

清华大学微机电系统工程系列教材

微纳米测量技术

Metrology for
Micro- and Nanotechnology

王伯雄 陈非凡 董 瑛 编著

Wang Boxiong Chen Feifan Dong Ying

清华大学出版社

清华大学微机电系统工程系列教材

微纳米测量技术

Metrology for Micro- and Nanotechnology

王伯雄 陈非凡 董 瑛 编著

Wang Boxiong Chen Feifan Dong Ying

清华大学出版社

北京

内 容 简 介

本书讲述了微纳米测量技术的基本理论和方法、微纳米测量系统的工作原理及构成以及对不同物理量的微纳米测量应用。

全书共4章,内容包括:微纳米测量技术的意义、特点和研究的内容;微型传感器的工作原理及其典型应用;微纳米测量技术中的光学方法,光学测量系统的结构及应用;微纳米尺度的几何量、表面粗糙度、表面微观形貌、MEMS材料机械特性、微应力和微应变、微位移、速度和加速度、振动、声和超声等典型物理量的测量技术应用。

本书可作为高等院校微机电系统工程、测控、仪器、自动化、机电一体化等专业的本科生和研究生教材,也可作为工程技术人员的参考书。

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

微纳米测量技术/王伯雄等编著. 北京:清华大学出版社,2006.8

(清华大学微机电系统工程系列教材)

ISBN 7-302-13063-9

I. 微… II. 王… III. 纳米材料—应用—测量—高等学校—教材 IV. P2

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第050460号

出 版 者: 清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机: 010-62770175

地 址: 北京清华大学学研大厦

邮 编: 100084

客 户 服 务: 010-62776969

组稿编辑: 张秋玲

文稿编辑: 赵从棉

印 刷 者: 北京市清华园胶印厂

装 订 者: 三河市新茂装订有限公司

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 185×230 印张: 14.5 字数: 308千字

版 次: 2006年8月第1版 2006年8月第1次印刷

书 号: ISBN 7-302-13063-9/TH·209

印 数: 1~3000

定 价: 24.00元

前言

微纳米技术是 21 世纪最重要的科学技术之一,它将在新世纪引起一场新的工业革命。而微纳米测量技术是微纳米技术的重要组成部分,它对于微纳米材料的发展、微纳米器件和系统的研究与开发具有十分重要的意义。由于微纳米技术研究微观尺度的物体和现象,因此微纳米测量技术也主要指微米和纳米尺度和精度的测量技术。与广义的测量技术相比,它具有被测量的尺度小以及以非接触测量手段为主等主要特点,对它的研究既有与广义测量技术共性的东西,也有它自身独有的技术特点。本书讲述微纳米测量技术的基本理论和方法,微纳米测量系统的工作原理及构成,以及对不同物理量的微纳米测量应用。

全书共 4 章。第 1 章为绪论,讲述微纳米测量技术的意义、特点和研究的内容。第 2 章为信号的传感及微型传感器,介绍各种微传感器的工作原理及其典型应用。第 3 章介绍微纳米测量技术的光学方法,讲述各种方法的原理、光学测量系统的结构及应用。第 4 章为典型物理量和 MEMS 系统特征参数的测量技术,介绍典型物理量的微纳米测量技术应用,主要包括微纳米尺度的几何量、表面粗糙度与表面微观形貌、MEMS 材料机械特性、微应力和微应变、微位移、速度和加速度、振动、声和超声等的测量。

本书第 4 章由陈非凡编写,第 3.5~3.9 节由董瑛编写,其他章节由王伯雄编写,由罗秀芝制作插图和编写习题。全书由王伯雄统稿并审阅。本书在编写过程中得到清华大学精密仪器与机械学系李庆祥老师和李玉和老师的大力帮助,在此向他们表示深深的谢意!

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

作 者

2006 年 1 月于清华园

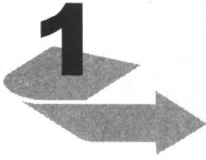
目录

1 绪论	1
1.1 测量和测量系统	1
1.2 微纳米技术和微系统技术	2
1.2.1 微纳米技术的产生和发展	2
1.2.2 微系统技术	4
1.2.3 微系统技术加工方法	5
1.2.4 微纳米材料的特性	11
1.3 微纳米测量技术的任务	12
1.4 课程学习的主要内容	14
习题	14
2 信号的传感及微型传感器	15
2.1 MEMS 技术与微型传感器	15
2.2 加速度微传感器	17
2.2.1 基本原理	17
2.2.2 压阻式微加速度计	20
2.2.3 电容式和力平衡(伺服)式加速度计	25
2.2.4 各类微加速度传感器的性能比较	28
2.3 微型力、压力、应变传感器	29
2.3.1 基本原理	29
2.3.2 微力传感器	31
2.3.3 微应力敏感电子装置	32

2.3.4	微压力传感器	33
2.3.5	压阻式压力传感器	35
2.3.6	电容式压力传感器	38
2.3.7	微应变传感器	39
2.4	速度和流量微传感器	41
2.4.1	基本原理	41
2.4.2	热敏电阻式微流量传感器	42
2.4.3	压阻式微型流量传感器	44
2.4.4	电容式微型流量传感器	45
2.4.5	谐振桥式微流量传感器	47
2.5	质量微传感器	47
2.5.1	基本原理	47
2.5.2	压电质量微传感器	47
2.5.3	SAWR 微传感器	48
2.6	隧道效应式传感器	49
2.6.1	基本原理	49
2.6.2	隧道效应加速度计	50
2.6.3	隧道效应红外传感器	51
2.6.4	隧道效应式磁强计	51
2.7	光纤传感器	52
2.7.1	光纤结构及光导原理	52
2.7.2	光纤特性	56
2.7.3	光纤传感器原理及结构	58
	习题	66
3	微纳米测量技术的光学方法	68
3.1	自动调焦法	68
3.1.1	自动调焦原理	68
3.1.2	轮廓测量	70
3.1.3	三维形貌测量	71
3.1.4	自动调焦方法的应用	72
3.2	三角法测量原理及应用	78
3.2.1	点三角法传感器的基本结构及作用原理	79

3.2.2	三角法测量传感器中光源的选择	81
3.2.3	不同检测方案的比较	81
3.2.4	影响三角法测量精度的因素	83
3.2.5	点三角法传感器的典型特性	85
3.2.6	三角法传感器的应用	85
3.2.7	激光光切法传感器	89
3.2.8	光切法传感器的光源和探测器	90
3.2.9	图像评价	92
3.2.10	光切法的应用	93
3.3	莫尔条纹法和投影条纹法	94
3.3.1	莫尔条纹法	94
3.3.2	阴影莫尔法	98
3.3.3	投影莫尔法	99
3.4	投影条纹法	100
3.4.1	作用原理	100
3.4.2	编码式光切法	103
3.5	光学显微测量技术	107
3.5.1	显微镜的工作原理	107
3.5.2	测量显微镜	110
3.6	光干涉测量技术	111
3.6.1	相移干涉测量技术	111
3.6.2	白光干涉测量技术	114
3.6.3	显微干涉测量技术	115
3.7	激光扫描显微测量技术	118
3.7.1	自聚焦激光扫描显微镜	118
3.7.2	共焦激光扫描显微镜	119
3.8	扫描电子显微镜技术	121
3.8.1	电子显微镜的工作原理	121
3.8.2	扫描电子显微镜	123
3.8.3	扫描电子显微镜的应用	125
3.9	原子力显微镜技术	126
3.9.1	原子力显微镜的工作模式	127
3.9.2	微悬臂形变检测方法	128

3.9.3	原子力显微镜的应用	129
习题	129
4	典型物理量和 MEMS 系统特征参数的测量技术	131
4.1	MEMS 器件几何结构特征参数测量	131
4.1.1	微米尺度的几何量测量	132
4.1.2	纳米尺度的几何量测量与纳米测量学	140
4.2	表面粗糙度与表面微观形貌测量	146
4.2.1	表面粗糙度与表面微观形貌的评价方法	147
4.2.2	表面粗糙度与表面微观形貌的测量方法	156
4.3	MEMS 材料机械特性的测试	169
4.3.1	拉伸测试法	170
4.3.2	弯曲梁法	179
4.3.3	纳米压入法	182
4.3.4	鼓膜法	184
4.3.5	共振频率法	186
4.4	力、应力和应变的测量	187
4.4.1	MEMS 结构中的应力和应变	187
4.4.2	应力、应变对 MEMS 结构的影响	188
4.4.3	MEMS 结构中应力和应变的测量方法	189
4.5	微位移、速度、加速度和振动等微机械量的测量	204
4.5.1	计算机微视觉与频闪光照明技术在微机械量检测中的应用	204
4.5.2	干涉技术在微机械量检测中的应用	206
4.5.3	光纤技术在微机械量检测中的应用	207
4.6	声和超声等其他物理量的测量	208
4.6.1	声频的测量	209
4.6.2	声压测量技术	212
4.6.3	声强测量技术	213
4.6.4	其他声学参数测量技术	216
4.6.5	声学测量技术	217
习题	219
参考文献	221



绪 论

1.1 测量和测量系统

人类对信息的爱好几乎是天生的,也是无限的,这种爱好随着人的成长而增长。然而,由于信息的量很大,因此人必须是一个复杂的信息采集者。而要能够利用信息,人又必须是一个有效的信息处理者。人利用他的一系列称之为“感觉”的测量系统从周围环境采集信息。通常的感觉有视觉、听觉、触觉、嗅觉和味觉,它们被用来测量环境中的各种物理的和化学的量。测量的结果由大脑进行处理并且给出决策。人的这种生物测量系统能够用来完成日常生活中众多简单或复杂的测量任务,它具有非凡的能力,比如能够以一种适应性的容错方式十分迅速地处理大量的数据。然而这种信息的本质还是主观的和定性的。因此,人类早就开始设计和使用各种仪器和工具来获取信息,这些仪器和工具是定量的测量系统。现在,人类已经有了众多的测量系统,这些系统以物理的和化学的参数作为设计的基础,用于从外界定量地获取测量数据。

一个测量系统的基本结构如图 1-1 所示。其中的一次敏感元件或传感器用于从被测量获取信息或能量。对于不同的被测量,要使用不同的传感器,传感器工作所依据的物理效应因此是千差万别的。对于一个测量任务来说,第一步就是要有效地从被测对象来获取能够用于测量的信息。因此,传感器在整个测量系统中的作用十分重要。通常,一个传感器用来将非电量转换为电信号。而该电信号在成为有用函数之前往往要通过信号调理元件进行某种修整,比如放大、滤波、调制和解调、A/D 转换等。这是因为从传感器输出的信号在传输过程中往往受到各种干扰和噪声信号的影响,在作进一步处理之前必须要将它们去除掉。有时也要对信号的幅值进行放大和修整,对信号的工作频段通过调制和解调进行调整。这些过程统称为信号的调理。最终希望通过信号的调理得到适合于记录、存储、显示和进一步传输的信号。

可以看到,一个完整的测量系统是由一系列的单元组成的,从敏感元件和传感器开

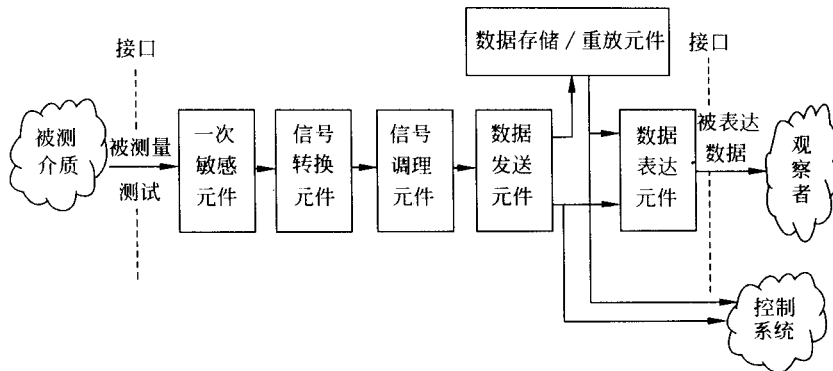


图 1-1 测量系统的功能模块结构图

始,到信号的转换和调理,最后到信号的记录和显示部分。对于任何给定的信号频率成分,系统的总增益都是该频率成分下所有系统单元增益的乘积。与之相似,系统的总相移则是信号通过各单元的相移之和。为了获得准确的测量结果,系统的各单元对所要求频率范围内的频率响应都应满足要求。如果系统中的任何一个元件不能获得正确的响应,就会使信号失真,从而影响整个系统的测量结果。还要看到,在信号传递的过程中,系统的各部分均会受到干扰,这种干扰可能是外部的,也可能产生于系统内部,如电子元件工作时的热噪声等。因此,测量系统的输出信号的质量一定不好于输入信号的质量。如何设计出精密的测量系统和测量仪器,如何用所设计的仪器来实现不失真的测量,是测量工作者面临的首要任务。

测量提供了有关物理变量和过程的现实状态的定量信息,如果没有测量,对这种现实状态便只可能进行估计。测量是对客观世界重新认识的工具,也是对任何理论或设计的最终检验。测量是一切研究、设计和开发的基础,它的作用在工程中十分显著。

世界已进入信息化时代,信息技术正成为推动国民经济和科学技术发展的关键技术。信息技术包括计算机、通信技术和仪器测量技术。而仪器测量技术是对客观世界的信息进行感知的基本手段,它是信息技术的基础,具有任何技术所不可替代的作用,在当今社会的发展中起着举足轻重的作用。

1.2 微纳米技术和微系统技术

1.2.1 微纳米技术的产生和发展

微纳米技术(micro- and nanotechnology)被认为是 21 世纪最重要的科学技术,它将在新世纪引起一场新的工业革命。微米和纳米均是长度单位。一微米为百万分之一米,即 $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{m}$;而一纳米为十亿分之一米,即 $1\text{nm}=10^{-9}\text{m}$ 。我们常说的微米尺度是指

1~100 μm ,而纳米尺度是指1~100nm。一般来说,微纳米技术研究的尺度范围是指1nm~1mm。

微纳米技术和微系统技术(micro system technology)是当今新兴的交叉学科,也是科学研究与发展的重点之一。微纳米技术最普遍的定义是指,通过在微纳米尺度范围内对物质的控制来创造并使用新的材料、装置和系统。由于微纳米结构的微尺度效应因而呈现全新的物理、化学、生物学等方面的性质和现象,因此微纳米技术的目标也是要研究和开发这些性质并有效地制造和使用这些结构。而微系统或微机电系统(micro electromechanical system, MEMS)一般是指将传感器、信号处理器和执行器以微型化的结构形式集成为一个完整的系统,而该系统具有“敏感”、“决定”和“反应”的能力。由于微纳米技术和微机电系统涉及机械、光学、电子、信息、物理、化学、材料、制造、生物等多个学科,因此是典型的交叉学科,它的研究与发展也必将促进这些学科的发展。

当前微纳米技术的发展正受到各国政府越来越多的重视。一般认为,微纳米技术在新的世纪中对人类健康、财富和安全等方面所产生的影响至少与20世纪中的集成电路、人造聚合物和抗生素三大发明所产生的全部影响一样大。美国总统科技顾问、美国前国家科学基金主任 Neal Lane 博士在1998年的一次国会听证会上曾说过:“如果有人问我哪个科学和工程领域最能够产生明天的科技突破,我认为是微纳米科学和工程。”1999年12月,美国国家科学技术委员会微纳米科学、工程和技术机构间工作组在其题为“微纳米技术研究指南”的工作报告中指出:“微纳米科学和工程将在未来的10~20年内成为一种战略性的、占主导地位的技术,因为对微尺度物质的控制将支持工业、经济、健康和环境管理、生活质量以及国防等方面的发明和进步。”报告的结论是:“微纳米技术将导致下一次工业革命。”由于认识到该学科潜力所在,因此美国白宫科技政策办公室以及管理和财政预算办公室共同发布了一个备忘录,其中将微纳米技术确认为科研重点,并已在2001财政年度给予重点投资,其投资总额比1999财政年度联邦政府投资微纳米技术研究开发资金的2.55亿美元增加了一倍,约5亿美元。为了满足不断增长的对微纳米技术人才市场的需求,美国在教育领域也采取了一系列的政府措施,包括:鼓励在大学里设立微纳米技术专业和研究中心,在已有的和新的课程中引入微纳米科学与工程的内容,促进有关微纳米科学与工程的多学科交叉研究,设立博士和博士后奖学金,以及促进产、学、研结合的微纳米研究成果转化。为了迎合企业界对微纳米技术科技人员的需求,政府还鼓励和投资大学,为企业培养未来的微纳米科技人员及企业领导人。目前美国的大多数学校均设置有微纳米技术和微机电系统研究中心、实验室和研究所,其中如麻省理工学院、斯坦福大学、密执安大学、加州大学伯克利分校、加州理工大学、康奈尔大学等的微纳米技术研究水平在世界上首屈一指。各校分别开设有微纳米技术和微机电系统的课程,设置了相关专业和教学大纲,培养专门人才。在德国,微纳米技术和微系统技术也被列入国家高科技重点发展的领域。德国教研部和德国科研基金会每年均设立有微纳米技术的重大科

研基金(Sonderforschungsbereiche),以促进该领域的科研发展。而在德国的数十所大学中均开展了微纳米技术的研究和教学,建立有专门的研究所,开设相应课程,有的还设置了新的微纳米机电系统技术专业。其中如亚琛工业大学、卡尔斯鲁厄大学、柏林工业大学、杜依斯堡大学、斯图加特大学、不来梅大学,以及东部的克姆尼茨大学、依尔墨瑙大学等,其研究的水平都很高,每年从国家和企业获取大量的研究资金。

我国国内从20世纪80年代末开始从事微机电系统和微纳米技术的研究,已取得了许多有价值的研究成果。10多年来,研究的队伍不断扩大,到20世纪末全国就已经有50多个单位在从事这方面的工作。国家对微纳米和微机电系统技术的发展也给予了高度重视,2001年由政府专门制定了《国家纳米科技发展纲要》。目前,国家科技部“863计划”专门设立有微纳米技术专项,并把它列为未来科研的重点之一。国家自然科学基金也设立有关微纳米技术重大科研基金项目,鼓励和促进该领域的研究和发展。目前国际上微机电系统和微纳米技术正处在一个全面发展的阶段,这正是我们发展该领域技术的大好时机,应该不失时机地积极推动它的研究、教育和应用。

1.2.2 微系统技术

过去的几十年里,微电子技术的迅速发展几乎对人类的一切生活领域都产生了巨大的影响,同样也对机械制造领域产生了巨大影响。但在这方面,人们还仅仅想到如何对机床进行数控,或怎样实现对生产过程的监控。而在最近的30多年时间里,出现了一种新的发展趋势,它向人们预示了一种与微电子技术相似的广阔前景和可能产生的影响,这便是微技术(micro technology),也称微系统技术、微机电系统技术。微系统技术是指制造、装配和应用最小的机械的或光学的零件,将它们同微电子元件一起组合成一个完整的系统。这一技术将对机械制造领域产生巨大的影响。图1-2所示为该技术可能产生的产品种类以及潜在的市场情况。

微系统技术的发展不仅给科学技术带来了新的机遇,也带来了新的影响。人们经常问,这一新的技术能在多大的范围内替代已有的精密技术的加工方法?另一个有趣的问题是,过去的那些没有进一步得到发展的传统加工方法是否也能被用于生产微零件,是否能够被作为原始的微加工工艺方法的一种补充,因此也能给机械领域带来一种新的市场潜力呢?图1-3是对微技术产品进行批量和单件生产的加工程序的比较。

另外一个重要的问题是,所采用的加工工艺和机械应该满足什么样的要求,才能够针对微系统技术中所应用的一切材料类型都能保持所要求的公差和精度?

在过去的30多年时间里,已经发展了众多的微细加工技术来加工越来越小的微电子元件。正是从电子元件的小型化中发展出了微系统技术,因为微系统技术的最初结构就是用微电子方法来制造的。图1-4以尺度关系示出了现在能够制造的几何尺寸,从中也能看出未来加工方法和机械系统的发展趋势。

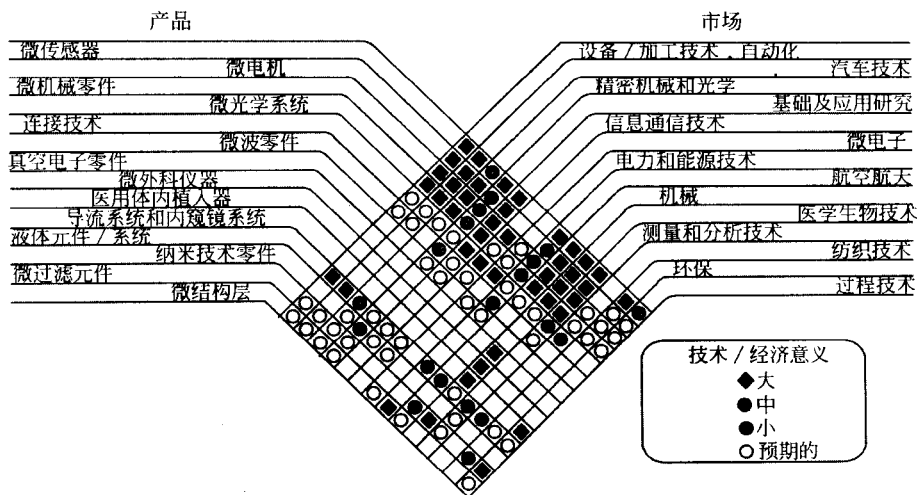


图 1-2 微系统技术的应用领域

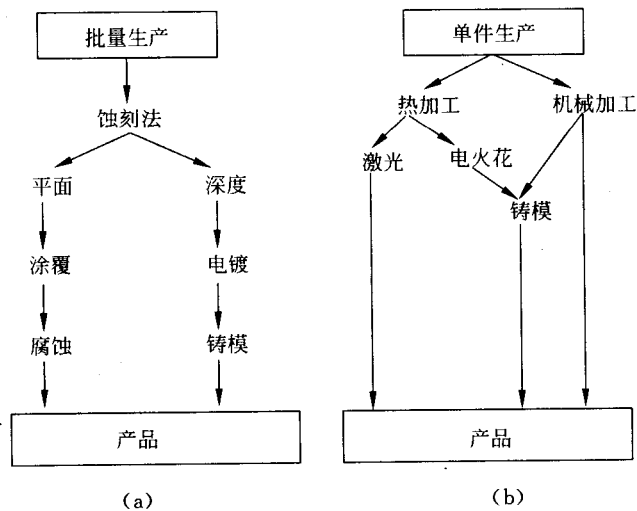


图 1-3 微零件批量生产和单件生产方法的比较

(a) 批量生产；(b) 单件生产

1.2.3 微系统技术加工方法

迄今为止在制造微细零件时应用的加工技术中,最重要的要数平板印刷术、蚀刻技术和层淀积技术。微电子技术的成就主要是基于单一的硅材料和平面工艺的结合来制造电

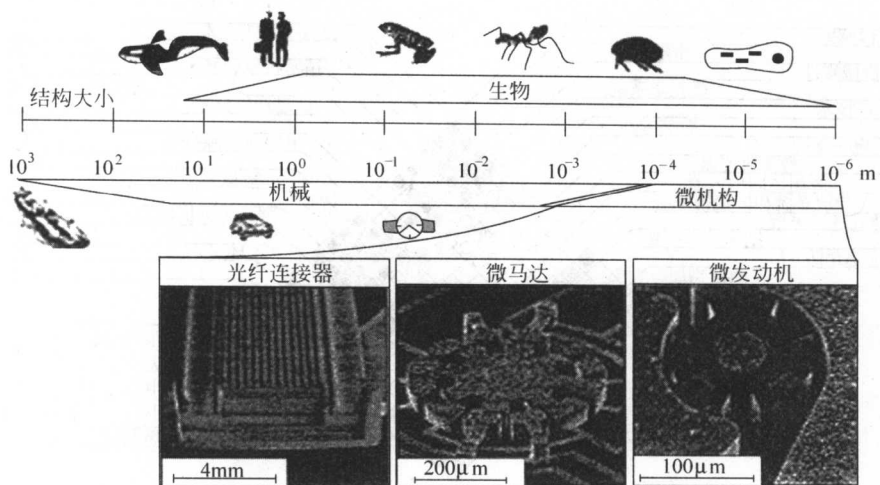


图 1-4 微系统技术发展的尺度排序

子系统,而微系统技术的工艺则建立在一个很广泛的材料和众多的加工方法的基础上。这是因为对于一个微系统来说,在一个模块上就集成了电的、机械的、光的、化学的以及生物的功能。因此从 20 世纪 80 年代开始,人们不仅进一步发展了已有的微电子加工方法,还在微系统技术中建立起传统的加工方法,如微切削、激光加工、电火花加工和压铸法。

1.2.3.1 LIGA 法和硅微加工法

制造微结构的两种主要方法是 LIGA^①法和硅微加工法。两种方法均要求有掩模,通过掩模并借助于平板印刷术将微结构形成在一个光刻胶涂层的衬底上。光刻胶是一种对光辐射敏感的胶,它在显影液中的溶解性会被不同的光照所改变。作为辐射源,可采用可见光源和紫外(UV)光源、电子束、离子束以及 X 射线。用上述两种方法可以加工复杂的微机构,其中硅微加工法仅仅适用于一定范围的材料,如硅、砷化镓或蓝宝石。而用 LIGA 工艺则可制造不同机加工材料的微结构,如塑料和有色金属。

在应用 LIGA 法方面,通过同步辐射的深平板印刷术能够制造三维的结构。光刻胶间的空间可以采用金属通过电镀法来填满。在将光刻胶溶解掉后,便能得到一个金属浇铸的模型,用它通过铸模工艺可以批量制造微零件。用 LIGA 工艺制造的三维微结构的精度能够达到 $0.2\mu\text{m}$,深宽比达 400。

硅微加工法要应用不同的腐蚀工艺。用腐蚀法生成的微结构表面区域对应于一定的

^① 德语 Lithografie, Galvanoformung, Abformung,即光刻、电铸、注塑的缩写。

晶体方向,因此它具有很大的局限性。通常采用两种腐蚀方法:干腐蚀法和湿腐蚀法。用干腐蚀法能够得到的深宽比最大为 50,而用湿腐蚀法得到的深宽比最大为 500。

1.2.3.2 经典加工方法

除了发展源于微电子技术的那些加工方法外,也同时继续发展传统的加工方法,使之能用于微系统技术中。

1. 微切削(车、铣、磨)

采用几何形状确定或不确定的刀具的微切削或超精密加工技术,现在已经能够用来加工微米量级尺寸的零件或具有微结构表面的微零件。这方面的应用例有激光器或红外系统的光学镜片,可见光光谱范围的透镜压铸件、空气动力轴承等。图 1-5 所示为用超精密车床加工出来的两种零件,其中的微型轴用于微型马达,非球面压膜用于塑料的压铸加工。图 1-6 所示为用快速工具系统(fast-tool system)加工的空气动力轴承,其微结构的高度仅为几微米。

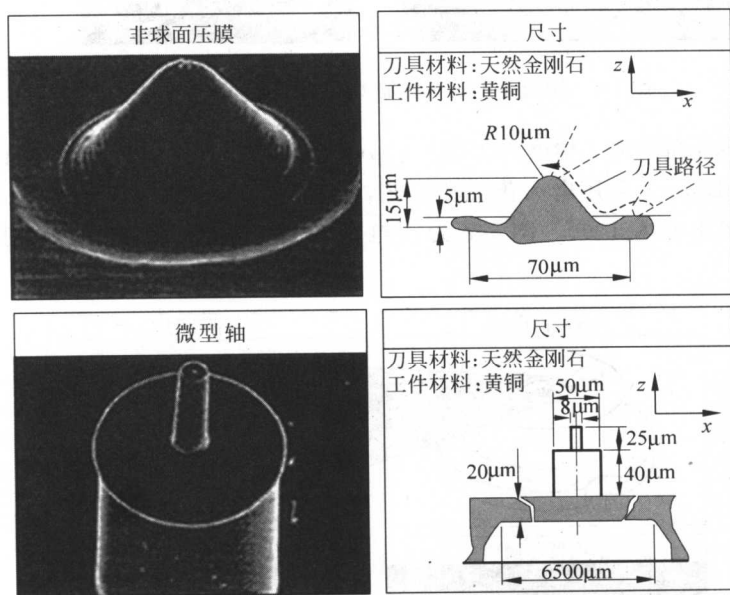


图 1-5 用超精密车床加工的微零件

2. 热加工方法

20 世纪 50 年代起,电火花加工法就作为一种加工方法用于加工硬的和不易切削的材料。其基本原理是通过热将材料烧熔或气化,达到加工材料的目的。通过几十年的发展,如今采用标准的电火花加工机器,能够十分精密地加工微米尺寸的零件。采用电火花

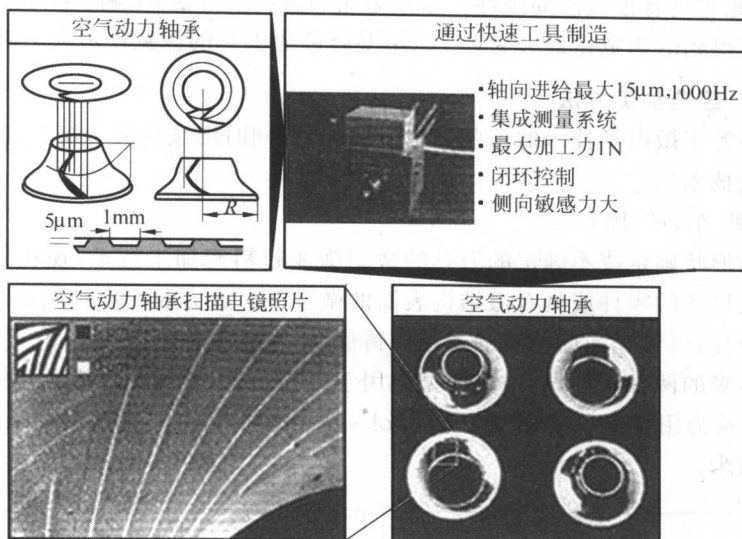


图 1-6 用快速工具系统加工的空气动力轴承的微结构

切削工艺,能够得到的加工精度为 $\pm(2\sim3)\mu\text{m}$,尺寸能小到 $40\mu\text{m}$,最小内径为 $20\mu\text{m}$,表面粗糙度为 $0.15\mu\text{m}$ 。采用电火花沉孔工艺,能够加工的空腔直径达 $15\mu\text{m}$,表面粗糙度为 $0.2\mu\text{m}$,深宽比可达1000。图 1-7 为用电火花加工法加工的模具,用于制造微齿轮零件。

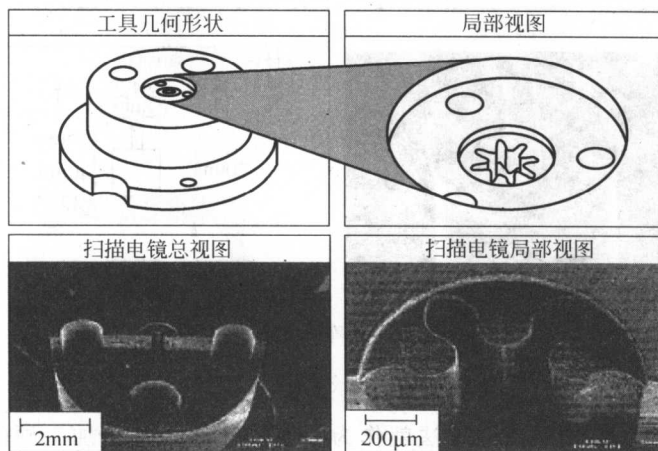


图 1-7 用电火花加工法加工的用于制造微齿轮的模具

激光加工法已经被广泛用于制造领域,主要用于焊接、切割、组装、变形、涂覆和结构化。由于激光加工机器具有能够将激光束能量集中在最小区间以及能够在最短时间里配置到加工材料上的优点,因此在微系统技术中起到了重要的作用。图 1-8 为采用激光加工法加工的微结构的图像,激光器为 Nd-YAG 激光器($\lambda=1.06\mu\text{m}$)。图 1-9 为用等离子激光器加工的喷墨打印机喷头的微结构。

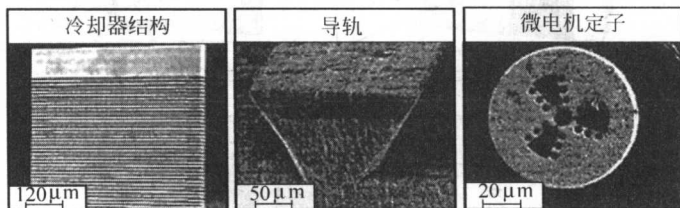


图 1-8 用激光加工机器制造的微结构

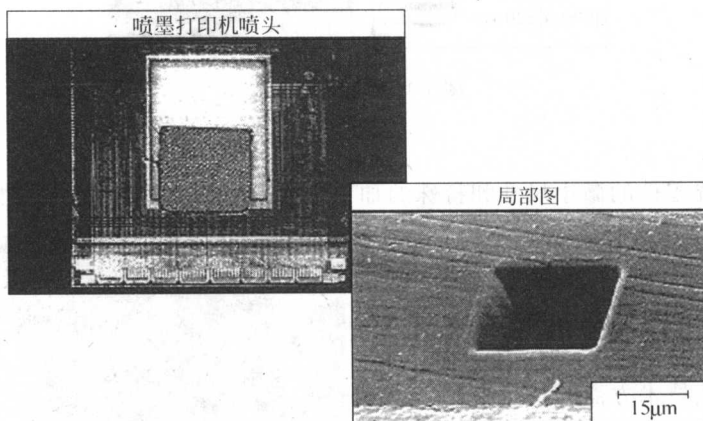


图 1-9 用等离子激光器加工的喷墨打印机喷头的微结构

3. 塑料压铸法

塑料压铸法尤其适用于大批量生产零件。塑料压铸法基本上分为喷射浇注、反应浇注和压印法三种。图 1-10 所示为一种用压铸机制造的精密试验结构,其中的压铸模是用深平板印刷术制造的。除了上述微结构外,用压铸法还能制造各种微零件,最小的零件重量仅为几毫克。微零件,如钟表的塑料齿轮,其冲击质量为 $0.5\sim 1\text{g}$ 时的质量偏差仅为 $0.1\sim 0.5\text{mg}$,这已经做得十分精密了。而世界上每年石英钟的需要量超过 10 亿只!因此压铸法的经济意义十分巨大。另外一个十分广阔的应用是 CD 行业。CD 的信息单元,也称信道,其高度仅为 $0.1\mu\text{m}$,横向尺寸为 $1\mu\text{m}\times 4\mu\text{m}$ 。信道的侧壁是斜的,便于很好地压铸。压铸工艺能够达到的深宽比因此能小于 1。压铸一片聚碳酸酯材料 CD 的时间仅