发展，引领了航空工程技术的前进。进入 21 世纪以来，飞机强度专业理论体系的日益完善，专业研究的重点则逐步转向工程技术范畴。随着航空科技的发展，飞机由机械系统演变到由现代飞控系统使能的半自动化系统，目前正向人机交互系统发展，未来将向智能系统方向演进，飞机强度专业将面临诸多挑战，在克服这些挑战的同时将被赋予更多新的内涵。

强度的内涵是什么？这是必须思考的第二个问题。在现代科学和工程技术领域，强度是一个传统、古老而基础的专业名词，然而自始至终强度缺少一个清晰、明确而科学的内涵。百度百科解释如下：材料在外力作用下抵抗破坏（变形和断裂）的能力称为强度。显然这是一个通俗易懂但无法让强度专业研究人员满意的阐述。马克思把力学称之为“大工业时代的真正科学的基础”，恩格斯

则把力学称作“最基本的自然科学”，而源于力学的强度专业具有很强的基础性和广泛的应用性，随着科学技术的发展，强度的内涵理应与与时俱进，能够精准涵盖专业面临的新问题和新发展。例如，随着飞行速度越来越高，使用环境和操控形式越来越复杂，人们开始密切关注结构、控制、环境之间的耦合作用，由高超声速飞行器发展引出的静、热、振、噪多场耦合问题，以及随着飞机全空域飞行、跨地域部署带来的气候环境适应性问题等，这些强度新问题的解决必将带来专业的新发展，促使强度专业的内涵得到深耕广拓。综上所述，理清专业发展趋势应是准确阐释专业内涵的前提和基础。

我们不妨从飞机强度这个视角来研究一下强度专业发展的趋势。首先是研究对象，过去我们讲强度，必然讲结构强度，往往强度成为结构强度的代名词，似乎结构是强度研究的唯一对象，但随着航空技术的发展，飞机强度的研究对象已经从过去较为单一的结构，演进为涵盖材料、结构、智能结构、设备、系统、全状态飞机的大范畴，我们称之为**大强度**，如气动弹性专业和气候适应性专业的研究对象就是全状态飞机；其次是研究方向，过去我们讲强度，更多是研究其安全性，飞机强度研究的方向已经从过去较为单一的安全性，演进为涵盖安全性、稳定性、可靠性、舒适性、适应性等相互交融，我们称之为**新强度**，如航空声学专业和高升力综合验证专业；最后是研究手段，航空发展百余年来，强度研究手段从最初的解析法到工程法，再到数值法，进入 21 世纪之后，其研究手段已经全面演进为基于模型的数字化阶段，我们称之为**数字强度**。综上所述，现代飞机强度专业发展总体上在研究对象、研究方向和研究手段三个方面，呈现出大强度、新强度和数字强度的发展趋势。显而易见，现代强度内涵中的外力应该是一个广义的外力，抵抗破坏更应该是一种广义的破坏，强度的广义内涵应该这样阐述：**研究对象在设计状态下保持其目标品质的能力。**

在航空发展的 110 多年历史中，强度专业的发展一直伴随着飞机（结构）设计准则的变迁。静力强度设计、安全寿命设计、破损安全设计、损伤容限设计、广布疲劳损伤设计这些设计准则的一路演进正是基于强度专业的发展，这种态势与大强度、新强度、数字强度的发展趋势共同前进，伺服稳定性、结构适坠性、系统可靠性、乘员舒适性、气候适应性、战伤生存性等必将以其特有的形式进入飞机设计准则，成为飞机设计不可或缺的重要元素，无疑这些元素会呈现出**融合和交叉**的特点，在矛盾交织的态势中多学科综合优化将显得尤为重要。

从 20 世纪末到如今近二十年时间，无疑是飞机型号研制和专业技术发展的黄金时期。在型号研制方面，国家相继成功研制歼 10、歼 15、歼 20、运 20、C919 等一大批新型军民飞机，攻克了一大批强度关键技术，构建了完备的积

木式验证体系，形成了系统的强度专业能力。在专业体系方面，通过一大批政府军方预先研究项目的完成，强度专业研究深度得到进一步加强，研究广度得到进一步拓展，专业体系得到进一步完善，突破了振动疲劳、空腔噪声、虚拟试验等一批基础理论研究瓶颈，攻克了多物理场耦合、飞发一体化、振动主动控制等一批交叉学科研究难关，填补了气候适应性、结构冲击、结构/机构可靠性等一批新兴专业的建设空白。

与此同时，调研结果表明，这么一个大的时代背景给飞机强度专业人员的学习和培养带来了较大的变化。一是**人才类型的变化**——过去航空工业需要大量具有坚实力学基础的结构或强度工程师从事强度设计、分析和试验等工作，现在这些工作仅需要部分工程师使用 CAE 软件进行强度分析计算即可完成。二是**知识结构的变化**——过去结构或强度工程师需要掌握坚实的理论力学、材料力学、结构力学等知识，而现在工程师仅需要不多的力学知识，更多的是需要有限元知识和软件使用能力。透过现象看本质，以上变化仅仅是种种肤浅之表象，面对需要独立探索和自主研制的新一代飞机，强度工程师既需要宽广纵深的知识结构，更需要对材料、制造、控制、隐身等技术的深刻理解，特别需要优秀的建模能力，第五代战斗机和高超声速飞行器研制所面临的强度关键技术挑战便是最好的证明。

强度专业的使命是什么？这一直是中国飞机强度研究所（简称强度所）长期以来思考的问题。“十三五”初期，强度所明确提出了强度专业的使命：**强度理论的探索者，强度技术的创造者，强度工具的提供者，强度设计的验证者**。这不仅是强度所的使命，更应该是强度人的使命，请大家注意这个“强度人”是个广义的概念。为深入践行强度人的使命与担当，系统总结强度专业技术新发展，全面促进知识传承和知识共享，有力支撑强度技术人员快速成长，强度所“十三五”科技发展规划中提出了编著“飞机强度技术丛书”的构想，丛书邀请了国内外强度领域的知名专家和学者广泛参加编著和审校等工作，以确保这套飞机强度技术丛书具有较高的品质和良好的社会价值，为我国的飞机研制和强度专业的发展提供有力的技术和知识支持。

“飞机强度技术丛书”我们将其称之为强度专著“三个一工程”，即再版一批有影响力的强度技术专著，翻译一批国外强度技术经典著作，编著一批高水平的强度技术新著作，在“十三五”期间分批出版发行。出版这套丛书，一是要从宏观上理清现代飞机强度专业所属的领域，揭示专业的本质内涵，剖析专业的发展趋势，基本清晰描绘新时期飞机强度专业的脉络和体系；二是要通过系统总结近年来飞机强度专业研究和型号研制的新成果与新经验，以及修订再版和翻译

经典权威著作，解决飞机强度专著出版现状与专业发展和型号研制水平不协调的问题，实现飞机强度专业研究和型号研制的成果共享和知识传承；三是要通过“三个一工程”来应对未来飞机强度专业发展和型号研制所面临的技术挑战和人才挑战，既要让专业技术人员知晓历史和现状，又要让他们明晰机遇和挑战，要通过这批专著使技术人员兼具“上手快”和“有后劲”的优点；四是要通过“三个一工程”初步构建起飞机强度专业知识体系，并通过后来者的不断努力使之日益科学化、系统化、创新化、完善化。

强度是最符合东方哲学中庸之道、和谐统一的专业，强而有度，张弛有道，从狭义的机械力到广义的自然力，强度专业的发展始终充满着生命力。《礼记·中庸》中讲“中立而不倚，强哉矫”，《道德经》中讲“知人者智，自知者明。胜人者有力，自胜者强”，这些都将给予我们专业发展无尽的智慧。科学是一门艺术，强度专业更具韵味，从哲学意义上讲度是万物之灵魂，对强度而言，度是永恒之追求，过之一分显拙，欠之一分则险！从艺术与灵魂，韵与恒的角度诠释强度，是专业的最高境界，“强之韵，度之恒”是强度人永恒的追求，祝愿“飞机强度技术丛书”能够在这种追求的历程中继往开来，祝愿飞机强度专业发展日新月异。

王彬文

2017年9月



# 《飞机结构强度新技术》

## 编委会

主 编 孙侠生

副主编 杨 海 段世慧 胡律行

主要编写人员

第1章 绪论

孙侠生 朱梅庄 杨 海 胡律行

第2章 结构分析及优化设计技术

段世慧 聂小华 庄 茁 杨智春 孙 秦 朴春雨 王立凯  
吴存利 万春华

第3章 飞机结构耐久性/损伤容限技术

董登科 陈 莉 孙 秦 童明波 闫文伟 李宴宾 臧伟峰

第4章 复合材料结构强度技术

柴亚南 张阿盈 陈普会 陈向明 沈 薇 李新祥

第5章 飞机结构动强度技术

牟让科 刘小川 白春玉 李晓东 惠旭龙

第6章 航空声学及振动环境技术

黄文超 侯 峰 潘 凯 陈克安 乔渭阳 郭定文 庞彦斌

第7章 飞行器结构热强度技术

蒋军亮 成 竹 任青梅 杨志斌 郝庆瑞

第8章 全尺寸结构静强度/疲劳试验技术

冯建民 贺 谦 夏 峰 高战朋 张革命

第9章 飞机结构强度虚拟试验技术

段世慧 吴存利 孙 秦 聂小华 黄 河 张国凡

第10章 飞机气候试验

成 竹 李喜明 唐 虎

第11章 飞机结构无损检测技术

肖迎春 詹绍正 黄华斌 韩 晖 王 倩

第12章 飞机结构健康监测技术

肖迎春 白生宝 袁慎芳 裘进浩 武湛军 刘马宝 薛景锋  
刘国强 李闵行 杜振华

校 核 胡律行

# 前 言

进入 21 世纪以来，我国航空装备呈井喷式发展态势。这种发展态势从《飞机结构完整性大纲》及配套规范的贯彻和实施，飞机功能、性能的提高及使用环境改变，新材料、新工艺和新结构的采用，数字技术、计算技术和互联网技术的不断进步等多个维度，促进了飞机结构强度技术的持续发展，勾画出不同时期飞机结构强度技术发展的重点和目标。

“十五”期间，结构强度研究重点是突破长寿命、高可靠性、高生存力所需要的飞机结构强度关键技术，解决飞机结构强度设计、分析与验证中存在的瓶颈问题；跟踪国际发展前沿，为飞机自适应结构、智能结构的强度设计、验证、评估和监测进行前瞻性和探索性研究。

“十一五”期间，围绕轻重量、长寿命、高可靠性、低成本飞机对结构强度的要求以及安全性、经济性、舒适性、环保性的适航性要求，重点开展飞机结构强度技术领域的应用基础研究和先期技术开发，为新机研制和改型提供强度设计与验证的关键技术和软件。

“十二五”期间，紧扣背景型号、在研型号和在役型号的结构强度技术需求，以及“数字航空”试验环节的数字化，梳理提炼科学问题与工程技术问题，对标世界先进航空企业，开展基础研究、基础应用研究和关键技术攻关，支撑航空型号研制，推动强度专业技术发展。

本书是飞机结构强度技术点上知识的积累，从结构分析及优化设计、耐久性/损伤容限、复合材料结构强度、飞机结构动强度、航空声学及振动环境、飞行器结构热强度、全尺寸结构静强度/疲劳试验、飞机结构强度虚拟试验、飞机气候试验、飞机结构无损检测和健康监测等多个专业方向，总结、提炼了近十几年来飞机结构强度专业发展的新技术，以供飞机结构强度设计、强度验证、强度分析和强度监测的工程技术人员参考，在工程实践中利用和继承创新。

结构强度是飞机研制的基础技术，强度技术的进步既能支持新研飞机的设计与制造，又能支持现役飞机的维修和延寿，还可应用到其他装备制造业。

本书编写得到了唐长红院士的大力支持和鼓励，编者表示由衷感谢！

朱梅庄、庄茁、薛景川、童明波、陈普会、齐丕骞、李玉龙、乔渭阳、吴德彦、李喜明、孙秦、袁慎芳等专家教授审阅了相关章节稿件，提出了许多宝贵意见；宁玲、张妍同志在本书成稿过程中做了大量工作。特此一并表示感谢！

本书可供从事飞机强度设计、试验、分析和监测的工程技术人员，以及高等院校飞机结构相关专业的研究生阅读。

由于编者水平限制，书中不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者  
2017 年 8 月

# 目 录

<b>第1章 绪论</b> .....	( 1 )
1.1 飞机结构完整性大纲的形成和进展 .....	( 1 )
1.1.1 结构完整性大纲的地位和作用 .....	( 2 )
1.1.2 结构完整性大纲形成过程 .....	( 2 )
1.1.3 结构完整性大纲发展状态 .....	( 3 )
1.1.4 我国结构完整性大纲的进展 .....	( 3 )
1.2 结构强度技术进步的动机 .....	( 4 )
1.2.1 ASIP 贯彻和实施 .....	( 4 )
1.2.2 新型号指标和改进改型要求持续提高 .....	( 6 )
1.2.3 不断涌现的新材料新工艺新结构 .....	( 6 )
1.2.4 计算结构和虚拟试验技术 .....	( 7 )
1.3 21 世纪以来的进展回顾 .....	( 7 )
1.3.1 “十五”期间的进展回顾 .....	( 7 )
1.3.2 “十一五”期间的研究成果 .....	( 8 )
1.3.3 “十二五”期间的研究进展 .....	( 9 )
1.4 本书的章节和内容 .....	( 9 )
<b>第2章 结构分析及优化设计技术</b> .....	( 11 )
2.1 概述 .....	( 11 )
2.2 飞行器结构有限元建模 .....	( 12 )
2.2.1 结构有限元建模一般方法 .....	( 12 )
2.2.2 典型结构刚度等效建模技术 .....	( 13 )
2.2.3 加筋板结构屈曲后屈曲分析的建模技术 .....	( 21 )
2.3 飞机结构损伤分析技术 .....	( 25 )
2.3.1 线弹性材料的断裂判据 .....	( 26 )
2.3.2 多尺度模型分析含缺陷结构的力学行为 .....	( 26 )
2.4 结构优化技术 .....	( 32 )
2.4.1 飞机结构多层次优化设计方法 .....	( 32 )
2.4.2 飞机结构多学科优化设计方法 .....	( 38 )
2.4.3 计及损伤容限的结构优化设计方法 .....	( 50 )
2.4.4 可靠性优化设计 .....	( 53 )
2.5 飞机结构分析与优化实例 .....	( 57 )
2.5.1 概述 .....	( 57 )
2.5.2 机身结构优化设计 .....	( 57 )
2.5.3 机翼结构分层次优化设计 .....	( 59 )

2.6 小结 .....	( 61 )
参考文献 .....	( 62 )
<b>第3章 飞机结构耐久性/损伤容限技术</b> .....	<b>( 64 )</b>
3.1 概述 .....	( 64 )
3.2 疲劳试验中的载荷谱简化与加重技术 .....	( 64 )
3.2.1 载荷谱简化及加重技术规范要求与准则 .....	( 65 )
3.2.2 疲劳试验中的载荷谱简化工程方法 .....	( 66 )
3.2.3 疲劳试验中的载荷谱加重方法 .....	( 70 )
3.2.4 等比例加重在裂纹扩展试验中的应用研究 .....	( 75 )
3.2.5 一种基于疲劳累积损伤概率模型的载荷谱简化方法 .....	( 76 )
3.3 广布疲劳损伤评估及控制技术 .....	( 85 )
3.3.1 广布疲劳损伤相关定义 .....	( 87 )
3.3.2 广布疲劳损伤的概率疲劳工程分析方法 .....	( 88 )
3.3.3 含多裂纹结构的应力强度因子的计算方法 .....	( 95 )
3.3.4 含多裂纹结构的剩余强度判据 .....	( 99 )
3.4 整体壁板结构设计分析技术 .....	( 101 )
3.4.1 整体壁板结构特点 .....	( 101 )
3.4.2 整体壁板结构裂纹转折特性研究 .....	( 102 )
3.4.3 机身整体壁板结构与组装结构对比分析与验证 .....	( 107 )
3.5 摩擦焊接头疲劳可靠性分析 .....	( 109 )
3.5.1 摩擦焊接方法分类及应用 .....	( 109 )
3.5.2 摩擦焊工艺对强度性能影响 .....	( 110 )
3.5.3 摩擦焊接头疲劳强度统计特征 .....	( 112 )
3.5.4 摩擦焊接头残余应力测试及控制方法 .....	( 114 )
3.5.5 摩擦焊接头疲劳可靠性分析与优化 .....	( 115 )
3.6 结构/机构疲劳可靠性试验技术 .....	( 116 )
3.6.1 襟缝翼运动机构可靠性试验技术 .....	( 117 )
3.6.2 起落架收放试验技术 .....	( 118 )
3.7 机身壁板复杂载荷耐久性/损伤容限试验技术 .....	( 122 )
3.7.1 机身壁板结构受力特点 .....	( 122 )
3.7.2 气密载荷施加方法 .....	( 122 )
3.7.3 气密/轴向拉伸载荷边界模拟与载荷施加方法 .....	( 123 )
3.7.4 气密/压缩载荷边界模拟与载荷施加方法 .....	( 124 )
3.7.5 机身壁板剪切载荷边界模拟与施加方法 .....	( 125 )
3.7.6 机身壁板耐久性/损伤容限复合加载试验技术 .....	( 126 )
3.8 飞机结构维修及维修大纲制订 .....	( 128 )
3.8.1 复合材料补片黏结修补金属结构技术 .....	( 128 )
3.8.2 飞机机体结构损伤容限修理评估 .....	( 129 )
3.8.3 维修大纲制订基础技术 .....	( 129 )

3.9 小结 .....	(133)
参考文献 .....	(133)
<b>第4章 复合材料结构强度技术 .....</b>	<b>(136)</b>
4.1 概述 .....	(136)
4.2 整体化复合材料结构基本单元——T接头 .....	(137)
4.2.1 T接头的分类、用途及其破坏机理 .....	(137)
4.2.2 T接头的元件级试验方法 .....	(139)
4.2.3 T接头破坏的有限元分析 .....	(142)
4.2.4 界面缺陷对T接头强度的影响 .....	(145)
4.3 后屈曲复合材料结构应用基础研究 .....	(146)
4.3.1 后屈曲复合材料结构刚度变化与传载分析 .....	(146)
4.3.2 复合材料整体加筋板轴压后屈曲失效分析方法 .....	(154)
4.3.3 结构后屈曲性能的试验表征 .....	(158)
4.3.4 后屈曲复合材料结构的应用展望 .....	(162)
4.4 基于渐进破坏的复合材料连接强度分析方法 .....	(163)
4.4.1 用自定义黏结元模拟接触 .....	(163)
4.4.2 基于黏结元接触技术的复合材料机械连接分析方法应用 .....	(164)
4.5 复合材料结构性能表征的标准化试验技术 .....	(167)
4.5.1 试验标准研究 .....	(167)
4.5.2 CAI试验冲击损伤引入方法的探索 .....	(175)
4.5.3 试验数据管理 .....	(178)
4.6 复合材料加筋壁板的稳定性试验方法 .....	(180)
4.6.1 剪切载荷下的稳定性试验方法 .....	(180)
4.6.2 压缩载荷下的稳定性试验方法 .....	(181)
4.6.3 压缩—剪切复合载荷下的稳定性试验方法 .....	(182)
4.6.4 复合材料机身壁板在综合载荷下的稳定性试验方法 .....	(183)
4.7 小结 .....	(185)
参考文献 .....	(185)
<b>第5章 飞机结构动强度技术 .....</b>	<b>(187)</b>
5.1 概述 .....	(187)
5.2 飞机地面振动试验 .....	(187)
5.2.1 大型飞机GVT空气弹簧支持系统设计 .....	(188)
5.2.2 相位共振/相位分离一体化模态识别技术 .....	(192)
5.2.3 工作模态识别 .....	(194)
5.3 离散源撞击分析与验证 .....	(198)
5.3.1 固体材料的应变率效应与测试 .....	(199)
5.3.2 冰雹撞击分析与试验 .....	(203)
5.3.3 鸟撞分析与试验 .....	(206)
5.3.4 结构战伤模拟分析与试验 .....	(208)

5.4	民机结构适坠性设计与验证 .....	(210)
5.4.1	民机机身结构坠撞建模与分析 .....	(210)
5.4.2	民机结构适坠性试验 .....	(214)
5.4.3	机身段坠撞试验与仿真分析的相关性分析 .....	(216)
5.4.4	民机机身结构适坠性评估技术 .....	(219)
5.4.5	民机典型机身段吸能结构技术 .....	(221)
5.4.6	航空座椅动态试验技术 .....	(225)
5.5	结构振动控制 .....	(230)
5.5.1	飞机抖振载荷减缓技术 .....	(232)
5.5.2	飞机典型壁板结构振动半主动控制 .....	(244)
5.6	考虑发动机陀螺效应的飞机突风载荷预计 .....	(251)
5.6.1	陀螺力矩与陀螺效应 .....	(251)
5.6.2	翼吊发动机广义陀螺矩阵 .....	(252)
5.6.3	涉及陀螺效应的振动特性分析 .....	(253)
5.6.4	涉及发动机陀螺效应的突风载荷分析 .....	(253)
5.7	多轮多支柱起落架落震试验 .....	(255)
5.7.1	试验方法 .....	(256)
5.7.2	关键设备 .....	(256)
5.7.3	试验验证 .....	(259)
5.8	起落架非线性摆振分析与验证 .....	(260)
5.8.1	分析方法原理 .....	(260)
5.8.2	计算分析 .....	(262)
5.8.3	试验验证 .....	(265)
5.9	小结 .....	(267)
	参考文献 .....	(267)
<b>第6章</b>	<b>航空声学与振动环境技术 .....</b>	<b>(269)</b>
6.1	概述 .....	(269)
6.2	飞机噪声源预计与控制 .....	(269)
6.2.1	飞机噪声源预计 .....	(270)
6.2.2	涡扇发动机短舱消声 .....	(276)
6.2.3	起落架气动噪声控制 .....	(284)
6.3	飞机噪声源识别测试 .....	(288)
6.3.1	声源识别概述 .....	(288)
6.3.2	传声器阵列声源识别基本原理 .....	(288)
6.3.3	利用传声器阵列技术识别飞机噪声源 .....	(292)
6.4	飞机舱内噪声计算与控制 .....	(300)
6.4.1	飞机舱内噪声计算方法 .....	(301)
6.4.2	飞机舱内噪声控制技术 .....	(303)
6.4.3	“新舟”系列飞机舱内噪声控制 .....	(310)

6.4.4	涡桨飞机舱内噪声主动	(317)
6.5	飞机结构声疲劳试验	(322)
6.5.1	声疲劳特性测试	(322)
6.5.2	飞机典型结构声疲劳试验技术	(327)
6.5.3	联合载荷环境声疲劳试验	(329)
6.5.4	进气道结构的声疲劳试验方法	(330)
6.6	飞机后机身结构动态疲劳试验	(331)
6.6.1	飞机结构动态疲劳问题概述	(332)
6.6.2	F/A-18 动态疲劳试验	(333)
6.6.3	动态疲劳试验系统	(335)
6.6.4	动态疲劳试验技术	(336)
6.6.5	某型先进战斗机动态疲劳试验	(340)
6.7	振动与其他环境联合试验	(342)
6.7.1	热振联合环境试验的振动控制技术	(342)
6.7.2	噪声-温度-振动联合环境试验测试技术	(344)
6.7.3	振动-噪声-温度-湿度四综合环境试验	(350)
6.8	小结	(350)
	参考文献	(351)
<b>第7章</b>	<b>飞行器结构热强度技术</b>	<b>(354)</b>
7.1	概述	(354)
7.2	飞行器抗热结构设计	(354)
7.2.1	抗热结构设计思想的演变	(355)
7.2.2	热结构设计方法	(357)
7.2.3	热防护系统设计方法	(359)
7.2.4	抗热结构设计流程	(359)
7.3	飞行器结构热分析	(361)
7.3.1	飞行器结构温度场有限元分析	(361)
7.3.2	温度场分析工程案例	(366)
7.3.3	飞行器结构热应力有限元分析	(370)
7.3.4	热应力分析工程案例	(371)
7.4	飞行器结构热试验	(374)
7.4.1	典型结构热试验技术	(375)
7.4.2	热试验控制技术	(379)
7.4.3	高温测试与标定技术	(384)
7.4.4	工程应用案例	(388)
7.5	小结	(392)
	参考文献	(393)
<b>第8章</b>	<b>全尺寸结构静强度/疲劳试验技术</b>	<b>(395)</b>
8.1	概述	(395)

8.2	试验设计技术 .....	(395)
8.2.1	计算机辅助试验设计技术 .....	(395)
8.2.2	载荷优化处理技术 .....	(397)
8.3	试验加载技术 .....	(399)
8.3.1	结构载荷施加技术 .....	(399)
8.3.2	多轮多支柱起落架支持技术 .....	(414)
8.3.3	试验扣重技术 .....	(419)
8.4	试验数据测量与分析技术 .....	(422)
8.4.1	非接触式位移测量技术 .....	(422)
8.4.2	应变片信息管理技术 .....	(424)
8.4.3	应变片电子标识技术 .....	(426)
8.4.4	基于应变数据的损伤监测技术 .....	(428)
8.5	小结 .....	(433)
	参考文献 .....	(433)
<b>第9章</b>	<b>飞机结构强度虚拟试验技术 .....</b>	<b>(435)</b>
9.1	概述 .....	(435)
9.2	飞机结构强度虚拟试验简介 .....	(435)
9.2.1	概念和内涵 .....	(435)
9.2.2	虚拟试验内容 .....	(436)
9.2.3	虚拟试验在飞机研制过程中的作用 .....	(437)
9.3	飞机结构强度虚拟试验环境模型 .....	(439)
9.3.1	虚拟试验环境模型的建立 .....	(439)
9.3.2	虚拟装配 .....	(442)
9.4	飞机结构强度虚拟试验件模型 .....	(446)
9.4.1	虚拟试验件建模 .....	(446)
9.4.2	模型校核与验证 .....	(449)
9.4.3	模型管理 .....	(450)
9.4.4	虚拟试验与物理试验相关性评估 .....	(450)
9.5	结构静强度破坏分析技术 .....	(453)
9.5.1	金属结构渐进破坏分析技术 .....	(453)
9.5.2	复合材料层合板渐进破坏分析技术 .....	(458)
9.5.3	非匹配多重网格算法技术 .....	(460)
9.6	虚拟试验显示技术 .....	(464)
9.6.1	虚拟试验结果的显示技术 .....	(465)
9.6.2	物理试验结果的实时显示技术 .....	(468)
9.6.3	虚拟试验性能数字样机技术 .....	(470)
9.7	飞机结构强度虚拟试验数据管理 .....	(471)
9.7.1	虚拟试验数据管理架构 .....	(471)
9.7.2	基于流程的虚拟试验数据 .....	(473)



9.7.3 虚拟试验数据的分析应用 .....	(473)
9.8 小结 .....	(474)
参考文献 .....	(474)
<b>第10章 飞机气候试验 .....</b>	<b>(476)</b>
10.1 概述 .....	(476)
10.2 飞机气候试验及其作用 .....	(476)
10.2.1 飞机气候环境适应性与飞机环境工程 .....	(476)
10.2.2 飞机气候试验 .....	(477)
10.2.3 飞机气候试验的分类 .....	(478)
10.2.4 飞机气候试验的作用 .....	(478)
10.2.5 飞机气候实验室 .....	(479)
10.3 飞机气候试验标准 .....	(479)
10.3.1 国内外飞机气候试验标准发展概况 .....	(479)
10.3.2 国外现有环境试验标准 .....	(480)
10.3.3 国内现有环境试验标准 .....	(482)
10.3.4 武器装备气候环境试验方法标准与飞机气候试验的关系 .....	(483)
10.4 飞机气候试验管理及工作程序 .....	(484)
10.4.1 飞机气候试验管理 .....	(484)
10.4.2 飞机气候试验工作程序 .....	(485)
10.5 飞机气候试验的内容 .....	(487)
10.5.1 飞机经受的气候环境因素与量值 .....	(487)
10.5.2 试验顺序 .....	(489)
10.5.3 飞机气候试验检测 .....	(489)
10.6 飞机气候环境适应性评定 .....	(490)
10.6.1 飞机气候环境适应性评定和目的 .....	(490)
10.6.2 飞机实验室气候环境适应性评定 .....	(490)
10.7 飞机气候试验展望 .....	(492)
10.7.1 国外发展情况 .....	(492)
10.7.2 我国飞机气候试验展望 .....	(493)
10.8 小结 .....	(494)
参考文献 .....	(494)
<b>第11章 飞机结构无损检测技术 .....</b>	<b>(495)</b>
11.1 概述 .....	(495)
11.2 超声相控阵检测技术 .....	(495)
11.2.1 超声相控阵检测技术原理及特点 .....	(496)
11.2.2 超声相控阵检测系统 .....	(496)
11.2.3 复合材料结构的超声相控阵检测技术 .....	(497)
11.2.4 超声相控阵技术在金属结构中的应用 .....	(505)
11.3 红外热成像检测技术 .....	(507)