



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

杨 辉 编著

精密超精密加工技术 新进展

NEW DEVELOPMENT OF
PRECISION AND ULTRA-PRECISION
MACHINING TECHNOLOGY

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

精密超精密加工技术新进展

杨辉 编著

航空工业出版社

北京

内 容 简 介

本书阐述了精密超精密及微细加工技术的发展历史、作用和最新发展趋势,详细介绍了超精密基础元部件的设计及应用,以及典型超精密加工设备研制中的关键技术,对一些典型超精密加工新工艺的技术特点、特殊材料及复杂型面的精密超精密加工工艺进行了分析,论述了超精密微细加工技术及其在微结构功能表面制造中的应用,以及叶片、喷嘴、复杂壳体类及薄壁结构类等航空典型零件的精密加工工艺及检测技术,研究了误差分析、测头特性及标定等多轴非接触扫描快速检测关键技术,最后介绍了精密超精密加工技术在抗疲劳制造技术中的应用。

本书适合从事精密/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参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

精密超精密加工技术新进展 / 杨辉编著. -- 北京 :
航空工业出版社, 2016. 8

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 1056 - 8

I. ①精… II. ①杨… III. ①精密切削②超精加工
IV. ①TG506

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 177504 号

精密超精密加工技术新进展

Jingmi Chaojingmi Jiagong Jishu Xinjinzhan

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

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2016 年 8 月第 1 版

2016 年 8 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 29.25

字数: 746 千字

印数: 1—2000

定价: 180.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展作出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

前 言

精密超精密加工技术是指工件通过刀具和精密超精密加工设备联系起来，在各种工艺条件保证下实现零件的精度和表面质量，并能实现指标的定量评价，同时将零件装配形成最终的产品，最终保证产品的性能。精密超精密加工技术的研究内容和范畴主要包括超精密加工机理及方法、超精密检测及控制技术、超精密加工设备技术、超精密加工工艺技术等几方面，并随着科学技术的发展和应用领域的拓展而不断扩展。

现代超精密加工技术经历了一个从非确定性、准确定性到确定性的发展阶段，其中非确定性加工工艺是指加工去除量很小且不确定，需反复进行加工和测量工序，最终迭代完成加工，零件最终的加工精度完全取决于工件的测量精度及操作者的工艺水平。准确性超精密加工技术是指通过计算机控制驻留时间、压力、工件转速等工艺参数确定去除函数，预知准确的材料去除量从而最终控制工件的面形，典型的准确定性超精密加工工艺包括小磨头抛光、磁流变抛光、气囊抛光、离子束抛光、等离子体抛光、应力盘抛光等。确定性超精密加工技术是从 20 世纪 60 年代开始发展起来的，该项技术综合利用当代精密机械制造、坐标测量、伺服运动控制、数控、环境控制等一系列尖端科技发展成果，主要包括超精密切削及超精密磨削加工等，加工精度完全取决于超精密机床的精度。发展至今，随着设备精度的提高，特别是随着工艺和检测技术水平的进步，以 CCOS（计算机控制光学表面成形技术）为特征的各类超精密抛光等准确定性加工工艺也可以称为确定性加工工艺。

精密超精密加工及微纳加工技术在航空航天武器装备及能源、交通、医疗等高新技术民用领域等方面有着广泛的应用。航空发动机叶片的几何精度和表面质量直接影响着航空发动机的工作效率，叶片类零件的精密制造及检测技术代表着国家制造业的核心竞争力，叶片型面及进排气边智能磨削和光学扫描快速精密检测技术代表了当今的制造水平。燃油喷嘴组件是影响发动机性能的微小、复杂、精密结构件之一，喷嘴具有结构精密、技术要求高、制造工艺复杂等特点，喷嘴的关键零件的尺寸结构一致性、尺寸配合精度等特性都对发动机燃烧室的工作性能、燃烧效率及可靠性有直接的影响，增材制造、高一致性精密制造工艺及优化、基于光学测量的快速检测等先进制造技术有效解决了喷嘴制造一致性差、加工效率低、检测能力弱、生产成本控制难的关键问题。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弱刚度构件的加工精度及效率。复杂壳体类零件的高效集成数控加工技术解决了深小孔的高效加工、多类型孔快速测量以及深小孔交叉处去毛刺等难题，保证了加工质量和效率。抗疲劳制造技术是在控制工件表面完整性的基础上，以疲劳性能为主要判据和提高疲劳强度的先进制造技术，其基础理论是无应力集中，本质是构筑抗疲劳表面变质层。基于表面完整性的精密超精密加工工艺、精密确定性强化设备及工艺、材料及构件疲劳寿命的测试设备等为抗疲劳制造技术的发展提供了技术支撑。

自由曲面光学元件凭借其传统光学元件无可比拟的优越光学性能，例如成像质量高、照明均匀性和能量的传输效率高、光学系统体积小重量轻等，已应用于国防、航空航天、太空遥测等重要领域，并成为了光电及通信的关键部件。多轴超精密加工设备、快速刀具伺服加工技术、慢拖板伺服加工技术等为光学自由曲面的加工提供了新的加工工艺。微结构功能表面具有特定的拓扑形状，其表面微结构具有纹理结构规则、高深宽比、几何特性确定、表面质量高等特点，这些表面微结构使得元件具有某些特定的功能，包括物理、化学及光学性能等，在航空、兵器及能源、照明等民用行业得到广泛应用。原有的 MEMS 等微纳制造工艺无论从精度、表面质量或材料的适应性等方面都无法满足设计及应用要求，随着超精密加工设备和工艺的发展，上述问题将迎刃而解。随着产品要求的提高，某些零部件整个制造过程或整个产品的研制过程都涵盖了“超精密”的概念。如随着高精度惯性传感器结构的微型化、工作部位尺寸及形位精度的亚微米化，刀具的小型化和加工进给量的微量化、非接触面形和尺寸测量显微化等一系列技术难题对传统精密超精密加工技术提出严峻挑战，因此需建立系统的超精密微细加工设备及工艺、微细测量、组装工艺技术平台，以满足微细超精密加工、装配和检测的需求，这样就需要实现由单工序的超精密加工向全过程的超精密制造的演变。

智能制造技术是“中国制造 2025”的核心，而智能制造技术的核心是：动态感知、实时处理、自主决策、精准执行动态感知及精准执行。所谓动态感知就是通过各类传感及测量系统对制造过程和状态进行检测和监测，这就是精密测量测试；精准执行必须有执行元部件，比如高精度的直线运动机构、回转运动机构、运动控制系统等，这就是精密元部件、精密装备，这一切均与精密超精密加工和检测技术密切相关。智能制造技术是一种先进的生产模式，需要材料、制造、检测、试验等基础技术支撑，离开这些基础技术，智能制造也是空谈。

目前，国内研发的超精密加工设备中检测及驱动部件还只能从国外引进，设备整体技术指标与国外同期先进水平还存在一定差距，尤其在工程化、可靠性等方面更为明显；国外设备依然占据大部分市场份额，但某些专用超精密加工设备已经取代了国外的同类设备。随着超精密加工技术向着高效、极致等方向发展，超精密检测及驱动部件的研发、复杂光学曲面的超精密加工与检测技术以及超精密加工新机理、新方法、新工艺的研究等成为亟待突破的关键技术，同时需进一步加快国产超精密加工设备及工艺的工程化应用进程。

北京航空精密机械研究所在精密超精密加工技术与设备、惯导测试与运动仿真技术与设备、数控三坐标测量机技术与设备、精密检测技术与设备、环境试验技术与设备、特种加工技术与设备、工艺过程自动化技术与设备以及航空发动机零部件制造与测试技术等方面进行了大量卓有成效的研究开发工作，具有光学、机械、电子自动控制、液压、测试和计算机应用等多专业的综合性技术开发能力，技术实力雄厚，工艺测试手段齐全。北京航空精密机械研究所是国内最早从事超精密加工技术研究的单位之一，先后自行研制了具有自主知识产权的系列化非球面超精密多轴切削加工设备、超精密磨床、圆弧刃金刚石刀具刃磨设备、超精密研磨抛光设备等超精密加工设备，并进行了超精密切削、磨削及研磨抛光等超精密加工工艺，精密数控加工工艺等研究，在超精密基础元部件及设备集成技术、超精密加工工艺研究，复杂壳体、薄壁结构件、难加工材料以及精密偶件等航空零部件的

精密加工及检测方面等方面具有较强的实力,相关科研成果已在航空、航天、兵器等领域得到了推广应用。近年来在以喷嘴、叶片等为代表的航空发动机关键件的精密加工及检测技术进行了大量研究工作,研制成功了复杂面形及微结构特征多轴非接触扫描快速精密检测设备,提高了测量效率及精度;进行了高强度合金材料的基于表面完整性的超精密磨削及抛光工艺研究并应用于航空发动机轴承的生产制造,并研制成功了疲劳寿命精密测试试验设备、发动机轴承构件强化设备等,为航空抗疲劳制造技术的研究和应用提供了技术支撑。

全书由北京航空精密机械研究所精密制造技术航空科技重点实验室组织编写,哈尔滨工业大学、天津大学等高校的老师也参与了其中部分章节的编写工作。其中北京航空精密机械研究所的房建国研究员负责编写了第2章(2.1、2.2)、第6章(6.3)、第7章(7.1)、第8章,郑会龙研究员负责编写了第7章(7.2、7.3),庞长涛研究员负责编写了第9章(9.3、9.5),张彬高级工程师负责编写了第2章(2.6、2.8)。哈尔滨工业大学的王波教授负责编写了第3章(3.5)、第4章(4.3)、第6章(6.4.5),孙涛教授负责编写了第6章(6.4.1、6.4.2)。天津大学房丰洲教授负责编写第5章(5.1)、第6章(6.4.4)。本书其余章节均由杨辉负责编写。

由于精密超精密加工及检测技术在不断发展,特别是新原理、新方法、新设备、新工艺等的出现尚需要大量的试验研究和深入的理论分析,在新领域的应用也仍需进一步验证,因此本书尚有诸多不足和可能的错误之处,敬请同行专家批评指正,以共同提高我国精密超精密加工技术的水平以及推广应用。

北京航空精密机械研究所郁韶琛、张建明、谭本能、胡成海、刘勇、刘祎、杨肖芳、张谭、鲍龙祥、王岩、张利鹏、董璞、毕超、丁军伟、李迪、杜海涛、尹伊纶等对书稿进行了校对和审阅工作,此外本书在撰写和出版过程中得到了精密制造技术航空重点实验室全体成员以及北京航空精密机械研究所领导和同事的支持和帮助,在此一并表示感谢!

编者

2015年10月1日

目 录

第 1 章 精密超精密加工技术的发展与展望	(1)
1.1 超精密加工技术的概念与内涵	(1)
1.1.1 概述	(1)
1.1.2 超精密加工技术的研究范围	(3)
1.2 超精密加工技术的发展历史	(5)
1.2.1 超精密加工技术的三种方式	(5)
1.2.2 现代超精密加工技术的发展现状	(7)
1.3 超精密加工技术发挥的作用	(15)
1.3.1 促进现代基础科学和应用基础科学的发展	(15)
1.3.2 是现代高新技术产业发展的基础	(17)
1.3.3 是现代武器装备的重要技术支撑	(18)
1.3.4 是衡量一个国家制造水平高低的重要标志	(21)
1.3.5 与智能制造技术相互促进	(22)
1.4 精密超精密加工技术的发展趋势	(22)
1.4.1 超精密加工技术基础理论和试验研究将进一步发展	(22)
1.4.2 被加工材料和工艺方法在不断扩展	(23)
1.4.3 微结构功能表面的超精密加工技术正在兴起	(24)
1.4.4 超精密加工技术开始追求高效	(25)
1.4.5 超精密加工技术将向极致方向发展	(26)
1.4.6 超精密加工技术将向超精密制造技术发展	(27)
第 2 章 超精密基础元部件	(29)
2.1 空气静压重力平衡气缸	(29)
2.1.1 概述	(29)
2.1.2 气体静压平衡气缸技术应用分析	(30)
2.1.3 空气静压润滑气缸的技术实施方案	(30)
2.1.4 空气静压润滑气缸特性试验验证	(31)
2.2 套装空气静压轴承行星运动机构	(32)
2.2.1 套装空气静压轴承行星运动机构在超精密机床中的应用背景	(32)
2.2.2 套装空气静压轴承行星运动机构应用分析	(32)
2.2.3 套装空气静压轴承行星运动机构实施方案	(33)

2.2.4	套装空气静压轴承行星运动机构运动精度试验验证	(34)
2.3	超精密位置伺服控制主轴 C 轴及 B 轴	(35)
2.3.1	背景	(35)
2.3.2	超精密车床 C 轴的特点及设计	(35)
2.3.3	超精密位置伺服控制主轴 B 轴	(37)
2.4	基于直线电机驱动的液体静压导轨及附件	(41)
2.4.1	概述	(41)
2.4.2	小流量流体液体静压导轨的设计	(43)
2.4.3	基于伺服控制的液压供油系统	(46)
2.5	高同轴度孔加工气浮镗杆	(48)
2.5.1	研究背景	(48)
2.5.2	高同轴度孔加工技术实施方案	(48)
2.6	高位置度端面加工用气浮镗杆	(50)
2.6.1	结构设计	(51)
2.6.2	内孔及端面加工工艺	(52)
2.7	基于空气静压轴承的微量进给系统	(54)
2.7.1	基本原理	(54)
2.7.2	空气静压轴承微量进给系统应用实例	(57)
2.8	带有微调机构的超精密分度转台	(59)
2.8.1	精密分度台的典型结构	(59)
2.8.2	微调机构的设计与计算	(62)
2.9	端齿分度台	(64)
2.9.1	概述	(64)
2.9.2	端齿盘的种类及基本结构	(66)
2.9.3	端齿盘的加工	(69)
第 3 章	典型超精密加工设备的发展及关键技术	(73)
3.1	概述	(73)
3.1.1	先进超精密加工机床的特点	(73)
3.1.2	先进超精密机床领域发展趋势	(74)
3.1.3	超精密机床国内外的差距及发展策略	(75)
3.2	超精密加工设备研制关键技术	(78)
3.2.1	超精密加工设备设计基本原则	(78)
3.2.2	超精密加工机床研发中的关键技术	(79)
3.3	多轴超精密切削加工设备	(81)
3.3.1	多轴超精密切削加工设备的总体设计及布局	(81)
3.3.2	各部件结构特点	(83)
3.4	模辊超精密加工机床	(90)

3.4.1	国外模辊超精密加工机床结构特点	(90)
3.4.2	大尺寸微结构模辊超精密加工机床研制关键部件	(94)
3.5	微结构特征超精密研抛加工机床	(100)
3.5.1	微结构特征及微小零件超精密加工设备的发展	(100)
3.5.2	典型薄壁微结构特征件的工艺分析	(103)
3.5.3	超精密研抛复合加工设备研发的关键技术	(105)
3.6	圆弧刃金刚石刀具刃磨机	(112)
3.6.1	概述	(112)
3.6.2	圆弧刃单晶金刚石刀具刃磨机关键技术	(113)
第 4 章	超精密加工新工艺	(120)
4.1	概述	(120)
4.2	可控柔性光学加工技术	(121)
4.2.1	可控柔性光学加工技术的特点	(121)
4.2.2	小磨具数控抛光加工技术	(122)
4.2.3	磁流变抛光技术	(125)
4.2.4	应力盘抛光技术	(129)
4.2.5	进动式气囊抛光技术	(134)
4.3	大气等离子体超精密加工技术	(142)
4.3.1	大气等离子体加工原理	(143)
4.3.2	电感耦合等离子体加工技术	(145)
4.3.3	电容耦合等离子体加工技术	(163)
4.3.4	微波等离子体加工技术	(170)
4.4	快速刀具伺服切削加工技术	(180)
4.4.1	快速刀具伺服加工技术原理	(180)
4.4.2	伺服刀架设计	(182)
4.4.3	快刀伺服系统特性测试	(183)
4.4.4	微结构阵列超精密车削加工技术快刀伺服系统加工实例	(184)
4.5	慢拖板伺服车削加工技术	(188)
4.5.1	概述	(188)
4.5.2	慢拖板伺服车削机床加工能力分析	(189)
4.5.3	刀具几何参数选择	(190)
4.5.4	刀具路径生成	(192)
4.5.5	空行程的处理	(194)
4.5.6	插补和数控程序生成	(195)
第 5 章	特殊材料及复杂形状零件的超精密加工技术	(196)
5.1	黑色金属超精密切削技术	(196)

5.1.1	黑色金属超精密切削加工时单晶金刚石刀具的磨损机理	(196)
5.1.2	减少金刚石刀具磨损的方法	(197)
5.1.3	典型表面改性模具钢材料超精密切削加工工艺	(201)
5.1.4	超声振动辅助金刚石切削	(205)
5.2	KDP 晶体单点金刚石超精密切削加工	(209)
5.2.1	KDP 晶体加工现状	(209)
5.2.2	影响 KDP 晶体加工表面质量的主要因素	(211)
5.3	镍磷合金超精密切削工艺	(213)
5.3.1	非电解镍磷合金材料特性	(213)
5.3.2	镍磷合金超精密切削刀具磨损	(214)
5.3.3	镍磷合金中磷含量对超精密切削性能的影响	(217)
5.4	光学自由曲面的超精密加工技术	(220)
5.4.1	光学自由曲面的应用	(220)
5.4.2	光学自由曲面超精密加工技术	(225)
5.4.3	光学自由曲面的超精密检测技术简介	(229)
第 6 章	微结构特征的超精密加工技术	(235)
6.1	微结构功能表面的概念及应用	(235)
6.1.1	概述	(235)
6.1.2	微结构功能表面的应用	(237)
6.2	微结构特征的典型加工工艺	(241)
6.2.1	传统 MEMS 工艺技术	(242)
6.2.2	特种加工工艺技术	(242)
6.2.3	精密超精密机械加工技术	(244)
6.2.4	低成本大尺寸微结构功能表面的制备	(248)
6.3	单晶金刚石微型刀具设计及制造技术	(249)
6.3.1	概述	(249)
6.3.2	微型单晶金刚石刀具的设计基础研究	(252)
6.3.3	微型单晶金刚石刀具的工艺流程设计	(254)
6.3.4	微型单晶金刚石刀具刃磨的力学分析	(257)
6.3.5	微型单晶金刚石刀具刃磨工艺	(260)
6.3.6	聚焦离子束加工单晶金刚石刀具	(263)
6.4	微结构特征的超精密机械加工方法及工艺	(266)
6.4.1	非回转对称微结构表面超精密车削加工关键技术	(266)
6.4.2	典型微结构特征超精密车削加工工艺试验	(272)
6.4.3	微结构特征的超精密磨削加工	(276)
6.4.4	微结构特征飞秒激光精细加工	(283)
6.4.5	挠性结构件微沟槽高质量表面研抛工艺	(288)

6.4.6 超疏水微结构表面的设计与超精密加工	(293)
第7章 航空典型零件的精密加工技术	(297)
7.1 叶片进排气边智能精密磨削及检测技术	(297)
7.1.1 概述	(297)
7.1.2 叶片进排气边磨削及加工技术发展现状	(299)
7.1.3 叶片进排气边智能加工检测一体化关键技术	(302)
7.2 发动机燃油喷嘴组件的精密制造与测试技术	(305)
7.2.1 概述	(305)
7.2.2 喷嘴精密加工及检测技术国内外发展现状	(306)
7.2.3 喷嘴精密加工及检测关键技术	(308)
7.3 薄壁类零件精密加工技术	(315)
7.3.1 概述	(315)
7.3.2 机载设备典型薄壁件的精密加工工艺方案	(317)
7.3.3 薄壁零件装夹变形仿真与装夹优化技术	(319)
7.3.4 薄壁零件加工变形预测与仿真技术	(322)
7.3.5 薄壁零件主动补偿技术	(325)
7.4 航空复杂壳体类零件精密加工技术	(329)
7.4.1 复杂壳体类零件的特点及加工难点	(330)
7.4.2 复杂壳体类零件精密加工工艺解决方案	(331)
7.5 微波铁氧体器件的精密加工技术	(345)
7.5.1 概述	(345)
7.5.2 铁氧体材料的研究现状	(346)
7.5.3 铁氧体材料精密高效磨削	(348)
7.5.4 铁氧体材料固结磨料精密研抛技术	(353)
第8章 精密光学扫描坐标测量技术	(356)
8.1 坐标测量技术的发展	(356)
8.1.1 我国坐标测量技术的发展历史及现状	(356)
8.1.2 传统三坐标测量机的局限性	(358)
8.1.3 光学扫描坐标测量机的特点	(359)
8.1.4 国内外光学坐标测量技术概况	(360)
8.2 光学扫描坐标测量技术研究及应用	(364)
8.2.1 光学坐标测量的关键技术	(364)
8.2.2 坐标测量中测头传感器的发展	(367)
8.2.3 光学精密坐标测量技术在航空零部件制造中的应用	(370)
8.3 叶片类复杂曲面零件光学扫描坐标测量技术	(372)
8.3.1 发动机叶片多轴光学扫描坐标测量机总体方案	(372)

8.3.2	光学测头空间位置标定技术	(373)
8.3.3	激光扫描测头与白光扫描测头的比较	(373)
8.3.4	多轴测量系统静态、动态误差分析与补偿	(374)
8.3.5	高精度转台技术	(375)
8.3.6	多轴坐标测量机电控与软件系统	(375)
8.4	光学扫描坐标测量系统误差分析	(376)
8.4.1	三坐标测量机的 21 项误差分析	(377)
8.4.2	多轴坐标测量中转台误差分析	(378)
8.4.3	四轴测量过程中的测量误差	(380)
8.4.4	光学测头光束方向标定误差分析	(381)
8.5	光学测头光束方向的标定方法与试验	(382)
8.5.1	现有标定方法简介	(382)
8.5.2	七点标定法理论研究	(384)
8.5.3	七点标定法试验研究	(389)
8.5.4	七点标定法的误差分析	(392)
8.5.5	单一角度测量试验	(393)
8.6	光学测头的角度特性和粗糙度特性试验研究	(394)
8.6.1	光学测头角度特性试验	(395)
8.6.2	光学测头粗糙度特性测试试验	(397)
8.6.3	光斑区域平均中点匹配算法	(400)
8.6.4	光斑区域平均中点匹配试验	(402)
8.7	多坐标系测量数据拼接方法与试验研究	(404)
8.7.1	多测头角度测量的数据拼接与坐标变换	(404)
8.7.2	多测头角度数据拼接测量试验	(406)
8.7.3	转台旋转数据拼接	(407)
8.7.4	转台旋转数据拼接测量试验分析	(408)
第 9 章	精密超精密加工技术在抗疲劳制造技术中的应用	(409)
9.1	引言	(409)
9.2	抗疲劳制造技术基本概念	(411)
9.2.1	制造技术发展的三个阶段	(411)
9.2.2	抗疲劳制造技术发展概况	(418)
9.2.3	抗疲劳制造的关键技术	(419)
9.3	航空构件超高强度钢表面完整性磨削工艺试验	(420)
9.3.1	超高强度钢磨削加工热力耦合作用对表面完整性的影响	(420)
9.3.2	M50NiL 超高强度钢表面完整性磨削工艺试验	(422)
9.4	表面强化新工艺	(427)
9.4.1	表层改性的方法	(428)

9.4.2 超声振动复合强化工艺	(429)
9.4.3 超声振动强化工艺在抗疲劳制造中的应用	(431)
9.5 轴承滚动体接触疲劳测试试验设备	(433)
9.5.1 概述	(433)
9.5.2 试验机原理及总体技术方案	(434)
9.5.3 滚动接触疲劳试验机关键技术	(437)
参考文献	(443)

第1章 精密超精密加工技术的发展与展望

1.1 超精密加工技术的概念与内涵

1.1.1 概述

制造技术的起源从一定意义上可以追溯到原始社会，当原始人类学会了制作具有一定形状且锋利的石器工具时，石块间的相互敲击和刮擦可以认为是最原始的手工研磨加工工艺（见图1-1（a））；到了青铜器时代后人类制作了各类表面光滑的铜镜（见图1-1（b）），这种制作方式与现代的研磨及抛光工艺更加接近，但是到了近代才出现了真正意义上的精密加工，最典型的例子就是镗床的发明。1769年瓦特取得实用蒸汽机专利后，汽缸的加工精度就成了蒸汽机能否提高效率并得到实际应用的关键问题。1774年英国人威尔金森发明了炮筒镗床（见图1-1（c）），可用于加工瓦特蒸汽机的汽缸体。1776年他又制造了一台更为精确的汽缸镗床，加工直径为75in^①的汽缸内孔，误差还不到一个硬币的厚度。正是由于加工精度的提高才促使了蒸汽机的大规模应用，从而推动了第一次工业革命的发展。



图1-1 精密加工的历史

目前精密超精密加工所涉及的主要技术指标包括加工精度（尺寸公差和形位误差）、表面质量（表面粗糙度等）。关于精密超精密加工的具体含义目前还没有一个准确的定义，表1-1中列出的只是目前公认的指标。随着技术的发展，超精密加工技术的指标也在不断丰富，对于一些特殊零件例如光学反射镜的超精密切削加工，反射率等指标目前也被列入了衡量超精密加工水平的技术指标。近年来发展起来的表面完整性制造技术及抗疲劳制造技术对精密超精密加工技术提出了新的要求，表面完整性的技术指标也已经成为衡量制造技术水平高低的重要标志。

^① 1in = 2.54cm。

表 1-1 目前精密超精密加工技术的技术指标范围

精度等级	尺寸精度/ μm	表面粗糙度 $Ra/\mu\text{m}$	加工技术
微米级	1 ~ 10	0.4 ~ 0.04	精密加工
亚微米级	1 ~ 0.01	0.04 ~ 0.005	超精密加工
纳米级	< 0.01	< 0.005	纳米加工

下面举一个通俗的例子可以更容易理解“精密”的概念或精密超精密加工技术的含义。首先说三个词：面团、锅炉、石头，再用这三个词造句：“钢铁如面团”“人如锅炉”“灰尘如石头”。看似三对矛盾的词语却发生了联系，从“精密”这个角度来看，却形象地反映了精密加工中的三个重要因素，即刚度、温度以及洁净度。刚度再高的结构件受力时从微观上看都会发生变形从而影响超精密加工的精度；37℃体温的一个人犹如一台锅炉会对环境温度产生影响，从而影响超精密加工设备的性能和加工精度；微米级的灰尘颗粒犹如巨大的石头会对超精密加工环境造成污染，从而损坏零件的表面质量。

精密超精密加工等制造技术随着时代的发展在不断进步，从远古的人类用敲击和研磨的方法制造出第一件石器工具开始，制造技术的进步就一直伴随着人类文明的进步。到了第一次工业革命以后，制造技术已成为推动社会进步的发动机，工业化制造的各种产品极大地改变着人类的生活。到了现代，制造技术更获得了飞速的发展，精密超精密加工技术正是在这种背景下获得了快速发展。在第一次工业革命时，机械零件的制造精度是毫米级（mm），而现在已经很容易达到微米级（ μm ）及亚微米级。在两百年间，机械加工精度提高了三个数量级。当前普通加工、精密加工和超精密加工的前沿已分别趋近 $1\mu\text{m}$ 、 $0.01\mu\text{m}$ 和 1nm （纳米）。超精密加工正在逼近“加工精度的极限”——原子尺度，如图 1-2 所示。在传统的超精密机械加工精度不断提高的同时，人们还发展了各种新的精密

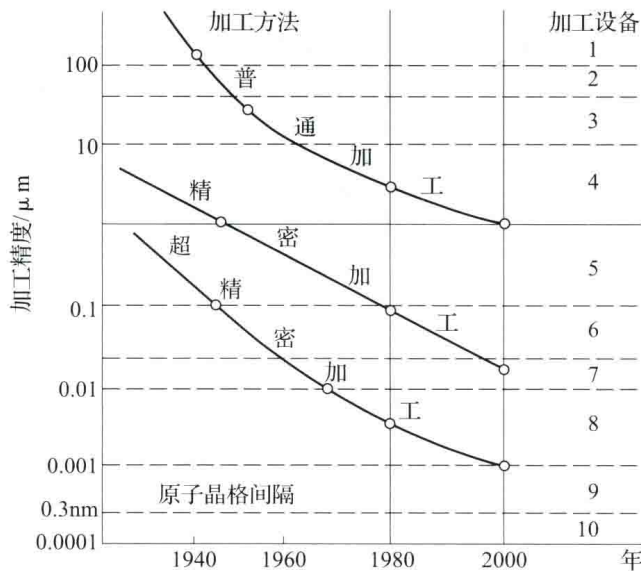


图 1-2 机械加工精度及发展

- 1—车、铣；2—磨；3—CNC 机床；4—研磨、工具磨；5—光学磨，金刚石车、磨；
- 6—金刚石超精车、ELID 磨削、电解加工；7—衍射光栅刻线机；8—电子束、离子束、X 射线；
- 9—分子束生长、离子注入；10—扫描隧道技术