



现代机电一体化技术丛书

微机电系统及 工程应用

莫锦秋 梁庆华 王石刚 编著


WEIJIDIAN XITONG

J1

GONGCHENG YINGYONG



化学工业出版社

 现代机电一体化技术丛书

微机电系统及 工程应用

莫锦秋 梁庆华 王石刚 编著



WEIJIDIAN XITONG

J1

GONGCHENG YINGYONG



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要从普及的角度介绍了微机电系统及其相关技术的应用。全书共12章,分别对微机电系统的定义、起源及研究现状、制造技术、系统构成、设计技术进行了深入浅出、通俗易懂的介绍。本书的特点是信息量大、系统全面,包含了微机电系统制造过程中微机械加工、微封装、微检测各个环节;微机电系统构成中的各种微传感器、微执行器、微构件、微系统的工作机理;先进的微机电系统设计技术以及计算机辅助技术;多种设计手段和实用软件。

本书可供希望了解或采用微机电系统的工程技术人员阅读,也可作为机械工程类学生学习专业选修课的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

微机电系统及工程应用/莫锦秋,梁庆华,王石刚
编著. —北京:化学工业出版社,2015.6
(现代机电一体化技术丛书)
ISBN 978-7-122-23883-2

I. ①微… II. ①莫…②梁…③王… III. ①微电机
IV. ①TM38

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第093819号

责任编辑:韩亚南 张兴辉
责任校对:蒋宇

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张12 $\frac{3}{4}$ 字数305千字 2015年8月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:58.00元

版权所有 违者必究

前言

Foreword

机电丛书

“现代机电一体化技术丛书”编委会

主任 林东来

副主任 王生泽 王侃 方建军

委员 (排名不分先后)

胡于进 王生泽 何勇 谢少荣 罗均 莫锦秋 王石刚
 张朴 徐盛林 林宋 殷际英 方建军 尚国清 郭瑜茹
 杨野平 戴荣 周洪江 刘杰生 黎放 刘勇 王晶
 王侃 白传栋 袁俊杰 胡福文 董信昌 马梅

会委编“书丛本技分本一由册分版”



丛书序

机电一体化是指在机构的主功能、动力功能、信息处理功能和控制功能上引进电子技术，将机械装置与电子化设计及软件结合起来所构成的系统的总称。机电一体化是微电子技术、计算机技术、信息技术与机械技术的相互交叉与融合，是诸多高新技术产业和高新技术装备的基础。机电一体化产品是集机械、微电子、自动控制和通信技术于一体的高科技产品，具有很高的功能和附加值。

目前，国际上产业结构的调整使得各个行业不断融合和协调发展。作为机械与电子相结合的复合产业，机电一体化以其特有的技术带动性、融合性和普适性，受到了国内外科技界、企业界和政府部门的特别关注，它将在提升传统产业的过程中，带来高度的创新性、渗透性和增值性，成为未来制造业的支柱。我国已经将发展机电一体化技术列为重点高新技术发展项目，机电一体化技术的广阔发展前景也将越来越光明。

随着机电一体化技术的不断发展，各个行业的技术人员对其兴趣和需求也与日俱增。但到目前为止，国内还鲜有将光机电一体化技术作为一个整体技术门类来介绍和论述的书籍，这与其方兴未艾的发展势头形成了巨大反差。有鉴于此，由北方工业大学、东华大学、上海交通大学和北京联合大学联合编写“现代机电一体化技术丛书”，旨在适时推出一套机电一体化技术基本知识和应用实例的科技丛书，满足科研设计单位、企业及高等院校的科研和教学需求，为有关技术人员在开发机电一体化产品时，提供从产品造型、功能、结构、材料、传感测量到控制等诸方面有价值的参考资料。

本丛书共十二种，包括《机电一体化系统分析、设计与应用》、《机电一体化系统软件设计与应用》、《机电一体化系统接口技术及工程应用》、《机电一体化系统设计及典型案例分析》、《光电子技术及其应用》、《现代传感器及工程应用》、《微机电系统及工程应用》、《光机电一体化技术产品典型实例：工业》、《光机电一体化技术产品典型实例：民用》、《现代数控机床及控制》、《楼宇设备控制及应用实例》、《服务机器人》。

本丛书的基本特点，一是内容新颖，力求及时地反映机电一体化技术在国内外的最新进展和作者的有关研究成果；二是系统全面，分门别类地归纳总结机电一体化技术的基本理论和在国民经济各个领域的应用实例，重点介绍了机电一体化技术的工程应用和实现方法，许多内容，如楼宇自动门的专门论述，尚属国内首次；三是深入浅出，重点突出，理论联系实际，既有一定的深度，又注重实用性，力求满足不同层次读者的需求，适合工程技术人员阅读和高校机械类专业教学的需要。

由于本丛书涉及内容广泛，相关技术发展迅速，加之作者水平有限，时间紧促，书中不妥之处在所难免，恳请专家、学者和读者不吝指教为盼！

“现代机电一体化技术丛书”编委会



前言

Foreword

微机电系统 (MEMS, 即 Micro Electro Mechanical System) 是微电子技术的拓宽和延伸, 通过传感器、致动器、信号处理、控制等多项功能, 与外部世界有机地联系起来。微机电系统将运动、光、声、热、磁等自然界信号转换成电信号; 微电子系统接收这些信号, 进而发出指令, 控制执行部件完成所需要的操作。微机电制造技术将微电子技术和精密机械加工技术相互融合, 实现微电子与机械融为一体的微机电系统, 不仅可以降低机电系统的成本, 而且还可以完成许多大尺寸机电系统无法完成的任务。微机电系统将信息获取、处理和执行融为一体, 集中了微米尺度的机械、电子、光学元器件和各种传感器, 派生出多种新原理、新器件和新系统, 将进一步促进产品的微型化和智能化, 在空间、信息、汽车、工业控制、通信、大容量数据存储、光信息处理、仪表仪器和国防等领域有广泛用途。


本书共 12 章, 分别对微机电系统的定义、起源及研究现状、制造技术、系统构成、设计技术进行了深入浅出、通俗易懂的介绍。本书的特点是信息量大、系统全面, 包含了微机电系统制造过程中微机械加工、微封装、微检测各个环节; 微机电系统构成中的各种微传感器、微执行器、微构件、微系统的工作机理; 先进的微机电系统设计技术以及计算机辅助技术; 多种设计手段和实用软件。

本书可供希望了解或采用微型机电系统的工程技术人员阅读, 也可作为机械工程类学生学习专业选修课的参考书。

本书的第 1、2、6、7、8、9 章由莫锦秋编写, 第 3、4、5、10 章由王石刚编写, 第 11、12 章由梁庆华编写。在本书的编写过程中, 林焯、汪国宝、刘洪涛、胡文等同学给予了大力的支持和协助, 中科院微系统所车录锋老师给予了指教, 在此表示谢意。

由于我们水平有限, 且时间仓促, 难免存在不妥之处, 敬请批评指正。

编著者



目录

CONTENTS

第 1 章 概论 / 001

- 1.1 微机电系统的定义 / 1
- 1.2 微机电系统的发展现状 / 3

第 2 章 微尺度效应 / 6

- 2.1 概述 / 6
- 2.2 微执行器的尺度效应 / 7
 - 2.2.1 静电执行器的尺度效应 / 7
 - 2.2.2 电磁执行器的尺度效应 / 8
 - 2.2.3 SMA 执行器的尺度效应 / 9
- 2.3 微流体的尺度效应 / 9
- 2.4 微尺度热学 / 11
 - 2.4.1 热传导的尺度效应 / 12
 - 2.4.2 热交换的尺度效应 / 13
 - 2.4.3 热辐射的尺度效应 / 13
- 2.5 微摩擦基础 / 13
- 2.6 尺度效应的一个实例 / 14

第 3 章 微机电系统材料 / 16

- 3.1 概述 / 16
- 3.2 硅材料 / 16
- 3.3 压电材料 / 18
- 3.4 形状记忆合金 / 19
- 3.5 超磁致伸缩材料 / 20
- 3.6 聚合物 / 21
- 3.7 电流变体 / 22

第 4 章 微机械制造技术 / 23

- 4.1 概述 / 23

4.2 微机电系统中的传统超精密与特种加工技术 / 23

4.2.1 超精密机械加工 / 23

4.2.2 微细电火花加工 / 24

4.2.3 高能束微机械加工技术 / 25

4.3 微机电系统常用的集成电路工艺 / 26

4.3.1 薄膜成形 / 26

4.3.2 掺杂技术 / 28

4.3.3 光刻技术 / 29

4.4 硅微机械加工技术 / 32

4.4.1 体微加工技术 / 32

4.4.2 表面微加工 / 36

4.4.3 键合技术 / 37

4.5 LIGA工艺 / 40

4.6 微封装 / 42

4.6.1 晶片级封装 / 43

4.6.2 单芯片封装 / 43

4.6.3 多芯片与微系统封装 / 45

4.6.4 表面微加工法封装 / 45

4.6.5 三维堆装 / 46

第 5 章 微检测技术 / 47

5.1 概述 / 47

5.2 微结构的材料特性检测技术 / 47

5.2.1 弹性模量的测定 / 47

5.2.2 微结构材料应力的检测 / 49

5.2.3 微结构材料热物性参数的检测 / 54

5.3 微机电系统构件的几何量检测 / 56

5.3.1 光学法测量几何尺寸 / 57

5.3.2 扫描隧道显微测量技术 / 60

5.3.3 薄膜构件的膜厚测量 / 61

5.4 微系统的性能检测 / 62

5.4.1 结构动态参数的识别 / 62

5.4.2 微执行器运动的检测 / 64

5.4.3 动态微结构的视觉检测法 / 64

第 6 章 微构件 / 68

6.1 概述 / 68

6.2 结构梁 / 68

6.3 薄膜 / 71

6.4 铰链 / 75

- 6.5 隧道探针 / 77
- 6.6 压阻换能器件 / 78
- 6.7 静电微构件 / 80
- 6.8 可动质量块 / 83

第 7 章 微执行器 / 84

- 7.1 概述 / 84
- 7.2 静电执行器 / 85
- 7.3 压电执行器 / 89
- 7.4 电磁执行器 / 92
- 7.5 热执行器 / 94
- 7.6 微流体执行器 / 96

第 8 章 微传感器 / 99

- 8.1 概述 / 99
- 8.2 微型物理传感器 / 100
 - 8.2.1 微型力学量传感器 / 100
 - 8.2.2 微型光学量传感器 / 109
 - 8.2.3 微型热学量传感器 / 110
 - 8.2.4 微型声学量传感器 / 111
- 8.3 微型化学量传感器 / 112
 - 8.3.1 微型气体传感器 / 112
 - 8.3.2 微型离子敏传感器 / 114
- 8.4 微型生物传感器 / 115
 - 8.4.1 生物传感器的分类 / 115
 - 8.4.2 悬臂梁式生物传感器 / 118

第 9 章 微构件及微器件制造工艺 / 121

- 9.1 悬臂梁的制造工艺 / 121
- 9.2 悬空结构的制造工艺 / 123
- 9.3 薄膜的制造工艺 / 124
- 9.4 微器件制造工艺示例 / 126

第 10 章 微系统及应用 / 132

- 10.1 概述 / 132
- 10.2 在汽车工业中的应用 / 132
 - 10.2.1 压力传感器 / 132

- 10.2.2 硅加速度传感器 / 132
- 10.3 微机器人 / 133
- 10.4 微型飞行器 / 135
- 10.5 在航空航天中的应用 / 136
- 10.6 在医学中的应用 / 138
 - 10.6.1 植入式人造器官 / 138
 - 10.6.2 体内显微手术 / 138
 - 10.6.3 微喷雾给药 / 139
- 10.7 在军事武器中的应用 / 140
- 10.8 在生物科学中的应用 / 142
 - 10.8.1 DNA PCR 扩增芯片 / 142
 - 10.8.2 DNA 毛细管电泳芯片 / 143
 - 10.8.3 微型 DNA 流体控制芯片 / 144
 - 10.8.4 集成 DNA 微系统芯片 / 144
- 10.9 在信息技术中的应用 / 144
 - 10.9.1 微光机电器件 / 145
 - 10.9.2 无线电微机电系统 / 147

第 11 章 微机电系统设计技术 / 150

- 11.1 概述 / 150
- 11.2 微机电系统设计的概念、任务及类型 / 154
 - 11.2.1 微机电系统设计概念及本质 / 154
 - 11.2.2 设计类型 / 155
 - 11.2.3 微机电系统设计内容 / 155
 - 11.2.4 VLSI、宏机械以及微机电系统设计 / 156
 - 11.2.5 设计原则 / 157
- 11.3 微机电系统设计过程 / 157
- 11.4 微机电系统现代设计方法简介——健壮性设计 / 160
 - 11.4.1 健壮性设计理论 / 160
 - 11.4.2 优化算法 / 162
 - 11.4.3 实例——两自由度微谐振器 / 164
- 11.5 微机电系统设计方法学与发展方向 / 166

第 12 章 微机电系统计算机辅助技术 / 168

- 12.1 概述 / 168
- 12.2 MEMS CAD 设计原则 / 169
- 12.3 MEMS CAD 结构体系 / 170
- 12.4 MEMS 建模与仿真 / 171
 - 12.4.1 加工过程模拟 / 172
 - 12.4.2 器件特性仿真 / 173

12.4.3	器件行为模型与系统仿真	/	174
12.5	宏模型	/	174
12.5.1	微机械宏模型技术现状及类型	/	175
12.5.2	宏模型设计的基本原则和常用方法	/	176
12.6	建模语言 VHDL-AMS 简介	/	177
12.6.1	VHDL-AMS 语言的起源:VHDL 语言	/	177
12.6.2	VHDL-AMS 语言基本特点	/	177
12.6.3	VHDL-AMS 语言的语法	/	178
12.6.4	微机械系统 VHDL-AMS 描述举例	/	181
12.7	常用软件介绍	/	182
12.7.1	SUGAR	/	182
12.7.2	AnsysMems	/	186
12.7.3	MEMS Pro	/	189
	参考文献	/	192

第 1 章

概论

1.1 微机电系统的定义

为了说明微机电系统 (Micro Electro Mechanical System, MEMS), 还是先从机电系统谈起。现代汽车就是一个典型的机电系统, 有几百只传感器、电子控制的点火装置、进油和进气量控制系统、制动系统、安全气囊, 甚至电子导航系统。由传感器检测出汽车的运行状况, 并以电信号的形式将信息传送给电子控制电路, 电子控制电路则根据这些信息作出判断并发出控制命令, 这些命令通过机械执行器实现对汽车运动状态的控制。由此可知机电系统的基本组成部分是传感器、电子控制电路 (微处理器) 和机械执行器。

当人们在微电子技术, 尤其是超大型规模集成电路 (Integrated Circuit, IC) 技术基础上发展出了微机械加工技术, 如硅微加工、光刻电铸模造 (LIGA) 技术和精密机械加工, 并将用微机械加工技术制成的微执行器, 与微电子器件甚至固态传感器有机地集成于一体, 则发展出了微机电系统。

微机电系统的概念始于 20 世纪 80 年代, 一般泛指尺度在亚微米至亚毫米范围的装置, 目前定义尚未统一。对应于微机电系统有不同的相关术语及其解释。

① MEMS [Micro Elector Mechanical System, 由美国北卡罗来纳微电子中心提出 (MCNC)] 微机电系统是由电子和机械组成的集成化器件或系统, 其中采用与集成电路兼容的大批量处理工艺制造的, 并且尺寸在微米到毫米之间。将计算、传感与执行融合为一体, 从而改变了感知和控制自然界的方式。

② Micro System Technology [由欧洲 NEXUS 提出 (The Network of Excellence in Multifunc-tional Microsystems)] 微结构产品具有微米级结构, 并具有微结构形状提供的技术功能。微系统由多个微元件组成, 并作为一个完整的系统进行优化, 以提供一种或多种特定功能, 在许多场合包括微电子功能。

③ Micro Machine (由日本微机械中心提出) 微机械是由只有几毫米大小的功能元件组成的, 它能够执行复杂、细微的任务。

④ Micro System [由国际电工委员会提出 (ICE)] 微系统是微米量级内的设计和制造技术。它集成了多种元件, 并适于低成本大产批量生产。

这些术语及其解释虽然有一定的不同处, 但有一点是相同的, 即微机电系统是由关键尺度在亚微米至亚毫米范围内的电子和机械元件组成的器件或系统, 它将传感、处理与执行融

为一体，以提供一种或多种特定功能。

微机电系统通过尺寸和功能来定义，并不限于任何制作工艺，通过工艺技术的不断发展和完善，微机电系统的产品越来越多，应用越来越广泛。

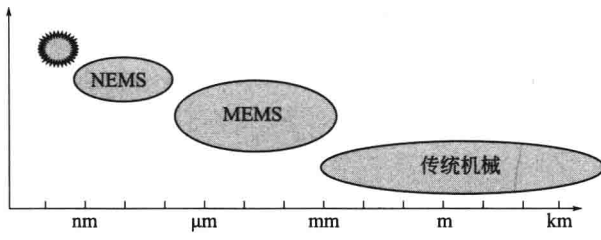


图 1-1 MEMS 的尺度范围

微机电系统器件的微小尺寸不是指总尺寸，而指特征尺寸。特征尺寸是决定器件性质和加工工艺的关键尺寸，如扩散硅压力传感器的膜厚。如图 1-1 所示，特征尺寸在亚毫米以上的机械电子系统基本上属于传统机电一体化装置，传统的机械加工技术已经能够满足要求。而特征尺寸在亚微米以下的机械电子系统，由于纳米效应、

量子效应的作用，其理论基础与加工技术已经完全改变，应属于纳机电系统（Nano Electromechanical System, NEMS）。

由于微机电系统的基于微电子技术的背景，它具有一般集成电子器件的共同优点，如适于批量加工、可低成本大批量生产，还有微型化带来的高速化、功耗低等优点，因此可以开拓出许多前所未有的应用领域。国内外一些有实力的半导体公司和研究机构，纷纷投入力量，开发和生产了不少有特色的产品，其应用已广泛渗透到现代科技领域。

汽车内安装的微传感器已达几十上百个，用于传感气囊，压力、温度、湿度、气体等的状况，以满足汽车行驶中的多种控制需求。其中用于制导、卫星控制的微惯性传感器及微型惯性测量组合在汽车中也能应用于自动驾驶、防撞气囊、防抱死系统（ABS）、定速控制。

在生物医学方面，特别是现代生物医疗领域，已通过微机电系统出色地解决了许多以前不能解决的问题。例如，增高体温法治疗癌症是利用超声波或无线电波的能量把身体某部位加热到 43℃ 以杀死癌细胞。在治疗时温度不够则效果不好，而温度过高又会伤害周围组织，但医生很难判断肿瘤部位是否达到了温度。美国斯坦福大学研究所研制的微型温度传感器可注射到肿瘤中去，而且只在加热时停留在那里。又如血管成形手术中，在动脉中推动一个小气球，以此来清除动脉壁上的硬化斑块，注射或吞服将用微机械加工法制成的微型压力传感器放在气球后面，医生通过它可以知道斑块清除工作进行得怎么样。通过微机械加工技术已经能制造出可以夹起一个红细胞的微型镊子。用微机械加工法制成的微型泵和阀，也可植入人体内，可用于微推进，如可按规定的剂量给出类似胰岛素那样的药物，以满足某种特殊疾病。

在信息领域中，计算机外设摄像头、鼠标投影仪、喷墨打印机、高密度海量数据存储器等中广泛应用了微机电系统技术。同时，作为信息产业的新方向，光通信正在向有光交换功能的全光通信网络方向发展，而无线通信则要求增强功能（如联网等）和减小功耗，包括美国朗讯公司在内的一些公司和大学正在研究全光通信网用的微系统及无线通信用射频微系统。

军事领域是微机电系统技术的最早应用点，大量采用微米/纳米和微系统器件改进武器性能，是发展新型高科技武器装备的方向。如微型加速度计已成功用于武器系统以改进武器性能。

航空领域中，微机电系统技术用于改进飞机性能、保证飞机安全舒适、减少噪声。而在航天方面则用于天际信息网、微重力测量。

能在硅片平面内做大范围的旋转与移动的新型微机械，标志着微机械加工技术已能解决诸如机器人运动关节等重要部件的制造。已用此技术制成的微型涡轮机、微型机械手，堪称小巧玲珑，令人叹服，在生物医疗等当代尖端科技应用中有难以估量的作用。

以上是业已开发、生产的大批微机电产品中的几个典型例子，清楚表明微机电系统确实是一个生机勃勃、潜力巨大的领域。

1.2 微机电系统的发展现状

(1) 国外的发展现状

军事应用的牵引，使得微机电系统研究得到迅速发展。其投资集中用于研究和发展先进材料、器件、系统和加工方法，而这些技术又快速方便地向实用化转化。

美国国家自然科学基金、先进研究计划、国防部等投资 1.4 亿美元进行微机电系统技术研究。最新资料表明，美军已将今后微机电系统在军事领域的应用归纳为九大类，确定了利用 MEMS 技术改进武器性能的九大主攻方向。

- ① 武器制导和个人导航的惯性导航组合；
- ② 超小型、超低功率无线通信（RF 微米/纳米和微系统）的机电信号处理；
- ③ 军需跟踪、环境监控、安全勘察和无人值守分布式传感器；
- ④ 小型分析仪器、推进和燃烧控制的集成流量系统；
- ⑤ 武器安全、保险和引信；
- ⑥ 嵌入式传感器和执行器；
- ⑦ 高密度、低功耗的大量数据存储器件；
- ⑧ 敌友识别系统、显示和光纤开关的集成微光学机械器件；
- ⑨ 用于飞机分布式空气动力学控制和自适应光学的主动共型表面。

美国的大学、国家实验室和公司已有大量的微机电系统研究小组，并有几种实用化的产品进入市场。如 Texas 公司已开发出用于彩色图像投影显示的数字镜面器件（DMD），Park 公司开发出的用于扫描隧道显微镜（STM）和原子显微镜（AFM）的微型传感器，由悬臂梁、微针尖以及信号检测和放大的集成电路组成。

欧共体为了加强各国之间的组织和合作，成立了 NEXUS（多功能微系统研究合作机构）组织。德国在 20 世纪 80 年代中期发展的 LIGA 工艺，可用来制作高宽比大于 200 的三维立体结构，并可实现大批量生产。目前德国的 LIGA 技术处于国际领先水平，其中有代表性的是 Karlsruhe 核研究中心、微技术研究所（IMM）和 Microparts 公司，研究人员已在实验室里制造出了微传感器、微电机、微执行器、集成光学和微光学元件、微型流量计以及直径为数百微米的金属双联齿轮等微机械零件。

日本曾制定了纳米制造计划（1985~1990 年）、埃技术计划（1992~2001 年）、微型机器人计划。目前日本共有以企业为中心的 60 多个微机电系统研究组，每年举行一次微机电系统国际研讨会。而 1990 年成立微机械中心（MMC）和微机械学会（MST），每年举行一次微机械展览会。

2001 年微机电系统的工业体系开始形成。Ge、Honeywell、Trw、Qualcomm、Omron 等公司有专门的微机电系统产品开发组，一些公司也提供代工服务。

2005 年起微机电系统的商业化进展加快，如 2006 年 HP 公司喷墨打印机销售达到 5 亿美元，Analog Devices 的传感器销售为 1.5 亿美元，Freescale Semiconduction 的压力及加速度传感器销售了 2 亿美元。新兴消费市场的扩展如手机、掌上智能电子产品、交互式电子产品、医疗等推动一些新公司及产品。其中有 Memsic 和 Stmicroelectronics 公司的加速度计，Invensense 的陀螺仪，Sitime 公司、Discera 公司、Silicon 公司的谐振器，Kknowles

公司的声传感器，Dust Network 公司的无线传感器，中国的重庆金山公司也推出了胶囊内窥镜。

综上所述，微机电技术已经受到工业发达国家的高度重视。从微机电发展的总体水平看，许多关键技术已经突破，正处于从实验室研究走向实用化、产业化阶段。而各国在开发微机电技术时，也各有特点。德国是采用 LIGA 技术代表发展起来的；日本则以精密加工技术为特点；而美国则主推以集成电路加工技术为基础的硅体加工技术。

由于硅加工技术所取得的成就，目前国际上硅加工技术已成为微机电系统的技术，集中在以下几点。

- ① 表面微加工技术向多层、集成化方向发展；
- ② 体微加工主要表现为键合与深刻蚀技术的组合，追求大质量块和低应力；
- ③ 表面微加工技术与体微加工技术进一步结合；
- ④ 设计手段向专用 CAD 工具方向发展。

(2) 国内发展现状

我国的微系统研究起步并不晚，在基础研究和相关技术方面都取得了一些有特色的成果。目前我国从事微机电系统研究的单位已有 60 多个，主要集中在高校、中科院及信息产业部的研究所，所取得的主要进展如下。

① 加工技术 北京大学微电子所建立了五套比较成熟的硅基微机械加工工艺，在 ICP Lag 效应抑制、金属剥离技术及硅化物在表面微机械中的应用等单项工艺技术取得了很大的进展。目前还在进行电路与微机电器件的集成化工艺研究，并已经取得了一些初步的成果。中科院上海微系统与信息技术研究所（原中科院上海冶金所）在原有重点实验室 2 吋硅片加工工艺线的基础上，引进了多种专用设备，具有了比较完备的加工能力。信息产业部电子第十三所也具有比较完备的加工设备，可以进行多种类型的器件加工，其中的熔硅工艺技术在国内外领先。清华大学微电子所在原有电路工艺实验室基础上开发相关的硅基微机电系统加工工艺，其中多孔硅的制备和腐蚀技术很有特色。上海交通大学主要开展了 LIGA 及准 LIGA 加工技术研究，开发出一套 DEM（Deep etching, Electroforming and Microreplication）工艺，具有工艺周期短，加工成本低等特点。

② 微陀螺 清华大学研制的振动轮式陀螺，利用熔硅工艺加工，具有机械耦合小、对外界加速度灵敏度低等特点。采用的“余弦”型弹性梁可以减小振动时的非线性。中科院上海微系统与信息技术研究所研制的电容式振动陀螺可以在空气环境中取得较高的 Q 值，不需要真空封装就可以很好地工作。复旦大学研制了一种利用相位检测的压阻式振动陀螺，与一般的振幅检测陀螺相比，具有高精度、低温度系数等特点。

③ 微型加速度计 国内研制微机械加速度计的单位有中科院上海微系统与信息技术研究所、北京大学微电子所，清华大学、信息产业部电子第十三所、信息产业部第四十九所、哈尔滨工业大学、华北工学院等十多家单位。表 1-1 为一些微机械加速度计样机指标。

表 1-1 一些微机械加速度计样机指标

单位名称	量程	灵敏度	线性度	分辨率	零轴稳定性
北京大学	-1~1g	3V/g	0.391%	1mg	2×10^{-4} mg
清华大学	±10g	>0.4V/g			
上海冶金所	±0.01~±1g	0.05%~0.1%			
信息产业部电子第十三所	>75g	0.1V/g		1mg	

④ 射频微机电系统 (RF MEMS) 总体水平离国际先进水平尚有一定差距。北京大学微电子所在 2000 年研制平面硅谐振器和侧向微机械继电器的基础上, 2001 年开发出了微机械可调电容和采用新型三明治硅梁结构的 RF 开关。清华大学研制出了基于多孔硅牺牲层技术的微电感, 并制作出了微机械天线和谐振器样品。重庆大学对用多晶硅技术制作微开关的技术进行了探索, 并制作出双 C 微带天线等样品。中国电子科技集团公司第五十五研究所利用表面工艺研制出了在 S 波段有很好射频性能的 RF 开关。信息产业部电子第十三所用硅溶片工艺研制出纵向单晶硅梁微机械开关, 并对开关的动态特性和失效模式进行了研究。华东师范大学研制出了基于牺牲层工艺的毫米波移相器。

⑤ 微光机电系统 (MOEMS) 国内的研究工作主要集中在面向全光传送网的 MEMS 光开关、可变光衰减器, 以及微小光学仪器等方面。北京大学开展了以扭转微镜为核心结构的光开关及其阵列化的研究, 已基于普通硅衬底研制出了 2×2 光开关阵列。清华大学开展了以法布里-泊罗 (F-P) 微腔为核心结构的光开关、运用材料应力参与驱动的光开关、可变光衰减器等研究。中科院微系统所开展了以上下垂直滑动微镜为核心结构的光开关及其阵列的研究。信息产业部电子第十三所开展了以水平滑动微镜为核心结构的光开关的研究。上海交通大学开展了基于非硅及硅材料的以电磁驱动微镜为核心结构的光衰减器的研究。重庆大学光电工程系开展了基于微机电系统的微光谱仪的研究。

⑥ 微机电系统计算机辅助技术 (MEMS CAD) 由北京大学牵头, 联合了东南大学、南开大学、华大公司、中国科技大学等国内优势单位, 在国家“973 计划”资助下开展了“微系统设计方法、建模、数据库和仿真相关问题研究”, 在华大公司开发的版图设计系统 ZLE 的基础上, 对微机电系统器件的设计工具、器件仿真、虚拟加工等方面开展了大量的开拓性、基础性、系统性工作。目前, 已经建立了一个包括版图设计、工艺模拟、性能分析等主要功能的 MEMS CAD 原型系统 IMEE1.0。其他单位在 MEMS CAD 方面的研究主要集中在器件的建模和仿真上, 如西北工业大学、清华大学、东南大学、复旦大学、中科院上海微系统与信息技术研究所等。

第 2 章

微尺度效应

2.1 概述

当构件的几何尺寸缩小到一定范围时将出现尺寸效应，即材料性能和构件的力学行为将发生很大的变化。

尺寸效应的影响反映在许多方面，构件尺寸减小使材料内部缺陷减少，因而材料的机构强度显著增加。微构件的弹性模量、抗拉强度、断裂韧性、疲劳强度以及残余应力等均与大构件不同，而且有些表征材料性能的物理量需要重新定义。

其次需考虑表面效应，即微小尺寸使得表面力起主要作用，需对传统机械的力学原理与分析进行修正。尺度的微细，使得表面积体积比增大，凡与尺寸高次方成比例的力，如惯性力、电磁力等的作用相对减弱，而与尺寸低次方成比例的黏性力、表面张力、静电力、摩擦力等的作用显著增加。

表面积与体积之比相对增加也使得热传导和化学反应速度也相应增加。如对于发动机来说，气量和发动机的推力与特征尺度的平方成正比，而发动机的质量是特征尺度的三次方，所以当发动机尺度减小时，其推力重量比就会按特征尺寸的减小而线性增加。根据推算，当发动机缩小至毫米量级时，其推力重量比可达 100 : 1 左右，比目前最好的发动机还高一个量级。又如，由于离心力与特征尺度平方成正比，在微机电系统中利用离心力来驱动流体已不再合适，故利用表面黏性力来泵进流体。又如，由于热现象的惯性很大，所以在常规尺度条件下，很难利用热现象去驱动和控制流动介质。然而当尺寸应微小化后，表面换热大大增加，时间常数很小，使传热现象应用于流动控制成为可能。

声、光、电、磁、力、流体、传热等基本现象将随着尺度减小出现新的效应，如隧道效应。

微构件的尺度效应和表面效应也是发生黏附失效的原因。特别在加工悬臂梁和加工膜时或在微构件运动过程中，经常会出现相邻构件的平行表面间的黏附，甚至发生粘连。其原因是由于微机电系统构件尺度的微小化，致使黏性力、表面张力、静电力、摩擦力等相对于惯性力、电磁力的作用显著增强，构件表面效应突出。加上构件间的间隙小、表面光滑，易受表面力的影响的缘故；即使在真空条件下，由于量子效应产生的表面力也会产生粘连。