

北京理工大学“双一流”建设精品出版工程

Design and Manufacture of Military Microsystems

军用微系统设计制造

冯跃 娄文忠 韩炎晖◎编著



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

军用微系统设计与制造

冯 跃 娄文忠 韩炎晖 编 著

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

内 容 简 介

本书按照高等学校兵器科学与技术专业的教学要求编写，强调微系统（MEMS）技术与武器系统的紧密结合，在阐述微系统技术的基础物理理论、典型微纳器件、加工制备工艺和未来发展趋势的基础上，重点介绍微系统技术在军事国防领域的应用。全书共7章，主要内容包括：微系统技术基础、典型微系统原理、典型微传感器技术、典型微执行器技术、典型微能源技术、微系统加工技术、智能 MEMS 弹药引信技术等。

本书既注重基本原理和必要的理论分析，又力求反映最新的科技成果，同时也突出军事上的实用性。本书是针对高等工科院校兵器科学与技术专业本科生和研究生的专业科技课程而编著的，同时也可以作为其他相关专业学生的辅助教材。

版权专有 侵权必究

图书在版编目（CIP）数据

军用微系统设计及制造/冯跃，娄文忠，韩炎晖编著. —北京：北京理工大学出版社，2021. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 9331 - 0

I. ①军… II. ①冯…②娄…③韩… III. ①武器系统 IV. ①E92

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2020）第 252273 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 /

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 18.25

字 数 / 428 千字

版 次 / 2021 年 1 月第 1 版 2021 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 78.00 元

责任编辑 / 张海丽

文案编辑 / 张海丽

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

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

微系统 (MEMS) 技术可以被称作人类制造技术的一次革命, 它将对未来战争产生非常巨大的影响。微系统技术可减轻武器系统的重量、缩小体积, 可增加作战有效载荷、提高命中精度, 使战斗力倍增。两次海湾战争中, 以美国为首的多国部队均能打败人数占优的伊拉克军队, 所凭借的正是由微系统器件所组成的先进武器, 如智能弹药、微型高速计算机、微型军事卫星、战场无线传感器网络与微型飞行器等。微系统器件是各种武器和军事手段的心脏、耳目和神经中枢。因此, 未来战争必然是微型、智能战争, 拥有更先进、更成熟的 MEMS 技术的一方将在战争中获得更大的优势。

作为 MEMS 技术最早应用的领域之一, 军事国防对推动微系统技术的进步和发展起到了至关重要的作用。本书以 MEMS 微系统在军事国防领域的应用为重点, 结合新兴前沿军事科技, 对广义微传感系统的相关技术进行了全面系统的介绍, 包括微传感器技术、微执行器技术、微能源技术、微系统加工技术和智能 MEMS 弹药引信技术等。本书以微系统相关技术为主, 结合代表性军事应用案例进行编写, 共分为 7 章。

第 1 章概述微系统技术, 主要介绍 MEMS 微系统的基本概念、特点、军事需求以及结合前沿科技的发展趋势。

第 2 章介绍典型微系统原理, 主要介绍常见的压阻效应、压电效应、静电效应等。

第 3 章典型微传感器技术, 主要介绍常用的压力、加速度、温度、生化微传感器和陀螺仪的原理、结构及典型军用案例。

第 4 章典型微执行器技术, 主要介绍常用的静电、压电、热微执行器器件的原理、结构及典型军用案例。

第 5 章典型微能源技术, 主要介绍常用的化学电源、物理电源、超级电容微能源器件的原理、结构及典型军用案例。

第 6 章微系统加工技术, 主要介绍典型的硅基、非硅基的 MEMS 制造工艺、微加工键合技术以及 3D 打印技术。

第 7 章智能 MEMS 弹药引信技术, 主要介绍 MEMS 技术在现代引信中的应用与发展趋势。

本书第 1 章至第 5 章由冯跃副教授编写, 第 6 章由北京东方计量测试

研究所韩炎晖工程师编写，第7章由娄文忠教授编写。本书是集体劳动的产物，在此衷心感谢为本书编写、插图和资料整理做了大量工作的研究生，他们分别是博士生周子隆、王运来和周小军，硕士生唐绪松、钟科航、饶泽泓、卢庆和王文龙。本书在编写过程中参阅了国内外同行的参考书、期刊文献，在此向原著者谨致谢意！

由于编者水平、知识背景、研究方向限制，书中不足之处，恳请各位读者、专家不吝指正。

编著者

2020年春于北京理工大学

目 录

CONTENTS

第 1 章 微系统技术基础	001
1.1 微系统的定义和内涵	001
1.1.1 微系统的定义	001
1.1.2 微系统的功能及意义	002
1.1.3 微系统的特点	003
1.2 国防需求推动微系统发展	005
1.2.1 微系统的发展历程	005
1.2.2 航天领域微系统需求	008
1.2.3 武器领域微系统需求	011
1.2.4 机器人领域微系统需求	015
1.2.5 医疗领域微系统需求	019
参考文献	023
第 2 章 典型微系统原理	025
2.1 压阻效应	025
2.1.1 技术背景	025
2.1.2 理论描述	025
2.1.3 典型应用	026
2.2 压电效应	028
2.2.1 技术背景	028
2.2.2 理论描述	029
2.2.3 典型应用	031
2.3 静电效应	033
2.3.1 技术背景	033
2.3.2 理论描述	033

2.3.3 典型应用	036
2.4 热效应	038
2.4.1 热应力效应	038
2.4.2 热电阻效应	042
2.4.3 热电效应	044
2.5 光电效应	047
2.5.1 技术背景	047
2.5.2 理论描述	048
2.5.3 典型应用	050
2.6 压电驻极体效应	052
2.6.1 技术背景	052
2.6.2 理论描述	053
2.6.3 典型应用	055
参考文献	056
第3章 典型微传感器技术	059
3.1 压力传感器	059
3.1.1 压阻式压力传感器	059
3.1.2 压电式压力传感器	063
3.1.3 电容式压力传感器	066
3.1.4 光纤式压力传感器	068
3.2 加速度传感器	071
3.2.1 电容式加速度传感器	072
3.2.2 压阻式加速度传感器	076
3.2.3 压电式加速度传感器	077
3.2.4 热对流式加速度传感器	079
3.2.5 光学加速度传感器	084
3.3 生化传感器	085
3.3.1 气体传感器	086
3.3.2 离子传感器	089
3.3.3 湿度传感器	091
3.3.4 生物传感器	092
3.4 温度传感器	104
3.4.1 热敏电阻温度传感器	104
3.4.2 热电红外温度传感器	106
3.4.3 光纤温度传感器	109
3.5 MEMS 陀螺仪传感器	111
3.5.1 MEMS 陀螺仪概述	111
3.5.2 MEMS 陀螺仪发展	113

参考文献	119
第 4 章 典型微执行器技术	123
4.1 微静电执行器	123
4.1.1 基本原理	123
4.1.2 结构与应用	124
4.2 微压电执行器	132
4.2.1 基本原理	132
4.2.2 结构与应用	132
4.3 微电热执行器	140
4.3.1 基本原理	140
4.3.2 U 形执行器	140
4.3.3 V 形执行器	143
4.3.4 双金属执行器	147
参考文献	149
第 5 章 典型微能源技术	152
5.1 微化学电源	152
5.1.1 微燃气涡轮发电机	152
5.1.2 微锂电池	154
5.1.3 微锌镍电池	156
5.1.4 微燃料电池	162
5.2 微物理电源	165
5.2.1 光伏发电技术	165
5.2.2 压电式发电技术	169
5.2.3 电磁式发电技术	175
5.2.4 驻极体式发电技术	177
5.3 超级电容器	181
5.3.1 技术背景	181
5.3.2 静电双电层电容器	184
5.3.3 电化学赝电容器	187
参考文献	190
第 6 章 微系统加工技术	193
6.1 硅基制造典型工艺	193
6.1.1 表面与体微加工技术概述	193
6.1.2 光刻	195
6.1.3 薄膜沉积技术	199
6.1.4 蚀刻	204

6.1.5 掺杂	208
6.2 非硅基制造典型工艺	211
6.2.1 非硅基技术概述	211
6.2.2 LIGA 技术	211
6.2.3 电沉积	212
6.2.4 聚合物柔性工艺	214
6.3 引线键合与封装技术	217
6.3.1 引线键合概述	217
6.3.2 引线键合形式	218
6.3.3 焊接设备	223
6.3.4 封装技术	226
6.4 3D 打印技术	229
6.4.1 3D 打印概述	229
6.4.2 3D 打印工艺	230
6.4.3 3D 打印结构设计	234
6.4.4 3D 打印技术在军事上的应用	238
参考文献	241
第 7 章 智能 MEMS 弹药引信技术	243
7.1 现代引信本质与内涵	243
7.2 MEMS 智能引信技术	244
7.3 国外 MEMS 智能引信现状	247
7.3.1 典型的 MEMS 引信器件	247
7.3.2 典型的 MEMS 引信组件	255
7.3.3 典型 MEMS 引信系统级集成	271
7.4 MEMS 智能引信未来发展方向	278
参考文献	281

第 1 章

微系统技术基础

在过去 20 年中，针对微米和亚微米尺度系统研究展现了爆炸式的增长，技术进步的速度也远远超过了人们对所涉及物理学的理解。以硅基和非硅基加工工艺为代表的一大批新型的加工技术在世界范围内得到了应用和推广，特征尺寸小于 100 μm 的器件和系统先后问世，微系统技术也从实验室研究走向成果落地转化，并广泛应用于航空航天、武器装备、战场医疗等领域。本章主要介绍微系统技术基础，包括微系统定义和内涵、微系统发展和微系统在军事国防中的应用，帮助读者建立对微系统技术和军用微系统的基本认知。

1.1 微系统的定义和内涵

1.1.1 微系统的定义

微系统 (microsystem) 也称微机电系统 (microelectromechanical systems, MEMS) 或微电子机械系统。一般可定义为通过微米加工技术 (micromachining 或 microfabrication) 和集成电路 (integrated circuits, IC) 制造技术，集成微传感器、微执行器、微驱动控制电路、微接口电路、微通信电路、微电源器等为一体的微型系统^[1]。图 1-1 为典型的微系统组成示意图，微传感器将外界信息 (声、光、热、力等) 转换成电信号并传递给微信号控制处理电路，经过信号转换 (包括数/模转换)、处理、分析、决策后，将指令传递给微执行器，微执行器根据指令对外界发生响应、操作、显示或通信等作用。微传感器可以将物理量转化为电学信号，微控制电路可以进行信号转换、放大、计算等处理，微执行器则根据指令自动完成人们所需要的操作，上述过程消耗的电能由微能源器提供，这样就形成具有感知、决策、通信和反应控制能力的智能集成微系统。

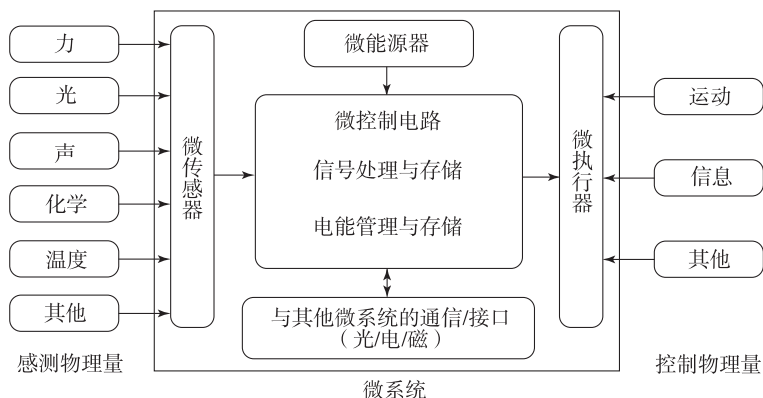


图 1-1 典型的微系统组成示意图

微系统的概念通常指上述较为全面的功能集成体，但由于制造能力、集成封装技术等限制，目前多数微系统只包含微机械结构（microstructures）、微传感器（microsensors）、微执行器（microactuators）、微电子器件（microelectronic devices）中的一种或几种，以及部分控制处理电路。这种情况下通常用 MEMS 这一名词来代替微系统，目前 MEMS 已被世界各国广泛接受，根据不同的场合，可以指微系统的产品，也可以指设计这种产品的方法学和制造技术手段。

MEMS 是将微电子技术与机械工程融合到一起的一种工业技术，它的操作范围在微米级。与微机电系统概念相似，但操作尺度更小，在纳米范围的技术被称为纳机电系统（nanoelectromechanical systems, NEMS）。微机电系统在日本被称作微机械（micromachines），在欧洲被称作微系统技术（microsystems technology, MST）。

当前的 MEMS 器件包括用于安全气囊传感器、喷墨打印机头、计算机磁盘执行器读/写头、投影显示芯片、血压传感器、光学开关、微型阀、生物传感器和许多其他产品的加速度传感器，这些产品均已大量商业化制造。MEMS 被认为是 21 世纪最有前途的技术之一，它具有将硅基微电子技术与微加工技术相结合潜力，从而彻底改变工业和消费类产品。它的技术和基于微系统的设备有可能极大地影响我们所有的生产和生活方式。如果说半导体微制造是第一次微制造革命，那么 MEMS 则是第二次革命。

1.1.2 微系统的功能及意义

微系统融合机、电、光、磁、生、化等多个领域，具有微型化、集成化、智能化、成本低、性能高、可批量生产等优点，已经被广泛应用于生物医疗、能源环境、汽车电子、消费电子、无线通信、军事国防、航空航天等领域，并将继续对人类的科学技术、工业生产、能源化工、军事国防等领域产生深远影响。表 1-1 为 MEMS 应用举例^[2]。

表 1-1 MEMS 应用举例

行业	消费电子	医疗	通信	航空航天	汽车	国防
MEMS 惯性传感器（加速度传感器、陀螺仪等）	计步器、游戏控制、摄像机图像稳定、硬盘保护、地震测量	运动跟踪、起搏器		惯性导航、稳定平台、姿态控制、状态监控	安全气囊、车辆动态控制、导航系统、主动制导悬架、滚动检测	导弹制导、稳定平台、引信安全与解除保险机构
MEMS 光学器件	数字微镜器件投影仪、栅状光阀成像系统、微显示器、自动对焦镜头	显微光谱仪、自动聚焦镜片	光纤通信、可变光衰减器、光开关、可调滤波器	激光测距、太阳敏感器	激光测距、图像传感器	激光雷达、激光测距
MEMS 射频器件	声波滤波器		波段切换开关、旁路开关、可调滤波器			相控阵雷达的可变波束天线、移相器

续表

行业	消费电子	医疗	通信	航空航天	汽车	国防
MEMS 微流体器件	喷墨头、芯片冷却系统	芯片实验室、呼吸器、药物泵、微型针				
MEMS 压力传感器件	登山高度计、潜水器	血压测量、肾透析		飞行控制系统、机舱气压控制、液压系统	轮胎气压监测、油压监测	引信安全与解除保险机构、监测弹底压力、战机舱门、氧气罩的结构监控
MEMS 流量传感器件		药物流量监测		发动机进气口、机舱空气质量监测	喷油量控制	

2000年以来，MEMS进入高速发展期。全球MEMS产品的销售额从2008年的55亿美元迅速增长到2017年的118亿美元。根据市场研究机构Yole Development的预估，受智能汽车、5G、虚拟现实/增强现实、人工智能/机器学习等市场需求推动，到2023年全球MEMS销售额或将攀升至310亿美元。2016年12月，中国工程院院士、清华大学副校长、教育部科技委国防学部主任尤政院士做了题为“中国制造与传感器技术”的报告，报告中明确指出传感器与中国制造发展紧密相关，而MEMS传感器作为新材料、新工艺传感器的革命性进步，必将推动整个传感器行业的发展。最后，尤院士建议将“核心传感器技术”上升为国家“制造强国”“工业强基”战略。

军事领域作为MEMS技术最早应用的领域之一，对推动MEMS的进步和发展起到了至关重要的作用。早在1992年，美国国防高级研究计划局（Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）就成立了微系统技术办公室（Microsystems Technology Office, MTO），负责对微处理器、MEMS和光电元器件等微电子产品进行预先战略投资。DARPA把MEMS技术确认为美国急需发展的新兴技术，在过去的几十年里大力推动电子材料、器件和系统技术革命性进步，资助了大量MEMS项目，大力发展小型惯性测量系统、微分析系统、射频传感系统、网络传感系统、战场无人值守传感系统等项目，并应用于单兵携带、战场实时监测、毒气以及细菌检测、弹药安全与解除保险、弹道修正、子母弹开舱控制、超低功率无线通信信号处理、高密度低功耗的数据存储器件、敌我识别系统等方面，为美国提供了强大的国防技术和经济优势。MEMS的应用能使武器平台更灵敏、更准确、更具杀伤力，是未来军用武器装备中的支撑技术和关键技术。在军事领域中迅速推广应用MEMS将是保持军队技术优势、维护国家安全的重要战略。

1.1.3 微系统的特点

MEMS的最大特点是微型化，典型MEMS器件的长度尺寸在 $1\ \mu\text{m} \sim 1\ \text{cm}$ ^[3]。图1-2

(a) 展示了美国桑迪亚国家实验室 (Sandia National Laboratories, SNL) 于 2002 年 1 月发布的一组 MEMS 齿轮和链条。该 MEMS 齿链机构的运动模式和功能与传统宏观齿轮和链条一样, 但链条的链节长约 $50\ \mu\text{m}$, 比人类头发还细。常见的 MEMS 器件的特征尺寸一般在毫米量级, 甚至更小。如美国亚德诺半导体技术有限公司 (Analog Devices Inc., ADI) 制造的 MEMS 加速度传感器 ADXL335 可以在 $4\ \text{mm} \times 4\ \text{mm} \times 1.45\ \text{mm}$ 尺寸内实现三轴 $\pm 3g$ 加速度测量 [图 1-2 (b)]。小尺寸可以为 MEMS 器件带来高谐振频率、高灵敏度、低热噪声等特点。同时, 小型化也意味着有效空间的增加、经济收益的提高、功耗的大幅降低, 这为空间装备、弹药引信、移动终端等高集成度系统带来巨大的发展潜力。在不久的将来, MEMS 机器人甚至可以进入血管、细胞等人体狭小空间内执行如清除血栓、靶向给药等复杂操作。

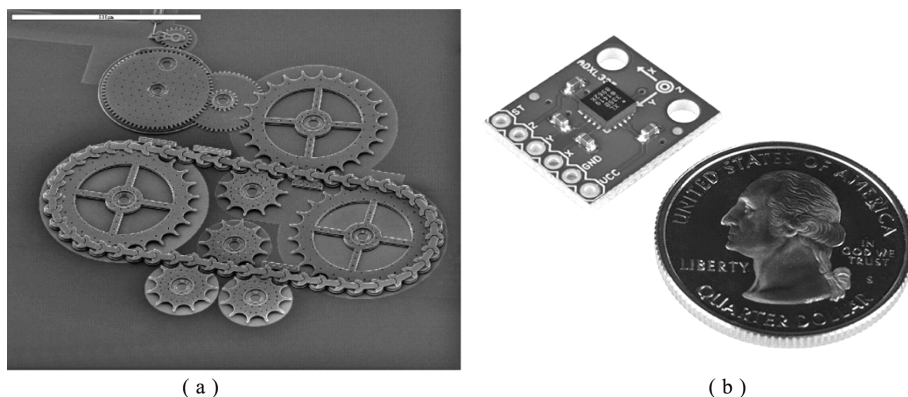


图 1-2 MEMS 器件
(a) MEMS 齿链机构; (b) MEMS 加速度传感器

MEMS 另一大特点是智能化和高度集成化。一个 MEMS 可以集合不同功能的微传感器、微处理器、微执行器和微能源器, 可以独立与外界进行能量与信息的交换和控制, 从而对多能量领域 (声、光、电、热、磁、机械、化学等) 进行测量与控制, 实现智能化系统。例如, 美国加州大学伯克利分校 (University of California Berkeley, UCB) 的工程师们在 2016 年开发的体积为 $1\ \text{mm}^3$ 的可植入人体无线传感器。它利用超声波充电, 并可以电刺激神经和肌肉, 以“电治疗”癫痫病或刺激免疫系统或抑制炎症。此外, 美国已经开展对 MEMS 卫星的相关研究。通过堆叠覆盖有 MEMS 和电气组件的晶圆来构造卫星, 将气相分析仪、环形激光光纤陀螺、图像传感器、微波接收/发射机、电动机、执行器等器件集成在一块芯片上构成芯片级卫星, 利用 MEMS 卫星的低发射成本、高抗辐射和抗振动能力的优势, 在低地轨道 (low earth orbit, LEO) 上布置数百个 $1\ \text{kg}$ 级卫星以获得预期数据。

由于多功能与高度集成化带来的多尺度、多效应叠加, 多物理场、多能量场耦合, MEMS 必然是典型的多学科交叉的前沿性研究领域。其中涉及自然科学及工程技术的绝大多数领域, 如电子工程、机械工程、物理科学、化学科学、生物医学、材料科学、能源科学等。因此, 这种学科交叉所诞生的创新性使 MEMS 不仅广泛应用于为汽车工业、航空航天、航海、军事武器等传统领域注入新的活力, 也为智能系统、消费电子、可穿戴设备、智能家

居、合成生物学、微流控、无线通信等新兴领域开拓了广阔的应用空间。

此外，MEMS 能迅速发展还在于其低廉的成本和易于批量化生产等特点。MEMS 制造工艺起源于 IC 制造工艺，大量使用 IC 制造工艺方法，因此可以像集成电路产品一样大批量并行制造，且力求与 IC 技术集成或兼容，易于实现阵列结构和冗余结构。但是，由于 MEMS 三维结构多样性和功能复杂性的特点，其制造过程引入了许多新的微加工方法，如深反应离子蚀刻和键合技术，使 MEMS 元器件的制造与 IC 元器件的制造差距增大。因此，MEMS 产品的生产线工艺研发成本较高。

尺寸的缩小赋予了 MEMS 很多卓越的性能，但也带来了其他问题。在 MEMS 尺度范畴内，经典宏观物理定律仍然适用，但是在多物理场耦合、元器件的比表面积（表面积与体积之比）急剧增加的影响下，在宏观状态如范德华力和静电力等可以忽略的作用因素一跃成为影响微系统功能的主要因素。因此，MEMS 并不是宏观系统简单地等比例缩小，而是包含了新的机理和新的功能。例如，在宏观情况下惯性力控制流体处于湍流，而在微观情况下黏性力控制流体处于层流，这给微流体的混合带来极大的困难；而 MEMS 静电马达的工作原理、结构设计、控制方式都与传统电磁式马达迥异，温度的影响十分显著。

1.2 国防需求推动微系统发展

1.2.1 微系统的发展历程

MEMS 是在 20 世纪 50 年代伴随着半导体技术的发展而出现的^[4]。以 1954 年贝尔实验室（Bell Labs）的 Smith 研究员发现半导体硅和锗的压阻效应为起点，经过 20 多年的萌芽状态（20 世纪 60 年代中期到 80 年代），在 20 世纪 90 年代进入飞速发展时期，到现在形成了一个强大、有活力、可持续发展的 MEMS 产学研用体系。

1959 年，著名物理学家 Richard Feynman 在一年一度的美国物理协会的会议上发表了题为 *There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics* 的划时代演讲。演讲提出了微型计算机、微型机器的设想，并预言了机理研究和加工工艺会遇到的难题。这个演讲不仅为今后 MEMS 的研究指明了方向，还吸引了许多优秀人才加入 MEMS 研究中，对 MEMS 的发展产生了巨大影响。

在萌芽时期，MEMS 的主要研究方向是利用硅各向异性蚀刻技术在平面硅衬底上加工出三维结构以及各种硅微型传感器。例如，在 20 世纪 70 年代，国际商业机器公司（International Business Machines Corporation, IBM）开发了隔膜型（diaphragm-type）微型压力传感器，利用硅微加工技术得到嵌有压阻传感器的薄隔膜 [图 1-3 (a)]。当隔膜上下存在压力差时，隔膜会产生机械应力，用压阻传感器检测这种应力就可以计算出压力差。图 1-3 (b) 则展示的是 1979 年惠·普公司（Hewlett-Packard Company, HP）发明的基于硅微加工技术的热喷墨打印机喷嘴。该打印机墨盒由一系列微小的喷嘴组成，每个喷嘴的腔室内均包含一个加热器。在热喷墨过程中，电流脉冲通过加热元件，使腔室内的墨水迅速汽化并形成气泡，从而将一小滴墨水推到纸张上，并且油墨的表面张力以及气泡的凝结和收缩，使得墨盒中墨水被带入腔室。尽管这个时期 MEMS 的主要产品只有压力传感器和打印机喷头，但多种 MEMS 元器件的原型如光学 MEMS 和微流体 MEMS 已经开始出现。

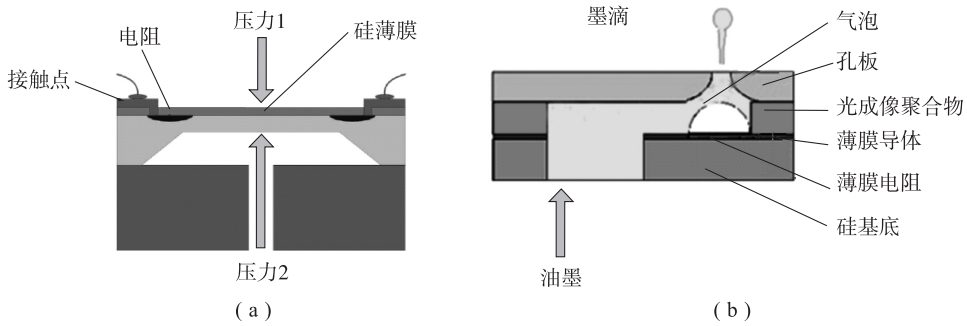


图 1-3 MEMS 压力传感器和打印机喷嘴

(a) MEMS 压力传感器; (b) MEMS 打印机喷嘴

20 世纪 80 年代，MEMS 隐隐有崛起的势头。美国犹他大学（The University of Utah, U of U）工程设计中心在 1986 年提交给 DARPA 的提案中首先引入“微机电系统”一词。在这个时期，MEMS 快速发展，世界各国相继开始着手研究 MEMS，基础理论与设计方法的研究不断深入、制造技术不断涌现与完善、新的器件不断开发、应用领域不断扩展。1982 年，IBM 的 Petersen 研究员发表了有关硅力学性能和蚀刻数据的重要论文 *Silicon as a Mechanical Material*，使硅成为搭建 MEMS 最常使用的材料。1986 年，美国麻省理工学院（Massachusetts Institute of Technology, MIT）的 Howe 教授等人完善了硅微加工牺牲层技术，从而制作出复杂的 MEMS 传感器（桥式共振蒸汽传感器），揭开了使用牺牲层进行硅表面微加工的序幕。1989 年，UCB 的 Muller 教授团队首次研究出基于硅表面微加工的静电马达（图 1-4）。该静电马达的转子直径为 60 μm ，厚度为 1 μm ，在 350 V 三相交流电的驱动下，最高转速可达 500 r/min。在 20 世纪 80 年代后期，国内清华大学、北京大学、复旦大学、南京工学院（现东南大学）、中国科学院上海冶金研究所（现中国科学院上海微系统与信息技术研究所）和中国科学院电子学研究所也相继开展 MEMS 的研究。

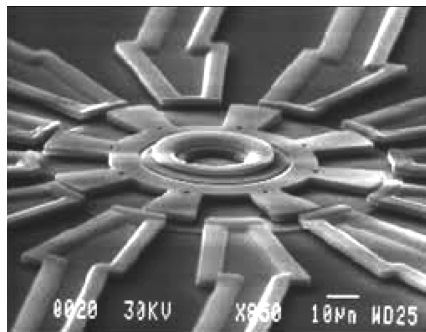


图 1-4 MEMS 静电马达

进入 20 世纪 90 年代，全球 MEMS 研究进入一个突飞猛进、日新月异的高速发展时期。世界各国投入大量研究资金，与 MEMS 相关的原理、材料、设计、仿真、加工、集成的研究更加深入，同时 MEMS 开始大量应用于航空航天、航海、国防、汽车、医疗、通信等领域。例如，ADI 推出的 ADXL 系列单轴、双轴、三轴加速度传感器广泛应用于汽车电子行业。如图 1-5 所示，该 MEMS 加速度传感器的敏感单元是由 4 根悬臂梁支撑的、单自由度

质量块。叉指形可动电极固定在质量块上，与固定电极形成平行电容器。当在测量方向存在加速度时，质量块因为惯性力产生相对位移，从而改变总电容值，并由信号处理电路读出。该系列加速度传感器通过测量极端情况下的减速加速度（如碰撞），从而控制安全气囊的展开。

20 世纪 90 年代，许多研究人员开始探索微流体技术，并试图使诸如聚合酶链式反应（polymerase chain reaction, PCR）之类的生化操作小型化。将样品搜集与最终分析所需的步骤整合到同一芯片上，展示了芯片实验室（lab-on-a-chip，或称微全分析系统，micro total analysis system, μ TAS）技术在生化和微流体应用中的真正潜力。20 世纪 90 年代中期，光学 MEMS 器件开始出现，其中的代表是由德州仪器公司（Texas Instruments, TI）开发的数字光学处理（digital light processing, DLP）技术。如图 1-6 所示，它含有 10 万多个可独立寻址的、由微镜（micromirror）组成的数字微镜器件（digital micromirror device, DMD），每个微镜的面积为 $12.68 \mu\text{m} \times 12.68 \mu\text{m}$ ，通过静电吸附使倾斜角度为 $\pm 12^\circ$ 。当光源照在微镜阵列时，处在合适角度的微镜就可以将光反射到屏幕上照亮一个像素单元。

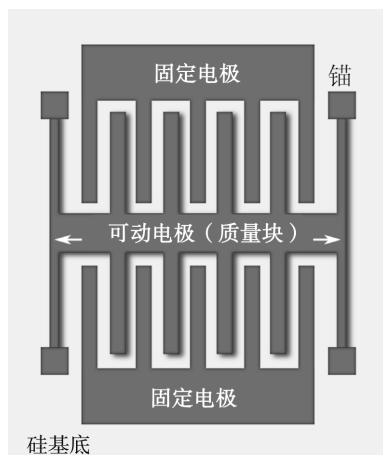


图 1-5 MEMS 单轴加速度传感器

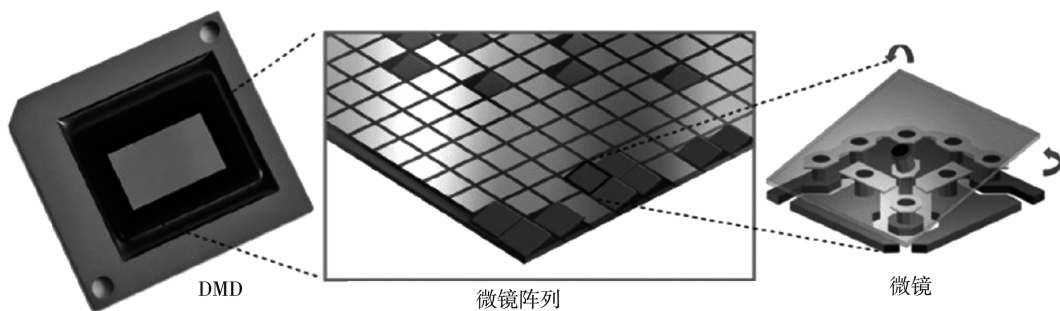


图 1-6 MEMS 数字微镜结构示意图

进入 21 世纪，MEMS 在纳米器件、生物医疗、能源、游戏、数据存储等研究领域不断扩展^[5]，并且，MEMS 逐渐从单一功能器件向多功能集成化发展。同时，智能手机、平板电脑、掌上游戏设备、可穿戴设备等消费电子产品的的发展极大地促进了压力传感器、惯性传感器和微型麦克风等 MEMS 器件的应用，进一步推动了 MEMS 的发展，形成了强大且可持续发展的 MEMS 产学研用体系。经历了从无到有的过程后，在 21 世纪，国内 MEMS 也有了长足的发展。从早年的全部依赖进口，到现在已有一批中试线、生产线、代工线和产业公司。虽然国内 MEMS 产业在设备、设计、工艺、封装方面与世界顶尖水平相差较大，但经过多年的发展，国内 MEMS 行业已处于曙光阶段。相信随着国内科技的进步和需求的增加，未来中国 MEMS 行业一定会欣欣向荣。

纵观 MEMS 60 多年的发展历史，我们不难摸清其中的发展脉络：基础研究的进步推动着制造技术的发展；制造技术的发展促进了新的高性能器件诞生；新的高性能器件拓宽了新

的应用领域，带来的巨大利润又促使国家或企业加大对基础研究和制造技术的投入。Feynman 在 60 多年前的那场高瞻远瞩的演讲，帮助人们推开了迈入微观世界的大门，奠定了 MEMS 的发展。MEMS 发展大事记见表 1-2。

表 1-2 MEMS 发展大事记

时间	事件
20 世纪 50 年代	1954 年 Smith 研究员发现硅的压阻效应
	1959 年 Richard Feynman 发表题为 <i>There's Plenty of Room at the Bottom: An Invitation to Enter a New Field of Physics</i> 的著名演讲
20 世纪 60 年代	1961 年 第一款硅压力传感器问世
	1967 年 表面微机械加工技术被发明；西屋公司（WH）制造了谐振门场效应晶体管
20 世纪 70 年代	1970 年 第一款硅加速度传感器问世
	1979 年 第一款微加工喷墨喷嘴问世
20 世纪 80 年代	1980 年 首次实现了硅基表面微加工工艺
	1982 年 光刻工艺应用于 MEMS
	1982 年 Petersen 研究员发表重要论文 <i>Silicon as a Mechanical Material</i> 吸引科学界使用硅作为 MEMS 的基本材料
	1987 年 第一次 MEMS 会议在盐湖城召开
20 世纪 90 年代	1992 年 MTO 成立；北卡罗来纳微电子中心在 DARPA 的赞助下开始研究多用户 MEMS 工艺
	1992 年 第一款微机械铰链结构问世
	1993 年 ADI 售出了第一款表面微机械单轴加速度传感器 ADXL50
	1994 年 深反应离子蚀刻获得专利
21 世纪	2001 年 三轴加速度传感器开始投放市场
	2003 年 MEMS 麦克风开始广泛应用
	2004 年 TI 的 DLP 芯片销售额增长至近 9 亿美元
	2005 年 ADI 公司交付了第 2 亿个 MEMS 惯性传感器
	2006 年 双轴 MEMS 陀螺仪上市
	2006 年 Perpetuum 公司推出第一款商业化 MEMS 振动能量采集器

1.2.2 航天领域微系统需求

MEMS 技术首先应用在航天技术领域，因为航天技术对器件功能密度比的要求非常高^[6,7]。目前将卫星放入 LEO 的成本约为 5 000 美元/kg，在更廉价的燃料和可重复使用火箭正式使用之前，采用 MEMS 技术是唯一降低成本的方式。因此也可以说，MEMS 技术的另一大需求来自航天领域。MEMS 技术在航天领域应用有如下优势：极小的质量和体积，可以获得低发射质量；低功耗，大部分器件处于电静态；小的热常数，可用较低功率来维持温度；抗振动、抗冲击和抗辐射；机械结构，如开关，可以抗辐射加固；低惯性质量使 MEMS 可