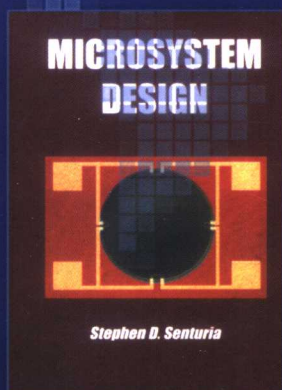


国外电子与通信教材系列

MEMS

# 微系统设计

Microsystem Design



[美] Stephen D. Senturia 著  
刘泽文 王晓红 黄庆安 等译



电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry  
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

# 微系统设计

Microsystem Design

[美] Stephen D. Senturia 著

刘泽文 王晓红 黄庆安 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书是美国麻省理工学院 (MIT) Senturia 教授根据自己在 MIT 电子工程系所讲授的课程的基础上进行扩展而编写的研究生教材, 已经被美国 10 多所大学采用 (包括斯坦福等著名大学)。本书系统全面地介绍了涉及微机电系统 (MEMS) 设计的方法、理论和技术, 包括 MEMS 制作工艺和封装技术、MEMS 器件的建模和模拟、相关电子线路与系统。全书详细地介绍了利用集总参数方法、弹性力学和结构力学方法、能量分析法对 MEMS 器件进行建模、模拟和分析的方法; 同时对微系统设计所涉及的能量耗散问题和流体力学系统、电路、噪声和封装问题等进行了分析和介绍。通过应用实例研究, 详细介绍了压阻式压力传感器、电容式加速度计、静电投影显示器、压电速率陀螺仪、DNA 扩增芯片和气体传感器等器件和系统的设计和制作。

全书结构新颖、特点鲜明、内容丰富, 能满足来自不同专业面向 MEMS 研究领域的研究生的需要。同时, 对于相关领域的科研、工程技术人员和教师来说, 也不失为一本很有价值的参考书。

Authorized translation from the English language edition published, entitled *Microsystem Design*, ISBN: 0792372468 by Stephen D. Senturia, published by Kluwer Academic Publishers. Copyright © 2003 by Kluwer Academic Publishers. All rights reserved. No part of this work may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, microfilming, recording, or otherwise, without the written permission from the Publisher.

Simplified Chinese Language edition published by Publishing House of Electronics Industry, Copyright © 2004.

本书中文简体专有翻译出版权由 Kluwer Academic Publishers 授予电子出版社。其原文版权及中文翻译出版权受法律保护。未经许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

版权贸易合同登记号: 图字: 01-2003-8827

### 图书在版编目 (CIP) 数据

微系统设计 / (美) 森图里亚 (Senturia, S. D.) 著; 刘泽文等译. - 北京: 电子工业出版社, 2004.11

(国外电子与通信教材系列)

书名原文: *Microsystem Design*

ISBN 7-121-00422-4

I. 微... II. ①森... ②刘... III. 微电机教材 IV. TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 101234 号

责任编辑: 窦 昊

印 刷: 北京兴华印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

经 销: 各地新华书店

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 29.5 字数: 755 千字

印 次: 2004 年 11 月第 1 次印刷

定 价: 59.00 元

凡购买电子工业出版社的图书, 如有缺损问题, 请向购买书店调换; 若书店售缺, 请与本社发行部联系。联系电话: (010) 68279077。质量投诉请发邮件至 [zltz@phei.com.cn](mailto:zltz@phei.com.cn), 盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

## 序

2001年7月间,电子工业出版社的领导同志邀请各高校十几位通信领域方面的老师,商量引进国外教材问题。与会同志对出版社提出的计划十分赞同,大家认为,这对我国通信事业、特别是对高等院校通信学科的教学工作会很有好处。

教材建设是高校教学建设的主要内容之一。编写、出版一本好的教材,意味着开设了一门好的课程,甚至可能预示着一个崭新学科的诞生。20世纪40年代MIT林肯实验室出版的一套28本雷达丛书,对近代电子学科、特别是对雷达技术的推动作用,就是一个很好的例子。

我国领导部门对教材建设一直非常重视。20世纪80年代,在原教委教材编审委员会的领导下,汇集了高等院校几百位富有教学经验的专家,编写、出版了一大批教材;很多院校还根据学校的特点和需要,陆续编写了大量的讲义和参考书。这些教材对高校的教学工作发挥了极好的作用。近年来,随着教学改革不断深入和科学技术的飞速进步,有的教材内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,特别是在电子学和通信技术发展神速、可以讲是日新月异的今天,如何适应这种情况,更是一个必须认真考虑的问题。解决这个问题,除了依靠高校的老教师和专家撰写新的符合要求的教科书外,引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,是会有好处的。

一年多来,电子工业出版社为此做了很多工作。他们成立了一个“国外电子与通信教材系列”项目组,选派了富有经验的业务骨干负责有关工作,收集了230余种通信教材和参考书的详细资料,调来了100余种原版教材样书,依靠由20余位专家组成的出版委员会,从中精选了40多种,内容丰富,覆盖了电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等方面,既可作为通信专业本科生和研究生的教学用书,也可作为有关专业人员的参考材料。此外,这批教材,有的翻译为中文,还有部分教材直接影印出版,以供教师用英语直接授课。希望这些教材的引进和出版对高校通信教学和教材改革能起一定作用。

在这里,我还要感谢参加工作的各位教授、专家、老师与参加翻译、编辑和出版的同志们。各位专家认真负责、严谨细致、不辞辛劳、不怕琐碎和精益求精的态度,充分体现了中国教育工作者和出版工作者的良好美德。

随着我国经济建设的发展和科学技术的不断进步,对高校教学工作会不断提出新的要求和希望。我想,无论如何,要做好引进国外教材的工作,一定要联系我国的实际。教材和学术专著不同,既要注意科学性、学术性,也要重视可读性,要深入浅出,便于读者自学;引进的教材要适应高校教学改革的需要,针对目前一些教材内容较为陈旧的问题,有目的地引进一些先进的和正在发展的交叉学科的参考书;要与国内出版的教材相配套,安排好出版英文原版教材和翻译教材的比例。我们努力使这套教材能尽量满足上述要求,希望它们能放在学生们的课桌上,发挥一定的作用。

最后,预祝“国外电子与通信教材系列”项目取得成功,为我国电子与通信教学和通信产业的发展培土施肥。也恳切希望读者能对这些书籍的不足之处、特别是翻译中存在的问题,提出意见和建议,以便再版时更正。



中国工程院院士、清华大学教授

“国外电子与通信教材系列”出版委员会主任

## 出版说明

进入 21 世纪以来,我国信息产业在生产和科研方面都大大加快了发展速度,并已成为国民经济发展的支柱产业之一。但是,与世界上其他信息产业发达的国家相比,我国在技术开发、教育培训等方面都还存在着较大的差距。特别是在加入 WTO 后的今天,我国信息产业面临着国外竞争对手的严峻挑战。

作为我国信息产业的专业科技出版社,我们始终关注着全球电子信息技术的发展方向,始终把引进国外优秀电子与通信信息技术教材和专业书籍放在我们工作的重要位置上。在 2000 年至 2001 年间,我社先后从世界著名出版公司引进出版了 40 余种教材,形成了一套“国外计算机科学教材系列”,在全国高校以及科研部门中受到了欢迎和好评,得到了计算机领域的广大教师与科研工作者的充分肯定。

引进和出版一些国外优秀电子与通信教材,尤其是有选择地引进一批英文原版教材,将有助于我国信息产业培养具有国际竞争能力的技术人才,也将有助于我国国内在电子与通信教学工作中掌握和跟踪国际发展水平。根据国内信息产业的现状、教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的指示精神以及高等院校老师们反映的各种意见,我们决定引进“国外电子与通信教材系列”,并随后开展了大量准备工作。此次引进的国外电子与通信教材均来自国际著名出版商,其中影印教材约占一半。教材内容涉及的学科方向包括电路理论与应用、信号与系统、数字信号处理、微电子、通信系统、电磁场与微波等,其中既有本科专业课程教材,也有研究生课程教材,以适应不同院系、不同专业、不同层次的师生对教材的需求,广大师生可自由选择 and 自由组合使用。我们还将与国外出版商一起,陆续推出一些教材的教学支持资料,为授课教师提供帮助。

此外,“国外电子与通信教材系列”的引进和出版工作得到了教育部高等教育司的大力支持和帮助,其中的部分引进教材已通过“教育部高等学校电子信息科学与工程类专业教学指导委员会”的审核,并得到教育部高等教育司的批准,纳入了“教育部高等教育司推荐——国外优秀信息科学与技术系列教学用书”。

为做好该系列教材的翻译工作,我们聘请了清华大学、北京大学、北京邮电大学、东南大学、西安交通大学、天津大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校的教授和骨干教师参与教材的翻译和审校工作。许多教授在国内电子与通信专业领域享有较高的声望,具有丰富的教学经验,他们的渊博学识从根本上保证了教材的翻译质量和专业学术方面的严格与准确。我们在此对他们的辛勤工作与贡献表示衷心的感谢。此外,对于编辑的选择,我们达到了专业对口;对于从英文原书中发现的错误,我们通过作者联络、从网上下载勘误表等方式,逐一进行了修订;同时,我们对审校、排版、印制质量进行了严格把关。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切关系,努力引进更多的国外优秀教材和教学参考书,为我国电子与通信教材达到世界先进水平而努力。由于我们对国内外电子与通信教育的发展仍存在一些认识上的不足,在选题、翻译、出版等方面的工作中还有许多需要改进的地方,恳请广大师生和读者提出批评及建议。

电子工业出版社

## 教材出版委员会

主任	吴佑寿	中国工程院院士、清华大学教授
副主任	林金桐 杨千里	北京邮电大学校长、教授、博士生导师 总参通信部副部长，中国电子学会会士、副理事长 中国通信学会常务理事
委员	林孝康	清华大学教授、博士生导师、电子工程系副主任、通信与微波研究所所长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	徐安士	北京大学教授、博士生导师、电子学系主任 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	樊昌信	西安电子科技大学教授、博士生导师 中国通信学会理事、IEEE 会士
	程时昕	东南大学教授、博士生导师、移动通信国家重点实验室主任
	郁道银	天津大学副校长、教授、博士生导师 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	阮秋琦	北京交通大学教授、博士生导师 计算机与信息技术学院院长、信息科学研究所所长
	张晓林	北京航空航天大学教授、博士生导师、电子信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	郑宝玉	南京邮电学院副院长、教授、博士生导师 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	朱世华	西安交通大学副校长、教授、博士生导师、电子与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与工程类专业教学指导分委员会委员
	彭启琮	电子科技大学教授、博士生导师、通信与信息工程学院院长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会委员
	毛军发	上海交通大学教授、博士生导师、电子信息与电气工程学院副院长 教育部电子信息与电气学科教学指导委员会委员
	赵尔沅	北京邮电大学教授、《中国邮电高校学报（英文版）》编委会主任
	钟允若	原邮电科学研究院副院长、总工程师
	刘彩	中国通信学会副理事长、秘书长
	杜振民	电子工业出版社原副社长
	王志功	东南大学教授、博士生导师、射频与光电集成电路研究所所长 教育部电子信息科学与电气信息类基础课程教学指导分委员会主任委员
	张中兆	哈尔滨工业大学教授、博士生导师、电子与信息技术研究院长
	范平志	西南交通大学教授、博士生导师、计算机与通信工程学院院长

# 译者序

选择本书的理由是很多的。首先，这本书是迄今为止我所看到的有关微技术最具系统性的书，本书将那些在 MEMS 领域工作的工程师所必不可少的多学科的基础知识有机地整合在一起。所涉及的主题很宽：微加工技术、机械学、热流理论、电子学、噪声以及系统动力学等。不仅有理论，也有器件；不仅有机械，也有电子；不仅有力学，也有生物学。其次，该书也是迄今为止，在 MEMS 基础知识方面十分深入的书，作者阐述了涉及 MEMS 设计中所遇到的大量的理论知识，并且用能量的观点和集总参数的方析方法将这些理论建成模型。这些理论和原理的重要性，不仅有利于我们培养出高水平的 MEMS 研究者和工程师，也有利于提高我们目前的研究水平。其三，本书是一本真正的理论联系实际的书，作者在阐明一些基本设计原理的同时，也系统地提供了一些来自真实产品或器件原型的一组实例研究，这不仅是本书的特色，也给大家提供了该技术应用的一个多视角的感性知识，因为实例研究的选择是在不同应用领域的具有代表的范例，如压力传感器、加速度计、陀螺、静电致动光投影显示器、DNA 扩增微系统、催化传感器等。很显然，这些知识对促进 MEMS 产业化是十分有用的。

作者 Stephen D. Senturia 教授（麻省理工学院）多年从事 MEMS 研究，发表过大量的学术文章，某些业内人士周知的 MEMS 设计软件就是基于他和他的研究组在 MEMS 设计理论方面的研究成果的。本书的内容主要来自于他在 MIT 电子工程系给研究生所开设的课程“微系统设计”的教材。希望这本书也能为我国目前的教材引进工作做点贡献。

本书由清华大学刘泽文、王晓红老师和东南大学黄庆安、李伟华老师共同组织翻译。其中，李伟华翻译第 2 章、第 5 章，王晓红翻译第 11 章、第 12 章、第 13 章，黄庆安翻译前言和附录，其余部分由刘泽文翻译。很多研究生为翻译工作做出了贡献，他们是雷啸锋、陈忠民、韦嘉、宣云、方杰、谢克文、姜英琪。

由于时间仓促，本书翻译中存在一些在所难免的错误，欢迎本书的读者和使用者提出宝贵意见。

刘泽文  
2004 年 5 月

# 序

为这本书写序是一件令人心愉之事。一方面因为我和这部著作的作者相识多年，始终对他怀有十分的敬意；另一方面，我预期这部著作的出版将是标志微系统领域在全球范围内继续蓬勃发展的重要里程碑。将涉及微系统设计所有方面的知识集成在一起作为教材，不仅会促进对新一代工程师的训练，甚至可以产生一种全新类型的工程师——他们将有能力面对在系统从微米尺度到纳米尺度不断缩小时所遇到的复杂问题。这部著作突破了学科界限，建立了一个我们甚至在今天都不敢梦想的有关微系统的知识平台。

微系统技术已经经历了一段很长的历史，可以追溯到微电子学发展的早期。在 20 世纪 60 年代集成电路发展的初期，已经有很多实验室使用同样的技术基础制作集成传感器，其思想是减少成本并试图将传感器和电子线路集成在一个芯片上。到 20 世纪 60 年代后期，已经研制出用于可见光成像的集成 MOS-光电二极管阵列，硅刻蚀技术在当时也已经用于制作能将压力转换成电信号的应变薄膜结构。到 20 世纪 70 年代，人们开始使用硅各向异性选择性腐蚀制作薄膜，并保留一圈厚沿以吸收封装时所产生的应力。掺杂以及基于电化学的腐蚀停刻技术也在不久后出现，随之而出现的是“体硅加工”技术。硅片键合（特别是硅-玻璃之间的静电键合）扩展了这些技术的能力从而被用于多种结构的制作，其中包括力求将一个全部的气相色谱分析系统集成在单一的圆片上。这类研究活动很多是在大学和实验室里进行的，在这些地方进行的研究工作是工业研究的重要补充，为推动传感器的发展做出了很大贡献。这些研究工作最初是由经过微电子学专业训练的电子工程师进行的，他们经常会为了理解器件的机械结构特征而孜孜求索。当时没有一本书能引导传感器设计师贯穿相关知识领域，这方面的知识分散于各自的领域。

在 20 世纪 70 年代后期，改善汽车燃料消耗和减少汽车排放物的需求把压力传感器带入大批量生产阶段。到 20 世纪 80 年代初期，带有片上读出电路的压力传感器也开始批量生产，体硅加工技术在流量计、加速度计、喷墨打印头等其他器件的制作中得到应用。基于这一点，“集成传感器”领域开始自行组织，在微电子学会议中召开独立的会议作为一些特别的分组会议的补充。

表面微加工进入微机械加工舞台并且很快在加速度计、压力传感器和其他微电子机械结构制作中得到应用是在 20 世纪 80 年代中期。这时微执行器成为很多研究工作的焦点，将一个全部闭环系统制作在一个芯片上成了现实的目标。这个领域需要一个用缩略词组成的简称，在此情况下“MEMS”（MicroElectroMechanical Systems，微电子机械系统）一词被逐渐接受，尽管很多器件并不是真正的机械结构。表示将传感器、执行器、信号处理电路集成在一个公共的衬底上（不一定是单片）的术语“微系统”一词也渐渐得到公认。从这点出发，这个领域开始寻求一些机械工程师的长期介入，然而工作的中心仍然是在学术机构，传感器和 MEMS 方面的课程十分罕有。工作的重点仍集中在由那些主要毕业于电子工程和物理领域的人们所开展的一些研究工作上。那些在相应领域没有多少训练的人们必须在机械学、化学和材料学方面的知识进行拓展，以作为对微电子学知识的补充，但仍然没有微系统方面的教材。

从 20 世纪 80 年代后期开始，MEMS 在世界范围内受到广泛重视。在美国，国家科学基金新



技术项目（The Emerging Technologies Program of the National Science Foundation）将 MEMS 研究选择为重点。1992 年，美国国防高级研究项目署（The Defense Advanced Research Projects Agency, DARPA）也做出相应的选择，投入的研究资金和研究人员陡然戏剧性地大幅增长。类似的投入也发生在欧洲和亚洲。在经历 25 年的历程以后，这个领域最终步入了发展的关键阶段。20 世纪 90 年代，人们见证了基于 MEMS 的喷墨打印头、压力传感器、流量计、加速度计、陀螺仪、非冷却红外成像仪、光学投影显示器全部进入批量生产。对微系统整体的重视也与日俱增，越来越多的功能先进的器件被开发出来，包括 DNA 分析器、集成气相色谱系统、微型化质谱计。

微系统设计现在横跨众多工程领域，是很多重点大学中相应课程和学位学习计划的重点，这些课程必须面向具有不同专业背景的学生，课程的内容需要以一种统一协调的方式覆盖同样宽广的专业范围。这本书的出现将十分有助于直面和解决这些挑战。通过在研究工作上的贡献以及对一系列确定该领域发展的会议和杂志的领导，该书的作者 20 多年来一直是引导微系统发展的主要人物。对于那些初次进入该领域的人来说，这本书本身是一个知识丰富而又友好的导师，而对那些该领域的长期实践者，这本书将是一个取之不尽的源泉。这本书涉及所有的方面——加工技术、建模、分析方法以及结构。在这本书里可以发现材料学、机械学、流体力学的主要原理，所以设计者可以从中理解并预测先进器件结构在这方面的特性。同样，该书中的电子学知识可以使读者理解信号的读出和处理方面的问题以及片上反馈控制系统。噪声方面的内容也包括在这本书中，因而精度和分辨率方面的限制也同样可以被预言。最后，实例研究将所有的内容紧密地联系在一起，这些实例强调目前所感兴趣的重要器件。

由于这部教材囊括了进行微系统设计所要求的所有主题，它的出现既会加速本领域的发展，也可以训练出一批新型的工程科技人员——微系统工程师。他们将能够结合多学科知识解决微米层次或纳米层次上的各种问题。用现实的深层次的眼光来看，微系统技术现在已经超出了作为微电子学的一个专门分支的范围，它们将是形成全球信息技术网络、在微电子学和生物技术及细胞世界建立桥梁的关键。

找到当今世界中的很多问题的解决方案，需要微系统工程师们研制开发出我们现在还无法想像的新型器件，其规模尺度前所未有。毫无疑问，前进的道路上会有许多困难和挑战，但是这本书中所给出的基本原理对于解决这些问题将会始终有效。正如物理学家理查德·费因曼（Richard Feynman）40 年前在倡导微系统技术时所说的：微小世界的尽头有宽广的空间。

Kensall D. Wise  
于迈阿密州密歇根大学

# 前 言

本书的目标是把当代微系统工程师所需要的多学科基础知识整理成一本易于理解的教科书。由于题材范围广泛,诸如微制造、力学、热流、电子学、噪声、有反馈或无反馈的系统动力学,同时理论上要阐述“好的设计”原理是非常困难的,所以本书围绕一系列实例编排,这些实例基于一些实际产品或尚不能找到合适说明文件但完全公开发表的原型样机。

本书源于1997年秋天 Martin Schmidt 教授和我首次给研究生开设的课程“MEMS 器件设计与制造”。后来,在1999年春天,我单独讲授该课程。我们的目的是探索高度交叉学科的学生培养,这些学生来自电气工程、机械工程、航空工程和化学工程。我们把由4人一组的学生小组进行的设计课题作为一学期的重点,这些小组是混合编队的,每个组分配1名有微制造经验的学生、1名真正理解系统动力学的学生和1名有电子学背景的学生等。学期的前三分之二时间讲授的材料以本书前16章作为讲义,在编写本书时我们对这些内容做了很大的扩充。在后一阶段,学生小组努力研究自己的设计问题的同时,我们给出了一系列有关现代 MEMS 实践中的各种实例研究。

要把讲义写成书,我必须做许多修改。首先,把涵盖基础知识部分的内容在深度和广度两个方面都做了极大的扩充。事实上,由于内容扩充太多,现在在一个学期是不可能讲授完的。因此,我建议教师选择一些内容进行重点讲授,而其他的内容可以跳过或让学生自己阅读。

第二个修改也许对使用本书的教师更重要,我收集了由1997和1999年讲义版编辑而来的家庭作业并将其中部分作为正文的例题。一方面,这大大丰富了本书的内容,另一方面,也使得家庭作业在数量上暂时不足。为了适当弥补这方面的不足,我在写作本书时设计了一套新的内容适度的家庭作业。好在要感谢万维网(WWW),可以从网络中找到新的额外家庭作业(见下述教师备忘录)

我希望通过实例和所涉及基础知识的讲解,为工程学生提供一种能够学习使用的设计和建模方法。重点放在利用网络表示或模块表示的集总元件模型,这种方法成功的关键在于建立模型单元的方法开发。因此,有一章是关于利用能量法和变分法求解能量守恒问题的近似解析法,另一章则是关于利用这两种不同方法建立用于服从热流方程或相对稳态拉普拉斯方程的耗散系统的集总模型建模方法。建模方法首先使用解析法,然后使用 MATLAB, SIMULINK 和少量 MAPLE 软件的数值模拟。本书中出现的例子都是由学生版 MATLAB 和 SIMULINK 的第五版完成的。在不多的地方,给出了有限元数值模拟的比较,但这不是本书的目的。

本书第五部分所选择的实例研究是想说明 MEMS 的多维性:不同的制造与加工方法、不同的器件应用领域、传感中不同的物理效应。在选择实例时,我在与 Microcosm 技术公司(现公司名称为 COVENTOR——译者注)的 Stephen Barts 博士和 Bart Romanowicz 博士进行的广泛讨论中得到了他们无价的帮助,也从 Martin Schmidt 教授那里获得了创造性的建议。众所周知,同时也是我要强调的,是 MEMS 领域中封装的重要性。因此,用汽车压力传感器作为例子来介绍封装实例研究出现在第五部分的第一章也就不足为奇了。其他实例是:压阻敏感的体加工硅压力传感器、电容敏感的表面加工多晶硅加速度计、压电激励与检测的体加工谐振石英速率陀螺、两种静电致

动的光投影显示器、DNA 扩增单芯片系统构造的两种方式，以及表面加工的易燃气体催化传感器。

如前所述，设计问题是本书讲授的重要部分。一个好的设计问题会要求学生小组面对问题的技术要求与约束，让他们开发出解决这个问题的系统结构，然后制订出微制造的工艺流程、确定器件尺寸、模拟器件的行为以满足技术指标。本书包含的设计例子有：流量控制器、一些压力传感器或加速度计、谐振应变传感器（包括其驱动电路）、聚合酶链式反应（PCR）系统、催化化学传感器的温度控制台等其他器件。一些设计问题的样本将放在网站上。我们希望您给我们反馈一些问题，因为它可以驱使我们建立用于插入环路中的合适开环动态器件模型。我们的经验在于：通过设计习题使学生认识到怎样才能真正掌握该课题中基本的问题。与此同时，学生还学到很多关于团队合作、课题的合理划分、小组内部交流以及在设计中进行方案选择和折中这样的重要的实际问题。仅当这个团队的成员意识到如果使部分工作简单化就可能使另一部分的工作变得更困难时，设计习题的真实优点才会显露。在一学期中，一些研究生和博士后自愿作为这些设计小组的顾问，学生从中受益匪浅。我建议教师在课程中使用设计问题时，安排这样的顾问。

如果非要 Schmidt 教授和我挑出课程中最难讲授的内容，那么这个内容就是工艺集成：既能达到希望的结果且无副效应（例如将金放在承受高温工艺的步骤中）的实际工艺流程的开发。那些已经学习过微制造技术课程的学生在此方面会有巨大优势，因此我们鼓励学生在学习本设计课程之前学习该课程。

在 MIT 的正常休假，从 1999 年 8 月到 2000 年 8 月共 13 个月，为我提供了撰写本书的机会。由于时间紧，只有走捷径：首先，我没有列出本书各种议题的全面参考文献，只是在每一章末尾包含了基本的读物并在合适的地方引用了关键的工作，但是略去了对许多工作的引用。这不是因为这些工作缺乏尊重，而是在有限的时间和有限的空间完成本书的情况下一个不得已的做法。其他书籍，例如 Kovacs (G. T. A. Kovacs, *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, 1998, 张文栋等译,《微传感器与微执行器全书》, 科学出版社, 2003) 和 Madou (M. J. Madou, *Fundamentals of Microfabrication*, CRC Press, 1<sup>st</sup> Edition, 1997; 2<sup>nd</sup> Edition, 2002) 所著的书对发表的文献有广泛的参考，因此，我吁请本书读者手头上能有这些书并作为辅助材料。其次，我没有把 MATLAB, SIMULINK 和 MAPLE 所编模型做成 CD-ROM。我的理由是，目前网络为分发这些材料提供了一种更有效的方式。而且使用网络，我会有一些灵活性，可随时对模型进行修改。再次，本书没有包括不同材料特性和工艺步骤的许多数据。我的希望是书中有足够的数可以完成实例研究。要感谢各种在线数据库的编辑，使其他数据容易找到，例如 mems.isi.edu 网站。

## 教师备忘录

如前所述，就家庭作业的广度和深度而言，本书中给出的不是我所最喜欢的。为了不因为仅编一些新的家庭作业而使本书的出版延期，我决定利用网络的优势存放一些辅助材料，本书 Web 网站的地址是：

<http://web.mit.edu/microsystem-design/www>

额外的家庭作业和设计问题、支持各章的例子和家庭作业的 MATLAB, SIMULINK 和 MAPLE 模型都放在网站上，在发表以前，我还没有找到印刷方面的错误。

欢迎本书的读者通过在线提交表单将材料放在网站上，特别欢迎给本书找给错误之处；新的家庭作业、设计习题和数值模型同样欢迎。贴在网站上的内容将标明其来源。

# 目 录

## 第一部分 基础知识

第 1 章 引言	2
1.1 微系统和 MEMS	2
1.2 微系统和 MEMS 的市场前景	4
1.3 实例研究	4
1.4 后续内容	8
相关阅读材料	8
习题	9
第 2 章 MEMS 设计方法	10
2.1 引言	10
2.2 建模层级	12
2.3 实例：一个定位控制系统	15
2.4 后续内容	17
相关阅读材料	18
习题	18
第 3 章 微制造技术	19
3.1 引言	19
3.2 圆片级工艺	19
3.3 图形转移	33
3.4 小结	51
相关阅读材料	51
习题	52
第 4 章 工艺集成	53
4.1 开发一项工艺	53
4.2 工艺设计的基本原则	56
4.3 工艺流程举例	60
4.4 后续内容	64
习题	65

## 第二部分 建模策略

第 5 章 集总参数建模	68
5.1 引言	68

5.2	共轭功率变量	68
5.3	单端口元件	69
5.4	$e \rightarrow V$ 约定中的电路连接	74
5.5	动态方程的公式表达	76
5.6	变压器和回相器	77
	相关阅读材料	81
	习题	81
<b>第 6 章</b>	<b>能量守恒换能器</b>	<b>83</b>
6.1	引言	83
6.2	平行板电容	83
6.3	双端口电容	86
6.4	静电执行器	87
6.5	磁执行器	94
6.6	线性换能器等效电路	96
6.7	定位控制系统回顾	98
	相关阅读材料	99
	习题	99
<b>第 7 章</b>	<b>动力学</b>	<b>100</b>
7.1	引言	100
7.2	线性系统动力学	101
7.3	非线性系统动力学	110
	相关阅读材料	121
	习题	121

### 第三部分 特定领域的细节

<b>第 8 章</b>	<b>弹性力学</b>	<b>124</b>
8.1	引言	124
8.2	线性弹性系统的本构方程	124
8.3	热膨胀和薄膜应力	131
8.4	部分材料的机械特性数据	133
8.5	大应变下的材料特性	133
	相关阅读材料	135
	习题	135
<b>第 9 章</b>	<b>结构</b>	<b>136</b>
9.1	引言	136
9.2	轴向负载梁	136
9.3	梁的弯曲	140
9.4	抗弹性扭曲	148

9.5	平板的弯曲	148
9.6	残余应力和应力梯度	150
9.7	带有平面应力的平板	160
9.8	大变形的情况	161
	相关阅读材料	161
	习题	162
<b>第 10 章</b>	<b>能量法</b>	<b>163</b>
10.1	弹性能	164
10.2	虚功原理	165
10.3	变分法	166
10.4	弹性结构的大形变	170
10.5	瑞利-里兹方法	177
	相关阅读材料	179
	习题	180
<b>第 11 章</b>	<b>耗散系统和热能域</b>	<b>181</b>
11.1	耗散的普遍性	181
11.2	电阻	181
11.3	电容的充电	182
11.4	耗散过程	183
11.5	热能域	184
11.6	电阻的自加热	188
11.7	其他耗散机理	193
11.8	不可逆热动力学: 耦合流动	196
11.9	时变耗散系统的建模	199
	相关阅读材料	199
	习题	200
<b>第 12 章</b>	<b>集总建模和耗散过程</b>	<b>201</b>
12.1	引言	201
12.2	热传导方程的推广	201
12.3	直流稳态: 泊松方程	202
12.4	泊松方程的有限差分解	202
12.5	泊松方程的本征解	205
12.6	瞬态响应: 有限差分法	206
12.7	瞬态响应: 本征函数法	206
12.8	一维应用举例	207
12.9	单模等效电路	208
12.10	多模等效电路	209
	相关阅读材料	211

习题	211
<b>第 13 章 流体</b>	213
13.1 引言	213
13.2 流体的基本概念	213
13.3 不可压缩层流	219
13.4 挤压膜的阻尼	223
13.5 电解质与电动势效应	227
相关阅读材料	233
习题	233

## 第四部分 电路与系统问题

<b>第 14 章 电子学</b>	236
14.1 引言	236
14.2 半导体物理基础	236
14.3 半导体二极管	239
14.4 扩散电阻	243
14.5 光电二极管	243
14.6 双极结型晶体管	244
14.7 金属氧化物半导体场效应晶体管	244
14.8 MOSFET 放大器	249
14.9 运算放大器	255
14.10 动态效应	256
14.11 运算放大器基本电路	257
14.12 电荷测量电路	262
相关阅读材料	263
习题	264
<b>第 15 章 反馈系统</b>	265
15.1 引言	265
15.2 反馈基本概念	265
15.3 线性系统中的反馈	266
15.4 非线性系统中的反馈	275
15.5 谐振器和振荡器	276
相关阅读材料	281
习题	282
<b>第 16 章 噪声</b>	283
16.1 引言	283
16.2 干扰问题	283
16.3 信号特性	286

16.4	随机噪声的特性	288
16.5	噪声源	290
16.6	示例:电阻温度计	294
16.7	漂移	297
	相关阅读材料	298
	习题	298

## 第五部分 实例研究

<b>第 17 章</b>	<b>封装</b>	302
17.1	引言	302
17.2	封装、测试和校准	302
17.3	封装方法	303
17.4	一个商业化压力传感器实例	306
	相关阅读材料	311
	习题	311
<b>第 18 章</b>	<b>压阻式压力传感器</b>	312
18.1	感测压力	312
18.2	压阻	312
18.3	摩托罗拉多 MAP 压力传感器	320
	相关阅读材料	329
	习题	329
<b>第 19 章</b>	<b>电容式加速度计</b>	330
19.1	引言	330
19.2	准静态加速度计基础	330
19.3	利用电容的位置测量	332
19.4	电容式加速度计实例研究	339
19.5	利用针尖隧道电流的位置测量	348
	相关阅读材料	351
	习题	351
<b>第 20 章</b>	<b>静电投影显示器</b>	352
20.1	引言	352
20.2	DMD 器件的电机学	355
20.3	静电驱动梁的机电性	359
20.4	光栅光阈显示	361
20.5	一个对比	371
	相关阅读材料	371
	习题	371



<b>第 21 章 压电速率陀螺仪</b> .....	373
21.1 引言.....	373
21.2 转动运动力学.....	373
21.3 柯里奥利速率陀螺.....	374
21.4 压电性.....	379
21.5 石英速率陀螺实例.....	384
相关阅读材料.....	401
习题.....	402
<b>第 22 章 用于 DNA 扩增的微系统</b> .....	403
22.1 引言.....	403
22.2 聚合酶链式反应.....	403
22.3 PCR 的微系统实现方法.....	407
22.4 批量反应器的热学模型.....	411
22.5 连续流体反应器的热学模型.....	414
22.6 一个对比.....	416
相关阅读材料.....	417
习题.....	417
<b>第 23 章 微桥气体传感器</b> .....	419
23.1 引言.....	419
23.2 系统级设计问题.....	419
23.3 一级近似器件和系统模型.....	421
23.4 实际器件及其制作工艺.....	425
23.5 传感器性能.....	428
23.6 高级模型.....	430
23.7 结束语.....	431
相关阅读材料.....	432
习题.....	432
<b>附录 A 参数符号表</b> .....	433
<b>附录 B 电磁场</b> .....	440
<b>附录 C 立方材料的弹性常数</b> .....	443
<b>参考文献</b> .....	444