

普通高等教育“十三五”规划教材

微纳机电系统力学

Mechanics of Micro/Nano Electrical
Mechanical Systems

高世桥 金磊 刘海鹏 牛少华 ◎ 主编

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

非
外
借

普通高等教育“十三五”规划教材

微纳机电系统力学

Mechanics of Micro/Nano Electrical
Mechanical Systems

高世桥 金磊 刘海鹏 牛少华 © 主编



内 容 简 介

本教材在简述微纳机电系统技术发展的基础上,从物理基本力入手,针对微纳机电系统的力学环境,先后介绍了静电力、电磁力、范德瓦尔斯力、卡西米尔力、毛细力在微纳尺度下的作用规律。针对微纳系统结构,介绍了电容静电力、布朗力、阻尼力对微纳结构系统的作用特性和影响规律。在微纳结构材料的尺度效应分析基础上,分别以微机械振动陀螺系统、微振动俘能器系统为典型案例介绍了受力分析方法、系统建模方法以及机电耦合的动力学分析求解方法。此外,针对纳米尺度的结构,在介绍碳纳米管结构、原理及应用的基础上,介绍了碳纳米管的力学相关特性及分析方法。

本教材适用于普通高等院校机电、力学类相关专业的本科生及研究生使用。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

微纳机电系统力学 / 高世桥等主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2018.9
ISBN 978-7-5682-6366-5

I. ①微… II. ①高… III. ①微机电系统-电动力学 IV. ①O442

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 223139 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米×1092 毫米 1/16

印 张 / 13

字 数 / 301 千字

版 次 / 2018 年 9 月第 1 版 2018 年 9 月第 1 次印刷

定 价 / 32.00 元

责任编辑 / 陈莉华

文案编辑 / 陈莉华

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

微米世界十分奇妙，头发丝的尺度上可以加工制作出微齿轮、微马达、微型泵。纳米世界更是富含玄机，碳纳米管、石墨烯的结构给新材料领域带来无限的商机。现如今，微电子技术的进步日新月异，微机电系统技术的发展突飞猛进，纳机电系统技术的研究也如火如荼。尺度的缩进已接近了分子的尺度。由于可动的微纳米结构和系统已远远超出了肉眼可辨识的范围，给系统规律的认识带来了一系列的亟待研究的问题。从力学分析和系统动态特性认识的角度，传统机械力的作用越来越微弱，取而代之的是，分子间力的作用越来越明显，表面力的作用越来越可观，静电力、电磁力的作用越来越显著。从系统综合性能分析的角度，纯机械的问题越来越少，机电结合的程度越来越紧密，机电耦合的问题越来越突出。

为了全方位认识微纳机电系统的结构组成和工作原理，也为了深入了解微纳机电系统的力学分析方法，本教材从物理基本力入手，针对微纳机电系统的力学环境，先后介绍了静电力、电磁力、范德瓦尔斯力、卡西米尔力、毛细力、布朗力、阻尼力在微纳尺度下的作用规律与特性。在材料微尺度效应分析基础上，分别以微机械陀螺系统、微振动俘能器系统为典型案例介绍了受力分析方法、系统建模方法以及机电耦合的动力学分析求解方法。此外，针对纳米尺度的结构，介绍了碳纳米管的力学相关特性及分析方法。

“微机电系统力学”作为本科生选修课程已引起同学们的广泛关注和极大兴趣，并已连续开课多年。由于没有专门教材，一直以我们撰写的专著作为基本素材。但因论述的角度不同，总感到有些内容和方法作为教材欠妥。因此，专门编写了本教材。期望能对教授者及受教者都有些帮助。

作者多年来一直从事微机电系统的研究，包括微机械陀螺、微加速度传感器、微惯性测量系统、微振动俘能器等。积累了一定的经验和认识，掌握了一些前沿的动态。但该领域的应用范围太广，发展速度也太快，很难对各方面的进展都有

所了解。因此，教材中出现的不足之处在所难免，有些论述也会挂一漏万。敬请读者不吝赐教和批评指正。

参与本教材编写的除作者外，尹作宗博士也提供了部分的初稿，高春晖博士参与了有关课程的讨论和资料的整理，李泽章博士参与了相关教改的实施，在此一并表示感谢。撰写本教材参考了大量的文献，除书中所列的以外，还包括所引专著中的大量文献。在此对文献的作者表示衷心的感谢。

感谢北京理工大学出版社对本教材的全面审定和出版，感谢林杰社长、陈莉华与刘派编辑的支持和帮助。

目 录

CONTENTS

第 1 章 微纳机电系统 MEMS/NEMS 及其物理力学	001
1.1 微纳机电系统 MEMS/NEMS	001
1.2 微机电系统的材料和微加工技术	005
1.3 物质的构成及物理基本力	008
1.4 微纳机电系统中的物理力学	013
第 2 章 电荷及电偶极子的静电力	015
2.1 库仑定律	015
2.2 电场、电场强度、电势	016
2.3 电偶极子	019
2.3.1 电偶极子的电场	019
2.3.2 电偶极子电场中的电势	020
2.4 电多极子与电势的多极展开	021
2.4.1 单极子项	021
2.4.2 偶极子项	022
2.4.3 四极子项	022
第 3 章 电磁力	024
3.1 洛伦兹力	024
3.1.1 带电粒子在均匀磁场中的运动	024
3.1.2 带电粒子在非均匀磁场中的运动	026
3.2 安培力	027
3.2.1 安培力的定义	027
3.2.2 安培力的微观解释	028
3.2.3 载流导线在磁场中所受到的磁力	028
3.2.4 载流线圈在磁场中所受到的磁力矩	029
3.2.5 平行载流导线间的相互作用力	031
3.3 电磁感应定律	032
3.3.1 电动势	032
3.3.2 法拉第电磁感应定律	033
3.3.3 动生电动势和感生电动势	034

第 4 章 范德瓦尔斯力	037
4.1 偶极子产生的电场	038
4.2 离子与电场间的相互作用能及作用力	039
4.3 偶极—偶极相互作用能	040
4.4 角平均的偶极相互作用	041
4.5 偶极—诱导偶极相互作用	042
4.6 London—范德瓦尔斯力（色散力）	043
4.7 极性分子间总的范德瓦尔斯相互作用	045
4.8 物体间的范德瓦尔斯力	047
第 5 章 卡西米尔力	048
5.1 卡西米尔力提出的背景	048
5.1.1 “零点能量”及卡西米尔力的探索	048
5.1.2 卡西米尔效应的进一步研究	049
5.2 卡西米尔力	050
5.2.1 卡西米尔力	050
5.2.2 卡西米尔效应	050
5.2.3 卡西米尔力的量子力学阐释	051
5.3 金属板间的卡西米尔力及做功	052
5.3.1 两平行导电金属板之间的卡西米尔力	052
5.3.2 两平行移动的平行平面的卡西米尔力	053
5.3.3 平板间距离变化时卡西米尔力做功	053
5.4 卡西米尔力对微加速度计性能的影响	054
第 6 章 毛细力	057
6.1 毛细现象	057
6.2 基本概念及毛细原理	057
6.2.1 基本概念	057
6.2.2 毛细原理	059
6.3 毛细模型	059
6.3.1 表面张力	059
6.3.2 接触角与润湿现象	061
6.3.3 拉普拉斯方程	063
6.4 毛细力在平行板间的作用	066
6.4.1 液桥毛细力理论	067
6.4.2 两板间的黏附力模型	067
第 7 章 微结构静电场分析	070
7.1 无限大平板模型	071
7.2 考虑边缘效应模型	072
7.2.1 基于分离变量法得到的级数解	072
7.2.2 基于保角变换计算式	072

7.2.3 考虑极板厚度时的边缘效应	073
7.2.4 边缘效应模型对比与分析	074
7.3 非平行平板电容器的电容计算	075
7.4 梳状结构电容的拐角效应	077
第 8 章 布朗力与噪声	084
8.1 随机过程的统计分析	084
8.2 能量均分原理	086
8.3 布朗运动现象与噪声 (布朗力)	087
8.4 硅微陀螺机械热噪声	091
8.5 电容加速度计热噪声	092
8.6 电子热噪声	093
8.7 PN 结的散粒噪声	096
第 9 章 阻尼力	099
9.1 气体微流动的基本概念及流区分类	099
9.2 流体动力学基本方程及边界条件	101
9.2.1 应力应变张量	101
9.2.2 流体动力学基本方程	109
9.2.3 边界条件	110
9.3 压膜阻尼	113
9.3.1 雷诺方程	113
9.3.2 气体压膜阻尼的求解	116
9.3.3 几种常见结构的阻尼力解	117
9.3.4 气体压膜阻尼的挤压效应	119
9.3.5 其他因素对压膜阻尼力的影响	120
9.4 滑膜阻尼	124
9.4.1 滑膜阻尼基本方程	124
9.4.2 圆柱质量块结构的气体阻尼	126
9.4.3 无限大、薄多孔板间气体压膜阻尼分析	129
第 10 章 微尺度效应	132
10.1 圆柱颗粒的分析	134
10.2 微结构力学基本方程	136
10.2.1 平衡方程	136
10.2.2 本构方程	137
10.3 微梁弯曲	138
第 11 章 微机械谐振陀螺的动力学特性	142
11.1 陀螺哥氏效应	142
11.2 微机械陀螺的动力学方程	144
11.3 微机械梳齿式陀螺的静电驱动力	147
11.4 动力学方程求解及讨论	148

11.4.1	常值角速度下检测系统位移解	148
11.4.2	谐变角速度下检测系统的位移解	151
11.4.3	一般变角速度下检测系统的位移解	151
11.5	多质量块音叉式微陀螺的动力学方程	152
11.5.1	双质量块音叉式微陀螺的动力学方程	152
11.5.2	四质量块音叉式微陀螺的动力学方程	154
第 12 章	微振动俘能器动力学	157
12.1	压电俘能系统的基本方程	158
12.1.1	压电材料本构方程	158
12.1.2	柱体压电块振动压电系统的基本方程	159
12.1.3	附着梁上的压电层振动压电系统的基本方程	162
12.2	悬臂梁式压电俘能系统	168
12.2.1	准静态振动模型(单自由度 SDOF 模型)	169
12.2.2	动态振动模型	170
12.3	电极的布置	175
12.3.1	在上下表面布满导体作为两电极	175
12.3.2	在上表面间隔开布置两电极	177
12.4	振动梁式静电俘能系统的基本方程	178
第 13 章	碳纳米管力学	183
13.1	碳纳米管结构、性能及应用	183
13.1.1	碳纳米管的结构	183
13.1.2	碳纳米管的特性及应用	186
13.2	碳纳米管结构力学	190
13.2.1	连续介质力学方法	190
13.2.2	分子结构力学方法	192
参考文献		197

第 1 章

微纳机电系统 MEMS/NEMS 及其物理力学

1.1 微纳机电系统 MEMS/NEMS

微机电系统 (MEMS) 一词来源于美国。1987 年在美国举行的 IEEE Micro-robot Sand Tele-operators 研讨会的主题报告标题为 “Small machines, Large opportunities”, 其中首次提出了微机电系统一词, 它是 Micro-Electro-Mechanical System 一词的缩写。

微机电系统, 也叫作微电子机械系统、微系统、微机械等, 是指特征尺寸在亚微米至亚毫米量级, 整体尺寸在毫米量级的集成装置系统。微机电系统应该说是以半导体 (特别是硅) 为材料, 以 IC (集成电路) 加工技术为手段, 以固态传感器为背景发展起来的。

关于微机电系统的定义, 目前仍没有统一的确切论述。美国、日本、欧洲各国由于各自发展微机电系统的途径和技术条件不同, 所以各自的定义也不尽相同。美国一般称其为微机电系统, 日本一般称其为微机械, 欧洲各国则称其为微系统。

MCNC (美国北卡罗来纳微电子中心) 对微机电系统的定义: 微机电系统是由电子和机械元件组成的集成化微器件或微系统。它是采用与集成电路兼容的批量处理工艺制造的, 并且尺寸在微米到毫米之间。它将计算、传感与执行融合为一体, 从而改变了我们感知和控制自然界的方式。

日本微机械中心的定义: 微机械是由尺度在毫米量级的功能元件组成的系统。它能够执行复杂、细微的任务。

欧洲 NEXUS (the Network of Excellence in Multifunctional Microsystems) 的定义: 微系统是由多个微元件组成的完整系统。它能提供一种或多种特定功能, 包括微电子功能。

微机电系统属高科技电子机电器件。从加工制造角度来看, 它是在微电子制造技术 (半导体制造技术) 基础上, 融合了光刻、腐蚀、薄膜、LIGA、硅微加工、非硅微加工和精密机械加工等制作技术而发展起来的。从系统功能角度来看, 微机电系统是集微传感器、微执行器、微机械结构、微电源、信号处理和控制电路、高性能电子集成器件、接口、通信等于一体的微型器件或系统。从技术角度来看, 微机电系统涉及微电子、材料、化工、机械等诸多技术领域。从学术角度来看, 微机电系统涉及物理学、半导体、光学、电子工程、化学、材料工程、机械工程、医学、信息工程及生物工程等多种学科。

常见的微机电产品包括 MEMS 压力传感器 (图 1-1-1)、微加速度计 (图 1-1-2、图 1-1-3)、微陀螺仪 (图 1-1-4~图 1-1-6)、MEMS 麦克风、微马达、微泵、微振子、MEMS 光学传感器、MEMS 湿度传感器、MEMS 气体传感器等以及它们的集成产品。

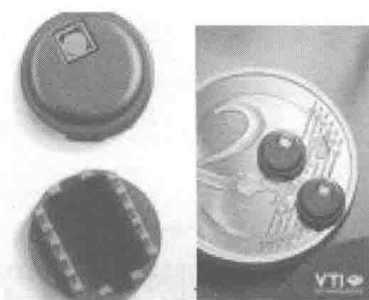


图 1-1-1 MEMS 压力传感器

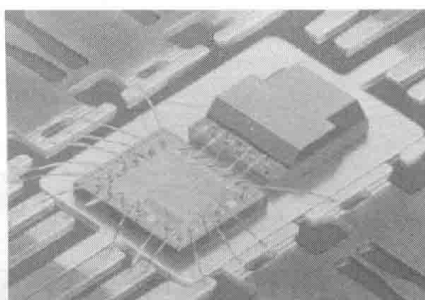


图 1-1-2 微加速度传感器

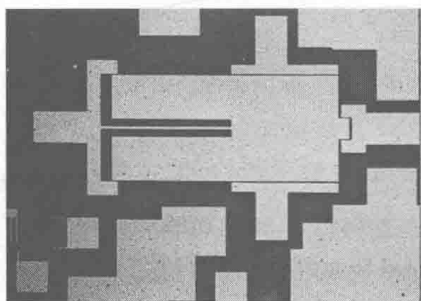


图 1-1-3 电容式微加速度计

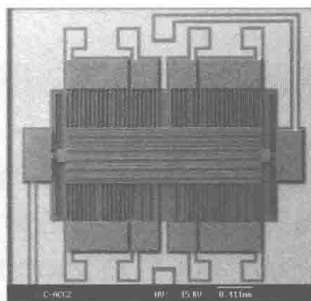


图 1-1-4 微陀螺仪样机

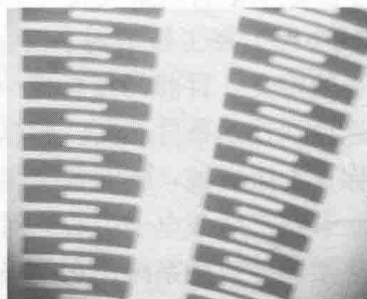
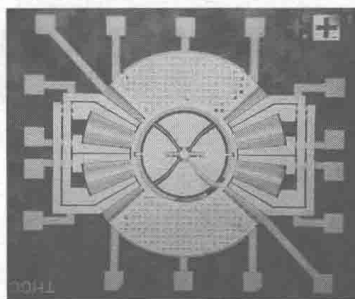
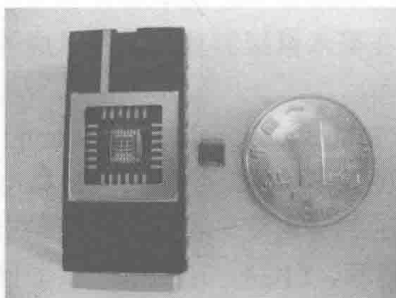
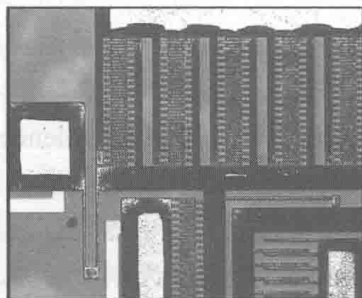


图 1-1-5 振动环式微陀螺仪



(a)



(b)

图 1-1-6 梳齿式微陀螺仪

(a) 微陀螺仪与一角硬币的尺寸对比；(b) 微陀螺仪的驱动检测部分

纳机电系统 (Nano-Electro Mechanical System, NEMS) 是 20 世纪末 21 世纪初提出的又一个新概念。可以这样来理解这个概念, 即 NEMS 是特征尺寸在 $1\sim 100\text{ nm}$ 、以机电结合为主要特征, 基于纳米级结构新效应的器件和系统。

从机电这一特征来讲, 可以把 NEMS 技术看成是 MEMS 技术的发展。MEMS 的特征尺寸一般在微米量级, 其大多特性还可以采用宏观尺度物理的方法来分析, 但 NEMS 的特征尺

寸达到了纳米量级, 凸显了一些新的效应, 如尺度效应、表面效应, 解释其机电耦合特性需要采用微观、介观物理的方法。与 MEMS 相比, NEMS 的工作原理及表现效应又有了许多根本性的不同。

NEMS 研发的产品方向主要包括谐振式传感器、RF 谐振器、滤波器、高密度存储器、单分子、单 DNA 检测及生化分析仪、生物电机、机械单电子器件等。

微机电系统由于体积小、质量轻、功耗低、设计思想独特、加工方法特殊, 因此, 具有许多不同于传统机电系统的特殊特性, 如微型化特性、尺度效应特性、可批量加工特性、可集成化特性、多技术融合特性、多学科交叉特性等。

1. 微型化特性

微机电系统对外界空间的要求极低, 很节省空间, 从而使整体系统结构都可实现小型化或微型化。整体系统也会十分紧凑。图 1-1-7 所示为一只虱子与 6 个用 MEMS 技术制成的齿轮, 图 1-1-8 所示为微仿昆虫飞行器, 图 1-1-9 所示为胶囊内镜, 图 1-1-10 所示为两种不同原理制成的微飞行器, 图 1-1-11 所示为智能昆虫, 图 1-1-12 所示为微型肠道机器人, 图 1-1-13 所示为日本研制的微硬盘, 图 1-1-14 所示为 MEMS 隐形眼镜。从这些系统所参照的对象可以看出, 微机电系统器件和整体尺寸该有多么微小。

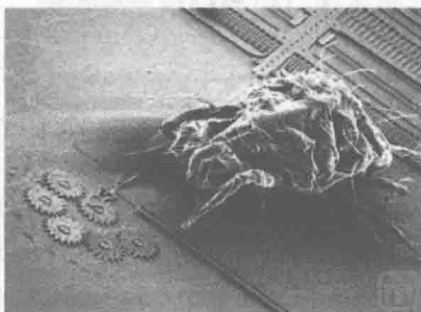


图 1-1-7 MEMS 技术制成的齿轮



图 1-1-8 微仿昆虫飞行器



图 1-1-9 胶囊内镜

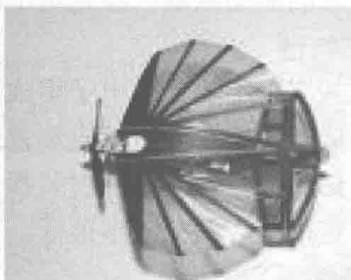
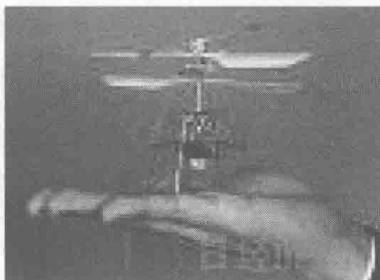


图 1-1-10 两种不同原理制成的微飞行器

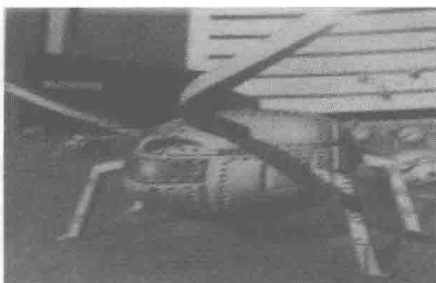


图 1-1-11 智能昆虫

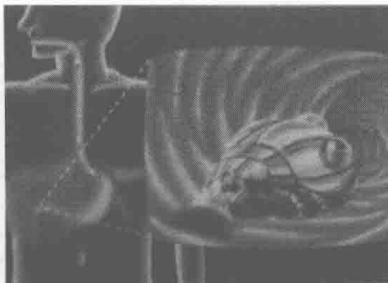


图 1-1-12 微型肠道机器人



图 1-1-13 日本研制的微硬盘

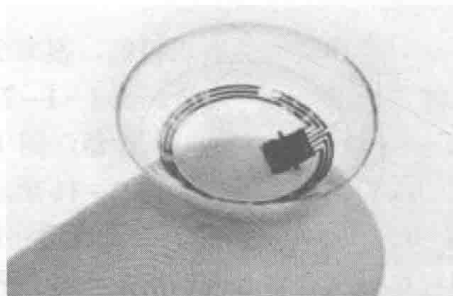


图 1-1-14 MEMS 隐形眼镜

由于微机电系统尺度很小，固有频率很高；质量很轻，惯性很小，因此抗冲击的能力很强，如同一个小昆虫，从高空掉下来不会摔死一样。

2. 尺度效应特性

虽然一般的 MEMS 器件还没有小到物理学中的微观分子尺度，却临近了物理学中的微观范畴。正是因为临近分子尺度而又不属于分子尺度，其力学特性才体现出许多特殊的方面。在这个尺度下，虽然宏观领域的一些物理理论仍然可以适用，但微观尺度下材料的许多特殊性质必须予以考虑，如固体材料的颗粒效应、气体分子的稀薄效应、液体材料的边界滑移效应等。由于宏观机电系统的某些物理规律在微机电系统中可能不再适用，因此需开展微机电系统特殊规律的研究，如微动力学、微流体力学、微热力学、微摩擦学、微光学和微结构学等方面的研究，其中许多涉及微结构力学的内容。

尺度效应是 MEMS 中许多物理现象不同于宏观现象的一个非常重要的原因。随着尺寸的减小，表面积 (L^2) 与体积 (L^3) 之比相对增大，表面效应十分明显，这将导致微机电系统的受力环境与传统机电系统完全不同，以潜水艇为例，当把潜水艇缩小到针头大小时，螺旋桨即使转动也很难使潜水艇前进，这主要是由于尺度的变化，使得潜水艇受到水的黏性阻力变得相当突出，二者的驱动原理已经完全不同。

3. 可批量加工特性

微机电系统的加工采用的是微电子集成电路的加工生产工艺。用硅微加工技术在一块硅片上可同时制造出成百上千个微型机电装置或完整的微机电系统。不仅如此，在许多加工过程中，器件加工、结构成型、布线及封装都是一步到位的，无须再进行装配和组合，其自动化程度极高，批产量很大，生产成本很低。

4. 可集成化特性

MEMS 可以把不同功能、不同敏感方向或制动方向的多个传感器或执行器集成于一体，

或形成微传感器阵列和微执行器阵列，甚至把多种功能的器件集成在一起，形成复杂的微机电系统。由于微机电系统技术采用模块化设计，因此设备运营商在增加系统容量时只需要直接增加器件/系统数量，而不需要预先计算所需要的器件/系统数量，这对于运营商来说是非常方便的。

5. 多技术融合特性

微机电系统中的“机械”不限于狭义的机械力学中的机械，它代表一切具有能量转化、传输等功能的效应，包括力、热、声、光、磁，乃至化学、生物等。采用广泛的物理、化学和生物原理进行产品设计，通过光电、光导、压阻、压电、霍尔效应等对信号进行处理变换和控制，集中了很多当今科技发展的最新成果。MEMS 本身就是科技创新的产物，其概念、机理、设计、加工等方面都不同于传统的大系统。设计方面，宏观世界的结构知识与法则，有些对 MEMS 不再适用；材料方面，除微电子工业常用的硅材料外，微传感器和微执行器还可以利用其他材料，如陶瓷和聚合物材料等。

6. 多学科交叉特性

微机电系统的设计、加工制造涉及微电子学、微机械学、微动力学、微流体学、微热力学、微摩擦学、微光学、材料学、物理学、化学及生物学等多种学科，还涉及元器件和系统的设计、制造、测试、控制、集成、能源、材料，以及与外界的联结等多方面，并集中了当今科学技术发展的许多尖端成果。

1.2 微机电系统的材料和微加工技术

微机电系统的材料与微加工技术是微机电系统技术的主要组成部分。微机电系统技术发源于微电子技术，其材料仍以硅为主，主要加工技术则借用了半导体集成电路工艺。不过，由于微机电系统的应用涉及多个领域，其材料与加工手段要比集成电路丰富得多。

微机电系统所用的材料可以分为结构材料和功能材料两种。结构材料是指具有一定机械强度，用于构造微机电系统器件结构基体的材料；功能材料是指压电材料、光敏材料等具有一定功能的材料。

目前研制生产 MEMS 的衬底材料仍然主要是硅，但也有公司使用石英玻璃、陶瓷、聚合物。硅的抗拉强度为 $7 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ，比不锈钢高 3 倍多，是高强度钢的 1.7 倍。它的努氏硬度为 $8.3 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ，比高硬度钢低一半，比不锈钢高 1/3，与石英 (SiO_2) 接近，比铬 ($9.1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$) 略小一点儿，而几乎是镍 ($5.4 \times 10^9 \text{ N/m}^2$)、铁、普通玻璃 ($5.2 \times 10^9 \text{ N/m}^2$) 的两倍。硅的弹性模量为 $1.9 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$ ，与钢、铁、不锈钢接近。

单晶硅的机械品质因数高，滞后和蠕变极小，因而机械稳定性极好。多晶硅是由许多排列和取向无序的单晶颗粒构成的，它一般通过薄膜工艺制作在衬底上，机械性能与单晶硅相近，但性能受工艺影响较大。硅的导热性较好，硅材料还有多种传感特性。因此，硅是一种十分优良的微机电系统结构材料。

功能材料是一类有能量变换能力的材料，可以实现敏感和制动 (actuation, 也称执行) 功能，可应用在执行器中。各种压电材料、光敏材料、形状记忆合金、磁致伸缩材料、电流变体、气敏和生物敏等多种材料也是目前微机电系统所使用的重要功能材料。

微机械加工是制作微机电系统的工艺基础，如果没有相应的工艺手段，微机电系统的实

现就只能是纸上谈兵。因此在微机电系统设计中，需要首先考虑微加工工艺的可行性。当加工工艺与微系统功能之间存在矛盾时，往往是牺牲微系统功能，修改结构设计来保证微系统能够用可获得的工艺条件制作出来。

微机械加工技术的主要类型有：以光刻、化学腐蚀为主要工艺手段的硅基结构体微加工和表面微加工；以 X 光深光刻、电铸制模和注模复制为主要工艺手段（LIGA 工艺）的非硅结构加工；以激光、超精密切削为主要工艺手段的精密机械加工。这里主要对体微加工、表面微加工和 LIGA 技术进行介绍，同时对精密机械加工等其他加工手段做简单介绍。

1. 体微加工技术

对硅材料的深腐蚀和对硅片整体的键合统称为体微加工。它是选择去除硅衬底，形成微机械元件的一种工艺。体微加工技术是制造微机电系统的重要工艺技术，通过对硅衬底内部进行腐蚀得到在衬底内部所要求的结构，目的是从硅衬底上有选择性地通过腐蚀的办法除去大量的材料，从而实现所需的悬空结构、模片和沟、槽等。

图 1-2-1 所示为体微加工工艺流程图。体微加工技术的优点是获得的结构几何尺寸较大（相应的质量大），机械性能好；缺点是与集成电路工艺不易兼容。

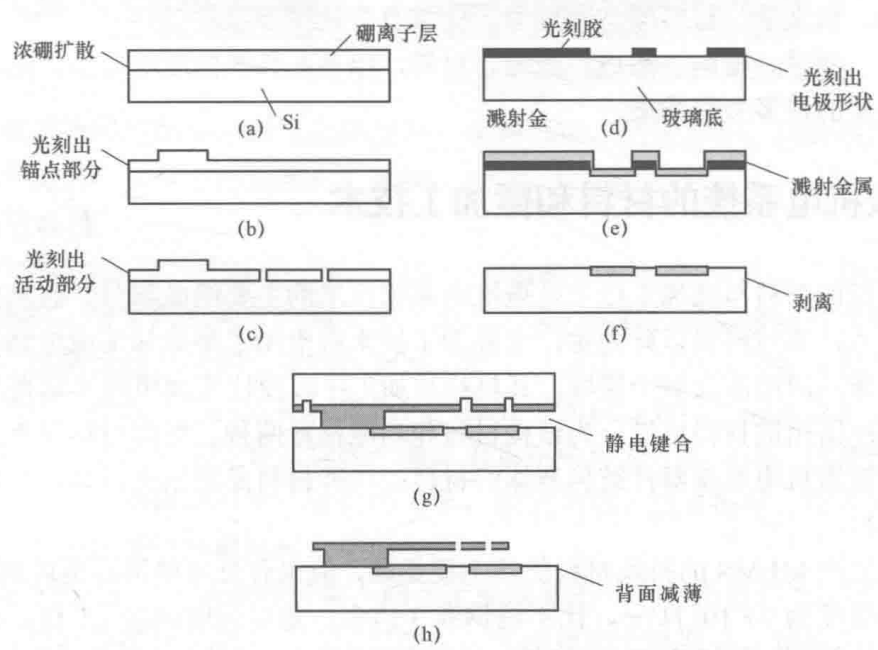


图 1-2-1 体微加工工艺流程图

2. 表面微加工技术

表面微加工技术现在仍然是制造微机电系统的重要工艺技术之一。它是一种将微机械器件完全制作在衬底晶片表面而不穿透晶片表面的一种制作技术。这种方法采用了大量与集成电路兼容的材料和工艺，便于集成和批量生产。利用表面微加工技术，可以制作出脱离基片表面而悬空固定的悬臂结构或薄膜。图 1-2-2 所示为利用表面加工工艺来加工一个悬臂梁的加工工艺流程示意图。

利用表面微机械加工技术可以把器件做得很小，比硅体微机械加工实现的器件尺寸小很多，且不影响器件特性。表面微加工技术形成的层状结构特点为微器件设计提供了较大的灵活性。体微加工中，在中心轴上加工转子是不可能的，而采用键合又会使工艺变得非常复杂，

而表面微加工就可以实现微小可动部件的加工。表面微机械加工的缺点是这种技术本身属于二维平面工艺，它限制着设计的灵活性。

3. LIGA 技术

LIGA 一词来源于德语光刻 (Lithographie) —电铸 (Galanofomung) —注塑 (Abformung) 三个单词的缩写。LIGA 技术是在 20 世纪 80 年代创立于德国卡斯鲁厄的核研究中心，是为了制造微喷嘴而开发出来的加工技术。

LIGA 技术是一种基于 X 射线光刻技术的综合性加工技术 (图 1-2-3)，主要包括 X 光深度同步辐射光刻，电铸制模和注模复制三个工艺步骤。由于 X 射线有非常高的平行度、极强的辐射强度、连续的光谱，使 LIGA 技术能够制造出高宽比达到 500、厚度大于 1 500 μm 、结构侧壁光滑且平行度偏差在亚微米范围内的三维立体结构。这是其他微制造技术所无法实现的。

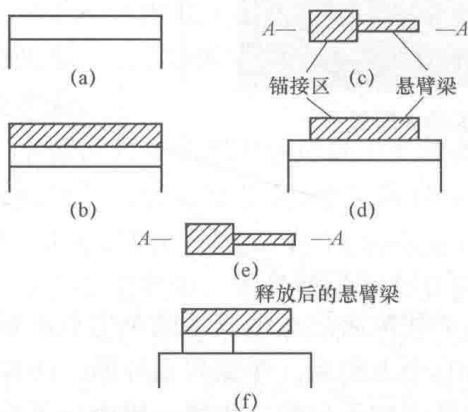


图 1-2-2 表面加工工艺流程示意图

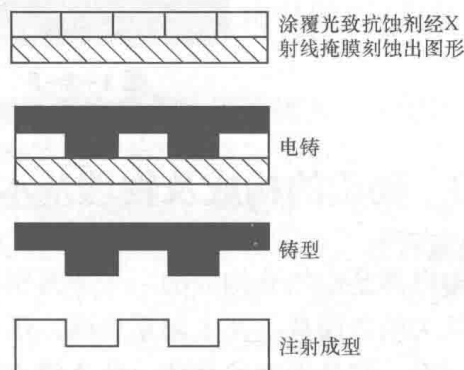


图 1-2-3 LIGA 技术流程示意图

由于 LIGA 技术需要极其昂贵的 X 射线光源和制作复杂的掩模板，其工艺成本非常高，这也限制了该技术在工业上的推广应用。于是出现了一类应用低成本光刻光源和 (或) 掩膜制造工艺而制造性能与 LIGA 技术相当的新的加工技术，通称为准 LIGA 技术或 LIGA-like 技术。例如，用紫外光源曝光的 UV-LIGA 技术，准分子激光光源的 Laser-LIGA 技术和用微细电火花加工技术制作掩膜的 MicroEDM-LIGA 技术，用 DRIE 工艺制作掩膜的 DEM 技术，等等。其中，以 SU-8 光刻胶为光敏材料，紫外光为曝光源的 UV-LIGA 技术因有诸多优点而被广泛采用。图 1-2-4 所示为采用 LIGA 技术加工的产品。

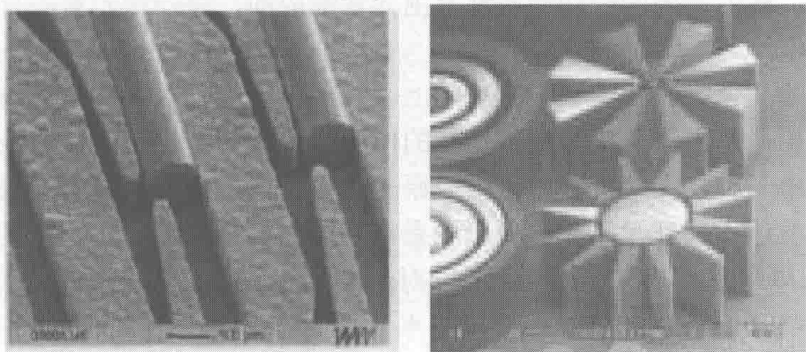


图 1-2-4 采用 LIGA 技术加工的产品

4. 其他微加工技术

由于微机电系统器件和结构的复杂性，使得对加工工艺的要求千变万化，前面介绍的微加工技术还不能完全满足加工需求。因此，世界各国都在发展各种新的微加工技术，这也包括将传统的加工技术改造用于微加工，如电火花加工技术、超精密加工技术、激光精细加工等。图 1-2-5 所示为电火花加工的人脸轮廓。

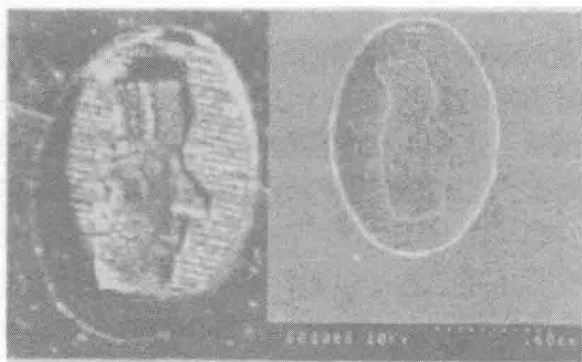


图 1-2-5 电火花加工的人脸轮廓

1.3 物质的构成及物理基本力

宇宙世界是由物质构成的。千差万别的物质种类和物质形式组成了这个色彩斑斓的宇宙世界。从大的方面说，在太阳系外面，还有千千万万个太阳系，在银河系外面，还有千千万万个银河系，它是无穷无尽的；从小的方面说，也是无穷无尽的，物质一般由分子组成，分子又由各种原子组成，原子里面又分为原子核和电子，原子核里面又分为质子和中子。

早在周代，我们的祖先就提出了五行说，即万物由金、木、水、火、土五种物质原料构成。古希腊哲学家德谟克利特把构成物质的最小单元叫作原子。战国时的墨翟也提出了类似原子说的观点。他认为“端，体之无厚，而最前者也”。端是物的起始，把物体分割到“无厚”，便达到最前的质点。也就是说：物体可以两半两半地分下去，如果分到“无”，就不能再分下去了。这就是原子说的思想。17 世纪，英国人波义耳提出了元素的概念。在以后的 100 多年里，人们逐渐发现了氢、氮、氧等元素。到了 19 世纪，已经有更多的元素被发现，俄国的门捷列夫从已知的元素中发现了规律性，制成了元素周期表，预测了未发现元素的特性。从此人们认识到，我们周围的一切物质都是由元素组成的，每一种元素都有化学性质相同的原子。

近百年来，物理学家在科学实验的基础上又发现了电子、质子和原子核并逐步形成了原子模型，认识到原子是由原子核与核外运动的电子所组成的。最初的认识是原子核由质子组成，一定数目的电子和相同数目的质子组成原子，不同电子数和不同质子数的原子构成不同的元素。按照目前近代物理学研究的最新成果，物质的最小构成单元不再是分子、原子，而是夸克和轻子（电子是其中的一种）。所以对于物质来说，现在知道有 5 个层次：分子—原子—原子核—核子—夸克。就拿最简单的水分子来说，它由两个氢原子（H）和一个氧原子（O）组成。氢原子的核，是一个质子（p），质子外面，有一个电子（e）绕其运行。质子又由 3 个夸克（两个上夸克 u，一个下夸克 d）构成。而氧原子就复杂得多了，它由 8 个质子