



航空基础技术丛书

航空计量技术

METROLOGY AND MEASUREMENT
IN AVIATION ENGINEERING

北京长城计量测试技术研究所◎主编



航空工业出版社



航空基础技术丛书

航空计量技术

北京长城计量测试技术研究所 主编

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

计量技术是综合现代科学前沿技术成果的集成应用技术,也是支撑技术创新的基础技术。在航空工程的实践中,计量技术对保证航空产品设计、生产、试验、使用维护的全寿命周期中的测量数据量值准确发挥着重要的作用。本书对计量专业技术及其在航空工程中的应用与发展做了较为系统的介绍,可供航空计量测试工程技术人员和科技管理人员在工作与学习时参考。

图书在版编目 (C I P) 数据

航空计量技术/北京长城计量测试技术研究所主编.

--北京:航空工业出版社,2013.12

(航空基础技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0292-1

I. ①航… II. ①北… III. ①航空工程-计量 IV.
①V2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 271292 号

航空计量技术 Hangkong Jiliang 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: 25.25

字数: 640 千字

印数: 1—3000

定价: 98.00 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	郭倩旒	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

《航空计量技术》审委会

主 任 曹英杰

成 员 姚俊臣 张志民 肖为国 廖 理 龙祖洪
靳书元 洪宝林 王龙根 许新民 牛立新
陈 勇 李新良 李文斌

《航空计量技术》编委会

主 任 张 力

成 员 周自力 周世锋 靳书元 洪宝林 梁志国
朱振宇 周庆福 曾 吾 熊昌友 徐 永
杨永军 熊 磊 朱 岩 崔岩梅

统 稿 李少壮 周庆福

《航空计量技术》文字起草参与人员名单

张 力	靳书元	洪宝林	梁志国	付军立	欧阳普忠	石 伟
王玉芳	毛如增	廖建平	李少壮	李洪波	刘彦军	徐晓梅
刘梦夏	薛 睿	李建国	赵 静	马骊群	牛立新	陆佳艳
周庆福	王龙根	张学涛	邢向南	李亚晋	李新良	张大治
李 强	任冬梅	王 宇	武腾飞	王立恒	薛景锋	蔡 静
吕国义	王 毅	李鑫武	张炳毅	张泽光	郭立忠	张玉文
武海波						

《航空计量技术》前言

计量学是“关于测量及其应用的科学”。在国家计量规范 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》中明确定义：“计量是实现单位统一、量值准确可靠的活动”，“计量学涵盖有关测量的理论及其不论其测量不确定度大小的所有应用领域”。计量学是现代科学的重要组成部分，计量学的研究对象涵盖了4个方面的内容，即“计量单位制”、“复现计量单位的自然基准或实物基准”、“测量方法”，以及“计量标准器及其使用条件”。计量技术是计量科学在工程实践中的具体应用，作为工程基础技术，在航空工程实践中起着保证航空器全系统参数指标量值准确可靠、支撑航空科技创新的重要作用。

在航空工程中，航空产品的设计验证、生产制造、运行维护都需要大量的数据给予支撑。随着产品性能的提升，对表征性能的各种数据的可靠性和可信度的要求不断提高，特别是随着大型民用飞机的发展，动力、飞控、电子、机电等功能系统产品作为飞机系统的重要构成部分，功能不断提升，结构日趋复杂，因此表征产品综合性能的总体指标在向各子系统、设备、传感器等成千上万的各层参数指标分解的过程中，量值的准确愈加重要。

伴随着产品试验与检测方法中与量值传递相关的因素日益得到关注，人们对于量值准确度与量传手段存在着的密切关系及其在试验结果评价过程中的重要作用的认识日渐清晰，随之而来的是对量值传递方式不断发展和完善的要求日益紧迫。传统的量值传递方式，是由下级部门定期将标准器送往上级计量部门进行检定以确定被检计量器具是否合格的量传方式存在着一定的局限性。它偏重于计量标准本身，而忽略了量值传递过程中其他相关因素的影响，如实验室的环境条件、其他计量器具和配套设备的状态等。在较长的一段时间里计量工作被“（计量标

准)建立起来、传递下去”的思想认识束缚,单纯以满足“建立并保持计量标准器”为工作重点,缺乏在工程参量测量方法方面的研发投入与经验积累,使得在航空工程实践中遇到的大量工程测量问题往往是依赖采购国外测量仪器来满足一时之需,而且工作器具在国内没有标准器可实施量传的状况屡见不鲜,造成了计量工作的被动局面。在航空工程计量保障需求的推动下,航空计量专业技术的发展面向工程现场保障、面向现场测试和现场校准正一步步地走出实验室,走进航空型号工程中。

由2个国防科技工业一级计量技术机构(航空计量技术中心、颗粒度计量一级站)和12个国防二级计量技术机构、115个国防三级计量技术机构组成的航空工业计量技术机构体系,量传能力由最初的几何量、热学、力学、电磁学等传统计量学专业领域向外不断拓展、完善,逐步建立起了涉及传统计量学十大专业的量传参数体系,并做为国家计量技术体系中的重要组成部分,经国家主管部门授权面向全社会提供量值传递服务。在纳米计量技术、动态测试与校准、导航与定位校准技术等领域已跻身国际先进行列。建立了一大批专用的计量标准或测试校准手段,对航空工程型号研制生产过程发挥了重要的技术先导与实践支撑的作用。

随着国家对大型飞机发展战略的稳步推进和航空工程技术的发展,一方面需要不断建立新的计量标准和校准手段,如大型工件的装配工艺、大推力发动机研制必需的精密测量方法与测量手段及相应的校准技术,航空武器装备研制试验需要的红外、激光、超声波、电磁兼容、随机振动、隔热涂层等技术应用相关的测量手段和计量标准;另一方面还需对既有的计量标准手段在参数量值的量程方面实现拓展,如发动机、大型飞机、空天飞行器等研制工程急需进一步扩展高温、高压、热流、极限尺寸测量等计量标准,来满足技术创新过程中对计量保障能力的需求。过去,只是在一般常用的量值范围内进行测量,而今后则要在特大、特小、超高、超低、极强、极弱的范围内进行测量,要解决像长距离、微小尺寸、极强/极弱的电磁场和辐射场等的计量问题,需要将计量校准设备的量程和频段向两端扩展,逐步建立如微电流、大电压、微

电场、超低频、超高频、大功率等标准。计量工作面临着逐渐由小到大、从分散到集中、从单参数到多参数、从静态测量到动态测量、从手动测量到自动化测量、从部件参数测量与评价到全系统测量与校准的不断发展。计量工作的参数多、频段宽、量值精度高的特点将更加突出,这将对计量技术满足航空工程综合保障需求的能力不断提出新的更高的要求。

本书站在计量学专业技术的角度,从介绍计量学的基础知识及其传统的计量专业布局入手,首先介绍计量学的基础知识及传统的计量专业技术领域细分概念,分析我国的计量科学技术发展与法制计量管理等基本情况,进而对几何量、热学、力学、电磁学、时间频率和无线电、化学、声学、光学,以及应航空工程需求发展的惯性计量等计量技术在航空工程实践中的应用状况进行阐述,结合我国航空工业系统对计量工作的管理实践,对航空计量工作的成果加以总结,对若干支撑航空产品自主创新发展的计量技术热点进行了分析,以帮助读者能对航空计量技术的现状与发展趋势及其在航空工程中的重要作用有所了解。

本书作为《航空基础技术丛书》的一部分,力求做到技术与工程应用相结合,面向关心航空、支持航空事业的广大的读者群体,希望能帮助读者加深对航空工程中的计量工作的了解,并对航空工程实践中的计量业务活动发挥一定的参考作用。本书适合从事计量工作相关业务的各级工程技术人员、管理人员参考,并可作为大专院校师生的辅助用书。

本书在编写过程中得到了长期工作在航空工业中的众多老领导和老专家的悉心指导,也得到了中国航空工业集团公司所属各相关厂、所的大力支持,同时还得到了长期在国防科技工业战线并肩奋战的计量工作人员的热情关注与支持配合。受篇幅所限,对航空计量在航空工程中开展保障服务的大量的信息资料不能在本书中一一展现,谨借此向本书成稿过程中为书稿编纂工作做出了贡献的同志们致以衷心的感谢。

在航空计量技术的发展历程中,奋战在航空计量战线的广大计量工作人员,以“铸尺量天”的豪迈精神,自主创新、自强不息,在确保航空产品量值准确的各项实践活动中,不计名利、甘当人梯,在默默无

闻中始终发挥着重要的作用。聂荣臻元帅曾寄语参加 1983 年国防计量工作会议的同志们——“科技要发展，计量须先行”，充分肯定了计量工作在国防科学技术发展中的重要作用，同时对计量工作者勇于创新、锐意进取的精神给予了莫大的鼓舞和支持，在此特借其向计量战线上的“无名英雄”们致以崇高的敬意，并祝愿我国航空计量事业在不断发展壮大的进程中，为我国科学技术的自主创新发展、国防与民用航空技术和产品的发展不断做出更大的贡献。

《航空计量技术》编委会

2013 年 5 月

目 录

第 1 章 现代计量学及其发展	(1)
1.1 计量概述	(1)
1.1.1 计量简介	(1)
1.1.2 计量的分类	(2)
1.1.3 计量的发展历程	(4)
1.1.4 现代计量学的发展	(5)
1.2 计量学基础	(10)
1.2.1 量和单位	(10)
1.2.2 测量、测量误差和测量不确定度	(14)
1.2.3 测量仪器及其特性	(16)
1.3 计量管理与体系建设	(17)
1.3.1 国家计量管理体系	(17)
1.3.2 国防军工计量体系的建设	(21)
1.3.3 航空计量管理	(31)
第 2 章 几何量计量	(41)
2.1 端度	(44)
2.2 线纹	(44)
2.3 直径	(45)
2.4 角度	(47)
2.4.1 角度量具	(47)
2.4.2 角度计量技术与计量标准器具	(48)
2.5 粗糙度	(51)
2.5.1 表面粗糙度的测量	(51)
2.5.2 表面粗糙度参数的量传	(52)
2.6 平面度和直线度	(52)
2.6.1 平面度	(52)
2.6.2 直线度	(55)
2.7 圆度和圆柱度	(55)
2.7.1 圆度	(55)
2.7.2 圆柱度	(56)
2.8 齿轮和螺纹	(57)
2.8.1 齿轮量仪	(58)
2.8.2 齿轮参数计量标准	(59)
2.8.3 螺纹	(59)

2.9 形位误差和尺寸	(60)
2.10 大尺寸计量	(61)
2.10.1 大尺寸计量技术及设备	(61)
2.10.2 大尺寸计量技术发展趋势	(63)
2.10.3 国外相关技术发展概况	(64)
2.11 在航空工程中的应用与发展	(65)
第3章 热学计量	(67)
3.1 常规温度计量	(68)
3.1.1 温度测量方法	(68)
3.1.2 常规温度量传体系	(72)
3.1.3 常规温度计量标准装置	(74)
3.2 湿度计量	(78)
3.2.1 湿度表示方法	(78)
3.2.2 湿度量传体系	(78)
3.2.3 湿度计量标准装置	(80)
3.2.4 动态湿度校准	(81)
3.2.5 湿度仪器的检定和校准	(81)
3.3 特种温度计量	(82)
3.3.1 气流温度测量	(82)
3.3.2 表面温度测量	(83)
3.3.3 特种温度计量的发展	(85)
3.3.4 特种温度量传体系	(86)
3.3.5 特种温度计量标准装置	(86)
3.4 在航空工程中的应用与发展	(89)
3.4.1 生产工艺保障	(89)
3.4.2 航空产品综合性能试验的保障	(90)
3.4.3 发展趋势	(93)
第4章 力学计量	(99)
4.1 质量	(99)
4.1.1 基本概念	(99)
4.1.2 计量器具	(99)
4.1.3 量传体系	(101)
4.1.4 在航空工程中的应用	(102)
4.2 力值	(102)
4.2.1 基本概念	(102)
4.2.2 计量器具	(102)
4.2.3 量传体系	(106)
4.2.4 在航空工程中的应用	(106)
4.3 硬度	(108)