



航空基础技术丛书

航空结构强度技术

AIRCRAFT STRUCTURE STRENGTH TECHNOLOGY

中国飞机强度研究所◎主编



航空工业出版社



航空基础技术丛书

航空结构强度技术

中国飞机强度研究所 主编

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

航空结构强度的概念和要求贯穿于航空器研发、生产、改进和使用全过程,强度技术解决结构和系统的强度、刚度、气动弹性、重量、寿命和维修性等综合问题,是航空器总体、气动、系统、工艺及维护等专业和环节不可或缺的基础技术。相对于其他装备制造业,航空器研制中强度技术更为重要。

本书从航空器在为人类服务的100余年的进展中不断提出的强度问题和解决方法入手,介绍了强度技术在航空器设计、制造和运营中发挥的作用。分别对静强度、动强度、耐久性/损伤容限、热强度、环境强度、航空噪声、结构验证试验和结构强度计算技术等方面进行叙述。该书可供飞行器管理、制造和使用的政府机关、工业部门和航空公司的决策者、管理者、技术人员和飞行器爱好者参考。

图书在版编目(CIP)数据

航空结构强度技术/中国飞机强度研究所主编. --
北京:航空工业出版社,2013.12
(航空基础技术丛书)
ISBN 978-7-5165-0347-8

I. ①航… II. ①中… III. ①航空器—结构强度
IV. ①V214.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第293271号

航空结构强度技术 Hangkong Jiegou Qiangdu Jishu

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话:010-84936555 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2013年12月第1版

2013年12月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:30.75

字数:790千字

印数:1—3000

定价:120.00元

《航空基础技术丛书》总审委会

主	任	林左鸣					
常务副主任		谭瑞松					
副	主	任	顾惠忠	吴献东	耿汝光	李玉海	
			张新国	高建设	李方勇	孙卫福	
成	员		关 桥	曹春晓	赵振业	李 明	刘大响
			冯培德	陈祥宝	魏金钟	刘 林	周国强
			王英杰	梁丽涛	杨胜群	曹英杰	戴圣龙
			孙侠生	张 军	赵 波	夏裕彬	张振伟
			张明习	谢富原			

《航空基础技术丛书》总编委会

主任 徐占斌
副主任 荣毅超 李晓红 吴世平 陈刚 刘鑫
成员 向明 梅方清 姚俊臣 周宁 史晋蕾
李小飞 徐明 吴晓峰 张力 李兴无
杨海 李志强 李周复 黄蓝 刘恩朋
轩立新 益小苏 段泽民

《航空基础技术丛书》编写办公室

主任 梅方清 姚俊臣
副主任 周宁 史晋蕾
成员 李小飞 郭晓月 熊昌友 郭倩旎 冯冰
李亚军 李少壮 杨素玲 胡律行 王湘念
陈玉 汪慧云 杨占才 李冬 张明
姚红

《航空基础技术丛书》总序

近年来，以一批先进重点型号为代表的我国航空武器装备取得了“井喷式”的发展，航空工业实现了与发达国家从“望尘莫及”到“望其项背”的历史性跨越。但我们也要清醒地看到，面对新航空装备下一轮“井喷式”发展的需要，我们面临着加强航空科技创新的迫切需求。

党的十八大报告指出，要实施创新驱动发展战略，坚持走中国特色自主创新道路，以全球视野谋划和推动创新。航空工业作为高科技战略性新兴产业，在加强自主创新和提升创新能力方面面临三个方面的挑战：一是传统的技术跟随式发展模式已经走到了尽头；二是长期积累的技术创新成果已充分应用，技术储备急需创新实践来大量补充；三是新航空装备跨越式发展对技术和管理创新提出更高要求。

要实施创新驱动的发展战略，首先要注重原始创新。加大现象发现和原理验证力度，探索未知技术领域，积极寻求原创性突破，形成一批引领未来发展，技术成熟度在1~3级的创新成果。更要注重技术创新。航空基础技术作为航空科技的重要组成部分，发挥着重要的支撑作用，支持和引领着航空科技的发展。在国家科技重大专项、重点型号攻关、新型飞机和发动机的研制中都起着强有力的保障与支撑作用，具有重要的战略意义。随着我国从跟踪研制向自主创新、从制造大国到制造强国的转变，作为科技前沿的航空基础技术必将从服务和保障的方式向技术引领方式转变，并向社会其他国民经济领域进行技术转移和输出，为全社会的技术进步和创新发展到起到强有力的推动作用。

中国航空工业集团公司基础技术研究院作为航空工业基础技术的龙头，肩负着支撑、引领型号发展的双重任务，本着“航空报国，强军富民”的理念，践行“变革为先，创新为本”的精神，以知识产权战略为抓手，牵引原始创新，推动技术创新，加强管理创新，最终实现从“型号牵引”到“牵引型号”的转变。

航空基础技术的传承与传播，与航空基础技术的研究与探索同样重要。目前，我们急需有关论述基础技术等科技前沿技术的专著。因此，在中国航空工业集团公司倡导下，由中国航空工业集团公司基础技术研究院组织所属 12 家单位联合编写了一套大型基础技术专著《航空基础技术丛书》。《航空基础技术丛书》的编写，开创了航空工业各专业板块之先河，为航空工业知识积累、传承、宣传工作，为航空科学技术服务于社会开了一个好头。这种勤勉探索，对航空工业、对全社会负责的精神，值得大力提倡。

该丛书的编写，对梳理航空工业基础技术的发展脉络，宣传航空基础技术成就，引领未来航空基础技术发展方向将起到重要作用，对政府主管部门、航空工业用户、其他工业领域用户了解航空基础技术提供了一个良好的媒介，对广大航空爱好者、尤其是青年人了解航空、热爱航空起到了宣传作用，亦对社会输出相关技术、服务于我国科技进步做出了贡献。

中国航空工业集团公司董事长
党组书记



2013 年 8 月

《航空基础技术丛书》总前言

我国航空工业经过六十多年的发展，逐步形成了专业门类齐全，科研、试验、生产相配套，具备研制生产当代航空装备能力的高科技工业体系，发展了多类型多用途的飞机、直升机、发动机、导弹，研制出一批具有自主知识产权并与发达国家在役航空装备性能相当的航空器，大幅度缩小了与国外先进水平的差距，使我国跻身于能够研制先进的歼击机、歼击轰炸机、直升机、教练机、特种飞机等多种航空装备的少数几个国家之列，为我国国民经济建设、国防现代化建设、社会科技进步和综合国力的提升做出了重大贡献。

航空工业作为国家的战略性产业，决定了它的发展必须建立在牢固的基础之上。所谓跨越式发展，是长期扎扎实实、厚积薄发的结果。航空基础技术作为整个航空工业的根基，在整个航空工业的发展中起着举足轻重的作用。因此，认真梳理航空基础技术发展脉络，跟踪国际航空基础技术的发展趋势，不断创新我国航空基础技术，并为航空工业新产品研制做好技术储备，成为航空工业的一项重要任务。

为完成中国航空工业集团公司基础技术研究院“打牢基础、做强技术、支撑型号、创造财富”的使命，作为中国航空工业集团公司横向价值链的最前端，基础院承担着包括政府科研、装备预研等方面的研究任务，拥有12家科研院所和高科技企业、多个国家工程实验室和国防科技重点实验室以及航空科技重点实验室，为国防科技工业和航空科技实现长远的跨越式发展提供了技术保障，为我国航空工业又好又快发展贡献着力量。

为强化从知识创新、技术创新到成果产业化的有效传导机制，提升航空基础研究成果产业化运作能力，充分体现基础技术在基础保障、技术引领、服务支撑等方面的作用，中国航空工业集团公司基础技术研究院（简称基础院）组织编写了《航空基础技术丛书》，全面介绍了航空

基础技术的范围、内容、现状、发展趋势等，尤其对各种技术的工程化应用特点、新技术对航空装备的影响作了重点介绍，对产品设计者提高新产品设计性能，用户提升对新产品的信任起到了较大作用。通过总结经验、探索航空基础技术发展趋势，进一步构筑和完善了相关材料、制造、标准化、计量、强度、气动、测试、雷电防护等技术体系，从而夯实航空工业发展的根基，实现航空基础技术从“型号牵引”到“牵引型号”的转型升级。

《航空基础技术丛书》分为《航空标准化与通用技术》、《航空精密超精密制造技术》、《航空计量技术》、《航空材料技术》、《航空结构强度技术》、《航空制造技术》、《航空气动力技术》、《航空故障诊断与健康管理技术》、《航空测试技术》、《航空电磁窗技术》、《航空复合材料技术》、《航空器雷电防护技术》12个分册，分别由基础院所属中国航空综合技术研究所、北京航空精密机械研究所、北京长城计量测试技术研究所、北京航空材料研究院、中国飞机强度研究所、北京航空制造工程研究所、中国航空工业空气动力研究院、上海航空测控技术研究所、北京长城航空测控技术研究所、济南特种结构研究所、中国航空工业集团公司复合材料技术中心、合肥航太电物理技术有限公司等12家科研院所和高科技企业负责编写。主编单位汇集了各个相关专业的一线科研骨干承担编写工作，由各相关专业的院士、专家负责审稿，并由各单位总工程师担任各分册编委会主任，意在全面、准确地介绍各相关专业的现状、发展趋势及应用特点。

该丛书适合航空工业相关部门、航空工业所属企事业单位，总装、空军、海军等装备需求部门，航天、兵器、船舶、核、电子等军工相关部门管理人员及相关技术人员，以及相关院校的师生等阅读。

由于航空基础技术涵盖范围甚广，相关科学技术发展很快，不足之处，还望广大读者批评指正。

中国航空工业集团公司副总经理

徐占斌

2013年8月

《航空结构强度技术》审委会

主 任 孙侠生

副主任 杨 海

成 员 段世慧 黄文超 柴亚南 冯建民
董登科 牟让科 成 竹

《航空结构强度技术》编委会

主任 强宝平
副主任 朱梅庄 胡律行
成员 童贤鑫 齐丕骞 薛景川 秦浩明
郭定文 李喜明 吴德彦 丁惠梁
陈焕星

《航空结构强度技术》序

航空结构是航空平台的基础。先进的气动布局必须具备结构的可实现性，各种用途的航空平台都必须有一个良好的机体结构来支持。

飞机是最重要的航空器，飞机结构强度就是以航空平台的飞机结构为主要研究对象，使飞机在满足总体、气动及各系统对飞机结构要求的同时，研究解决机体结构本身的强度、刚度、气动弹性、耐久性、损伤容限、重量、寿命、维修性和可验证性等综合问题。

飞机结构强度专业的研究水平直接影响着飞机的性能、成本、安全性、可靠性和舒适性以及民用飞机的适航性。在飞机研制的立项论证阶段和预发展阶段就对结构强度技术有明确要求；飞行器结构强度地面试验验证是飞机研制不可或缺的重要环节，在飞机研制工程发展阶段有详细设计、全面试制、地面试验和飞行试验四个主要环节，地面试验要为首次飞行试验和持续飞行试验提供支持。飞行器结构在整个设计过程还须具备有效的结构设计方法和“积木式”的试验作支持，主要包括：元件试验、组件试验、结构件试验和部件试验。

《航空结构强度技术》是在结构强度研究几十年的成果和经验的基础上编写的，主要描述飞机结构强度技术，个别章节涉及高超声速飞行器强度。全书分9章，分别从航空结构强度技术概述、静强度、动强度、耐久性/损伤容限、热强度、噪声控制与声疲劳、气候化学环境强度、全尺寸飞机地面试验验证及计算结构技术和结构优化等方面，叙述了航空结构强度技术的发展历程、原理、现状和发展趋势，及其在飞机新型号探索、预研和研制过程中的地位和作用。复合材料结构强度技术涉及航空结构强度的各个方面，在各章中均有叙述。

解决强度难题，创新强度技术，提供强度设计的规范、标准、手册、指南和软件等工具，进行试验和分析验证，是航空结构强度研究的

重点，也是航空结构强度研究者的使命。根据“探索一代、预研一代、研制一代、生产一代”的任务，开展结构强度前沿技术研究，如新材料/结构强度技术、不确定设计方法、健康监测技术、智能结构和多功能结构强度技术等，是我们应扩展的研究领域；按照飞机结构完整性大纲要求，加强结构强度基础研究、应用研究，形成完整的技术体系和配套设施，特别是结构强度综合技术、积木式试验验证技术、结构强度规范及标准等内容，是我们持续努力的工作方向。

了解结构强度技术的地位和作用、关注结构强度技术的发展和应用、为飞机设计人员提供技术支持是该书编写的目的，同时也希望藉此能吸引更多的年轻学者来从事结构强度技术的研究和应用工作。

孙侠生

2013年5月

《航空结构强度技术》前言

《航空结构强度技术》是根据航空结构强度几十年的研究成果和经验编写而成的科普读物，是《航空基础技术丛书》的一个分册。

航空结构强度直接影响着航空器的性能、成本、安全性、可靠性、舒适性和适航性。我国航空结构强度技术的发展随着我国航空工业的发展而逐步发展，航空结构强度技术关注和研究的范畴随着航空科学技术的发展而不断丰富拓展。随着在实践中的不断学习探索，形成了适用于我国航空工业的航空结构强度试验验证方法和体系。航空器结构强度地面试验验证是航空器研制不可或缺的重要环节，完成航空器结构强度试验是航空器首次飞行和持续飞行试验的先决条件。

航空器是指在大气层中飞行的飞行器。它包括飞机、直升机、飞艇和其他任何藉空气的反作用力而得以在大气层中飞行的器物。本书中为了表述清楚，在不同的章节分别使用了飞机、飞行器等名词。

了解航空器结构强度技术都包括哪些内容，它们是怎样发展起来的、基本原理都是什么、在航空器研制过程中起什么重要作用，以及结构强度研究和试验在航空工业中处于什么地位，对于了解航空器和航空工业非常重要。本书试图能予以解释。

本书从航空结构强度技术概述、静强度、动强度、耐久性损伤容限、热强度、噪声控制与声疲劳、气候化学环境对结构强度的影响、全尺寸飞机地面试验验证、结构强度计算分析技术和结构优化等方面，叙述了航空结构强度技术的发展历程、原理、现状和发展趋势，以及在新型号研制和课题预先研究过程中的地位和作用。由于复合材料结构强度涉及强度的各个方面，书中各章中均有相应的描述，故不再作为单独一章出现。疲劳强度包括常规疲劳、振动疲劳、腐蚀疲劳和声疲劳，除第4章的叙述外，还在第3章、第5章、第6章、第7章作了介绍。

孙侠生两次主持审委会，对书稿内容进行了审查，胡律行阅读了全书，完成了全书的统稿工作，张妍完成了书稿的录入和编排工作，在此致以诚挚的谢意。

全书成稿得到了中国航空工业集团公司基础技术研究院科技部和航空工业出版社的大力支持和指导，在此表示诚挚的感谢。

《航空结构强度技术》编委会

2013年5月

目 录

第 1 章 概述	(1)
1.1 概念	(1)
1.1.1 航空结构强度	(1)
1.1.2 结构强度技术	(3)
1.2 结构强度在航空器研制中的地位 and 作用	(15)
1.2.1 航空器研制中结构强度的地位	(15)
1.2.2 结构完整性大纲对结构强度任务的总要求	(18)
1.2.3 强度规范对结构强度的具体要求	(22)
1.2.4 适航性对结构强度的总要求	(25)
1.3 结构强度技术发展现状	(32)
1.3.1 飞机结构强度设计思想的发展	(32)
1.3.2 结构强度技术体系	(34)
1.3.3 结构强度技术现况概要	(41)
1.3.4 结构强度技术的研究、试验能力现状——设备和设施	(43)
1.4 结构强度技术发展趋势	(44)
1.4.1 新材料、新工艺结构静强度、耐久性/损伤容限分析与试验验证技术研究	(45)
1.4.2 结构试验验证无损检测和健康监测与使用维护的相关性技术研究	(45)
1.4.3 结构动强度设计技术研究	(45)
1.4.4 高超声速飞行器结构完整性研究	(46)
1.4.5 特殊结构航空噪声控制和振动/声耐久性研究	(46)
1.4.6 全尺寸飞机结构及相关系统气候适应性与可靠性分析与试验技术	(46)
1.4.7 全尺寸飞机结构试验验证技术深化研究	(46)
1.4.8 计算结构技术深化研究	(47)
1.4.9 结构完整性标准、规范和适航符合性深化研究	(47)
第 2 章 静强度设计与验证	(48)
2.1 静强度设计与验证的内容和要求	(49)
2.1.1 设计载荷的确定和要求	(49)
2.1.2 材料性能和设计许用值的确定和要求	(52)
2.1.3 结构应力分析的内容和要求	(53)
2.1.4 结构强度和刚度校核的内容和要求	(54)
2.1.5 试验验证的内容和要求	(55)
2.2 结构应力分析的原理和方法	(56)
2.2.1 结构应力的有限元分析的原理和方法	(56)
2.2.2 结构应力的工程分析原理和方法	(62)

2.3	结构强度和刚度校核的原理和方法	(63)
2.3.1	薄壁板壳结构的稳定性分析与强度校核	(65)
2.3.2	蜂窝夹层结构的设计分析与强度校核	(76)
2.3.3	结构连接件的强度分析与校核	(77)
2.3.4	开口结构的设计分析与强度校核	(81)
2.4	结构强度试验验证的原理和方法	(85)
2.5	复合材料结构静强度设计、分析与验证中的特殊问题简介	(94)
2.5.1	复合材料结构的特点	(94)
2.5.2	复合材料结构静强度设计、分析与验证中的特殊问题	(95)
2.6	结构静强度设计分析与验证的发展趋势	(102)
第3章	动强度设计与验证	(105)
3.1	飞机动强度设计与验证要求	(107)
3.1.1	飞机强度规范和标准简介	(107)
3.1.2	动强度设计与验证要求概述	(108)
3.1.3	动强度设计与验证要求有关说明	(109)
3.2	飞机动载荷分析与动力环境预计	(111)
3.2.1	飞机动载荷分析	(111)
3.2.2	涉及发动机陀螺效应的飞机动载荷	(113)
3.2.3	飞机振动环境预计	(114)
3.2.4	飞机抖振机理与抖振边界确定	(115)
3.3	结构动力学设计与振动控制设计	(117)
3.3.1	结构动力学设计	(117)
3.3.2	振动控制设计	(118)
3.3.3	抖振预防和抖振抑制	(120)
3.3.4	发动机隔振安装设计	(121)
3.4	结构随机振动疲劳寿命分析	(121)
3.4.1	随机振动过程及其统计特性简介	(121)
3.4.2	随机振动疲劳分析方法	(123)
3.5	飞机动力学特性地面试验	(126)
3.5.1	全尺寸飞机地面振动试验	(126)
3.5.2	飞机气动伺服弹性地面试验	(129)
3.5.3	高超声速飞行器结构热模态试验	(131)
3.6	飞机动力环境试验	(132)
3.6.1	动力环境试验的分类	(132)
3.6.2	动力环境试验的一般工作程序	(134)
3.6.3	结构振动环境与多点静载荷的复合加载试验	(136)
3.6.4	油箱晃振试验	(137)
3.6.5	炮振试验	(137)
3.6.6	大迎角机动飞行飞机的后机身动态疲劳试验	(139)