

清华大学精密仪器与机械学系

---

---

科学研究论文集  
(第二集)

1992.4

# 精密仪器与机械学系简介

(代序)

精密仪器及机械学系的主要学科方向是：精密仪器和现代制造工程。

精密仪器及机械学系是一个历史悠久，又在不断发展更新的系。本科设有两个专业：机械设计、制造及自动化，精密仪器仪表。每年招收学生150名。硕士点共有七个：光学仪器、精密仪器及机械、机械学、机械制造、工程图学、测试计量技术及仪器、机电控制及自动化等，前四个同时又是博士点。每年招收硕士生50名，博士生15~20名，外国硕士生10名。本系还设有仪器仪表、机械工程两个博士后流动站。现全系共有教职工384人，其中教授24人（教授中12人为博士生导师），副教授97人。近一、二十年来，随着微电子、计算机、自动控制、激光等新技术及现代化设计、现代控制及信息理论的发展，本系的面貌发生了深刻的变化，逐步形成了机、电、光、计算机技术结合，高科技交叉密集的综合学科。

精仪系的科研工作“七五”和“八五”期间承担了一些国家重大科研攻关和基金项目，例如：计算机集成制造系统(CIMS)及数控技术、过程监控与故障诊断、摩擦学、工业机器人技术、光盘存储技术、工程图纸自动输入和存储管理、大尺寸测量技术和微电子工艺设备等，许多研究成果达到了到国内外先进水平，不少技术和产品直接为国民经济主战场服务。

为跟踪国际高技术发展趋势，我系将重点发展现代机械制造工程和微米级/毫微米级制造技术，使我系的学科建设和科研水平上一个新台阶。

全系现有三个国家级实验室，即CIMS工程实验室，摩擦学实验室和精密测试技术及仪器实验室。CIMS工程实验室以系统集成作为研究开发对象，它的建设是为了减少我国在实施CIMS时的风险。实验工程将是CIMS集成技术的研究中心，各种单元技术的集成测试中心，国内外先进技术的转让中心，以及各种层次人才的培训中心。摩擦学实验室目前的研究方向与内容包括：润滑力学研究、摩擦磨损研究、基于油分析的故障诊断技术研究、润滑介质研究、表面形貌效应研究、材料磨损及表面工程研究、摩擦学材料制品及其机理研究、摩擦化学研究和摩擦学测试技术研究。精密测试技术与仪器实验室七五期间得到联合国计划开发署的支持，八五期间国家还

将投入经费用于引进先进的器件和装备，例如：计算机控制的三坐标测量机、双频干涉仪、高速度的CAD工作站、纳米级的外差干涉仪、微定位仪、纳米振动测量仪、传感器动态标定装置等等。实验室将为国内外研究工作者、为博士研究生提供先进的研究条件。另外，还有10个教研室的实验室，系有仪器设备等固定资产二千万元，有计算机及终端近200台，这为开展教学和科学研究提供了良好条件。

本系安排学生在掌握扎实的数理化与外语的基础上，学习机械、仪器设计和制造、电工与电子技术、计算机技术、控制及测量、计算机辅助设计和计算机辅助制造等课程，培养能从事机电一体化的设计制造和管理的高级工程技术人材。

精仪系有重视教学的传统，面向全校的〈机械制图〉、〈机械原理〉和〈机械设计基础〉三门课的教学质量达到国内外先进水平，获得清华大学一类课称号。目前机械系统课程已引入CAD技术，对课程体系和内容进行改革，做到信息量大，内容新，基本功扎实，创造性强。为提高专业课教学质量，还要不断加强专业课的建设，把理论教学和工程实践及科学研究紧密结合起来。

在学生培养中，十分注意打好坚实的理论基础，加强基本的工程训练，养成“勤奋、求实、创新”的学风，积极开展多种形式的课外科技、文化和体育活动，培养学生的创造能力。一批又一批优秀青年爱国、成材、奉献，健康成长。从1978年起至1991年，我系毕业生达1847人，其中本科生1236名，硕士生446名，博士生66名。

周兆英 范荫乔

微米级和毫微米级制造技术	周兆英 林喜荣 李慧芳 杨 岳	1
国外摩擦学设计的进展与现状	温诗铸 黄昌华	10
现代制造系统——现状与前景	张伯鹏	19
计算机集成制造系统综述	范荫乔 蔡复之	34
智能测量方法和仪器的发展	杨立志 严普强 周汉安	39
大型零件表面平面度误差的测量方法的研究	刘兴占 梁晋文	48
反射棱镜作用矩阵与棱镜物象方向共轭定理	毛文炜 王民强 连铜淑	56
二值周象代数基本操作的光学实验	郭敏贤 周少敏 余官正 金国藩	63
磁盘润滑膜厚度测量仪	张云祥 王东生 张鸿澍 梁晋文	72
N o m a r s k i 显微镜定量测量表面形貌	高 宏 薛实福 李庆祥 严普强	78
刀具自动对准系统的实验研究	李庆祥 王伯雄 薛实福 王则豪	82
开关电容滤波器在动平衡检测中的应用	毛乐山	87
捷联式惯性系统中卡尔曼滤波技术的应用	顾启泰	95
静电陀螺仪控制线路及故障检测装置的设计与实验研究	辛 暖 滕云鹤	103
近似非线性滤波在陀螺漂移误差模型辨识中的应用	高钟毓 王永梁	109
自动导引车系统 ( A G V S ) 安装调试及联网运行	高钟毓 董景新 刘学斌 焦正财	116
静电陀螺支承系统的最优化参数及设计调整方法	滕云鹤 才德容 章燕申	125

粗糙表面气体静压润滑轴承的研究 -----	潘晋 沈钊 徐丰仁	134
WORM 光盘和光盘文档管理系统 -----	贾惠波	139
数字光盘机主轴电机伺服控制系统 -----	裴京 潘龙法 袁浩	143
工业循环冷却水动态模拟试验系统研制 -----	齐国生 林斌 徐振明 王铁林	150
自适应除噪技术在激光准直中的应用研究 -----	杨友堂 管理江 殷纯永	161
谐振阻尼测湿方法及其传感器的研究 -----	桂成群 冯冠平 董永贵	169
谐振阻尼传感理论的研究 -----	冯冠平 桂成群 董永贵	173
机械电子学综合实验课的实践 -----	徐峰 桂成群	179
CIMS 中测量组合夹具系统设计与应用 -----	成晔 蔡复之	182
精细陶瓷制件振抛光整加工及其应用的研究 -----	金之垣	188
回转运动误差的精确测试理论与方法 -----	冯之敬	200
用于非圆齿轮加工的微机控制系统 -----	李春江 杨群英 叶纪林 邢在忠 路士华	206
一个模块化步行机控制系统 -----	汪劲松 荣松年 贾岗 张伯鹏	212
具有主动柔顺和机器视觉的机器人化柔性装配检测单元的建设 -----	徐家球 邹敏伟 杨向东 张伯鹏	218
一个应用于自动化加工系统的综合刀具监测系统 -----	郑力 罗振璧 张伯鹏	226
适用于非牛顿介质的雷诺方程的普遍形式 -----	陈大融	232
铸铁-铸铁、铸铁-镀铬层在纯油和加磨料润滑条件下磨损特性的研究 -----	金占明 金元生 鞠凯贤 张玉顺	243

用 C 语言构造机械产品方案设计专家系统的开发工具 -----	张春风	童秉枢	251
带微机系统的硬支承动平衡机的研制 -----	申永胜	唐锡宽	徐彦 250
采用电磁式固有频率可控动力消振器的频率跟踪消振方法 -----	项海筹	邵敏	266
滑动轴承实验数据的微机采集和处理系统 -----		俞海清	272

# 微米级和毫微米级制造技术

清华大学精密仪器与机械学系

周兆英 林喜荣 李慧芳 杨 岳

## 一、前言

现代制造技术已成为人类创造物质财富的最主要技术。随着生产和经济的发展、科学和技术的进步，制造的概念和内容在不断发展和更新。当前，制造工程的两大技术前沿是计算机集成制造(CIM)、微米级和毫微米级制造(MNN)，是世界上许多发达国家努力开发、激烈竞争的领域。

我们把微米级(显微量级，指 $0.1\mu\text{m}\sim 100\mu\text{m}$ 范围， $1\mu\text{m}=10^{-6}\text{mm}$ )和毫微米级(原子量级，指 $0.1\text{nm}\sim 100\text{nm}$ 范围， $1\text{nm}=10^{-9}\text{mm}$ )设计、制造、测量和应用的技术，简称M/N技术(Micro and Nanotechnology)。M/N技术是一项基础技术，它为其它相关技术的发展提供基础；M/N技术又是一个交叉学科，它涉及材料学、机械学、光学、电子学、信息科学、物理学、化学、生物学等多种学科和技术。M/N技术的主要应用领域有三[1]：

1，集成电路应用。M/N技术可以压缩器件的尺寸和距离，会在这一领域引起新的突破。从理论上讲，量子效应器件至少有小至100个原子的沟道宽度，这比生物细胞还小。日本的 $\times$ 光光刻技术已达到 $0.3\mu\text{m}$ 的能力，具有开发256M以上存储芯片的能力。

2，薄膜和表面处理。薄膜和表面处理能提高材料的抗磨损、耐热及抗腐蚀性，用于切削工具、飞机发动机的涡轮片。例如金刚石膜具有高热导率和高硬度等优良性能，而使用的金刚石量又很少。

3，微型机械。80年代起，已在研制微型传感器、致动器、微型机械元件和微型集成系统(如微型机器人)，可用于环境控制和医学等不同领域。已商业化的测量压力、运动或振动的微型机械传感器为传统传感器大小的几千分之一，价格的几百分之一，更准确可靠。用IC工艺，4英寸基片可做1000只压力传感器，一盘可装25片，即2.5万只传感器一次加工成功。如美国加州卢卡斯传感器公司制成如盐粒大小的血压传感器，能在手术过程中在心脏内测量血压。这家公司还生产微型加速度计，用于汽车防撞保护气囊。

M/N技术的开发和研究可能导致一些新的学科和技术的发展，如微动力学或微机械电子学(Microdynamics or Micromechanics)、微光学、以及毫微机械学、毫微电子学、毫微生物学等，例如研究把微型机械元件、致动器、传感器和逻辑电路集成一体，构成自主式微型机器人。又例如91年初美国用扫描式隧道显微镜(Scanning Tunneling Microscope)操纵半导体表面上被吸附的铯原子，有可能产生毫微米级表面原子工程；国际商用机器公司(IBM)能用STM操纵硅基质中以共价键结合的硅原子或硅原子团，用正电压脉冲拾取，用负电压脉冲沉积到表面预定的位置，成为强键合材料的毫微米级加工。以后可用于沉积或局部掺杂。

M/N技术已进入加速发展时期，美国纽约时报91年1月1日刊登科技记者征询大学、政

政府和工业部门专家意见后列出的“美国使今后七年大改观的十大关键技术”中，微电机、超小型机器人身上的转子和齿轮名列第一。美国国家关键技术委员会91年3月22日的报告中，有22项国家关键技术，其中，第二大类是制造技术，第七项是微米级和毫微米级制造技术。89年起美国科学基金会(NSF)就把它列为“关系国家繁荣与安全，应当予以扶植”的重大课题。日本Trigger杂志91年4月刊登“日本科学技术成就近10年回顾”共31项，其中第七项为微型机器，指大小为几微米~几毫米的超小型机器人，用途广泛，人们可用遥控方式让微型机器把药物沿血管送入病灶。日本通产省(MITI)从1991年起把微型机器列为大型科研项目，值得“下个世纪，举国努力”。投资达250亿日元(约2亿美元)，在十年内发展能用于施行外科手术到监测核电站的各种超小型机器人。欧洲共同体(EC)的一些国家如英国、德国和荷兰也开展了M/N技术的研究。英国从89年开始执行一个纳米技术战略委员会，在四年内投资1200万英镑(后来科学与教育委员会也加入并投资150万英镑)，在国家物理实验室(NPL)设置秘书处，为参加纳米技术研究的单位提供机会和鼓励合作，每年召开一次讨论会。

我国近几年来在M/N技术研究中也有一些进展，如东南大学微电子中心研制了转子直径分别为 $160\mu\text{m}$ 和 $140\mu\text{m}$ 的静电和准静电硅微马达，华南理工大学研制了电致伸缩的多晶体、微位移执行器，中科院上海冶金所研制了 $\Phi 400\times 5\mu\text{m}$ 的多晶硅微齿轮，浙江大学研制了硅一体化结构的加速度传感器和双岛结构压力传感器，清华大学微电子研究所研究了微型多晶硅梁开关结构制造工艺，能用于微触觉开关阵列和微静电开关等器件上。清华大学精密仪器及机械学系在微动执行器、微光学器件、超精密加工和纳米级测量技术方面都有进展。

本文拟就M/N技术的几个重要方面，包括微型机械、微细加工、纳米技术等的发展情况作一综述。

## 二、微型机械：

微型机械的历史要从80年代说起，那时美国明尼苏达州哈耐威尔物理科学中心用硅集成块做成小的压力传感器，其中小薄片在压力变化时会略为弯曲。87年加州大学和贝尔实验室做出两台能在空气喷流推动下转动的微小齿轮。88年加州大学制成一只直径为 $60\mu\text{m}$ 的微型电机，它运转20秒就烧毁了。90年MIT把微型电机寿命从3分钟提高到一星期以上，微型电机如图1所示。而威斯康星大学90年12月制造了直径为 $100\mu\text{m}$ 的金属齿轮。关于微

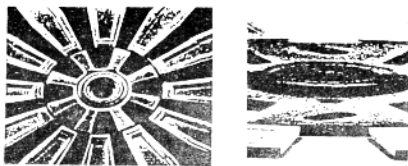


图1 静电电机的扫描电视图，两个转子的直径都约为 $50\mu\text{m}$



型机械的报导、会议和杂志日益增多,从1987年起已召开了:四次微型传感器和致动器(Micro Sensors and Actuators)会议,两次微米级和毫微米工程(Micro/Nano Engg.)会议,多次微型机械电子系统(Micro Electro-mechanical System)会议,以及纳米科学技术(Nano Science and Technology)会议。专题杂志有: Sensors and Actuators, Journal of Micromechanics and Microengineering, Nanotechnology, Nanobiology等。

广义机械系统的尺寸范围非常大,超过35个量级,如图2所示。其中在毫米级以下、原子以上,属于微小王国的有7级。硅微加工在微米到毫米之间,传统微加工要大一级。生命的最小尺寸是细胞,约 $10\mu\text{m}$ 。机械的最小尺寸也许是原子,为 $\text{\AA}$ 级。日本东京工业大学林辉教授把机构的尺寸划分为:小型机械(minimechanism), $1\sim 100\text{mm}$ ;微型机构(micromechanism), $10\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ ;超微型机构(submicromechanism), $10\text{nm}\sim 10\mu\text{m}$ 。日本学者

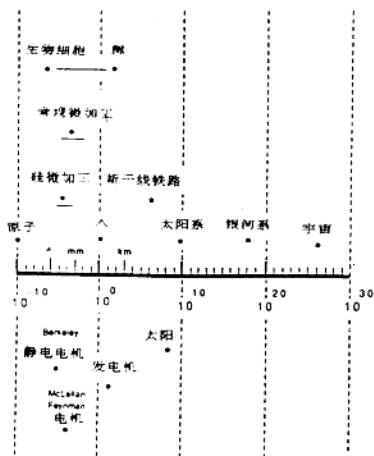


图2 从原子到宇宙的机械物体尺寸范围(对数坐标)

认为,美国对技术前沿的微型系统研究比较积极;日本则把小型和微型系统结合起来的混合系统作为主要发展目标,因为它比纯微型系统更接近实用。目前的微型机械主要有:

1. 微型传感器。如微型加速度计(ADXL-50加速度计,量程 $\pm 50\text{g}$ ,精度为5%,尺寸为 $500\times 625\mu\text{m}$ ,工作频率 $\text{DC}\sim 1\text{KHz}$ )、微型压力计、微型化学传感器(用于监控汽车发动机的燃料注入系统)、微型血压传感器(可放在心脏内)、超微型诊断器(是一种电子生物化学传感器,宽度可小到 $0.5\text{mm}$ ,可在血管内移动、采集医学数据)、微型血流量计(核心为带有四只转轮的叶片,宽为 $300\mu\text{m}$ )等。

现在已能把传感元件和电子线路集成在一块硅片上,称为灵巧传感器或集成灵巧传感

器(Integrated Smart Sensor)。在辐射、力学、热、电、磁和化学等六个信号域中, 硅材料具有的物理和化学性能如表一所示:

表一

信号域	硅材料本身产生的效应	调制效应
辐射	光电压效应	光电导效应, 光电容效应, 光电效应
力学	—	力敏电阻效应, 侧向光电压效应, 侧向光电效应
热	Seebeck、Nernst效应	热敏电阻效应, 热电偶效应
磁	—	Hall效应, Suhl效应, Nernst效应
化学	电池效应	化学键效应, 化学电介质效应, 化学场效应

其中, Seebeck指温差电动势效应, Nernst指加热金属在磁场中产生电位差效应, Hall指霍尔效应, Suhl指苏尔效应。

表二

驱动原理	运动范围	旋转运动	速度	力	与IC相容性	电压 (v)	备注
静电式	大	○	中-高	小	●	5-100	已做成60μ直径电机
压电式(叠层)	小	×	高	大	△	10-100	有蠕变和磁滞问题
压电式(双压电晶体)	中	×	中	中	○	5	蠕变和磁滞大
超声电机	大	○	低	大	△	5	尺寸受波长限制
形状记忆合金	大	△	低	中	△	加热式	散热问题
热膨胀	小	×	中	大	○	加热式	散热问题
双金属	中	×	低-中	小	○	加热式	散热问题
超导	大	○	中-高	小	△	低	悬浮无摩擦, 需致冷

2, 微型致动器。如静电驱动的微型电动机(可用于控制计算机和通讯系统)、微型泵(90年德国慕尼黑林费恩霍尔研究所研制, 其尺寸为 $5 \times 5 \times 0.7 \text{mm}^3$ , 每秒传输液体是本身体积的150倍)。表二给出几种微型致动器及其特性。在微运动系统中关键的问题是摩擦。

3, 微型机械元件。如微型金属齿轮( $\Phi 100 \mu\text{m}$ ,  $\Phi 400 \times 50 \mu\text{m}$ ), 用于灵敏化学分析仪器的复杂微细管道和阀门系统。

4, 微型机器。微型机械的意义不仅在于尺寸微型化, 还在于发展功能集成的新一代智能机械。美国把微型机械集成系统称为MEMS(Micro Electro Mechanical System)。日

本通产省计划在未来10年内研制一种 $100\mu\text{m}$ 长的微型机器人，能执行诊断和手术操作任务，如直接打通血栓，把药物沿血管送入病灶，杀死癌细胞，修复受损害的人体组织。威斯康星大学谈到可能用微手术刀，进行精巧的外科手术。用微电机驱动照相机快门，以得到非常精确的照片。而小型机器人已经问世，如80年日本东京大学就举行过“微型机器人展”，限制尺寸小于 $10\times 10\times 10\text{mm}^3$ ，攀登 $\Phi 0.55\times 3.3\text{m}$ 的山，参展17台中有5台成功。

MEMS或IMMS的研究涉及许多传统的工程领域，如表三所示。

表三

类别	硬 件				系 统			
	材 料	设 计	加 工	元 件	传 输	控 制	可 靠 性	优 化
内 容	功 结 摩 数 能 构 擦 据 库	CAD 热 液 结 电 体 体 构 磁	机 IC 械 加 工	机 电 致 能 械 电 动 源 器 器 件	通 能 力 迅 源	非 分 线 散 性	衰 质 贮 变 量 备 破 控 坏 制 环 模 境 型	优 化
领 域	MS MS MS CS 材 机 计 料 械 算 科 工 机 学 程 器 学 学 学	CS ME ME ME EE 电 力 电 子 工 程	ME EE	ME EE EE EE NE CE 化 学 工 程	MS SE SE	CE CE 控 制 工 程	EE EE NE 系 统 工 程	SE

微型机械的材料是一个重要问题。硅材料做成的部件很脆，具有很大内应力，容易断裂，要采取特殊方法消除这种内应力，或使用新的材料。如威斯康星大学麦迪逊分校用镍代硅制造齿轮，用的是X光平板印刷术的刻蚀工艺。

### 三、微细加工：

微细加工是微型技术的关键之一，主要有三类：

1，超精密机械加工。传统的机械加工可扩展到加工微小零件。如单点金刚石加工、镀膜和铸造。超精密机械加工精度甚至可达数十到数百毫微米级的超镜面，但当零件大小（如 $d < 0.1\text{mm}$ ），加工就有困难。

2，半导体的刻蚀和沉积技术[2]。这种加工方法可制造十微米到几分之一毫米大小的器件。

异向性刻蚀方法是50年代发现的。对硅晶体的不同平面，酸溶液浸蚀的速度是不同的，这取决于晶体的方向。把特定的晶体结构暴露一部分去酸蚀，就可产生壁的角度很精密的空腔。这种方法（又称Bulk Micromachining）用于加工大而简单结构，如医学和自动化用压力传感器，其薄膜仅 $10\mu\text{m}$ 厚，其中有一块测试质量，器件上还沉积了有力敏电阻的

惠斯登电桥，这压力传感器对温度敏感，需要复杂的外部信号处理，以使传感器输出信号放大和线性化。这种加工方法的尺寸受晶体平面和基片厚度影响。

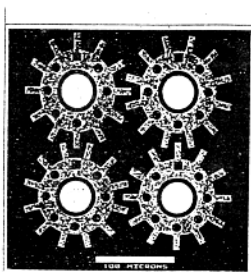


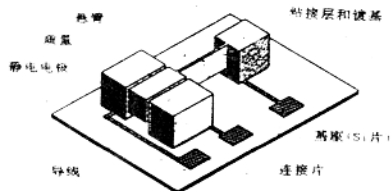
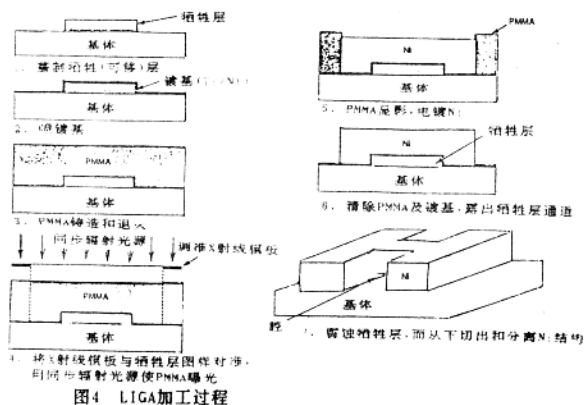
图3 第一个产品 Sandia国家实验室表面微细加工方法制造的多晶硅齿轮  
直径约 $100\mu\text{m}$ ，厚 $1\mu\text{m}$ ，重 $0.02$ 微克，用于核能联系装置标志。

表面微细加工方法 (Surface Micromachining) 可用于加工较复杂和精密的结构。先沉积，然后浸蚀，可形成多层薄膜的硅和酸蚀氧化硅层。可制成细梁、质量块和其它结构，尺寸可小到 $1\sim 2\mu\text{m}$ ，是前面加工方法的五分之一，例如图3。表面微细加工方法使用了 IC 技术，可以同时把信号调节电路做在同一芯片上，实现集成化。如电容传感器和谐振结构传感器都可与调节电路集成一体。这种加工方法的尺寸上受限膜厚的影响。

还有一种SFB(Silicon Fusion Bonding)方法，是较新的三维加工方法。使多层分子级硅片粘在一起加工，其中一片或几片可以是预先部分加工过的。这样整体结构中便有隐藏的通道或空腔。由于是相同的硅片叠合，几部分有相同的机械、化学、电子和热力学特性。SFB 技术能提供更小的传感器尺寸，更高运行温度和全硅传感器结构。

### 3. LIGA加工方法[3]

1987年西德卡尔斯鲁核研究中心的微型机构研究所 (The Institute für Mikrostrukturechnik of the Karlsruhe Nuclear Research Center) 研究出一种LIGA加工方法。德文为Lithografie, Galvanoformung, Abformung，即辐射光刻、电铸和模铸工艺的缩写。它是短波长 $\times$ 射线( $\lambda=0.1\sim 1\text{nm}$ )深刻蚀(可深达几毫米)、电铸成型和注膜的结合，可加工多种金属材料、塑料、陶瓷、玻璃等非金属材料或这些材料的结合物，是一种高宽深比(如宽度可小于 $1\mu\text{m}$ ，深度可达数百 $\mu\text{m}$ )的三维加工。LIGA工艺需要较强的同步辐射光源，把 $\times$ 射线通过带有模板图形的掩膜，照到粘在金属基板上的异丁烯酸甲酯(PMMA，即Poly Methyl Methacrylate)上，这是一种象有机玻璃似的材料。 $\times$ 射线就把掩膜的图形传到PMMA中。短波长 $\times$ 光几乎没有畸变，可实现精密深刻蚀(如 $400\mu\text{m}$ 高，宽度变化仅 $0.1\mu\text{m}$ )。被 $\times$ 射线曝光了的物质可用化学药品溶解掉，再用电铸法把镍或金那样的材料铸入这模子或空腔中。



电容器间隙小于 $4\mu\text{m}$

传感器、微执行器、光电互联及化学、医学和生物工程中。

#### 四、毫微米技术

毫微米技术又称为纳米技术，这一长度为通常物质原子间距离的3倍。毫微米技术是指尺寸小到原子大小的物质材料的形成、运用和测量技术。毫微米技术的前景是很好的，可以制造速度快的原子开关，容量大的分子逻辑器件，大大提高芯片集成度，做出亿万次计算机；可以直接用原子、分子或分子团制造新的纯净的信息处理材料，如光芯片和生物芯片，做出智能计算机；可以在原子和分子量级上制造材料和装配机器；可以促进基因工程的进展。91年IBM公司做出氦原子开关，其开关速度为0.05纳秒。这项发明有可能使美国国会图书馆的全部藏书存储在一个直径为0.3m的硅片上。

扫描隧道显微镜 (STM) 是在原子级分辨率水平上定量研究物质表面结构的仪器。STM 是非接触测量, 探针是一个只有几个原子粗细的细针, 它与被测表面保持  $1\text{nm}$  左右的距离。在探针与被测表面间加上微小恒定电压, 形成隧道电流。它随针尖与被测表面间的间隙变化, 而且非常敏感。当针尖沿样品表面扫描时, 用伺服控制系统使压电晶体驱动器在垂直方向运动以作高度补偿, 使电流保持恒定。压电晶体在三个方向的信号输出就得到原子级尺寸的表面形貌图。目前 STM 垂直分辨率为  $0.01\text{nm}$ , 横向分辨率为  $0.5\text{nm}$ , STM 要求被测表面是导体。90年4月美国IBM公司用STM操纵氩原子, 在镍板上拼出IBM字样。91年7月该公司又将单个或成团的硅原子移动到预定的位置。最早的STM是80年代初康乃尔大学国家纳米装配工厂研制的, 整个系统能摆满一张桌子。88年斯坦福大学把整套STM安置在  $4\text{mm}$  直径的硅集成块上。现在康乃尔小组又把它全放在边长为  $40\mu\text{m}$  的硅片中, 这台微型STM针尖是一根双头神经, 一个尖端振动, 一个尖端静止, 针尖重为千分之一微克。STM 不但能测原子, 还能测加速度、光和声。英国剑桥大学也研制出STM。

在半导体和光盘应用中, 已提出测量表面粗细结构要求, 可以用STM。现在还有一种 OSTM (STM with an Optical Microscope), 把光学显微镜和STM 结合起来, 如图6所示。先用光学快对准, 再用STM。在针扫描时, 光学显微镜继续观察着样品和针影。图中还给出OSTM的测量结果。图6-2中光盘上蒸发了  $40\text{nm}$  厚的金膜, 扫描范围是  $4.5 \times 4.5\mu\text{m}^2$  的方形面积。OSTM可以清楚地测量宽约  $1\mu\text{m}$  的凹坑, 金分子团和污染。OSTM可作附加垂直测量图6-3是STM的测量结果。图6-4中在硅基片上蒸发  $30\text{nm}$  厚的金膜, 扫描范围  $0.2 \times 0.2\mu\text{m}^2$ , OSTM观察到  $10\text{nm}$  直径的金分子团。STM 测量用铂铱针尖。

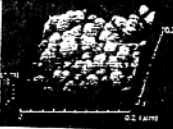
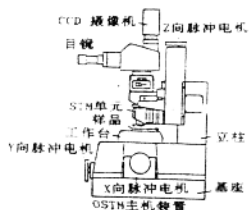


图6-4 OSTM薄金膜图像



图6-2 OSTM光盘图像



图6-3 SEM光盘图像

图6 OSTM及其图象

英国有一些从事精密工程的单位, 如国家物理实验室 (NPL), 克兰菲尔德精密工程研究所 (CUPE), 瓦威克大学的精密工程研究中心和RTH 仪器公司等, 取得一些进展[4]:

1, 关键部件, 如空气静压轴承、气浮导轨、超精密激光测头、摩擦驱动系统、刀具定位系统、基于压电晶体的超精位移机构。

2, 毫微米加工技术, 如电子束纳米蚀刻法可用于刻槽、钻孔、切削和制造表面形貌 CUPE研制的超精密金刚石车床采用超精密空气轴承, 高精度摩擦伺服系统, 用分辨率为 1nm 的压电式定位刀架, 用三个压力传感器测出切削力, 并反馈控制调整切削力, 用在线激光干涉系统测出刀具的安装位置与磨损。这台机床加工铝零件的表面粗糙度  $R_a < 3\text{nm}$ , CUPE 的高刚度超精密坐标金刚石磨床可用于脆性材料的纳米磨削。

3, 超精密测量技术: RTH 公司的 Talysurf 73-39 超精密圆度仪用了误差分离技术, 测量精度达到 2.5nm, NPL 的超光滑表面粗糙度测量的干涉偏振系统的垂直灵敏度为 0.1nm, 横向分辨率为 1nm, 垂直方向重复性为 0.1nm。CUPE 的主轴误差分析仪 Talyspin 采用电容传感器, 能实时测得回转主轴的五个敏感方向信号, 分辨率小于 10nm 和 0.02rad/s。

清华大学精密仪器与机械学系在最近几年研制出一批微米和毫微米加工、测量设备并有一些应用。如分辨率为 0.01  $\mu\text{m}$  的微动工作台、精密研抛机加工磁盘胶面的粗糙度  $R_a = 0.008 \sim 0.014 \mu\text{m}$ , 磁头飞行姿态测量的圆周和径向分辨力为 30nm 和 3nm, 测量精度为 2nm 的膜厚测量仪, 表面形貌非接触测量仪的分辨力为 1nm(V) 和 0.4nm(H), 纳米级圆度测量系统精度达 2.5nm, 研制了微光学器件和基因枪等。实验室有一批毫微米级振动测量、直线测量、表面形貌测量、微定位仪器和扫描电子显微镜。

## 五、结束语:

M/N 技术对未来科技发展的重要性已为人们认识了, 关键在于材料、工艺和测量, 不断促进其应用是 M/N 技术的生命。对于科学技术的新发现, 如人们能控制原子或分子的排列, 其影响是巨大的。另一个要强调的是工程实现, 有了强大的工程基础和手段, 新的科学发现才是有意义的。

## 参考文献:

1. 美国国家关键技术委员会报告, 1991.3
2. Henry M. Morris, Microsensors Enhance Process Variable Transmitters Abilities, Control Engg., Oct. 1991.
3. Mini Gears Show Their Mettle, Design Engg., June 1991.
4. プレス技术, 1989, vol.27, No.13
5. Fumic Hatashina, Integrated Micro-Motion Systems, 1990
6. Alexander Wolfe, Micromachining moves into high gear, Mech. Engg., 9. 1990
7. C. Burbaum, J. Mohr and P. Bley, Fabrication of Capacitive Acceleration Sensors by LIGA Technique, Sensors and Actuators, A. 25-27, 1991
8. Shuichi ITO, Simultaneous Observation on Fine Processing Surfaces by an Integrated Scanning Tunneling Microscope System with an Optical Microscope, Int. J. Japan. Soc. Prec. Engg., Vol 25, No. 2 (June 1991)

# 国外摩擦学设计的进展与现状

温诗铸 黄昌华

(100084 清华大学摩擦学国家重点实验室)

## 0 引 言

何谓摩擦学设计?我们能否给它这样下个定义:摩擦学设计就是利用摩擦学研究成果,对某一个特定对象通过合理的设计方法使其获得良好的摩擦学性能的设计过程。这一定义是否恰当,请同行们提出意见。但,我想无论用何种修辞来描述,摩擦学设计至少应包含下列几个含义:

- 1) 它是以现有摩擦学研究成果为基础的;
- 2) 设计是针对某一特定对象而言的;
- 3) 它的目标是使其对象获得良好的摩擦学性能;
- 4) 它还必须有自身的设计方法以便将摩擦学研究成果应用于设计活动中。

摩擦学设计与摩擦学研究的关系是紧密相联的。摩擦学研究的成果最终为摩擦学设计提供理论基础和指导,在摩擦学设计过程中也常常会遇到新的问题,对摩擦学研究提出新的挑战。

现在回头来看会议主持人给我出的这次报告的题目:国外摩擦学设计的进展与现状。这个题目很大,包含的内容很多。今天我想就其中的几个主要问题提出来与大家共同商讨。首先是摩擦学设计的工业应用背景,它是摩擦学学科存在的基础,是摩擦学设计直接为之服务的对象;其二是机械零件的摩擦学设计,它是摩擦学设计的基本内容;最后讨论一下现代摩擦学设计方法学。

## 1 摩擦学设计的工业应用背景

在此由于时间有限,我仅就几个典型工业中的摩擦学设计问题来谈一谈。顺便说一句,在工业中摩擦学的定义不限于传统的摩擦学定义,即:“关于摩擦和磨损的科学研究”。在工业实践中的摩擦学研究不仅包含接触本身的摩擦性能,还包括热分析以及零件的应力和寿命分析。

### 1.1 航空航天工业

在航空发动机中最突出的摩擦学问题是轴承。在压缩机中摩擦刀刃的密封也很关键,其密封件的过量磨损将严重影响发动机的性能。

在直升机和涡轮螺旋桨发动机中都采用了齿轮箱,但它们的使用要求却是不同的。对直升机而言,齿轮箱是其主要的传动执行部件,需要非常高的传动比;在涡轮螺旋桨发动机中,效率是最重要的,尤其是对为下世纪准备的特大型发动机更是如此。

就目前而言,在大多数齿轮箱和轴承设计时,摩擦学设计是第二位的,这部分原因是环境和润滑剂的限制,但主要的原因是人们对摩擦学失效的认识不及结构失效深入和系统。而在实际航空航天工业中由于零件的摩擦学设计不当而导致的失效也是常见的。

### 1.2 核工业

基于操作的要求,环境的考虑,在核工业中通常的摩擦学设计方法在此不适应,因此必须



建立一套设计方案,然后给予评价,在有些情况下还需重新设计和修正以适应操作,维修,控制事故和处理不确定事件的要求。在大多数核反应堆中润滑剂是禁止使用的,因此在设计需要对无润滑磨损给予充分重视。磨损研究的基本公式采用简化的“Archardian”近似公式,即:

$$\text{磨损量} = K \cdot L \cdot S$$

式中  $K$  为特定磨损速率,  
 $L$  为表面间的作用载荷,  
 $S$  为滑动距离。

但在具体的工业设计中上述三个参量很难确定,需根据具体对象做深入的分析,综合多方面专家的意见才能决定。在核工业中摩擦学设计的重点是安全,可靠。

### 1.3 信息处理

现代工业的信息处理过程主要是磁记录的读写过程。磁记录过程是通过磁头与介质之间的相对运动完成的。在稳定的操作条件下,磁头与介质之间的相对运动将产生能承担一定载荷的空气膜。在机器启动和制动过程中,磁头与介质之间将不可避免地产生物理接触。在现代计算机的硬盘中磁头与介质之间的间隙为  $0.1 \sim 0.4 \mu\text{m}$ ,在软盘设备中间隙更小(通常小于  $0.4 \mu\text{m}$ ),这就使物理接触会经常发生。随着越来越高的磁记录密度的需要,相对运动表面将要求尽可能光滑,相对运动间隙也要尽可能小,这必将导致运动表面摩擦,温度、磨损、划伤的可能性增加。由于相对运动表面上即使是在微观范围内的失效都将导致数据的丢失,因此在整个磁记录器的寿命范围内运动表面的高可靠度变得十分重要。随着磁记录工业的发展,在磁记录系统中摩擦学机理研究也将变得越来越重要。

### 1.4 电子工业

这里我介绍一下一个由六十多个国家组成的电子工业集团 Philips 在摩擦学设计研究工作中所做的主要工作,我们即可了解电子工业中摩擦学设计的概况。Philips 摩擦学设计研究工作主要集中在以下几个方面:

#### (1) 全膜润滑

全膜润滑有三个研究方向,一是压力空气轴承和油轴承,这方面研究集中在动态性能和结构优化方面;二是螺旋槽润滑轴承;三是涂层轴承。

#### (2) 混合和边界润滑

在这一领域中的许多问题是通过功能试验的方法来解决。目前的重要课题是在电子精密机械加工中的应用,如精密加工过程,机器动力学,测量和控制以及它们之间的相互作用。

#### (3) 干摩擦系统

该领域研究主要有以下几个内容:材料特性,接触力学,涂层和磁记录。这些研究具有双重意义,一是基于理论研究的自然需要,二是技术发展的需要。

该公司计划在如下多方面继续摩擦学设计研究的努力。

a. 研制一个通用的、可靠的、便于使用的设计全膜润滑轴承的软件包,该软件包将达到象机械工程计算中的有限元程序包一样的适应性。

b. 轴承性能的动力学分析。

c. 涂层失效的机理分析。

d. 新型摩擦学材料的研制及其特性研究。

e. 对边界润滑的研究,以便尽快将研究成果应用于工程实践中。

f. “零”磨损条件分析。