



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
2002年全国普通高等学校优秀教材二等奖

精密和超精密加工技术

第2版

哈尔滨工业大学 袁哲俊 主编 山东大学 艾兴 主审
清华大学 王先逵 哈尔滨工业大学 蔡鹤皋



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

2002年全国普通高等学校优秀教材二等奖

精密和超精密加工技术

第 2 版

主编 袁哲俊 王先逵

参编 高 栋 袁巨龙 段广洪

(按章节顺序排列)

主审 艾 兴 蔡鹤皋



机械工业出版社

精密和超精密加工技术近年来获得飞跃发展。本书全面系统地讲述了精密和超精密加工技术,内容包括:超精密切削和金刚石刀具,精密和超精密磨削、研磨与抛光,精密和超精密机床,精加工中的测量技术和在线误差补偿,微细加工技术,精加工的支撑环境和纳米技术。本书内容丰富,不仅系统讲述了精密加工的基础原理和技术,新技术在精加工中的应用,还介绍了国内外的最新发展和成就。本书可供机制专业研究生和本科生作教材,同时也是科技人员的重要参考书。

图书在版编目(CIP)数据

精密和超精密加工技术/袁哲俊,王先逵主编.—2版.—北京:机械工业出版社,2007.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-07155-6

I. 精… II. ①袁…②王… III. ①精密切削—高等学校—教材②超精加工—高等学校—教材 IV. TG506

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第066502号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:高文龙 版式设计:冉晓华 责任校对:陈延翔

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2007年7月第2版第1次印刷

180mm×260mm·16.5印张·404千字

标准书号:ISBN 978-7-111-07155-6

定价:25.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379715

封面无防伪标均为盗版

第2版序1

近年来机械制造技术，特别是精密加工技术发展较快，有必要对该书进行修订再版。这次修订与原版比较有以下一些特点：

(1) 体系结构上进行了调整和变动。全书各章的安排未变，但章内各节的体系结构有变动，将近年来发展较快的内容单独成节或小节。例如：超硬微粉砂轮超精密磨削单独形成一小节；在微细加工中增加了立体复合工艺一小节；集成电路与印制线路板制作技术成为一节；第九章章名改为“精密和超精密加工的外部支撑环境”，这样更确切一些。

(2) 增加了近年来发展的新内容。对精密和超精密磨削加工”、“研磨与抛光”、“微细加工技术”和“纳米技术”等章，因近年来技术发展迅速，故作了全面较大修改，充实了较多新内容。例如：介绍了复合结合剂金刚石微粉砂轮超精密磨削；增加了立体复合微细加工工艺，如沉积和刻蚀多层工艺和光刻—电铸—模铸复合成形技术等；增加了集成电路与印制线路板制作技术；在精密和超精密加工的外部环境设施中增加了隔振器件的新进展，光环境中光的颜色以及满足现代电子、微电子、光电子、微机械制造的外部环境要求等内容。

(3) 文字上进行了修改和精练：删除了一些不确切的内容和提法，采用国标规定的名词术语和新标准，修改了一些文字错误。例如英国国立物理实验室的四面体结构立轴超精密磨床，只是目前的实用性表现在并联机床上，故将其删除。

该书内容丰富，新颖先进，体系结构符合教学要求，基础理论与技术实践结合，图文并茂精练，是一本难得的研究生和大学本科生教材和工程技术人员参考书。

中国工程院院士 山东大学机械工程学院



2006年12月25日

第2版序2

精密和超精密加工是机械制造中的重要领域，对尖端技术和国防工业的发展具有重要影响。“精密和超精密加工技术”课是机械制造及其自动化专业的重要专业课。

袁哲俊和王先逵主编的《精密和超精密加工技术》教材，是一本系统全面讲述精密和超精密加工理论和技术的教材，填补了国内外空白。该教材第1版1999年出版后，经全国各学校使用，深受欢迎，2002年曾获全国普通高等学校优秀教材二等奖。

近年来精密加工技术获得迅速发展，多种新技术在精加工中得到应用，因此作者袁哲俊等对原出版的《精密和超精密加工技术》教材进行修订再版。该教材这次修订中，将超精密切削和金刚石刀具、精密和超精密磨削、精密和超精密加工的机床设备、精密加工中的测量技术、在线检测与误差补偿技术、研磨与抛光、微细加工技术等章的部分常见内容作了适当精简，增添了最近发展的新内容。对“纳米技术”一章，因近年技术发展迅速，作了全面的较大修改，充实了较多技术发展的新内容。

本教材内容丰富，不仅系统讲述了精密和超精密加工的基础理论和技术，应用的各种新技术，还介绍了本领域国内外的最新发展和成就。本教材讲授系统条理，深入浅出，符合学生的认识规律，是一本优秀的教材，可以供机制专业本科学生和研究生使用，也可供这领域的科技人员用作重要的参考书。

建议修订后的本教材第2版尽早出版供学生使用。

审阅人 

中国工程院院士，哈尔滨工业大学教授

2006年12月20日

第2版前言

本教材第1版自1999年出版后,经全国各学校多年使用,颇受欢迎,2002年获全国普通高等学校优秀教材二等奖。

近年来机械制造技术,特别是精密加工技术有较快发展,多种新技术在精加工中得到应用,同时我国的机械制造工业亦获得了飞跃的发展。高技术机电产品、尖端技术和国防工业的发展,对精密和超精密加工技术提出了迫切提高的需求。由于以上情况,有必要对原出版的《精密和超精密加工技术》教材进行修订再版。本教材是根据教材出版修订规划,在原来教材的基础上,参考各兄弟院校提出的意见和最近精密加工的技术发展,进行修订而成。

本教材在这次修订中,将超精密切削和金刚石刀具、精密和超精密磨削、精密和超精密加工的机床设备、精密加工中的测量技术、在线检测与误差补偿技术、微细加工技术等章的部分常见内容作了适当精简,增添了最近发展的新内容。对“研磨与抛光”和“纳米技术”两章,因近年技术发展迅速,故做了全面较大修改,充实了较多技术发展的新内容。本教材内容丰富,不仅系统讲述了精密和超精密加工的基础理论和技术,精加工中应用的各种新技术,还介绍了本领域国内外的最新发展和成就。

参加本教材各章修订的编者如下:第一章袁哲俊,第二章袁哲俊、周明,第三、六、八章王先逵,第四章袁哲俊、高栋,第五章袁哲俊、李华,第七章袁巨龙,第九章段广洪,第十章袁哲俊、谢大纲、房丰洲。由袁哲俊和王先逵担任主编,由艾兴院士和蔡鹤皋院士担任主审。

本书可供机械制造及其自动化专业的研究生和本科生作教材,同时也可供从事机械制造精密加工工作的科技人员作为一本重要的参考书。

由于作者水平所限,书中错误和不足之处希望读者给予批评指正。

主 编

2006年12月

第 1 版前言

精密和超精密加工技术是机械制造业中最重要的部分之一，这是因为精密和超精密加工技术不仅直接影响尖端技术和国防工业的发展，而且还影响机械产品的精度和表面质量，影响产品的国际竞争力。例如陀螺仪现在是用超精密切削等方法加工的，它的精度直接影响导弹的命中精度。大规模集成电路的制造，使用了超精密研磨和微细加工等技术，它的加工工艺水平决定了集成电路上的线宽和元件数，直接影响微电子工业和计算机技术的发展。世界各国都非常重视发展精密和超精密加工技术，把它作为发展先进制造技术中的优先发展内容。

近年来各种新技术，例如微电子技术、计算机技术、自动控制技术、激光技术等，在精密加工中得到广泛的应用，使精密和超精密加工技术产生了飞跃的发展，大大地改变了它的技术面貌。精密加工技术的水平已是机械制造业水平的重要标志。当代的精密工程，其中包括精密加工，超精密加工技术，微细加工技术和纳米技术是现代制造业的前沿，也是明天制造技术的基础。

机械产品要求的精度不断提高，促使精密加工技术水平的迅速发展，精密和超精密加工达到的精度也在不断提高。在 20 世纪 50 年代精密加工能达到的精度水平是 $3 \sim 5 \mu\text{m}$ ，超精密加工达到的精度是 $1 \mu\text{m}$ 。到 20 世纪 70 年代后期，精密加工达到的精度水平是 $1 \mu\text{m}$ ，超精密加工达到的精度是 $0.1 \mu\text{m}$ ，而现在精密加工达到的精度水平是 $0.1 \mu\text{m}$ ，超精密加工达到的精度已是 $0.01 \sim 0.001 \mu\text{m}$ 。

近年来由于受到各方面的重视，我国的精密和超精密加工技术获得了很大的发展，超精密切削技术已获得较多生产应用，超精密机床已研制成功，多种精度甚高的精密机械和仪器已能生产，微细加工技术也已发展到相当水平。但应看到我国的精加工技术水平与发达国家比较还有相当大的差距。例如数控超精密车床我国还没有正式产品，大型超精密机床国内还没有。标志制造大规模集成电路水平的微细加工，我国现在导线的光刻加工，其线宽只能达到 $0.5 \sim 1 \mu\text{m}$ ，国外生产中已可达 $0.1 \mu\text{m}$ ，而实验室正在研究的是 $0.01 \mu\text{m}$ 宽度，故国外生产的每个集成电路可以有数百万个元件，而我国则相差甚多。精密和超精密加工技术，因涉及尖端技术和国防工业的发展，关键的技术各国都保密，不允许技术转让或出口。各国都是自己投力量研究开发这方面的技术。因此我国也亟需加速发展这方面的技术。

高等学校的机械制造专业已是成立多年的较老的学科。近年来由于多种新技术在机械制造中的应用，机械制造业的面貌发生了极大的变化。学校的机械制造专业也面临改造，要求更新教学内容，增设新课程以跟上机械制造技术的发展。很多高等学校为研究生设立了精密和超精密加工技术的课程，同时也为本科生新开了精密加工的选修课。

本书系统全面地讲述了精密和超精密加工技术的各部分主要内容，收集了国内、外精密加工的大量资料文献，且结合了哈尔滨工业大学和清华大学等校多年来从事精密和超精密加工的研究成果而写成的。本书不仅系统讲授了精密加工的基础原理和技术，新技术在精加工中的应用，还介绍了国内外精密加工的最新发展和成就。

本书内容包括精加工涉及的全部主要内容：超精密切削和金刚石刀具，精密和超精密磨削、研磨与抛光，精密和超精密机床设备，精密加工中的测量技术，在线测量和误差补偿技术，微细加工技术，精加工的支撑环境，典型精密零件的加工工艺，纳米技术。本书试图解决国内需要发展精密加工技术，而缺少这方面的科技书和教材的困难，可供机制专业研究生和本科学生作教材，同时也可供从事机械制造精密加工工作的科技人员作为一本重要的参考书。

本书各章的编者如下：第一、四章袁哲俊，第二章袁哲俊、周明，第三、六、八章王先逵，第五章袁哲俊、谢大纲、王晓蕙，第七章袁巨龙，第九章段广洪，第十章袁哲俊、高栋。由袁哲俊和王先逵担任主编。

由于作者水平所限和编写时间仓促，书中错误和不足之处，希望读者给予指正。

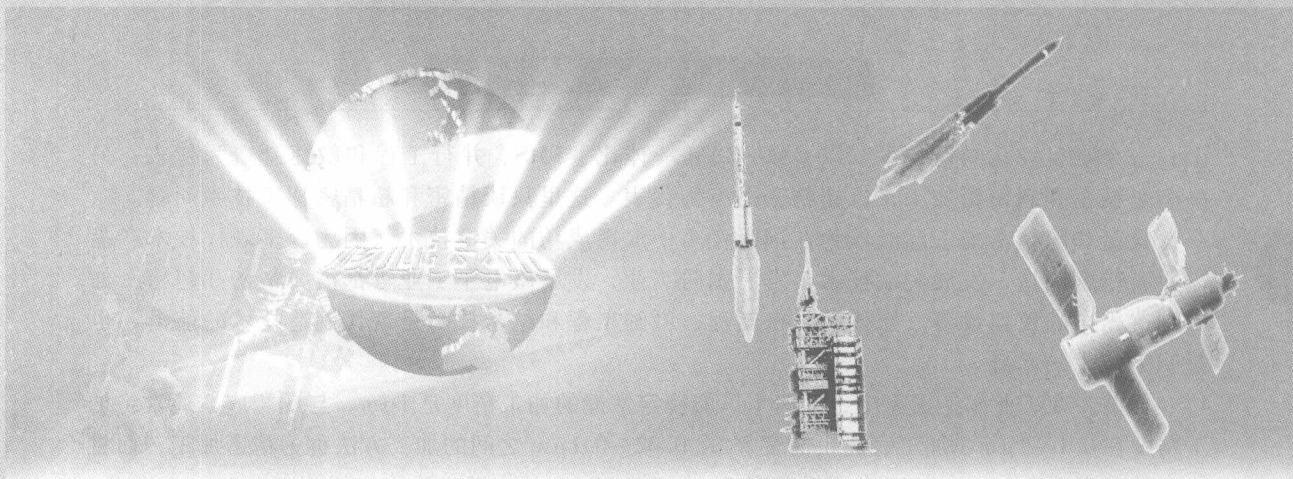
编者

1999年1月

目 录

第 2 版序 1	复习思考题	76
第 2 版序 2	第四章 精密和超精密加工的机床设	
第 2 版前言	备	77
第 1 版前言	第一节 精密和超精密机床发展概况	77
第一章 精密和超精密加工技术及其	第二节 典型超精密机床的简介	80
发展展望	第三节 精密主轴部件	86
1	第四节 机床的总体布局和床身导轨	91
第一节 发展精密和超精密加工技术的	第五节 进给驱动系统	98
重要性	第六节 微量进给装置	100
1	第七节 机床运动部件位移的激光	
第二节 超精密加工技术的现状	在线检测系统	105
4	第八节 机床的稳定性和减振隔振	107
第三节 超精密加工技术发展展望	第九节 减少热变形和恒温控制	110
8	复习思考题	114
复习思考题	第五章 精密加工中的测量技术	115
9	第一节 精密测量技术概述	115
第二章 超精密切削与金刚石刀具	第二节 测量基准	116
10	第三节 直线度、平面度和垂直度的	
第一节 超精密切削的切削速度选择	测量	118
10	第四节 角度和圆分度的测量	121
第二节 超精密切削时刀具的磨损和寿命	第五节 圆度和回转精度的测量	124
11	第六节 激光测量	130
第三节 超精密切削时积屑瘤的生成规律	第七节 自由曲面的测量	134
13	复习思考题	135
第四节 切削参数变化对加工表面质量	第六章 在线检测与误差补偿技术	137
的影响	第一节 概述	137
15	第二节 在线检测与误差补偿方法	143
第五节 切削刃锋锐度对切削变形、加工	第三节 微位移技术	149
表面质量的影响	复习思考题	156
18	第七章 精密研磨与抛光	158
第六节 金刚石刀具超精密切削中的若	第一节 研磨	158
干理论问题	第二节 抛光	160
22	第三节 精密研磨与抛光的主要工艺	
第七节 超精密切削对刀具的要求及金	因素	162
刚石的性能和晶体结构	第四节 精密研磨抛光新技术	168
28	第五节 曲面研磨抛光技术	170
第八节 金刚石晶体各晶面的耐磨性和	复习思考题	173
好磨难磨方向		
33		
第九节 单晶金刚石刀具的磨损破机		
理		
35		
第十节 金刚石晶体的定向		
36		
第十一节 金刚石刀具的设计与制造		
39		
复习思考题		
45		
第三章 精密磨削和超精密磨削		
47		
第一节 概述		
47		
第二节 精密磨削		
52		
第三节 超硬磨料砂轮磨削		
56		
第四节 超精密磨削		
62		
第五节 精密和超精密砂带磨削		
67		

第八章 微细加工技术	174	第四节 其他环境	221
第一节 微细加工技术的出现	174	第五节 精密和超精密加工的环境设施	224
第二节 微细加工的概念及其特点	175	复习思考题	225
第三节 微细加工机理	177	第十章 纳米技术	226
第四节 微细加工方法	179	第一节 纳米技术概述	226
第五节 集成电路与印制电路板制作		第二节 纳米级测量和扫描探针测量	
技术	201	技术	227
复习思考题	204	第三节 纳米级加工技术和原子操纵	232
第九章 精密和超精密加工的外部		第四节 微型机械、微型机电系统及其制造技术	239
支撑环境	206	复习思考题	248
第一节 空气环境和热环境	206	参考文献	249
第二节 振动环境	214		
第三节 噪声环境	219		



第一章

精密和超精密加工技术及其发展展望

第一节 发展精密和超精密加工技术的重要性

机械工业是国民经济发展的基础，因为它需要为其他生产部门提供技术装备。机械工业提供技术装备的水平和质量，将直接影响国民经济各部门生产技术水平的高低和经济效益的好坏。因此加强发展机械制造工业是发展国民经济的一项关键性措施；是加强经济竞争能力的强有力的手段。

在平时机械制造工业将为国民经济提供各种商品和机器设备，在战时将提供武器。因此机械工业是经济现代化和国防现代化的基础工业部门。据国外统计，在经济发展阶段，机械工业的发展速度要高出整个经济发展速度 20% ~ 25%。历史证明，哪一个国家不重视机械制造工业，它就会遭到历史的惩罚。

美国过去长期在机械制造技术上处于领先地位，但在第二次世界大战后不重视机械制造工业，新技术研究开发不力，对机械制造专业人才不重视培养，日本则大力支持了机械制造业的发展。两国政府的不同政策形成鲜明的对比，后果极为明显：20 世纪 70 年代和 80 年代两国在汽车工业和微电子工业的竞争中，日本的汽车、摩托车、电视机、录音机、录像机、照相机等不仅大量抢占了美国原来的国际市场，而且大量进入美国国内市场。美国上述工业面临严重的威胁，美国公众惊呼这已危及国家安全。美国在关于工业竞争的总统委员会的报告中检讨：美国在重要而又高速增长的技术市场上失利的一个重要因素是没有将自己的技术应用到制造业上。美国工程科学院和国家研究理事会经过反复讨论，重新重视制造技术，而不是将制造列入到从属设计工程或设计风格的位置上。

我国的机械制造工业近年来获得飞速的发展，现在已是世界制造大国，制造规模已达世界第 4 位，仅次于美国、日本和德国。虽机电产品出口不少，但高技术机电产品仍依赖进口，还不是制造强国，和某些发达国家相比，仍有相当大的差距。主要表现在两个发展方向

上：一个是自动化制造技术，以 CAD/CAM 一体化、FMS、并行工程和敏捷制造为代表；另一个是精密和超精密加工，以超精密加工为代表。这里只谈精密和超精密加工技术问题。

精密和超精密加工已经成为在国际竞争中取得成功的关键技术。因为许多现代技术产品需要高精度制造。发展尖端技术，发展国防工业，发展微电子工业等都需要精密和超精密加工制造出来的仪器设备。当代的精密工程、微细工程和纳米技术是现代制造技术的前沿，也是明天技术的基础。

目前，在工业发达国家中，一般工厂能稳定掌握的加工精度是 $1\mu\text{m}$ 。与此相应，通常将加工精度在 $0.1\sim 1\mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度 R_a 在 $0.02\sim 0.1\mu\text{m}$ 之间的加工方法称为精密加工，而将加工精度高于 $0.1\mu\text{m}$ 、加工表面粗糙度 R_a 小于 $0.01\mu\text{m}$ 的加工方法称为超精密加工。

现代机械工业之所以要致力于提高加工精度，其主要的原因在于：提高制造精度后可提高产品的性能和质量，提高其稳定性和可靠性；促进产品的小型化；增强零件的互换性，提高装配生产率，并促进自动化装配。

超精密加工技术在尖端产品和现代化武器的制造中占有非常重要地位。例如：对于导弹来说，具有决定意义的是导弹的命中精度，而命中精度是由惯性仪表的精度所决定的。制造惯性仪表，需要有超精密加工技术和相应的设备。例如：美国民兵Ⅲ型洲际导弹系统陀螺仪的精度为 $0.03\sim 0.05^\circ/\text{h}$ ，其命中精度的圆概率误差为 500m ，而 MX 战略导弹（可装载 10 个核弹头）制导系统陀螺仪精度比民兵Ⅲ型导弹高出一个数量级，从而保证命中精度的圆概率误差只有 $50\sim 150\text{m}$ 。如果 1kg 重的陀螺转子，其质量中心偏离其对称轴 0.5nm ，则会引起 100m 的射程误差和 50m 的轨道误差。惯性仪表中有许多零件的制造精度都要求达到小于微米级。例如：激光陀螺的平面反射镜的平面度为 $0.03\sim 0.06\mu\text{m}$ ，表面粗糙度 R_a 为 $0.012\mu\text{m}$ 以下，反射率为 99.8% 。人造卫星的仪表轴承是真空无润滑的轴承，其孔和轴的表面粗糙度达到 $R_{\text{max}}^{\ominus} = 1\text{nm}$ ($0.001\mu\text{m}$)，其圆度和圆柱度误差均以 nm 为单位。雷达的关键元件波导管，其品质因数与内表面的粗糙度有很大关系。内腔表面粗糙度值越小越好。其端面要求有很小的粗糙度、垂直度和平面度值。采用超精密车削，波导管内腔粗糙度可达 $R_a 0.01\sim 0.02\mu\text{m}$ 或 $\leq 0.01\mu\text{m}$ ，端面粗糙度可达 $\leq 0.01\mu\text{m}$ ，平面度 $< 0.1\mu\text{m}$ ，垂直度 $< 0.1\mu\text{m}$ ，可使波导管的品质因数值达到 6000，而用一般方法生产的只能达到 2000~4000。红外探测器中接收红外线的反射镜是红外导弹的关键性零件，其加工质量的好坏决定了导弹的命中率。该反射镜表面的粗糙度要求达到 $R_a 0.015\sim \leq 0.01\mu\text{m}$ 。只有采用超精密车削，方能满足上述要求。

又如，已被美国航天飞机送入空间轨道的，用来摄制亿万公里远星球图像的哈勃望远镜（HST），其一次镜要求使用直径 2.4m ，重达 900kg 的大型反光镜，并且具有很高的分辨率。为此，专门研制了超精密加工（形状精度为 $0.01\mu\text{m}$ ）光学玻璃用的 6 轴 CNC 研磨抛光机。由于 HST 计划的实施，大大促进了硬脆材料的超精密加工技术，发展了能反馈加工精度信号的 CNC 研磨加工技术。从上所述可以看出，只有采用超精密加工技术才能制造精密陀螺仪、精密雷达、超小型电子计算机及其他尖端产品。

又如据英国 Rolls-Royce 公司的资料，若将飞机发动机转子叶片的加工精度由 $60\mu\text{m}$ 提高到 $12\mu\text{m}$ ，而加工表面粗糙度 R_a 由 $0.5\mu\text{m}$ 减小到 $0.2\mu\text{m}$ ，则发动机的压缩效率将从 89%

⊙ 此为日本标准，相当于我国的 R_z 。

提高到 94%。传动齿轮的齿形及齿距误差若能从目前的 $3 \sim 6 \mu\text{m}$ 降低到 $1 \mu\text{m}$ ，则单位齿轮箱重量所能传递的扭矩将近提高一倍。

大规模集成电路的发展，促进了微细工程的发展，并且密切依赖于微细工程的发展。因为集成电路的发展要求电路中各种元件微型化，使有限的微小面积上能容纳更多的电子元件，以形成功能复杂和完备的电路。因此，提高超精密加工水平以减小电路微细图案的最小线条宽度就成了提高集成电路集成度的技术关键（见表 1-1）。

表 1-1 集成度与最小线条宽度

参数与性能 分类名称	单元芯片上的单 元逻辑门电路数	单元芯片上的 电子元件数	最小线条宽度/ μm
小规模集成电路	$< 10 \sim 12$	< 100	≤ 8
中规模集成电路	$12 \sim 10^3$	$100 \sim < 10^4$	≤ 5
大规模集成电路	$> 10^3 \sim < 10^5$	$10^4 \sim < 10^6$	$2.5 \sim 5$
超大规模集成电路	$\geq 10^5$	$\geq 10^6$	$0.1 \sim 2$

目前工业发达国家都在发展微细加工技术，为减小集成电路的“线宽”而奋斗。2001 年 3 月英特尔公司推出的 Pentium 4 电脑的芯片，时钟速度 1.7GHz，最小线宽 $0.13 \mu\text{m}$ ，在面积 116mm^2 内的晶体管元件数超过 4200 万个。现在使用新的超紫外线光刻，已加工出 $0.10 \mu\text{m}$ 的线宽，正在继续努力希望将光刻的线宽减小到 $0.08 \mu\text{m}$ 。为进一步减小集成电路的线宽，国外正在试验新的工艺方法，如用电子束光刻可加工出 20nm 的线宽，用电子束直接刻蚀可加工出 10nm 的线宽，美国 IBM 公司用扫描探针显微镜（SPM）光刻，在 Si 表面加工出宽度为 10 nm 的线条，这 10 nm 的线宽还不是 SPM 光刻加工最小极限，还有可能加工出更小的线宽。

计算机磁盘的存储量在很大程度上取决于磁头与磁盘之间的距离（即所谓“飞行高度”，Flying Height），目前已达到 $0.3 \mu\text{m}$ ，近期内可争取达到 $0.15 \mu\text{m}$ 。为了实现如此微小的“飞行高度”，要求加工出极其平坦、光滑的磁盘基片及涂层。IBM 公司开发的磁盘，其记忆密度在 1957 年为 $3 \times 10^2 \text{bit}/\text{cm}^2$ ，而现在已达到 $2 \times 10^{10} \text{bit}/\text{cm}^2$ ，这除了原材料、涂层技术和空气动力学研究改进外，在很大程度上应归功于超精密加工带来的磁盘基片与磁头加工精度的提高和表面粗糙度的减小。

当代多种加工方法所能达到的精度，及其发展趋势预测如图 1-1 所示。由图中可见，预计到 2010 年普通机械加工、精密加工与超精密加工的精度可以分别达到 $1 \mu\text{m}$ ， $0.05 \mu\text{m}$ 及 $0.001 \mu\text{m}$ （1nm）。而且可见精密工程正在向其终极目标——原子级精度的加工逼近，也就是做到“移动原子”。为了达到这一目标，各工业发达国家都在努力冲刺。日本的 ERATO 计划中，纳米技术作为其 6 项优

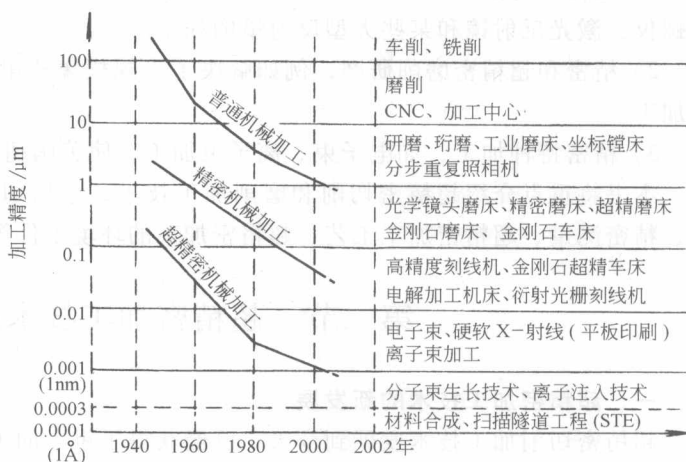


图 1-1 各种加工方法所能达到的精度及其发展趋势预测

先技术之一,在由政府、大学和工业界联合开发。对纳米材料的物理力学性能正大力进行分析研究,基本的测试系统与加工设备正在研制中。美国已将纳米技术列为21世纪科技发展的3项重中之重的项目之一,投入大量人力物力,在多个大学和研究所成立纳米技术研究中心,大力开展扫描隧道工程、纳米材料、微机电系统等方面的研究工作。在英国国家纳米技术(NION)计划已开始实行,纳米技术战略委员会(Nanotechnology Strategy Committee)已建立,欧盟已成立多个纳米技术研究中心,正在实行合作的研究计划。

在过去的相当时期内,精密加工,特别是超精密加工的应用范围很狭窄。近十几年来,随着科学技术和人们生活水平的提高,精密和超精密加工不仅进入了国民经济和人民生活的各个领域,而且从单件小批生产方式走向大批量的产品生产。例如:照相机、摄像机、微型传感器等都已数字化,核心部件精度要求很高,产量都很大。在机械制造行业,已经改变了过去那种将精密机床放在后方车间,仅用于加工工具、卡具、量具的陈规。现在已经将精密机床搬到前方车间,直接用于产品零件的加工。

超精密加工走向大批量产品生产的事实使人们不得不正视长期以来一直被忽视的问题:成本和效率,现代超精密加工不仅必须达到极高的加工精度和表面质量,同时应该保证成本低、效率高、成品率高。这对精密和超精密加工提出了更加严格的要求。

我国当前不少精密机电产品尚靠进口。有些精密产品靠老工人手艺,因而废品率极高。例如现在生产的某些高精度惯性仪表,从十几台甚至几十台中才能挑选出几台合格品。某些精密机电产品我国虽已能生产,但其中的核心关键部件仍需依靠进口,如飞机的发动机还需进口。我国每年需进口大量尚不能生产的精密数控机床设备,例如,2003年我国进口机床41.6亿美元,出口机床3.8亿美元,进口的大部分为精密数控机床,而出口的则是低精度廉价的简单机床。2004年我国进口机床57.8亿美元,出口机床5.2亿美元;2005年我国进口机床67亿美元,比同年我国机床的总产值50亿美元还多,当年出口机床仅8亿美元。某些大型精密机械和仪器国外还对我国禁运。这些都说明我国必须大力发展精密和超精密加工技术。

精密和超精密加工目前包含三个领域:

- 1) 超精密切削,如超精密金刚石刀具切削,可加工各种镜面,它成功地解决了高精度陀螺仪、激光反射镜和某些大型反射镜的加工。
 - 2) 精密和超精密磨削研磨,例如解决了大规模集成电路基片的加工和高精度硬磁盘等的加工。
 - 3) 精密特种加工,如电子束、离子束加工,使美国超大规模集成电路线宽达到 $0.1\mu\text{m}$ 。
- 本书将重点介绍超精密切削和磨削加工技术,包括切削机理、金刚石刀具、超精密机床、精密测量、超精密加工工艺、超精密加工的环境条件等。

第二节 超精密加工技术的现状

一、超精密加工技术的新发展

超精密切削加工技术发展到今天,已经获得了重大的进展,超精密切削加工已不再是一种孤立的加工方法和单纯的工艺问题,而成为一项包含内容极其广泛的系统工程。实现超精密切削加工,不仅需要超精密的机床设备和刀具,也需要超稳定的环境条件,还需要运用计

计算机技术进行实时检测, 反馈补偿。只有将各个领域的技术成就集结起来, 才有可能实现超精密切削加工。

使用天然单晶金刚石刀具对超精密零件进行超精密切削, 始于 20 世纪 50 年代末期。初期的被加工工件多为形状简单的圆柱表面、平面和球面, 只要求达到 $R_{\max} 0.1 \mu\text{m}$ 的镜面即可。后来发展要求加工非球曲面反射镜, 再发展要求加工大型反射镜。要求很高的形状精度和很小的表面粗糙度。

金刚石刀具的超精密切削加工技术, 主要应用于两个方面: 单件的大型超精密零件的切削加工和大量生产的中小型零件的超精密切削加工技术。

单件大型零件的超精密金刚石刀具切削, 以美国最为发达, 居于世界领先地位。美国超精密加工技术的发展出于国防的需要, 通过能源部激光核聚变的任务, 以及陆海空三军制造技术开发计划等, 对超精密金刚石切削机床的研究开发投入了巨额资金和大量人力。其最高水平是 LLL 实验室 (Lawrence Livermore Laboratory) 在 1983 年研制的第三号大型超精密金刚石车床 (DTM-3 型), 该机可加工 $\phi 2100\text{mm}$, 质量为 4500kg 的工件和在 1984 年研制的大型光学金刚石车床 LODTM, 可加工 $\phi 1625\text{mm}$, 质量 1360kg 的非球面工件, 其加工精度可达 $0.025 \mu\text{m}$, 表面粗糙度 $R_a 0.0045 \mu\text{m}$ 。这是以庞大资金集 20 年的研究成果而创造的超精密车床。

大量生产的中小型超精密零件大多是感光鼓、磁盘、多面镜, 以及平面、球面或非球面的激光反射镜等。材料多为铜、铝及其合金、非电解镀镍层, 进而扩展至塑料及硬脆材料 (如陶瓷、单晶锗、KDP 等), 间或有铁氧体材料加工。最近也有用 CBN 精车黑色金属的报道。

这些零件的加工精度可用表 1-2 说明。

表 1-2 中小型精密零件的加工精度

加工零件例	平均加工精度	加工零件例	平均加工精度
激光光学零件	表面粗糙度 $R_a 0.01 \sim 0.006 \mu\text{m}$ 形状精度 $0.1 \mu\text{m}$	磁 盘	表面粗糙度 $R_a 0.01 \sim 0.004 \mu\text{m}$ 波度 $0.02 \sim 0.01 \text{mm}$
磁 头	表面粗糙度 $R_{\max} 0.02 \mu\text{m}$ 平面度 $0.04 \mu\text{m}$, 尺寸精度 $\pm 2.5 \mu\text{m}$		
多面镜	表面粗糙度 $R_{\max} 0.01 \sim 0.02 \mu\text{m}$ 反射率 $85\% \sim 90\%$ 平面度 $0.04 \mu\text{m}$, $\lambda/5 \sim \lambda/10$	塑料透镜用 非球面模具	表面粗糙度 $R_{\max} 0.01 \mu\text{m}$ 形状精度 $1 \sim 0.3 \mu\text{m}$

日本在 1975 年以前, 超精密金刚石车床都是从欧美等国的 Symon—Bryani, Philips, Moore 公司进口的。但日本从 1980 年以后逐渐采用自己生产的超精密金刚石车床, 后来居上, 水平较高。现在日本生产超精密机床的工厂约有 20 家, 如东芝公司、理研制钢公司、丰田工机、不二越、日立精机等。日本偏重发展中小型超精密机床, 加工对象是电子产品, 激光、照像、摄像、办公自动化设备等民用产品。为了适应大量生产的要求, 降低成本提高生产率, 设计和生产了专用的高生产率的超精密机床, 如磁盘车床、多面镜加工机床、隐形眼镜片车床、塑料光学透镜车床等。

超精密切削加工是一项内容广泛的新技术, 它的加工精度和表面质量是由所使用的超精

密机床设备、金刚石刀具、切削加工工艺、计量和误差补偿技术、操作者的技术水平、环境支持条件等多种因素影响的综合结果,下面对其中几个主要方面的情况予以说明。

二、超精密切削的机床设备

超精密机床是实现超精密切削的首要条件,各国都投入了大量人力物力研制超精密切削用机床。目前水平最高的是美国,其代表作是 DTM—3 型大型超精密车床和大型光学金刚石车床 LODTM。该机床采用空气轴承主轴和高压液体静压主轴,刚度高、动态性能好。为实现超精密位置的确定,采用了精密数字伺服方式,控制部分为内装式 CNC 装置和激光干涉测长仪,实现随机测量定位。为了实现刀具的微量进给,在 DC 伺服机构内装有压电式微位移机构,可实现 nm 级微位移。该车床采用了恒温油淋浴系统,油温控制在 $(20 \pm 0.0005)^\circ\text{C}$,消除了加工中的热变形。该车床还采用了压电晶体误差补偿技术,使加工精度达到 $0.025\mu\text{m}$,该机床可用于加工平面、球面及非球面,用于加工激光核聚变工程的零件,红外线装置用零件以及大型天体望远镜。

在欧洲以具有研究开发超精密金刚石切削加工机械传统的 Philips 公司的中央研究所为中心,研究开发 CNC 超精密金刚石车床 COLATH,1978 年以后用于本公司的高精度零件的加工。

英国 Cranfield 公司与 British Science and Engineering Research Council (SERC) 签订合同,研制开发 X 射线天体望远镜用大型超精密机床 OAGM2500,机床于 1991 研制成功,工作台 $2500\text{mm} \times 2500\text{mm}$,可用于超精密车削、磨削和坐标测量,使用性能良好。

日本大型超精密金刚石切削机床的研究与开发,远远落后于欧美,至今未见有关的报道。日本有关方面正大声疾呼在这方面积极赶超欧美。

我国北京机床研究所于 1987 年研制成功加工球面的 JSC—027 空气轴承超精密车床,1998 年研制成加工直径 800mm 的 NAM—800 型 CNC 超精密金刚石车床和加工平面的 SQUARE—200 型等超精密铣床。北京航空精密机械研究所研制成功空气主轴的超精密车床和金刚石镗床。哈尔滨工业大学 1998 年研制成加工直径 300mm 的 CNC 超精密车床,2006 年研制成加工 KDP 晶体的大平面超精密铣床。我国的这些超精密机床虽已达到较高水平,但和国外比还有差距,现在还没有加工直径 1m 以上的大型超精密机床,精密空气主轴、微位移机构、精密 CNC 伺服系统、机床热变形和结构稳定性等关键部件和关键技术都还需要研究提高。

三、金刚石刀具和超精密切削机理的研究

金刚石刀具是超精密切削中的重要关键。

金刚石刀具有两个比较重要的问题:一是晶面的选择,这对刀具的使用性能有着重要的关系;再就是金刚石刀具的研磨质量——切削刃钝圆半径 r_n ,它关系到切削变形和最小切削厚度,因而影响加工表面质量。

金刚石晶体是各向异性的,用于制造刀具时需要晶体定向。

超精密切削中,切削刃的实际切削厚度与名义切削厚度不相同,有一个差值。实际切削厚度亦称有效切削厚度。切削厚度,小过一定界限就不能正常切削。能稳定切削的最小有效切削厚度称为最小切削厚度。最小切削厚度取决于金刚石刀具的切削刃钝圆半径,切削刃钝圆半径越小,则最小切削厚度越小。国外报道研磨质量最好的金刚石刀具,切削刃钝圆半径可以小到数纳米的水平;而国内现在磨的金刚石刀具,切削刃钝圆半径只能达到 $0.1 \sim$

0.3 μm 。提高金刚石刀具的质量,使切削刃钝圆半径小于0.1 μm 是我们需要研究解决的问题。1986年2月日本精机学会与有关的企业团体设置研究规划:“超精密金刚石切削加工用刀具切削刃评价的研究”。1990年日本大阪大学和美国LLL实验室合作研究超精密切削的最小极限,成功地实现了1nm级切削厚度的稳定切削,使超精密切削达到新的水平。

超精密切削机理的某些方面,如各种因素对金刚石刀具磨损的影响、最小切削厚度、积屑瘤的生存规律等有一定的特殊性,过去研究较少,研究这些问题对提高切削加工表面质量、减少变质层和减少表面残留应力等有直接影响。最近黑色金属的超精密切削正在研究,有用金刚石刀具的,也有用CBN刀具的,目前还在实验室研究阶段。

工件材料对超精密切削有重要影响。其主要原因有:1)表面出现不纯物,造成不规则的空穴和划伤;2)结晶的晶界出现阶梯;3)加工工件有残留变形和残留应力;4)对金刚石刀具的亲合性,产生粘接现象等;5)由于晶体材料的各向异性,影响切削变形和加工表面质量。为解决这些问题,可以采用高纯度合金元素(例如99.99%Al等)在高真空中熔解铸造,用极高速度使铸件冷却,在高于再结晶温度下进行长时间保温等。

四、检测和误差补偿

要达到亚微米级和纳米级的加工精度,检测是一个极为重要的方面。超精密加工对测量技术提出了严格要求。超精密加工要求测量精度比加工精度高一个数量级。如果超精密加工精度达到1nm,测量机要控制的精度则要达到0.2~0.3nm。因此,超精密加工需要与相应的测量技术配合。超精密测量技术的开发必须与超精密加工技术的开发保持同步。目前超精密测量仪正向高分辨率、高精度和高可靠性的方向发展。国外广泛发展非接触式测量方法并研究原子级精度的测量技术。例如,Johaness公司生产的多次光波干涉显微镜的分辨率为0.5nm,OrienPass公司生产的MBI重复反射干涉仪的测量精度可达 $\pm 0.001\text{nm}$ 。最近出现的隧道扫描显微镜的分辨率为0.01nm,是目前世界上精度最高的测量仪,可用于测量金属和半导体零件表面的原子分布的形貌。最新的研究证实,在扫描隧道显微镜下可移动原子,实现精密工程的最终目标——原子级精密加工。

超精密加工中的测量,应包括机床超精密部件运动精度的检测和加工精度的直接检测。要提高机床的运动精度,首先要能检测出运动误差。用三点法所测得的高精度静压空气轴承的径向圆跳动一般为50nm左右。主轴的跳动加上静压工作台的直线运动误差,可以造成圆度和圆柱度等误差达数十纳米。

加工时机床的定位精度是一个重要问题。一般平面、圆柱表面、球表面、多面棱体在加工时,工作台的运动精度相对地并不很高。但在加工非球面时就要求很高的连续的运动精度和定位精度。现在采用激光干涉测长仪精确测出工作台的位置,用反馈和闭环控制系统而制成精密CNC机床。

对超精密加工中的误差补偿问题,国内外学者专家的争议比较大。但从目前的发展趋势来看,要达到最高精度还需要使用在线检测和误差补偿。例如高精度静压空气轴承的径向圆跳动大约在50nm左右,工作台的直线运动误差也至少在数十纳米,要进一步实现更高精度就有一定困难。但用误差补偿方法有可能达到10nm。

目前世界上精度最高的LLL实验室的3号超精密金刚石车床和大型光学金刚石车床LODTM是有误差补偿系统的,CNC超精密机床实际上也是反馈补偿原理的体现,用激光干涉测长仪测出工作台实际位置,再反馈控制其运动。