



青年学术文库

PRINCIPLE, DESIGN  
AND ANALYSIS  
OF MEMS

**微机电系统(MEMS)**

**原理、设计和分析**

田文超 著



西安电子科技大学出版社  
<http://www.xduph.com>

青年学术文库

---

# 微机电系统(MEMS)原理、设计和分析

田文超 著

西安电子科技大学出版社

2009

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了微机电系统的原理、设计和分析等知识,内容包括微机电系统的基本概念、常用材料、工作原理、分析方法、设计方法、加工工艺、表面特性、检测技术、主要应用以及 COMSOL 软件、微机电系统模块仿真。

本书可供高等学校机械、电子、仪器、微电子器件专业高年级本科生和研究生使用,也可对相关工程技术人员及科技管理人员提供参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

微机电系统(MEMS)原理、设计和分析/田文超著. —西安:西安电子科技大学出版社,2009.5

ISBN 978-7-5606-2223-1

I. 微… II. 田… III. 微电机 IV. TM58

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 034094 号

策 划 高维岳

责任编辑 张 玮 高维岳

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路 2 号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2009 年 5 月第 1 版 2009 年 5 月第 1 次印刷

开 本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印 张 16.125

字 数 380 千字

印 数 1~2000 册

定 价 30.00 元

ISBN 978-7-5606-2223-1/TN·0498

**XDUP 2515001-1**

\* \* \* 如有印装问题可调换 \* \* \*

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

## 前 言

回顾过去近 20 年的发展,微机电系统(Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS)由于具有能够在狭小空间内进行作业而又不扰乱工作环境的特点,因而在航空航天、精密机械、生物医学、汽车工业、家用电器、环境保护、通信、军事等领域有着广泛的应用潜力,成为广大科技工作者研究的热点。

本书比较全面地介绍了 MEMS 的基本概念、常用材料、工作原理、分析方法、设计方法、加工工艺、表面特性、检测技术、主要应用以及 COMSOL 软件、MEMS 仿真模块。本书的某些内容是作者在完成博士学位论文和博士后研究报告时所得到的结果,由于篇幅所限,有关推导过程和实验过程均作了省略。本书的编写目的既是为高年级本科生和研究生提供有关 MEMS 的基本知识,同时也为其进一步的 MEMS 研究打好基础。

全书共 9 章,各章的主要内容如下:

第 1 章首先介绍了 MEMS 的基本概念、研究范围、研究现状、主要应用领域和有待进一步研究的问题。

第 2 章介绍了 MEMS 的常用材料。首先介绍了硅及其化合物,其次介绍了砷化镓、陶瓷、形状记忆合金、磁致伸缩材料,最后介绍了流变体,包括电流变体、磁流变体和铁流体。

第 3 章介绍了涉及 MEMS 的有关固体力学问题,主要包括梁、膜的受力分析,振动分析以及阻碍 MEMS 市场化的粘附问题,同时还推导了 MEMS 分析经常用到的拉格朗日—麦克斯韦方程。

第 4 章介绍了 MEMS 的常见工艺方法,主要包括微电子加工工艺及精密加工和特种加工。

第 5 章详细介绍了 MEMS 的工作原理。首先介绍了压阻传感器、电容传感器、压电传感器、谐振传感器、隧道传感器、热传感器、光传感器、化学传感器,重点介绍了微加速度计和微陀螺仪。其次介绍了微执行器的工作原理,重点介绍了数字微镜及其应用。最后介绍了微流系统,包括流体力学基础、基本方程和典型微流器件。

第 6 章介绍了 MEMS 的表面特性。从物质结构和固体物理学出发,先后讨论了势函数、微观连续介质理论、液体表面特性、粗糙表面表征、粗糙表面工艺分析、MEMS 粘附问题及其释放恢复技术。

第 7 章介绍了 MEMS 的检测技术,包括 MEMS 材料特性测量、MEMS 表面形貌测试、可靠性测试,最后简要介绍了离心机的工作原理。

第 8 章详细介绍了 MEMS 的应用,包括 MEMS 在汽车、家用电器、生物医学、光通信、航空航天、军事等领域中的最新应用。

第 9 章介绍了 COMSOL 软件及 MEMS 仿真模块。鉴于 MEMS 的多力耦合特点,详

细介绍了 COMSOL 软件从 MEMS 建模、材料库选择、边界条件加载、网格划分到结果的各种显示、分析。

本书在编写过程中，得到了贾建援教授和杨银堂教授的指导和帮助，在此对两位教授在百忙之中给予的支持和帮助表示衷心的感谢。同时还感谢德国 FREIBURG 大学 IMTEK 研究所的 U. Wallrabe 教授以及西安电子科技大学出版社的大力支持。

作者

2008 年 9 月

# 目 录

<b>第 1 章 微机电系统概述</b> .....	1
1.1 微机电系统的基本概念 .....	1
1.2 微机电系统的研究现状 .....	4
1.3 微机电系统的应用 .....	6
1.4 微机电系统的特点和研究领域 .....	8
<b>第 2 章 微机电系统常用材料</b> .....	13
2.1 硅 .....	13
2.1.1 单晶硅 .....	13
2.1.2 晶体结构 .....	14
2.1.3 弥勒指数 .....	15
2.1.4 机械特性 .....	16
2.2 硅化合物 .....	17
2.2.1 多晶硅 .....	17
2.2.2 氧化硅 .....	17
2.2.3 碳化硅 .....	18
2.2.4 氮化硅 .....	18
2.3 砷化镓 .....	18
2.4 陶瓷 .....	19
2.5 形状记忆合金 .....	20
2.6 磁致伸缩材料 .....	22
2.7 流变体 .....	22
2.7.1 电流变体 .....	22
2.7.2 磁流变体 .....	23
2.7.3 铁流 .....	23
<b>第 3 章 微机电系统的固体力学问题</b> .....	26
3.1 尺寸效应 .....	26
3.2 梁的力学问题 .....	27
3.2.1 应变和应力 .....	28
3.2.2 梁的弯曲变形 .....	28
3.3 膜的力学问题 .....	31
3.3.1 薄膜弯曲 .....	32
3.3.2 周边固支圆形薄膜弯曲 .....	33
3.3.3 周边固支矩形薄膜弯曲 .....	33
3.4 机械振动 .....	34
3.4.1 无阻尼自由振动 .....	34
3.4.2 共振 .....	35

3.4.3	阻尼自由振动 .....	35
3.5	粘附力 .....	36
3.5.1	粘附力的实质及其研究方法 .....	36
3.5.2	分子动力学 .....	38
3.5.3	Hamaker 微观连续介质理论 .....	40
3.6	机电系统中的拉格朗日—麦克斯韦方程 .....	41
3.6.1	电路方程 .....	41
3.6.2	有质动力 .....	42
3.6.3	拉格朗日—麦克斯韦方程 .....	43
<b>第4章</b>	<b>微机电系统加工技术基础 .....</b>	<b>45</b>
4.1	微电子加工工艺 .....	45
4.1.1	光刻 .....	45
4.1.2	淀积 .....	47
4.1.3	腐蚀 .....	47
4.1.4	键合 .....	49
4.1.5	外延 .....	50
4.1.6	体硅加工 .....	51
4.1.7	表面加工 .....	51
4.1.8	LIGA 技术 .....	54
4.1.9	准分子激光工艺 .....	58
4.1.10	分子操纵技术 .....	58
4.1.11	封装 .....	62
4.2	精密加工和特种加工 .....	62
4.2.1	精密加工 .....	62
4.2.2	特种加工 .....	63
<b>第5章</b>	<b>微机电系统工作原理 .....</b>	<b>69</b>
5.1	微传感器 .....	69
5.1.1	压阻传感器 .....	70
5.1.2	电容传感器 .....	72
5.1.3	压电传感器 .....	74
5.1.4	谐振传感器 .....	76
5.1.5	隧道传感器 .....	77
5.1.6	热传感器 .....	78
5.1.7	光传感器 .....	79
5.1.8	化学传感器 .....	80
5.2	微加速度计和微陀螺仪 .....	80
5.2.1	线微加速度计 .....	80
5.2.2	差动电容微加速度计 .....	81
5.2.3	“跷跷板”式微加速度计 .....	83
5.2.4	“三明治”式微加速度计 .....	85
5.2.5	梳齿式微加速度计 .....	86
5.2.6	微加速度计的研究方向 .....	89
5.2.7	微陀螺传感器 .....	91

5.2.8	刚体定点转动式微陀螺仪 .....	92
5.2.9	刚体平动式微陀螺仪 .....	95
5.2.10	振动棒式微陀螺仪 .....	98
5.3	微执行器 .....	99
5.3.1	静电执行器 .....	99
5.3.2	电磁执行器 .....	102
5.3.3	压电执行器 .....	104
5.3.4	形状记忆合金执行器 .....	106
5.4	数字微镜及其应用 .....	106
5.4.1	数字微镜的工作原理 .....	106
5.4.2	数字微镜的应用 .....	110
5.5	微流系统 .....	113
5.5.1	流体力学基础 .....	113
5.5.2	基本方程 .....	114
5.5.3	典型器件 .....	117
<b>第 6 章</b>	<b>微机电系统表面特性</b> .....	<b>123</b>
6.1	物质结构 .....	123
6.2	势函数 .....	125
6.3	Hamaker 微观连续介质理论 .....	126
6.4	液体表面 .....	126
6.5	粗糙表面表征 .....	128
6.6	粗糙表面工艺分析 .....	133
6.7	粘附问题及其释放恢复技术 .....	144
<b>第 7 章</b>	<b>微机电系统检测技术</b> .....	<b>152</b>
7.1	微机电系统材料特性测试 .....	152
7.1.1	弹性模量测量 .....	152
7.1.2	残余应力测试 .....	153
7.1.3	断裂强度测试 .....	153
7.1.4	硬度测试 .....	155
7.2	微机电系统表面形貌测试 .....	157
7.2.1	SPM 基本原理 .....	158
7.2.2	STM 基本原理 .....	159
7.2.3	AFM 基本原理 .....	159
7.2.4	FMM 基本原理 .....	160
7.2.5	PDM 基本原理 .....	161
7.2.6	其他 SPM 显微镜原理 .....	161
7.2.7	光学探针测试 .....	163
7.2.8	台阶测试 .....	163
7.3	可靠性测试 .....	164
7.4	离心机 .....	165
<b>第 8 章</b>	<b>微机电系统应用</b> .....	<b>167</b>
8.1	微机电系统在汽车工业中的应用 .....	167



8.1.1	汽车电子特性 .....	168
8.1.2	汽车传感器 .....	169
8.1.3	轮胎气压监测系统 .....	173
8.2	微机电系统在家用电器中的应用 .....	178
8.3	微机电系统在生物学中的应用 .....	184
8.3.1	生物芯片 .....	184
8.3.2	微创无创技术 .....	187
8.4	微机电系统在光通信中的应用 .....	193
8.4.1	全光通信 .....	194
8.4.2	光开关 .....	194
8.5	微机电系统在航空航天中的应用 .....	203
8.5.1	微纳卫星 .....	203
8.5.2	微型飞行器 .....	204
8.5.3	微型机器人 .....	206
8.5.4	NASA .....	206
8.6	微机电系统在军事中的应用 .....	209
8.6.1	微纳武器 .....	209
8.6.2	微惯导技术 .....	210
<b>第9章</b>	<b>COMSOL 软件及微机电系统模块仿真 .....</b>	<b>214</b>
9.1	有限元 .....	214
9.2	COMSOL Multiphysics 软件介绍 .....	215
9.2.1	COMSOL Multiphysics 概述 .....	215
9.2.2	COMSOL Multiphysics 建模 .....	218
9.2.3	结构力学模块 .....	219
9.2.4	热传导模块 .....	220
9.2.5	CAD 导入模块 .....	221
9.2.6	COMSOL 二次开发工具 .....	221
9.3	微机电模块仿真 .....	223
9.3.1	微机电模块介绍 .....	223
9.3.2	微电阻梁变形模型仿真 .....	225
9.3.3	二维叉指驱动器仿真 .....	233
9.3.4	微悬梁残余应力模型仿真 .....	241
<b>参考文献</b>	.....	<b>246</b>

# 第 1 章 微机电系统概述

随着微/纳米科学与技术(Micro/Nano Science and Technology)的发展,以形状尺寸微小或操作尺寸极小为特征的微机电系统(Micro Electro-Mechanical Systems, MEMS)已成为人们在微观领域认识和改造客观世界的一项高新技术,并且是当前一个十分活跃的研究领域。MEMS 涉及多学科交叉,包括材料、机械、电子、微电子、生物学、医学、信息等工程技术学科和力学、物理学、化学、光学等基础学科。

MEMS 具有能够在狭小空间内进行作业而又不扰乱工作环境的特点,有着广泛的应用前景,在世界范围内,市场销量呈指数形式上升,成为新的经济增长点。MEMS 在航空航天、精密机械、生物医学、汽车工业、家用电器、环境保护、通信、军事等领域有着广泛的应用潜力,成为广大科技工作者研究的热点,被列为 21 世纪关键技术之首。

本章将介绍 MEMS 的基本概念、特点、研究现状和研究领域。

## 1.1 微机电系统的基本概念

MEMS 是美国的习惯用词;在欧洲被称为微系统技术(Micro System Technology, MST);在日本被称为微机器(Micro-Machine)。由于美国的 MEMS 总体研究水平处于领先地位,因此,本书沿用 MEMS 叫法。

MEMS 是以微细加工技术为基础,将微传感器、微执行器和电子线路、微能源等组合在一起的微机电器件、装置或系统。它既可以根据电路信号的指令控制执行元件实现机械驱动,也可以利用传感器探测或接收外部信号。传感器将转换后的信号经电路处理,再由执行器变为机械信号,完成执行命令。MEMS 是一种获取、处理和执行操作的集成系统。

MEMS 将微电子技术和微细加工技术相结合,实现了微电子与机械的融合。完整的 MEMS 是由微传感器、微执行器、信号处理和控制电路、接口电路及微能源组成的一体化微型器件或系统,用于完成传统大尺寸系统所不能完成的任务,也可以把独立微器件,如微传感器或执行器直接嵌入到大尺寸系统中,以达到提高系统可靠性、降低成本、实现系统智能化和自动化的要求。

关于 MEMS 的概念,习惯上依据机械结构的尺寸,将特征尺寸在 1~10 mm 范围内的机械称为小型(Mini)机械;特征尺寸在 1  $\mu\text{m}$ ~1 mm 范围内的机械称为微型(Micro)机械;特征尺寸在 1 nm~1  $\mu\text{m}$  的机械称为纳米(Nano)机械。当然,这样划分也未必严密,有时微机械加上外围结构尺寸已大于 1 mm 了,但仍然归于微机械。由这些机械构成的机电系

统称为小型机电系统、微机电系统(MEMS)和纳机电系统。

图 1-1 为 MEMS 微传感器的原理示意图。温度、力、磁、光、声和化学成份等外界信号通过微传感元件感知后,输送给传输单元。传输单元将外界感应信号转变为电信号,再送给控制电路进行处理。

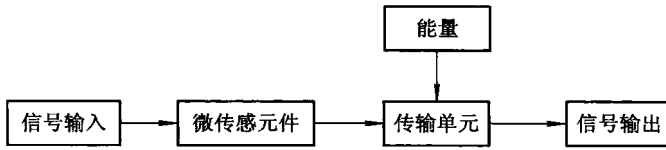


图 1-1 MEMS 微传感器原理示意图

图 1-2 为 MEMS 微执行器的原理示意图。传输单元将获得的信号转变为电压、热、磁等形式,通过微执行元件完成执行功能。

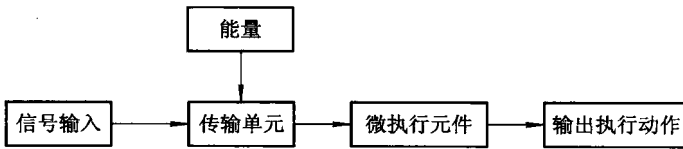


图 1-2 MEMS 微执行器原理示意图

图 1-3 为 MEMS 系统组成图。

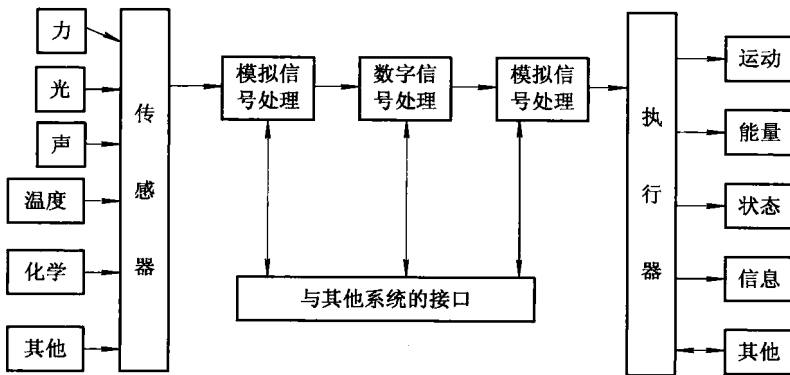


图 1-3 MEMS 系统组成

MEMS 并非单纯是宏观机械的微小化,它的研究目标在于通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统,开辟一个新的科学技术领域和产业。微电子学、微机械学、微光学、微动力学、微流体力学、微热力学、微摩擦学、微结构学和微生物学等共同构成了 MEMS 的理论基础。下面一些图片可以对 MEMS 的微型化提供一些感性认识。

图 1-4 为一只蚂蚁同微齿轮图片。图 1-5 为微镜驱动机构和一只蜘蛛的脚。图 1-6 为微驱动机构和一只寄生虫。图 1-7 为微驱动机构、微齿轮组和一只寄生虫。图 1-8 为微齿轮组和一只蜘蛛。图 1-9 为一只蜘蛛和微镜装配示意图。

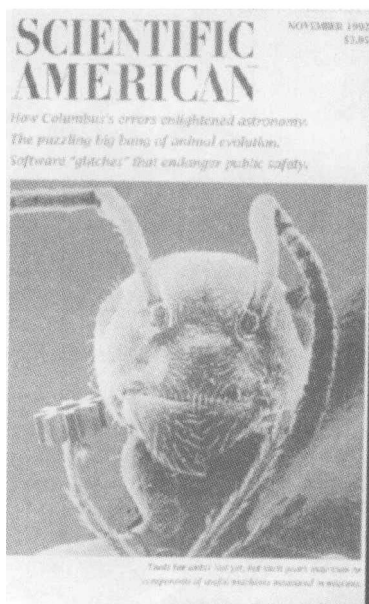


图 1-4 一只蚂蚁同微齿轮 (Scientific American)

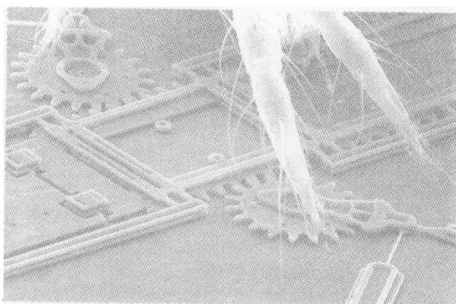


图 1-5 微镜驱动机构和一只蜘蛛的脚 (Sandia 国家实验室)

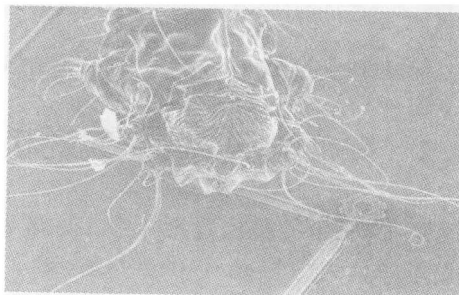


图 1-6 微驱动机构和一只寄生虫 (Sandia 国家实验室)

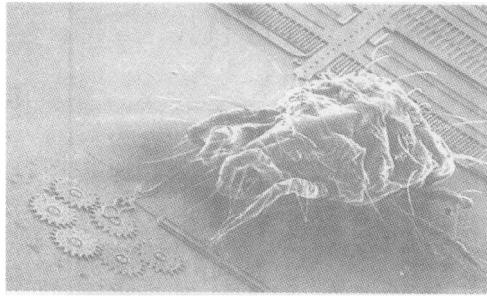


图 1-7 微驱动机构、微齿轮组和一只寄生虫(Sandia 国家实验室)

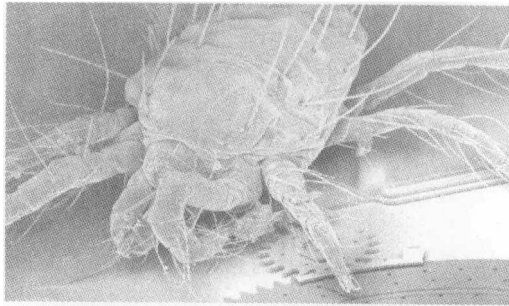


图 1-8 微齿轮组和一只蜘蛛(Sandia 国家实验室)

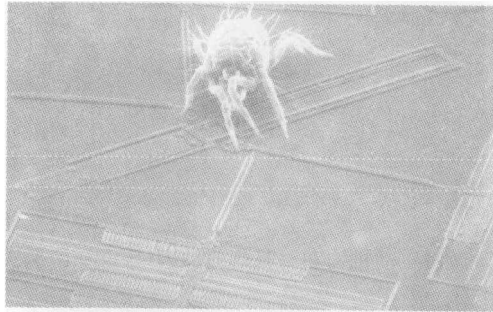


图 1-9 一只蜘蛛和微镜装配示意图(Sandia 国家实验室)

## 1.2 微机电系统的研究现状

MEMS 的发展可以追溯到 1959 年的美国物理年会上。诺贝尔物理奖获得者 Richard P. Feynman 在该次年会上作了题目为“*There is plenty of room at the bottom*(实际上大有余地)”的报告。他描述了可用大机械来加工比自己小许多的小机械,而这些小机械又可以制造更小的微小机械,即是一条 Top-Down 的路径。同时,他还描述了人们按照自己的方式排列原子、分子,按照人们的意愿构造各种物质,即 Bottom-Up 路径。Feynman 教授的报告在当时还不被许多人所理解,然而现在看来,当时 Feynman 教授的报告已经预见到了 MEMS、纳机械和原子操纵技术的未来。

鉴于 MEMS 技术的学科交叉特点,它的发展同许多学科有关。1954 年史密斯发现半导体电阻率随应力变化,即压阻效应。1958 年,研究人员通过测量贴在弹性体上应变片的应变,测量弹性体的受力情况。美国斯坦福大学在 20 世纪 60 年代利用硅片腐蚀方法,制造了应用于医学的脑电极阵列的探针,后来又在微传感器方面的研究取得了成功。20 世纪 70 年代初期,硅压力传感器出现。单晶硅既可以作为微电子材料,又可以作为机械结构材料。到了 20 世纪 70 年代中期,美国 Kulite 公司通过在硅衬底上形成氧化硅或氮化硅,由各向异性腐蚀法加工出硅膜,利用键合技术制成了微压力传感器。

真正具有标志性的工作是静电微电机的出现。1988 年 5 月 27 日,在美国加州大学伯克利分校,两个年轻人启动一个直径为  $120\ \mu\text{m}$  的静电微电机开关,在显微镜下观察电机的转动。虽然该电机仅仅转动了几秒钟,但却标志着 MEMS 时代的到来。图 1-10 为 1988 年伯克利分校最早研制的静电微电机。

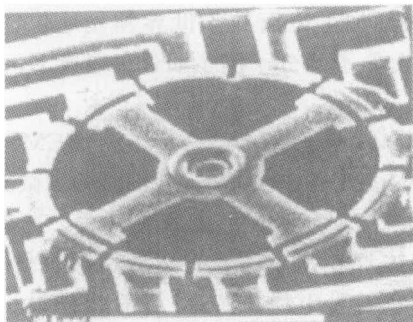


图 1-10 伯克利分校最早研制的静电微电机(4<sup>th</sup> int. con. of solid state sensors and actuators)

在国外,美、日、德等国在 MEMS 的研究与应用方面占据领先地位。加利福尼亚大学伯克利分校在 MEMS 加工与微细加工技术方面的发展很快,其静电微电机的研究处于领先地位,在微器件、微机构的研究方面也取得了很大进展。麻省理工学院、威斯康星-麦迪逊大学、凯斯西方储备大学、康内尔大学等在 MEMS 的研究方面取得了一定成就。另外,一些研究公司和实验室在 MEMS 的研究方面也做了大量工作。朗讯公司在 MEMS 光开关方面处于世界领先水平,二维 MEMS 光开关研究已基本成型,目前正在研究三维 MEMS 光开关。德克萨斯州仪器公司研究的数字微镜(Digital Micro-mirror Device, DMD)在 MEMS 领域曾引起轰动,对高清晰度电视、全光通信等领域的发展具有极大的推动作用。Northrop 公司利用硅片进行了光波导技术研究,并研制出微光学陀螺仪(MOG)样机。Draper 实验室于 1989 年最先研制出双框架式微硅陀螺,并于 1993 年研制出由三个微硅陀螺、三个微硅加速度计和附加电路组成的微惯性测量组合(MIMC)。Litton 公司、Honeywell 公司和 Draper 实验室成功地将光波导移相器做成多功能集成光路芯片,并应用于光陀螺。美国航空航天局(NASA)研制出成本不足 1 亿美元的“发现号”微卫星后,正在构思成本在 10 万美元以内的纳卫星(或称“芯片卫星”)。MEMS 的三个标志性成果分别为数字微镜、静电微电机和微加速度计,均由美国发明。目前,美国在 MEMS 研究的总体水平处于世界领先地位。

日本在 MEMS 的研究起步晚于美国,但政府、学术界和产业界高度重视,东京大学、东北大学在微细加工、微流量泵、微型传感器、微继电器等方面取得了相当快的进展。名古屋大学成功研制了直径为 6 mm、具有 16 个爪的微管道流通微机器人。EPSON 公司研制出光诱导微型自行走机器人。东京大学生产技术部开发的在线放电磨削(WEDG)技术和特种放电电路,可加工出  $5\ \mu\text{m}$  的细轴和微孔。岛津制作所研制出生物细胞微操作器。滋贺医科大学研制出用于眼科手术的微机械“GENGERO”。名古屋大学利用形状记忆合金(SMA)研制出可在血管中操作的有源导管。日本在微机器人方面的研究处于世界领先地位。

德国 Karlsruhe 研究中心在微细加工方面首创了 LIGA 技术,即 X 光深层光刻、微电铸和微塑铸三种工艺的有机结合,可实现高深宽比的微结构。LIGA 工艺可制造加工难度极大的微结构,微结构高度可达 1 mm,线宽尺寸小到  $0.2\ \mu\text{m}$ ,深宽比可达 500,表面粗糙度可达 30 nm。美茵兹技术研究所(IMM)利用准分子激光烧蚀与 LIGA 技术结合研制出准分子激光工艺技术。德国在微细加工方面处于世界领先地位。另外,英国的 3M 计划提出揭示 DNA、有机高分子和超大分子的分子测量研制。瑞典 Uppsala 大学也在研制在显微镜下工作的微机器人。

随着 MEMS 的发展, MEMS 和光技术结合,形成 MEMS 的一个分支,即微光机电系统(Micro Optical Electro-Mechanical System, MOEMS)。微光学元件在微执行器的作用下,实现对光束的汇聚、衍射、反射等控制;完成光开关、光驱动、光检测、成像、图像传输、图像显示等功能。MOEMS 是由微电子、微光学和微机械相结合而产生的一种新型微光机电一体化技术,在通信、医疗、生物、航天、计算机外设、家用电器等领域有巨大的应用前景。鉴于 MOEMS 的特点,研究人员仍然将 MOEMS 归于 MEMS 范畴。

### 1.3 微机电系统的应用

一个完整的 MEMS 应包括微电源、微传感器、微执行器、分析控制电路和实体结构。包含以上五大结构的 MEMS 大部分还停留在研究阶段,真正进入市场的是 MEMS 的一些典型元件或构件,其主要问题是微电源和各种元件同外界接口技术问题及微细加工问题,然而这些问题并不能妨碍 MEMS 元件的应用。MEMS 主要在以下领域得到应用。

#### 1. 汽车工业

汽车工业已经成为 MEMS 的主要用户,尤其是智能汽车的发展,将与 MEMS 密不可分。各种各样的微传感器被用于环境和道路的检测,微执行器则按要求完成各项动作。概括来说, MEMS 在汽车工业主要应用于安全系统、动力系统、舒适性和诊断等方面。下面对安全系统进行简单介绍。

安全系统主要包括安全气囊系统、制动防抱死系统和动力检测控制系统。

作为高度综合的安全系统,安全气囊系统由微传感器、缓冲气囊、气体发生器及控制单元组成。微传感器检测汽车发生碰撞后加速度信号的变化,将信号送入控制器,由控制器触发气体发生器产生气体,打开缓冲气囊,以达到保护驾驶员的目的。目前已有多家公司生产安全气囊中的加速度传感器,如美国模拟器件(AD)公司的 ADXL05、ADXL50 系列的差动电容式加速度传感器;摩托罗拉公司生产的 MMAS40G 电容式加速度计;美国

EG&GIC 开发的 3255、3000 系列压阻式加速度计。

制动防抱死系统 (Antilock Brake System, ABS) 是防止刹车时车轮抱死, 以避免发生侧滑、跑偏等危险状态的装置。通过大量实验验证, 汽车最佳制动的方式是“将要抱死, 又没抱死”的状态。ABS 系统就是为实现该状态而研制的。ABS 由车轮速度传感器、电子控制器和压力调节器组成。车轮速度传感器用于检测车轮转速, 将车速转换成电信号传送给电子控制器。电子控制器用于监测处理车轮转速信号, 若车速急剧下降, 则表示车轮将要发生抱死, 电子控制器就向压力调节器发出指令。压力调节器是 ABS 的执行部分, 负责调节制动器中的油压和气压, 以确保车轮不会发生抱死现象。压力调节器的工作过程为“隔断—减压—加压”三个过程。压力控制器在 1 秒钟内重复这三个过程, 直到车轮不被抱死。

动力检测系统主要包括温度传感器、压力传感器、流量传感器、旋转传感器、浓度传感器、防震传感器。这些传感器是汽车传感器的核心, 可以提高发动机的动力性能、降低油耗、减少废气、预防事故, 实现自动控制。美国凯乐尔、特种测量、SSI、菲尔科、德州仪器、德国博世、日本电装等公司, 都投入了大量资金研制动力传感器系统。

## 2. 军事领域

MEMS 在军事中的应用主要集中在导弹制导、微型飞行器等领域。

由微加速度计和微陀螺构成的微惯性测量组合 (Micro Inertial Measurement Unit, MIMU) 远远优于常规导航系统, 在导弹精确制导系统、发火控制系统、固态电子引信系统和安全系统方面, 有着极为广阔的应用前景。

美国国防部通过对“21 世纪的战略策略与相关技术”的专题研究, 由美国国防部高级研究计划局 (Defence Advanced Research Projects Agency, DARPA) 牵头, 将微型飞行器 (Micro Air Vehicle, MAV) 作为一个重点发展项目。其基本用途在于军事侦察。小尺寸使 MAV 灵活而易于隐蔽, 同时也便于单兵携带和放飞, 更适应现代复杂环境的小兵种作战。MAV 的尺寸仅为 10 cm, 重量仅为 50 g。MAV 被制作成昆虫一样大小, 配给单兵或个人使用, 以适应军事或民用的隐蔽性侦察, 城市或室内等复杂环境作战, 跟踪尾随, 化学或辐射等有害环境监测, 复杂环境的救生定位等特殊任务。MAV 属于一种军民两用的新型装备。目前 MAV 主要有微型固定翼飞行器、微型旋转翼飞行器和微型扑翼飞行器。

## 3. 医学领域

MEMS 在医学领域中的应用主要集中在微创外科手术、药物定点输送、人造器官等方面。

在微创外科手术中, 内窥镜的应用十分广泛。医用无线内窥镜结合生物医学技术和 MEMS 技术, 实现无创、微创, 达到减小患者痛苦的效果。通过吞咽微传感器进入消化道, 对食道、胃、肠进行特定位置的拍摄分析, 完成对消化系统的检测, 克服传统推进式内窥镜检测范围窄的缺点。日本在微创外科手术方面有关 MEMS 的研究走在世界前列, 如日本东北大学、东京大学。我国的浙江大学也在研制能在胃肠中运动的微型机器人。

由 MEMS 和药剂学、生物医学结合研制的药物定点输送系统, 在医学中也有很大的应用前景。药物定点输送主要有两个功效: ① 直接将药物输送到病变位置, 从而提高疗效、节约药量、减少药物副作用; ② 在药物到达病变位置时, 通过检测病变处血液等样品参数, 定时遥控释放药物, 以达到最佳治疗目的。



人造器官大体包括人造心脏、人造肾脏、人造心肺、电动假肢以及人造血管、气管、人造食道、人造关节、人造肠道等。但目前人造器官主要存在以下三个问题：

- (1) 人身体对 MEMS 所用材料的适应性和材料的耐用性问题。
- (2) 人造器官的微型化和能量源问题。
- (3) 信息交流和控制问题。

另外，MEMS 在航空航天、精密机械、家用电器、环境保护、通信等领域都有着广泛的应用潜力，具体应用将在第 8 章介绍。

## 1.4 微机电系统的特点和研究领域

同常规机电系统相比，MEMS 具有如下特点：

(1) 系统微型化。MEMS 器件体积小、精度高、重量轻、惯性小、谐振频率高。MEMS 器件的体积可小至亚微米级以下，尺寸精度可达到纳米量级，重量可轻至纳克，谐振频率可达上百千赫。

(2) 制造材料性能稳定。MEMS 器件的主要材料是硅。硅材料的机械、电子材料性能优越，强度、硬度和杨氏模量同铁相当，密度和导热性能类似于铝。

(3) 批量生产成本低。MEMS 器件适于大批量生产，成本低廉。MEMS 能够采用与半导体制造工艺类似的方法，像超大规模集成电路芯片一样，可一次制成大量完全相同的零部件，制造成本显著降低。

(4) 能耗低，灵敏性和工作效率高。完成相同工作，MEMS 所耗能量仅为传统机械的十分之一或几十分之一，而运作速度及加速度却可达数十倍以上。由于 MEMS 几乎不存在信号延迟等问题，因而更适合高速工作。

(5) 集成化程度高。在 MEMS 中，可以将不同功能、不同敏感方向的多个传感器、执行器集成在一起，可以形成阵列，也可将多种功能器件集成在一起，形成复杂的多功能系统，以提高系统的可靠性和稳定性。特别是应用智能材料和智能结构后，更利于实现 MEMS 的多功能化和智能化。

(6) 多学科交叉。MEMS 技术包含电子、机械、微电子、材料、通信、控制、扫描隧道等工程技术学科，还包含物理、化学、生物、力学、光学等基础学科。MEMS 融合了当今科学技术的许多最新成果，通过微型化、集成化探索 MEMS 的新原理、新工艺，开辟新领域。

鉴于 MEMS 的以上特点，同常规机电系统相比较，MEMS 又存在以下问题：

(1) 尺寸效应。当构件尺寸从 1 mm 减小到 1  $\mu\text{m}$  时，面积减小因子为  $10^{-6}$ ，而体积减小因子为  $10^{-9}$ ，这样正比于面积的作用力（如摩擦力、粘附力、表面张力、毛细力、静电力）同正比于体积的作用力（如惯性力、电磁力）相比，增大了数千倍而成为 MEMS 的主要作用力。

(2) 材料性能。在 MEMS 硅衬底上淀积有多种薄膜。这些膜的厚度从几十纳米到几十微米不等，加工方法也与常规方法不同，其机械性能和电性能同常规材料的性能存在差异，有些差别甚至更大。如何准确把握薄膜的机械性能和电性能，对 MEMS 的性能分析是个关键。