

# MEMS 和微系统—— 设计与制造

## MEMS & Microsystems——Design and Manufacture

---

(美) 徐泰然 (Tai-Ran Hsu) 著  
王晓浩 冯焱颖 熊继军 杨 兴 蓝金辉 译  
周兆英 冯焱颖 杨 兴 校



机械工业出版社

微系统近年来迅速发展,在航天、汽车、生物技术、消费产品、国防、环境保护和安全、保健、制药,以及远程通信工业等方面都有广泛的应用。本书对 MEMS 技术的基础进行了深入观察,共分 11 章,介绍了微系统工程的发展、市场、产品、微系统所涉及的各工程学科的基础知识、尺度效应、微系统工程的材料、微制造和微加工工艺及微系统的设计和封装等内容。

本书可作为本科生或研究生课程的教材,还可以作为专业人士及相关人员了解 MEMS 的参考书。

Tai-Ran Hsu

MEMS & MICROSYSTEMS-DESIGN AND MANUFACTURE

ISBN: 0-07-120476-8

Copyright 2002 by the McGraw-Hill Companies, Inc .

Original language published by The McGraw-Hill Companies . Inc . All Rights reserved . No part of this publication may be reproduced or distributed in any means , or stored in a database or retrieval system , without the prior written permission of the publisher .

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co . and China Machine Press .

本书中文简体字翻译版由机械工业出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封面贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签,无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2002-1258

## 图书在版编目 (C I P) 数据

MEMS 和微系统——设计与制造/ (美) 徐泰然著; 王晓浩等译 .—北京: 机械工业出版社, 2004.1

ISBN 7-111-13226-2

.M... . 徐... 王... . 微电子技术-应用-机械系统 .TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 094103 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 周国萍 白 刚 版式设计: 冉晓华 责任校对: 韩 晶

封面设计: 陈 沛 责任印制:

印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2004 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷

1000mm × 1400mm B5 · 13.125 印张 · 511 千字

0 001— 册

定价: 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换  
本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646  
封面无防伪标均为盗版

## 常用物理量推荐单位

---

长度	m
面积 ( $A$ )	$m^2$
体积 ( $V$ )	$m^3$
时间 ( $t$ )	s
温度 ( $T$ )	或 K
力 ( $F$ )	N
重量 ( $W$ )	1 千克力 (kgf) = 9.81 N
压力 ( $P$ )	$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$
质量 ( $m$ )	g
质量密度 ( )	$\text{g}/\text{cm}^3$
能量	$\text{J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$
功率	$\text{W} = 1 \text{ J}/\text{s} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{s}$
应力 ( )	$\text{MPa} = 10^6 \text{ Pa} = 10^6 \text{ N}/\text{m}^2$
速度 ( $V$ )	$\text{m}/\text{s}$
加速度 ( $a$ )	$\text{m}/\text{s}^2$
比热容 ( $c$ )	$\text{J}/(\text{g} \cdot \text{ )}$
热导率 ( $k$ )	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{ )}$
传热系数 ( $h$ )	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{ )}$
热扩散率 ( )	$\text{m}^2/\text{s}$
线膨胀系数 ( )	/
动力粘度 ( $\mu$ )	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$



## 单位换算

长度	$1\text{m} = 39.37\text{in} = 3.28\text{ft}$ $1\text{cm} = 10^{-2}\text{m}$ $1\text{mm} = 10^{-3}\text{m}$ $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$ $1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$
面积	$1\text{m}^2 = 10.76\text{ft}^2$
体积	$1\text{m}^3 = 35.29\text{ft}^3$ $1\text{L} = 1000\text{cm}^3$
温度	$1\text{\textcircled{C}} = (5/9) \times (1\text{\textcircled{F}} - 32)$ $1\text{K} = 1\text{\textcircled{C}} + 273$
力	$1\text{N} = 0.2252\text{lbf}$
重量	$1\text{kgf} = 2.2\text{lbf}$
压力和应力	$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa} = 145.05\text{psi}$ $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2 = 10\text{dyn/cm}^2 = 2.089 \times 10^{-2}\text{lbf/ft}^2$
质量	$1\text{g} = 68.5 \times 10^{-6}\text{slug}$ $1\text{kg} = 1000\text{g} = 2.2\text{lb}$
能量	$1\text{J} = 1\text{N}\cdot\text{m} = 0.2389\text{cal} = 10^7\text{ergs} =$ $0.7376\text{ft}\cdot\text{lbf} = 9.481 \times 10^{-4}\text{Btu}$ $1\text{kW}\cdot\text{h} = 3.6 \times 10^6\text{J} = 3413\text{Btu}$
功率	$1000\text{W} = 1.341\text{hp} =$ $737.6\text{ft}\cdot\text{lbf/s} = 0.9483\text{Btu/s}$ $1\text{W} = 1\text{J/s}$
速度	$1\text{m/s} = 3.28\text{ft/s}$
比热容	$1\text{J/(g}\cdot\text{\textcircled{C}}) = 0.2394\text{Btu/(lbm}\cdot\text{\textcircled{C}})$
热导率	$1\text{W/(m}\cdot\text{\textcircled{C}}) = 13.3816 \times 10^{-6}\text{Btu/(in}\cdot\text{s}\cdot\text{\textcircled{C}})$
传热系数	$1\text{W/(m}^2\cdot\text{\textcircled{C}}) = 1.1151 \times 10^{-6}\text{Btu/(in}^2\cdot\text{s}\cdot\text{\textcircled{C}})$
热扩散率	$1\text{m}^2/\text{s} = 1545\text{in}^2/\text{s}$
线膨胀系数	$1/\text{\textcircled{C}} = 0.5555/\text{\textcircled{F}}$
动力粘度	$1\text{N}\cdot\text{s/m}^2 = 1\text{Pa}\cdot\text{s} = 10\text{poise} = 0.02089\text{slug}\cdot\text{(ft}\cdot\text{s)}$

## 译 校 者 序

---

微系统是集微型机构、微型传感器、微型执行器以及信号处理和控制电路甚至接口、通信和电源等于一体的微型器件或系统。微系统具有成本低、体积小、重量轻、可靠性高、能实现复杂功能、可批量制作、可集成等特点，有广阔的应用前景。经过十多年的发展，在设计基础、制造技术与应用系统的研究上有许多成果，正在形成一个新的产业。微系统的习惯术语有：MEMS（Micro Electro-Mechanical System，微机电系统）或 MOEMS（微光机电系统，美国），Micro-Machine（微机械，日本），MicroSystems（微系统，欧洲）。

微系统为信息化的数字世界与现实自然（模拟）世界提供接口，正在机电、信息和生化领域内形成一批特征尺度为微米级的产品（器件、系统和工具，包括微结构、微传感器、微执行器以及与 IC 集成的微系统），为科技发展提供新的技术平台和方法学；微系统正引起微制造第二次新的发展，可用类似集成电路的方法制造复杂的、高宽深比的三维微结构，并和集成电路集成，成为集成微系统；微系统是多学科的领域，有 Physical MEMS、Optical MEMS、Chemical MEMS、Bio-MEMS、RF MEMS 和 Power MEMS 等；微系统还将与纳米技术结合，成为纳米-微系统或纳系统。

微系统的发展需要培养人才，在许多国家已经开设了不同类型的大学生和研究生课程。国内近年来许多学校开出微系统的课程，需要有合适的教材或教学参考书。

我们阅读了机械工业出版社引进的这本外文书。该书作者的目标是为高年级本科生和研究生新生提供机械、电子、制造和相关工程学科在微系统设计和制造方面必要的基础知识和经验。作者论述了微系统设计、加工和封装涉及的工程科学，如固体力学、流体力学和热力学分析，以及尺度效应；还论述了微系统设计、材料、工艺和封装的知识和技术，微系统当前和潜在的市场，介绍了一些设计实例，每章还附有习题或思考题。这些内容是基本的和必要的，很有特色。我们觉得对初学者很有帮助，对从事微系统的工程技术人员和管理人员也很有参考价值，便请王晓浩同志组织人力进行了翻译。第 1 章、第 3 章和第 10 章由王晓



浩翻译，第 2 章和第 4 章由蓝金辉翻译，第 5 章、第 6 章和第 7 章由杨兴翻译，第 8 章、第 9 章和第 11 章由熊继军翻译，王晓浩和冯焱颖对全书翻译进行了统稿。周兆英、冯焱颖和杨兴分别对各个章节进行了初步校对，最后周兆英统校了全书。

限于译校者水平，以及时间限制，译文中定有许多不足之处，敬请读者批评指正。

译校者

2003 年 8 月 31 日于清华大学

# 前 言

---

过去十年中，微系统工程的技术优势在发展速度和新应用数目方面，给人非常深刻的印象。微系统工程包括微机电系统（MEMS）及相关设备的设计、制造和封装。微系统在航天、汽车、生物技术、消费产品、防御、环境保护和安全、保健、制药，以及远程通信工业等方面都有应用，这就使很多专家可以解释微系统及相关产品在 2000 年的 820 亿美元营业收入。

快速增长的市场对 MEMS 和微系统的强烈需求吸引了人们强烈的兴趣，同时也对工程教育工作者在他们各自的机构内部开设这个学科的课程提出了需求。同样地，很多从业工程师表现出了类似的兴趣，渴望获得微系统设计和制造方面必要的知识和经验。这些人在实现他们的目标和目的方面面对着巨大的困难，因为缺乏在协同集成微系统工程涉及的科学和工程方面这一宽广学科领域的综合性书籍。市场对于能向读者提供对微系统技术和微系统产品设计、制造和封装方法学整体认识的书籍的需求非常迫切，这些需求推动了我完成这本书。

这本书的目标是向高年级本科生和低年级研究生提供机械、电子、制造和相关工程学科在微系统设计和制造方面必要的基础知识和经验。重点放在学生前几年获得的关于微系统设计和制造的知识和经验的应用方面。相关主题的编排和组织以及本书中的很多设计实例也会引导从业工程师进入微系统工程领域。

本书是打算作为本科生或研究生 15 星期长的学期课程的课本。学生应该具备大学数学、物理和化学，以及基本的材料科学、电子学和机械设计等工程学科的知识。

本书由 11 章组成：

第 1 章从微系统概述及微加工的发展开始，将话题逐渐引到微系统的生产，以对各种类型的微系统当前和潜在的市场的展望结尾。

第 2 章介绍了当前存在的微传感器、致动器和电动机、阀、泵，以及微系统中应用的流体控制技术。

第 3 章提供了适用于微系统设计和加工的工程科学的专题概述。

第 4 章包括与微系统设计和封装相关的工程力学专题。包括可变形固体力学和机械振动理论，还有微结构中常见的薄膜界面的热力学和断裂力学的基本方程。本章用应力分析的有限元方法概要做结尾。

第 5 章讨论微系统设计中的热流体工程原理。从流体力学原理和微流体流动的毛细效应开始，介绍了气体在亚微米和纳米尺度的稀疏效应，以及亚微米尺度系统热传导的修正方程。

第 6 章涉及尺度效应，被广泛用于微器件和系统的概念设计。学生会学到将微系统相关的确定物理量按比例缩小的正面和负面的影响。

第 7 章讨论了普通微部件和器件的材料。介绍了有源和无源基底以及封装材料。其他微系统材料，例如压阻、压电和聚合物，也进行了描述。

第 8 章是对用于微制造的微加工工艺的概述。

第 9 章包括三个常用的微制造技术：体硅微制造、表面微加工和 LIGA 工艺。

第 10 章和第 11 章提供了微系统设计和封装设计的要素。介绍了 CAD 和有限元方法在这些工作中的使用。精选的关于微压力传感器和微流体技术的实例研究和例题说明了这些方法在产品设计和封装中的应用。

在 15 星期的学期里面每星期讲授 3 个小时，覆盖本书中各式各样的主题，对教师是一个很大的挑战。由于这个原因，在后续的部分有基于我个人在给两类学生教授这门课程的经验“给教师的建议”，在此部分有教授 15 星期长或 10 星期长学期的 MEMS 或微系统课程相应的主题选择建议。

准备这样篇幅的一本书的工作是不可能由单独一个人的努力完成的。我很高兴能够与像精通纳米流体动力学的 Ali Beskok 和精通微流体毛细管电泳设计和建模的 S. Krishnamoorthy 博士这样的专业人士沟通。我也非常荣幸有这些有献身精神和能力的学生 Ta-jen Tai、Valerie Barker、Matthew Smith、Jeanette Wood、Jacob Griego 和 Yen - chang Hu，他们分担了许多在我为本书开发的例题中填充详细计算和检查数据准确度的工作。我还要感谢 Mindy Kwan 帮助数字化本书中的照片和图表。另外，也要感谢国内及国外公司不同部门提供本书所收录的重要照片和图片。这本书的完成是 1995-1998 年我主要负责的本科生机械电子学课程开发项目的一部分。非常感谢国家科学基金（NSF）本科生教育部门对本项目的资助。

我非常感谢下列评审人不知疲倦的努力，做了很多超出职责的工作，使得这本书尽可能全面和明晰。

Norman Tien, 康奈尔大学

Robert S. Keynton, 路易斯维尔大学

Imin Kao, 纽约州立大学石溪分校

Dennis Polla, 明尼苏达大学

Zeynep Celik-Butler, 南卫理公会大学

Ashok Srivastava, 路易斯安那州立大学



Ryszard Pryputniewicz, 伍斯特理工学院

Michael Y. Wang, 马里兰大学

Michael Hstand, 科罗拉多州立大学

Liwei Lin, 加州大学伯克利分校

Masood Tabib-Azar, 凯思西部保留地大学

George F. Watson, 审稿人

我非常感谢新加坡 Ngee Ann 理工大学的 Cheah Choo Lek, 他对手稿进行了细心和认真推敲的阅读, 提出了很多改进建议。最后, 但不仅限于此, 我要感谢 McGraw-Hill 的编辑部及其全体职员提供的出色服务。我也非常感激 Jonathan Plant 的支持和有效的帮助。

徐泰然

San Jose. 加利福尼亚

## 给教师的建议

这本书是为高年级本科生和低年级研究生写的课本。它还可以作为参考书，引领从业工程师进入微系统工程这一正在增长的领域。它的内容是为 15 星期长的学期课程设计的，同时适合本科生和研究生水平。在省略一些重要材料的情况下，本书也适用于 10 个星期的课程。

这本书将对具备下述学术背景和经验的学生更加有效：

1. 有充足的大学数学、物理和化学知识的高年级本科生。
2. 具备基本的电路和电子工程、材料科学、工程力学和机械设计必备课程或相当知识的学生。
3. 有使用 MachCAD 和 MatLAB 等数学软件经验的学生。

教授一门含有如此多样化主题的 MEMS 课程，例如本门课程要在 15 或 10 个星期长的学期内每星期讲授 3 小时，对教师是一个挑战。在同一个班中，可能各个学生的学术和经验背景差异非常大，这也加重了上述问题。下面的进度表 A 和进度表 B 为教师在不同长度学期授课提供了选择讲授主题的建议。

进度表 A 15 个星期长的学期

星期数	本科生班级	研究生班级
1	第 1 章	第 1 章
2	第 2 章	第 2 章
3	第 3 章	第 3.5、3.8、3.9 节，将第 3 章其他内容作为阅读材料，第 4.1、4.2 节
4	第 4.1、4.2、4.3 节	第 4.3、4.4 节
5	第 4.4、4.6、4.7 节	第 4 章剩余部分和第 5.1、5.2 节
6	第 5.1、5.2、5.4、5.6 节	第 5.3~5.7 节
7	第 5.8 和 5.9 节	第 5.8~5.10 节
8	第 6 章	第 6 章和第 7.1~7.3 节
9	第 7.1~7.5 节	第 7.4~7.11 节
10	第 7.6~7.11 节	第 8.1~8.5 节
11	第 8.1~8.5 节	第 8.6~8.10 节

(续)

星期数	本科生班级	研究生班级
12	第 8.6 ~ 8.10 节	第 9 章和第 10.1、10.2 节
13	第 9 章	第 10.3 ~ 10.6 节
14	第 10.1 ~ 10.4、10.6、10.7、10.9 节	第 10.7 ~ 10.9 节
15	第 11.1 ~ 11.8、11.10 节	第 11 章

**进度表 B 10 个星期长的学期**

星期数	本科生班级	研究生班级
1	第 1 章和第 2 章 (阅读和理解)	第 1 章和第 2 章 (阅读和理解)
2	第 3.5、3.8、3.9、4.1、4.2、4.3.1、4.3.2、4.3.3、4.3.6 节	第 3 章 (阅读) 和第 4 章 (跳过 4.3.1、4.3.2 节)
3	第 4.4、4.7、5.4、5.6 节	第 5.1、5.4 ~ 5.10 节
4	第 5.8、5.9、5.10 节	第 6 章
5	第 7.1 ~ 7.9 节	第 7 章
6	第 7.10、7.11、8.1 ~ 8.3 节	第 8.1 ~ 8.5 节
7	第 8.4 ~ 8.10 节	第 8.6 ~ 8.10、9.1、9.2 节
8	第 9 章	第 9.3、9.4、10.1 ~ 10.4 节
9	第 10.1、10.2、10.4、10.7、10.9 节	第 10.5 ~ 10.9、11.1 ~ 11.3 节
10	第 11.1 ~ 11.6 节	第 11.4 ~ 11.8、11.10 节

当然，教师们也可根据自己的判断力来选择主题，这样会比上面表格里面的建议更适合他们特殊的偏好和日程。

作者鼓励使用黑板来讲解本书提供的例题，这样比使用图片或幻灯向学生快速展示这些例题效果更好。仔细选择主题的设计项目，例如广泛的特殊微加工工艺等学术主题，对学生是有价值的经验。这些项目可以分配给包含 2 个或 3 个学生的小组。应该给这些项目以适当的分数，例如全部分数的 20%。可以为这些项目的陈述保留一个特别的时间空当或者一个“项目日”，用于同等评论一个班的所有学生。这些陈述会使班里的所有学生受益，因为他们能够通过陈述以及后面的积极讨论和提问彼此之间相互学习。教师们可以汇总这些项目的想法和结果，作为来年他们讲稿的附加材料。

## 关于作者



徐泰然教授从中国台湾国立成功大学获得学士学位，从加拿大弗雷德溜克顿 New Brunswick 获得硕士学位，从加拿大蒙特利尔 McGill 大学获得博士学位。他的所有学位都是机械工程专业。

他现在是位于美国加利福尼亚圣何塞的圣何塞州立大学 (SJSU) 的机械和航空工程教授。他在 1990 年作为系主任 (他保持这个位置到 1998 年) 加入 SJSU。在加入 SJSU 以前，他在加拿大温尼伯马尼托巴大学拥有一个类似的职位。

在他从事学术职业以前，他作为一个设计工程师，在美国和加拿大的大公司里主要从事热交换器、蒸汽发电厂、大蒸汽轮机，以及核反应堆燃料系统等方面的工作。他出版了四本有限元方法和计算机辅助设计方面的书，发表了 70 多篇热力学方面的论文，应用范围从核反应堆到微电子封装。他的其他研究活动包括用于高精度测量的激光全息测量方法和计算机辅助设计。他是 1997 年 SJSU 开发和设置本科生机械电子学主干课程的前驱者，也是这个国家第一次开设这种课程的人。他当前的研究方向包括微系统设计和封装，以及针对本科生和研究生的关于微系统和纳米技术的工程教育。

他积极参加由卓越的专业团体举办的微电子封装、机械电子学、MEMS 教育和微系统技术等国际、国内学术会议和论坛。他还是 IEEE Transactions of CPMT and Advanced Packaging 在机械电子学和 MEMS 封装专栏的特约编辑。

# 目 录

译校者序		
前言		
给教师的建议		
关于作者		
<b>第 1 章 MEMS 和微系统概论</b> .....	1	
1.1 MEMS 和微系统 .....	1	
1.2 典型 MEMS 和微系统 产品 .....	6	
1.3 微加工的发展 .....	10	
1.4 微系统和微电子 .....	11	
1.5 微系统设计和制造的多学 科性质 .....	12	
1.6 微系统和小型化 .....	14	
1.7 微系统在汽车工业中的 应用 .....	20	
1.8 微系统在其他工业中的 应用 .....	26	
1.8.1 在卫生保健工业中的 应用 .....	26	
1.8.2 在航天工业中的应用 .....	27	
1.8.3 在工业产品中的应用 .....	28	
1.8.4 在消费产品中的应用 .....	28	
1.8.5 在电信中的应用 .....	28	
1.9 微系统的市场 .....	29	
习题 .....	30	
<b>第 2 章 微系统的工作原理</b> .....	32	
2.1 引言 .....	32	
2.2 微传感器 .....	32	
2.2.1 声波传感器 .....	33	
2.2.2 生物医学传感器和生物 传感器 .....	33	
2.2.3 化学传感器 .....	36	
2.2.4 光学传感器 .....	38	
2.2.5 压力传感器 .....	39	
2.2.6 热传感器 .....	45	
2.3 微驱动 .....	47	
2.3.1 热力驱动 .....	48	
2.3.2 形状记忆合金驱动 .....	48	
2.3.3 压电晶体驱动 .....	49	
2.3.4 静电力驱动 .....	50	
2.4 带有微型致动器的 MEMS 器件 .....	53	
2.4.1 微型夹钳 .....	53	
2.4.2 微型电动机 .....	55	
2.4.3 微型阀 .....	56	
2.4.4 微型泵 .....	58	
2.5 微加速度计 .....	58	
2.6 微流体器件 .....	61	
习题 .....	63	
<b>第 3 章 微系统设计和制造的         工程科学</b> .....	66	
3.1 引言 .....	66	
3.2 物质的原子结构 .....	66	
3.3 离子和离子化 .....	68	
3.4 物质的分子理论和		



分子间力 .....	69	4.7.3 FEA 的输入信息 .....	144
3.5 半导体掺杂 .....	71	4.7.4 FEA 应力分析的输出 信息 .....	144
3.6 扩散工艺 .....	73	4.7.5 图形输出 .....	145
3.7 等离子物理 .....	79	4.7.6 总评 .....	145
3.8 电化学 .....	80	习题 .....	146
3.8.1 电解 .....	81		
3.8.2 电液动力学 .....	82	<b>第 5 章 热流体工程和微系统 设计 .....</b>	<b>151</b>
3.9 量子物理学 .....	85		
习题 .....	86	5.1 引言 .....	151
<b>第 4 章 微系统设计中的 工程力学 .....</b>	<b>90</b>	5.2 宏观和介观流体力学 基础回顾 .....	<b>151</b>
4.1 概述 .....	90	5.2.1 流体的粘性 .....	152
4.2 薄板的静力弯曲 .....	91	5.2.2 流线和流管 .....	154
4.2.1 周边固支圆板的弯曲 .....	93	5.2.3 控制体和控制面 .....	154
4.2.2 四边固支矩形板的弯曲 .....	95	5.2.4 流动模式和雷诺数 .....	154
4.2.3 四边固支正方形板的 弯曲 .....	96	5.3 连续介质流体动力学基本 方程 .....	154
4.3 机械振动 .....	99	5.3.1 连续性方程 .....	154
4.3.1 基本公式 .....	99	5.3.2 动量方程 .....	156
4.3.2 共振 .....	102	5.3.3 运动方程 .....	159
4.3.3 微型加速度计 .....	104	5.4 圆管中的层流流动 .....	161
4.3.4 加速度计的设计理论 .....	105	5.5 计算流体动力学 .....	163
4.3.5 阻尼系数 .....	112	5.6 微管道中不可压缩流体的 流动 .....	165
4.3.6 谐振式微传感器 .....	119	5.6.1 表面张力 .....	165
4.4 热力学 .....	123	5.6.2 毛细效应 .....	167
4.4.1 材料机械强度的热效应 ...	124	5.6.3 微泵 .....	168
4.4.2 蠕变 .....	124	5.7 亚微米和纳米尺度的流体 流动 .....	169
4.4.3 热应力 .....	125	5.7.1 稀薄气体 .....	170
4.5 断裂力学 .....	135	5.7.2 努森数和马赫数 .....	170
4.5.1 应力强度因子 .....	135	5.7.3 微气体流动建模 .....	171
4.5.2 断裂韧度 .....	137	5.8 固体中的热传导概述 .....	173
4.5.3 界面断裂力学 .....	139	5.8.1 热传导的一般原理 .....	173
4.6 薄膜力学 .....	141	5.8.2 热传导的傅立叶定律 .....	174
4.7 有限元应力分析概述 .....	142	5.8.3 热传导方程 .....	175
4.7.1 原理 .....	142		
4.7.2 工程应用 .....	143		

5.8.4 牛顿冷却定律 .....	176	7.4.5 硅的力学性能 .....	224
5.8.5 固体-流体相互作用 .....	177	7.5 硅化合物 .....	226
5.8.6 边界条件 .....	178	7.5.1 二氧化硅 .....	226
5.9 多层薄膜中的热传导 .....	182	7.5.2 碳化硅 .....	227
5.10 亚微米尺度固体中的热 传导 .....	187	7.5.3 氮化硅 .....	227
5.10.1 薄膜的热导率 .....	189	7.5.4 多晶硅 .....	228
5.10.2 薄膜的热传导方程 .....	190	7.6 硅压电电阻 .....	229
习题 .....	191	7.7 砷化镓 .....	233
<b>第 6 章 微型化中的尺度效应</b> .....	197	7.8 石英 .....	234
6.1 尺度的介绍 .....	197	7.9 压电晶体 .....	235
6.2 几何结构学中的尺度 .....	197	7.10 聚合物 .....	240
6.3 刚体动力学中的尺度 .....	200	7.10.1 作为工业材料的 聚合物 .....	240
6.3.1 动力中的尺度 .....	200	7.10.2 用于 MEMS 和微系统的 聚合物 .....	241
6.3.2 Trimmer 力尺度向量 .....	200	7.10.3 导电聚合物 .....	241
6.4 静电力中的尺度 .....	202	7.10.4 Langmuir-Blodgett (LB) 膜 .....	242
6.5 电磁力中的尺度 .....	204	7.11 封装材料 .....	243
6.6 电学中的尺度 .....	206	习题 .....	245
6.7 流体力学中的尺度 .....	207	<b>第 8 章 微系统加工工艺</b> .....	249
6.8 热传递中的尺度 .....	210	8.1 引言 .....	249
6.8.1 热传导中的尺度 .....	210	8.2 光刻 .....	249
6.8.2 热对流中的尺度 .....	211	8.2.1 概述 .....	249
习题 .....	213	8.2.2 光刻胶及其应用 .....	251
<b>第 7 章 用于 MEMS 和微系统的     材料</b> .....	215	8.2.3 光源 .....	252
7.1 引言 .....	215	8.2.4 光刻胶的处理 .....	252
7.2 衬底和晶片 .....	215	8.2.5 光刻胶的去除和烘干 .....	253
7.3 活性衬底材料 .....	216	8.3 离子注入 .....	253
7.4 作为衬底材料的硅 .....	217	8.4 扩散 .....	256
7.4.1 用于 MEMS 的理想 衬底 .....	217	8.5 氧化 .....	258
7.4.2 单晶硅和晶片 .....	217	8.5.1 热氧化 .....	258
7.4.3 晶体结构 .....	220	8.5.2 二氧化硅 .....	259
7.4.4 密勒指数 .....	222	8.5.3 热氧化的速率 .....	259
		8.5.4 由颜色来确定氧化层 厚度 .....	263



8.6 化学气相沉积 .....	263	9.5.3 LIGA 工艺 .....	302
8.6.1 CVD 的工作原理 .....	264	习题 .....	302
8.6.2 CVD 中的化学反应 .....	264	<b>第 10 章 微系统设计</b> .....	<b>307</b>
8.6.3 沉积的速率 .....	265	10.1 引言 .....	307
8.6.4 增强 CVD .....	271	10.2 设计根据 .....	308
8.7 物理气相沉积——溅射 ...	273	10.2.1 设计约束 .....	309
8.8 外延沉积 .....	274	10.2.2 材料选择 .....	310
8.9 腐蚀 .....	276	10.2.3 制造工艺选择 .....	311
8.9.1 化学腐蚀 .....	277	10.2.4 信号转换选择 .....	312
8.9.2 等离子刻蚀 .....	277	10.2.5 机电系统 .....	314
8.10 微加工工艺小结 .....	278	10.2.6 封装 .....	315
习题 .....	279	10.3 工艺设计 .....	315
<b>第 9 章 微制造综述</b> .....	<b>284</b>	10.3.1 光刻 .....	315
9.1 引言 .....	284	10.3.2 薄膜加工 .....	316
9.2 体硅微制造 .....	284	10.3.3 结构成型 .....	318
9.2.1 腐蚀技术概述 .....	285	10.4 力学设计 .....	318
9.2.2 各向同性腐蚀和各向异性 腐蚀 .....	285	10.4.1 热力学负载 .....	318
9.2.3 湿法腐蚀 .....	286	10.4.2 热力学应力分析 .....	319
9.2.4 自停止腐蚀 .....	288	10.4.3 动力学分析 .....	319
9.2.5 干法腐蚀 .....	289	10.4.4 界面破坏分析 .....	324
9.2.6 干法腐蚀与湿法腐蚀的 比较 .....	293	10.5 有限元方法力学设计 .....	324
9.3 表面微加工 .....	293	10.5.1 有限元方程 .....	324
9.3.1 概述 .....	293	10.5.2 微加工工艺仿真 .....	329
9.3.2 一般过程 .....	294	10.6 微压力传感器硅芯片的 设计 .....	331
9.3.3 表面微加工中的力学 问题 .....	296	10.7 微流体网络系统的 设计 .....	335
9.4 LIGA 工艺 .....	298	10.7.1 微管道中的流动阻力 .....	336
9.4.1 LIGA 工艺概述 .....	298	10.7.2 毛细管电泳网络系统 .....	339
9.4.2 基底和光刻胶的材料 .....	300	10.7.3 毛细管电泳网络系统的数学 模型 .....	340
9.4.3 电镀 .....	301	10.8 设计实例：毛细管电泳网络系 统 .....	341
9.4.4 SLIGA 工艺 .....	301	10.9 计算机辅助设计 .....	346
9.5 微制造小结 .....	302	10.9.1 为什么用计算机辅助 设计 .....	346
9.5.1 体硅微制造 .....	302		
9.5.2 表面微加工 .....	302		

10.9.2	微系统计算机辅助设计 程序包是什么 .....	346	11.5.1	芯片准备 .....	367
10.9.3	如何选择计算机辅助设计 程序包 .....	349	11.5.2	表面键合 .....	368
10.9.4	计算机辅助设计实例 .....	349	11.5.3	引线键合 .....	372
	习题 .....	354	11.5.4	密封 .....	374
<b>第 11 章</b>	<b>微系统封装</b> .....	<b>359</b>	11.6	三维封装 .....	376
11.1	引言 .....	359	11.7	微系统的装配 .....	377
11.2	微电子机械封装概述 .....	360	11.8	封装材料的选择 .....	381
11.3	微系统封装 .....	362	11.9	信号转换和传递 .....	383
11.3.1	封装设计的一般考虑 .....	363	11.9.1	微系统中的典型电 信号 .....	383
11.3.2	微系统封装的三个 等级 .....	363	11.9.2	阻抗的测量 .....	383
11.3.3	芯片级封装 .....	363	11.9.3	压力传感器中的信号转换 和传递 .....	384
11.3.4	器件级封装 .....	365	11.9.4	容抗的测量 .....	386
11.3.5	系统级封装 .....	365	11.10	设计实例：压力传感器 的封装 .....	387
11.4	微系统封装的接口 问题 .....	366		习题 .....	391
11.5	主要的封装技术 .....	367		参考文献 .....	394