



航空基础技术丛书

# 航空精密超精密 制造技术

AVIATION PRECISION AND ULTRA-PRECISION  
MANUFACTURING TECHNOLOGY

北京航空精密机械研究所◎主编



航空工业出版社



航空基础技术丛书

# 航空精密超精密制造技术

北京航空精密机械研究所 主编

航空工业出版社

北京

## 内 容 提 要

《航空精密超精密制造技术》主要介绍精密超精密制造技术的概念、特点、方法、技术装备以及应用等相关内容,能够反映当代航空精密超精密加工技术的现状和最新科研成果。体现了航空基础技术作为航空科技体系的组成部分,以及对航空工业发展的支持和引领作用。

《航空精密超精密制造技术》一书共分7章:第1章 精密、超精密制造技术概论;第2章 航空精密加工技术;第3章 航空超精密加工技术;第4章 航空微系统制造技术;第5章 精密坐标测量技术;第6章 精密、超精密加工设备;第7章 惯导测试与运动仿真技术及设备。

本书适合从事航空型号工程管理、航空精密超精密制造技术领域工程技术人员、高等院校相关专业师生使用;也可作为从事相关技术领域的研究人员的参考书。

### 图书在版编目(CIP)数据

航空精密超精密制造技术/北京航空精密机械研究所主编. --北京:航空工业出版社,2013.12

(航空基础技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0297-6

I. ①航… II. ①北… III. ①航空设备—机械制造工  
艺 IV. ①V243

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第271931号

## 航空精密超精密制造技术 Hangkong Jingmi Chaojingmi Zhizao 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:14

字数:355千字

印数:1—3000

定价:56.00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，面对新航空装备新一轮“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

## 《航空精密超精密制造技术》审委会

主任 杨胜群

成员 张跃刚 金 涛 高国平 谢晓兵 郑会龙  
徐国柱

## 《航空精密超精密制造技术》编委会

主任 吴晓峰

副主任 李亚军 杨 辉

成 员 刘 樾 张建明 柳 权 郁韶琛 郭益德

赵祉江 胡成海 王 婕

统 稿 郁韶琛 李亚军

## 《航空精密超精密制造技术》前言

武器装备的发展离不开制造技术的进步。全球新一代战机全面提上日程，继续保持全球领先地位；激光制导与枪械射击这看似毫不相关的两方面已逐步结合；“好奇”号成功着陆火星表面，为人们揭开了这颗红色星球的清晰面容。这一切都与先进制造技术的发展，特别是精密、超精密制造技术的发展密切相关。

精密、超精密与微纳米加工技术是随着武器装备精密化、小型化而迅速发展的加工技术，这些加工所采用的手段除传统机械加工以外，还涉及高新技术的特种加工以及相应的检测技术和环境控制技术等，近年来得到了较好的发展。特别是微纳米制造技术作为当今国际技术竞争热点，是21世纪战略必争的前沿技术，对社会发展与国家安全具有重要意义。

航空工业作为高新技术领域的前沿行业，对精密、超精密制造技术的需求更加突出，对各种航空零部件的精度、表面质量以及加工效率要求越来越高。在飞机、发动机、机载设备的制造中，高精度零部件、难加工材料和轻量复杂结构件等的精密、超精密加工工艺及测量测试技术是其中的关键环节，各种精密、超精密加工及测量测试专用设备也是必须具备的手段。

近年来，磁流变抛光、气囊抛光、离子束抛光、应力盘抛光等基于新原理的超精密加工新工艺的发展，为航空光学元件的加工提供了高效、高精度的加工工艺。快速刀具伺服加工技术、慢拖板伺服加工技术等新加工方法的出现极大地拓宽了超精密加工设备的加工范围，为航空微结构及微特征的加工提供了一条新的技术途径。各种新结构的高精度元部件及以直线电机驱动为代表的驱动新技术等在精密超精密加工设备得到了应用，提高了设备的精度及效率。各类新型航空材料及零部件

的试验测试分析设备的研制为航空构件性能的提升奠定了基础,如航空发动机封严涂层超高速刮擦设备可对涂层材料在高温高速条件下的抗刮擦性能进行评价;滚动接触疲劳试验设备可对航空新材料的接触疲劳性能进行测试与分析;航空轴承的各类试验设备为提高轴承的使用寿命提供了测试手段;多轴非接触扫描测量技术、视像三维图形分析测量技术等为航空发动机叶片及整体叶盘的高效高精度测量提供了技术手段。

随着航空飞机发动机等性能的提升,钛合金、高温合金、超高强度钢、金属基及陶瓷基复合材料等为代表的难加工材料作为主体结构、主承力件以及其他精密零部件得到了越来越广泛的应用,不仅要求其精度高,而且对其表面质量也提出了更高的要求。超硬磨削工艺提高了高温合金和超高强度钢构件的表面质量;超细金刚石涂层刀具、新型立方氮化硼和复合陶瓷等超硬刀具的应用为各类难加工材料提供了手段;车铣、电火花铣、化学铣、超声振动切削等复合加工工艺应用于航空硬脆材料和复杂薄壁弱刚度结构零件;多工序集成复合加工工艺应用于结构复杂、加工特征多、加工余量大的航空构件,可显著提高加工精度和加工效率。

随着新型整体结构、轻量化结构和冷却结构等新结构制造技术在航空发动机和飞机结构等方面得到迅速发展和应用,对精密制造和检测技术提出了新的要求。例如,采用刀具或测头的轨迹规划、数据分析及拟合等技术实现了整体叶盘、叶环的制造及检测;航空薄壁件加工过程中的刚度仿真及主动补偿技术提高了航空弱刚度构件的加工精度及效率;叶片表面形孔、发动机喷嘴等高精度微小孔的高效精密特种加工工艺(电火花、激光和电液流等)及基于各类非接触光学传感器的微小孔测量技术也得到了迅速发展。

抗疲劳制造技术是近年来在国内特别是在航空制造业提出的新概念技术,它是以零件或产品的疲劳性能指标为主要判据,通过控制产品的表面完整性提高疲劳强度的制造技术。抗疲劳制造技术的理论基础是“无应力集中”,是指不同应力集中的构件具有无应力集中时材料固有的疲劳强度。表面完整性主要包括表面粗糙度、残余应力、加工硬化、表面形貌、表面缺陷、金相组织等指标,构成了抗疲劳制造完整的技术

指标评价体系，抗疲劳制造涉及多学科、产品功能、制造细节和全过程，是全新的制造理念。

本书是在中国航空工业集团公司基础技术研究院《航空基础技术丛书》总体策划下组织编写的，本分册技术内容是《航空制造技术》分册的组成部分之一，因其内容较多，且自成体系，故将其作为一个分册单独编写。

中国航空工业集团公司北京航空精密机械研究所承担了本分册的编写任务。编写组历经一年多时间，在收集、归纳、分析、消化、整理相关图书资料、文献的基础上，力求充分把握国内外在“航空精密超精密制造技术”领域的发展现状和趋势，对航空精密超精密制造技术涉及的一些基础性和共性关键技术问题和未来的技术发展趋势进行了较为系统性的阐述，对该领域涉及的相关专业技术体系与内涵，对航空精密超精密制造技术基本原理、方法等进行概括性的归纳和总结，完成了该书的编写工作。

本书面向航空工程技术人员、工程项目管理人員和从事该领域的专业技术人员，深入浅出、删繁就简，力求取得较好的可读性，旨在扩大该领域基础知识的影响面，进一步促进我国航空精密超精密制造技术的应用与推广。

需要说明的是，航空精密超精密制造技术的范畴比本书的内容要更广泛。本书从精密超精密加工制造的角度，对精密加工、超精密加工、微细加工以及相关的测量技术、加工设备、环境条件以及典型应用等内容分7章进行了论述。由于编者水平有限，错谬之处在所难免，欢迎各位读者批评指正。

《航空精密超精密制造技术》编委会

2013年5月

# 目 录

第 1 章 精密、超精密制造技术概论 .....	( 1 )
1.1 精密、超精密制造技术概念 .....	( 1 )
1.2 精密、超精密制造技术对航空制造业的重要作用 .....	( 2 )
1.3 精密、超精密制造技术分类 .....	( 4 )
1.3.1 航空精密、超精密制造技术体系 .....	( 4 )
1.3.2 航空精密、超精密加工技术分类 .....	( 4 )
1.4 航空精密、超精密制造技术的特点 .....	( 6 )
1.5 精密、超精密制造技术的发展现状 .....	( 7 )
1.6 精密、超精密制造技术在航空制造业中的应用 .....	( 8 )
1.7 航空精密、超精密制造技术的发展趋势 .....	( 10 )
第 2 章 航空精密加工技术 .....	( 12 )
2.1 概述 .....	( 12 )
2.2 航空精密加工技术的特点 .....	( 12 )
2.3 航空精密加工技术的方法 .....	( 14 )
2.3.1 分类 .....	( 14 )
2.3.2 精密加工基础技术方法 .....	( 15 )
2.4 航空精密加工技术典型应用 .....	( 28 )
2.4.1 精密偶件类零件制造技术 .....	( 28 )
2.4.2 精密薄壁结构零件的制造技术 .....	( 30 )
2.4.3 壳体类零件制造技术 .....	( 32 )
2.4.4 难加工材料精密制造技术 .....	( 33 )
第 3 章 航空超精密加工技术 .....	( 36 )
3.1 概述 .....	( 36 )
3.1.1 发展超精密加工技术的重要性 .....	( 36 )
3.1.2 超精密加工技术的发展现状 .....	( 38 )
3.1.3 超精密加工技术的发展 .....	( 39 )
3.1.4 超精密加工技术的分类 .....	( 40 )
3.2 超精密加工工艺方法 .....	( 42 )
3.2.1 超精密切削加工技术 .....	( 42 )
3.2.2 超精密磨削和研磨加工技术 .....	( 51 )
3.2.3 超精密复合加工技术 .....	( 61 )
3.3 航空超精密加工技术的典型应用 .....	( 65 )
3.4 超精密加工的支撑环境 .....	( 74 )
3.4.1 空气环境和热环境 .....	( 75 )

3.4.2	洁净室	(77)
3.4.3	分层次的局部环境	(80)
3.4.4	振动环境	(81)
3.4.5	隔振器的隔振原理	(83)
3.4.6	噪声环境	(85)
3.4.7	其他环境	(87)
3.4.8	超精密加工的环境设施	(88)
<b>第4章 航空微系统制造技术</b>		<b>(90)</b>
4.1	概述	(90)
4.1.1	惯导器件微小零件	(90)
4.1.2	微光学元件及微小结构	(91)
4.1.3	伺服阀微小结构	(91)
4.1.4	微组装	(92)
4.1.5	微小动力装置	(92)
4.1.6	微光电子器件	(92)
4.1.7	航空微系统	(92)
4.2	微系统制造技术的特点	(93)
4.2.1	超微细加工是制造技术的极限	(93)
4.2.2	精密机械、仪器、仪表的需求催生了微细加工技术	(93)
4.2.3	电子设备微型化和集成化的需求促进了微细加工技术的发展	(93)
4.2.4	大规模集成电路的制造是微细加工技术的主要应用领域	(94)
4.2.5	微细加工的特点	(94)
4.2.6	微细加工与其他技术的关系	(95)
4.3	微系统制造技术的方法	(96)
4.3.1	微细加工的基础技术	(96)
4.3.2	微细切削加工技术	(98)
4.3.3	微细特种加工技术	(100)
4.4	航空微系统制造技术	(107)
4.4.1	微电子器件制造技术	(107)
4.4.2	微机电系统制造技术	(107)
4.4.3	微光电子器件制造技术	(108)
4.4.4	微细切削加工技术	(108)
4.5	航空微系统制造关键技术	(108)
4.5.1	微电子器件关键制造技术	(108)
4.5.2	微机电系统关键制造技术	(109)
4.5.3	微光电子器件关键制造技术	(109)
4.5.4	微三维零件微细加工技术	(110)
4.6	航空纳米技术发展与应用	(110)
4.6.1	纳米技术的特点	(110)



4.6.2	发展纳米技术的重要性 .....	(110)
4.6.3	纳米技术的主要内容 .....	(111)
4.6.4	纳米级测量技术 .....	(111)
4.6.5	纳米级表层物理力学性能的检测 .....	(114)
4.6.6	显微力学探针检测系统的应用 .....	(114)
4.6.7	纳米级加工技术 .....	(115)
4.6.8	纳米级器件、微型机械和微型机电系统 .....	(119)
<b>第5章</b>	<b>精密坐标测量技术 .....</b>	<b>(122)</b>
5.1	概述 .....	(122)
5.2	精密坐标测量技术的特点 .....	(124)
5.2.1	坐标测量原理 .....	(124)
5.2.2	三坐标测量机的组成 .....	(126)
5.2.3	坐标测量机的类型 .....	(131)
5.3	精密测量技术的方法 .....	(134)
5.3.1	产品检验与坐标测量机 .....	(134)
5.3.2	坐标测量机检验的方案 .....	(135)
5.3.3	三坐标测量机在集成制造系统中的应用 .....	(137)
5.4	三坐标测量机的发展趋势 .....	(139)
5.4.1	提高测量精度 .....	(139)
5.4.2	提高测量效率 .....	(140)
5.4.3	发展探测技术,完善测量机配置 .....	(140)
5.4.4	采用新材料,运用新技术 .....	(141)
5.4.5	发展软件技术,发展智能测量机 .....	(142)
5.4.6	控制系统更开放 .....	(144)
5.4.7	进入制造系统,成为制造系统组成部分 .....	(145)
5.4.8	发展非正交坐标系测量系统 .....	(145)
5.4.9	加强环境问题的研究 .....	(146)
5.4.10	加强量值传递、误差检定与补偿的研究 .....	(147)
<b>第6章</b>	<b>精密、超精密加工设备 .....</b>	<b>(149)</b>
6.1	概述 .....	(149)
6.2	精密、超精密加工设备设计的基本原则 .....	(149)
6.3	精密、超精密加工设备关键模块 .....	(150)
6.3.1	主轴回转系统 .....	(150)
6.3.2	直线导轨 .....	(152)
6.3.3	机床传动系统 .....	(153)
6.3.4	位置测量及反馈系统 .....	(154)
6.3.5	控制系统 .....	(155)
6.3.6	在机在位测量系统 .....	(156)
6.3.7	床身 .....	(156)