

微机电系统手册 (原书第2版)



国际制造业先进技术译丛

微机电系统应用

MEMS Applications

(美) Mohamed Gad-el-Hak 编
张海霞 赵小林 金玉丰 等译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际制造业先进技术译丛

微机电系统手册（原书第2版）

微机电系统应用

MEMS Applications

（美）Mohamed Gad-el-Hak 编
张海霞 赵小林 金玉丰 等译



机械工业出版社

本书是 MEMS 系列图书中的一本, 主要介绍 MEMS 技术应用方面的知识。内容包括: 惯性传感器、微机械压力传感器、表面微加工器件、微执行器、湍流传感器与执行器、微机器人技术、微型真空泵、非线性电液器件、微液滴发生器、微热管和微散热器、微通道热沉、流动控制、用于边界层减阻的反应式控制、自由剪切流的 MEMS 自主控制。

本书主要面向 MEMS 专业的高年级本科生和研究生, 也可供 MEMS 技术研究人员参考。

MEMS: Applications 2ed Edition/by Mohamed Gad-el-Hak/ISBN: 978-0-8493-0139-2

Copyright© 2006 by CRC Press.

Authorized translation from English language edition published by CRC Press, part of Taylor & Francis Group LLC; All right reserved.

China Machine Press is authorized to publish and distribute exclusively the Chinese (Simplified Characters) language edition. This edition is authorized for sale throughout Mainland of China. No part of the publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

本书中文简体翻译版由机械工业出版社独家出版并限在中国大陆地区销售。未经出版者书面许可, 不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

本书封面贴有 Taylor & Francis 公司防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2007-4485

图书在版编目 (CIP) 数据

微机电系统应用/ (美) Mohamed Gad-el-Hak 编; 张海霞等译. —北京: 机械工业出版社, 2009. 4

(国际制造业先进技术译丛)

书名原文: MEMS Applications

ISBN 978-7-111-26733-1

I. 微… II. ①M…②张… III. 微电子技术 IV. TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 049894 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 孔 劲 责任编辑: 刘本明

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 鞠 杨 责任印制: 洪汉军

三河市宏达印刷有限公司印刷

2009 年 7 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·30 印张·2 插页·741 千字

0001—3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-26733-1

定价: 108.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379772

封面无防伪标均为盗版

译丛序言

一、制造技术长盛永恒

先进制造技术是20世纪80年代提出的,由机械制造技术发展而来。通常可以认为它是将机械、电子、信息、材料、能源和管理等方面的技术,进行交叉、融合和集成,综合应用于产品全生命周期的制造全过程,包括市场需求、产品设计、工艺设计、加工装配、检测、销售、使用、维修、报废处理、回收利用等,以实现优质、敏捷、高效、低耗、清洁生产,快速响应市场的需求。因此,当前的先进制造技术是以产品为中心,以光机电一体化机械制造技术为主体,以广义制造为手段,具有先进性和时代感。

制造技术是一个永恒的主题,与社会发展密切相关,是设想、概念、科学技术物化的基础和手段,是所有工业的支柱,是国家经济与国防实力的体现,是国家工业化的关键。现代制造技术是当前世界各国研究和发展的主题,特别是在市场经济高度发展的今天,它更占有十分重要的地位。

信息技术发展并引入到制造技术,使制造技术产生了革命性的变化,出现了制造系统和制造科学。制造系统由物质流、能量流和信息流组成,物质流是本质,能量流是动力,信息流是控制;制造技术与系统论、方法论、信息论、控制论和协同论相结合就形成了新的制造学科。

制造技术的覆盖面极广,涉及到机械、电子、计算机、冶金、建筑、水利、电子、运载、农业以及化学、物理学、材料学、管理科学等领域。各个行业都需要制造业的支持,制造技术既有普遍性、基础性的一面,又有特殊性、专业性的一面,制造技术既有共性,又有个性。

我国的制造业涉及以下三方面的领域:

- 机械、电子制造业,包括机床、专用设备、交通运输工具、机械设备、电子通信设备、仪器等;
- 资源加工工业,包括石油化工、化学纤维、橡胶、塑料等;
- 轻纺工业,包括服装、纺织、皮革、印刷等。

目前世界先进制造技术沿着全球化、绿色化、高技术化、信息化、个性化和服务化、集群化六个方面发展,在加工技术上主要有超精密加工技术、纳米加工技术、数控加工技术、极限加工技术、绿色加工技术等,在制造模式上主要有自动化、集成化、柔性化、敏捷化、虚拟化、网络化、智能化、协作化和绿色化等。

二、图书交流源远流长

近年来,国际间的交流与合作对制造业领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用,制造业科技人员需要及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、成果取得情况及先进技术应用情况等。

必须看到,我国制造业与工业发达国家相比,仍存在较大差距。因此必须加强原始创新,在实践中继承和创新,学习国外的先进制造技术和经验,提高自主创新能力,形成自己

的创新体系。

国家、地区间的学术、技术交流已有很长的历史，可以追溯到唐朝甚至更远一些，唐玄奘去印度取经可以说是一段典型的图书交流佳话。图书资料是一种传统、永恒、有效的学术及技术交流方式。早在 20 世纪初期，我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》，其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》，对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体，图书是一个海洋，虽然现在已有网络、光盘、计算机等信息传输和储存手段，但图书更具有广泛性、适应性、系统性、持久性和经济性，看书总比在计算机上看资料更方便，不同层次的要求可以参考不同层次的图书，不同职业的人员可以参考不同类型的技术图书，同时它具有比较长期的参考价值和收藏价值。当然，技术图书的交流具有时间上的滞后性，不够及时，翻译的质量也是个关键问题，需要及时、快速、高质量的出版工作支持。

机械工业出版社希望能够在先进制造技术的引进、消化、吸收、创新方面为广大读者作出贡献，为我国的制造业科技人员引进、纳新国外先进制造技术的出版资源，翻译出版国际上优秀的制造业先进技术著作，从而能够提升我国制造业的自主创新能力，引导和推进科研与实践水平不断进步。

三、选择严谨质高面广

1) 精品重点高质 本套丛书作为我社的精品重点书，在内容、编辑、装帧设计等方面追求高质量，力求为读者奉献一套高品质的丛书。

2) 专家选译把关 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员承担，充分保证了内容的先进性、适用性和翻译质量。

3) 引纳地区广泛 主要从制造业比较发达的国家引进一系列先进制造技术图书，组成一套“国际制造业先进技术译丛”。当然其他国家的优秀制造科技图书也在选择之内。

4) 内容先进丰富 在内容上应具有先进性、经典性、广泛性，应能代表相关专业的技术前沿，对生产实践有较强的指导、借鉴作用。本套丛书尽量涵盖制造业各行业，例如机械、材料、能源等，既包括对传统技术的改进，又包括新的设计方法、制造工艺等。

5) 读者层次面广 面对的读者对象主要是制造业企业、科研院所的专家、研究人员和工程技术人员，高等院校的教师和学生，可以按照不同层次和水平要求各取所需。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢许多积极热心支持出版“国际制造业先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐评审和翻译的知名专家，特别要感谢承担翻译工作的译者，对各位专家学者所付出的辛勤劳动表示深切敬意，同时要感谢国外各家出版社版权工作人员的热心支持。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社

译者序

MEMS 的历史可以追溯到 20 世纪五六十年代。1959 年,著名物理学家 Richard P. Feynman 在加州理工学院发表了题为“*There's Plenty of Room at the Bottom*”的演讲,提出了系统微小型化的概念,并预言了这一技术的广阔前景。随后的 30 年间,研究者在硅的各向异性腐蚀技术、薄膜淀积技术等方面开展了大量的研究。1988 年,加州大学伯克利分校的 Richard Muller 小组研制成功了世界上第一个硅静电马达,震惊了学术界,并促成了机电系统的飞速发展。

目前成功的 MEMS 产品有安全气囊加速度计、喷墨打印机打印头、计算机磁盘读写头、投影芯片、血压计、光开关、微泵、微阀、生物传感器和 MEMS 微镜等。生物芯片、化学传感器、温度传感器、RF MEMS 以及纳米尺度的微机械部件等研究相继得到了长足的发展和推进。另外,在远程通信(光通信和无线通信)、生物化学和自动控制等领域, MEMS 也有着巨大的应用潜力。在未来的几十年里, MEMS 技术将如微电子技术一样渗透到生活的各个角落。

随着 MEMS 发展的春天的日益临近,学术界和产业界对 MEMS 领域的关注也在不断升温,有关的资料和研究书籍也逐渐多了起来,但是这是一个多学科交叉的领域,很难找到比较全面和深入介绍的专业书。因此,我最初拿到这两本书的时候,心情十分激动,因为终于为我给研究生上的“MEMS 器件与设计”课找到了一套比较好的参考书。这套书恰如入夜的春雨,给致力于 MEMS 技术研究的专业人员带来了全面而完整的专业知识。

可是,等到开始翻译才发现这是一件庞大而复杂的工作。这套书的涉猎实在是太广了,从材料、加工到设计技术,从传统的 MEMS 传感器、执行器到新兴的微流控技术等,实在非小团队所能驾驭。这要感谢我们“微米纳米加工技术国家级重点实验室”的各位同仁,由北京大学微电子学研究院和上海交通大学微纳研究院的两个团队合作完成了此书的翻译工作。北京大学一直负责硅基的加工技术,上海交大的重点则在于非硅技术的研发,双方从 1996 年开始就有了非常互补和友好的合作,涉猎了 MEMS 研发的各个方面,这 12 年的积累在这套书的翻译中得到了充分的体现。北京大学的金玉丰教授、上海交大的赵小林教授作为实验室的正、副主任,对本书的翻译工作给予了大力支持,20 多位年轻的教师和博士参与了本书的翻译工作。这是一次大规模高效率的合作,从 2007 年 10 月到 2008 年的 4 月的半年时间里,大家通力合作、互相鼓励和帮助,一口气把 200 多万字的两本厚书翻译完成,校对了三遍!掩卷沉思,为大家感动,为中国感动,相信 MEMS 的春天正在向我们走来!

本书主要是介绍 MEMS 的应用,共分 15 章,详细介绍了惯性、压力等各类微型传感器和执行器,以及微流控、微型机器人等系统。这些章节分别由来自加拿大、印度、以色列、意大利、韩国、瑞典、美国等国家和中国香港、中国台湾地区的多位知名科学家合著而成。我们的翻译队伍主要是由北大和上海交大的多位年轻学者组成,按照章节顺序依次是毛旭(第 1、2 章)、迟晓珠(第 3 章)、丁桂甫(第 4 章)、刘景全(第 5 章)、王玮(第 6 章)、李振波(第 7 章)、李修函(第 8 章)、缪旻(第 9 章)、易玉良(第 10 章)、季旭(第 11、

12 章)、王玮(第 13 章)、杨振川(第 14、15 章)等,方东明、杨振川、肖志勇、李志宏、于晓梅、陈兢、赵新等对主要章节进行了审阅和修改,张海霞、金玉丰、赵小林完成了最终的审校。在此对他们的辛勤劳动表示衷心的感谢!

张海霞

2008 年 12 月 20 日

目 录

译丛序言

译者序

第 1 章 绪论	1
参考文献	3
第 2 章 惯性传感器	5
2.1 简介	5
2.2 惯性传感器的应用	5
2.3 加速度的基本概念	7
2.4 直线运动惯性传感器参数	8
2.5 旋转运动的惯性传感器参数	15
2.6 惯性传感器件的微机械加工技术	17
2.7 微加工工艺加工问题	19
2.8 惯性传感器的系统问题	23
2.9 结束语	27
参考文献	27
第 3 章 微机械压力传感器：器件、接口电路及性能	34
3.1 简介	34
3.2 器件结构和性能测试	34
3.3 压阻式压力传感器	38
3.4 电容式压力传感器	46
3.5 伺服控制压力传感器	59
3.6 其他压力传感方式	64
3.7 结论	71
参考文献	71
第 4 章 表面微加工器件	75
4.1 引言	75
4.2 材料特性和几何结构	76
4.3 应力与应变	76
4.4 机械设计	80
4.5 封装	93
4.6 应用	95
4.7 MEMS 失效机理	102
4.8 结论	107

参考文献	107
第5章 微执行器	109
5.1 引言	109
5.2 压电执行器	114
5.3 电磁驱动器	120
5.4 形状记忆合金驱动器	129
参考文献	136
第6章 湍流传感器与执行器	139
6.1 绪论	139
6.2 MEMS 工艺概述	141
6.3 湍流	145
6.4 用于湍流测量和控制的传感器	151
6.5 用于流动控制的微执行器	184
6.6 微透平机械	193
6.7 结论	197
参考文献	198
第7章 微机器人技术	207
7.1 引言	207
7.2 什么是微机器人	208
7.3 微机器人的应用环境	211
7.4 微机器人的制造技术	216
7.5 微机器人器件	219
7.6 多机器人系统（微型工厂和桌面工厂）	234
7.7 结论与讨论	237
参考文献	238
第8章 微型真空泵	246
8.1 引言	246
8.2 基础知识	248
8.3 泵尺度	250
8.4 MEMS 真空系统的极限压强和抽气能力	256
8.5 MEMS 系统的工作压强和 N 需求	257
8.6 尺度规律综述	257
8.7 新型泵送技术	259
8.8 结论	266
参考文献	268
第9章 非线性动电器件	272
9.1 引言	272
9.2 非线性动电现象	274
9.3 交流动电现象	278

9.4 小结	287
参考文献	287
第 10 章 微液滴发生器	291
10.1 简介	291
10.2 微液滴发生器的工作原理	291
10.3 物理和设计问题	297
10.4 微液滴发生器的制造	306
10.5 液滴产生的特性	308
10.6 应用	311
10.7 结束语	317
参考文献	317
第 11 章 微热管和微散热器	322
11.1 概述	322
11.2 单个微热管	329
11.3 微热管阵列	337
11.4 平板微散热器	342
11.5 新设计	345
11.6 概要和结论	349
参考文献	349
第 12 章 微通道热沉	353
12.1 绪论	353
12.2 微通道内对流换热的基本原理	354
12.3 微通道内单相对流换热	359
12.4 微通道内两相对流换热	367
12.5 小结	376
参考文献	377
第 13 章 流动控制	380
13.1 绪论	380
13.2 一般性原理	381
13.3 “驯悍记” (<i>The Taming of the Shrew</i>)	386
13.4 湍流控制	387
13.5 抽吸	388
13.6 相干结构	389
13.7 反应式流动控制	392
13.8 磁流体控制	399
13.9 混沌控制	403
13.10 软计算	408
13.11 应用 MEMS 技术的反应式控制	412
13.12 总结	414

参考文献	414
第 14 章 用于边界层减阻的反应式控制	425
14.1 绪论	425
14.2 近壁流向涡	426
14.3 反相控制	427
14.4 基于壁上检测的反应式控制	430
14.5 有源壁运动	434
14.6 结束语	436
参考文献	437
第 15 章 自由剪切流的 MEMS 自主控制	439
15.1 绪论	439
15.2 自由剪切流	439
15.3 剪切层 MEMS 控制系统组件和问题	440
15.4 三角翼上滚动力矩的控制	445
15.5 超声速射流啸音的控制	452
15.6 低雷诺数翼上分离的控制	461
15.7 对未来的思考	464
参考文献	466

第 1 章 绪 论

Mohamed Gad-el-Hak
弗吉尼亚联邦大学

制造工具是我们人类特有的能力，这种能力将人与地球上的所有其他物种区分开来。早在 40 万年前，古老的智人就雕刻出了符合空气动力学的木制长矛。此后的数万年，人类制造了各种工具，尺寸从 10^{-4}m 到 10^2m 不等，如图 1-1 所示。如果纳入整个尺度范围，你会惊异地发现人类自身的尺寸恰好位于最小尺寸（亚原子粒子，约 10^{-26}m ）和可观测的最大尺寸（宇宙范围，量级为 10^{26}m ，即 150 亿光年）的正中间。此时，整个宇宙既不以太阳为中心也不以地球为中心，而是以人类为中心。

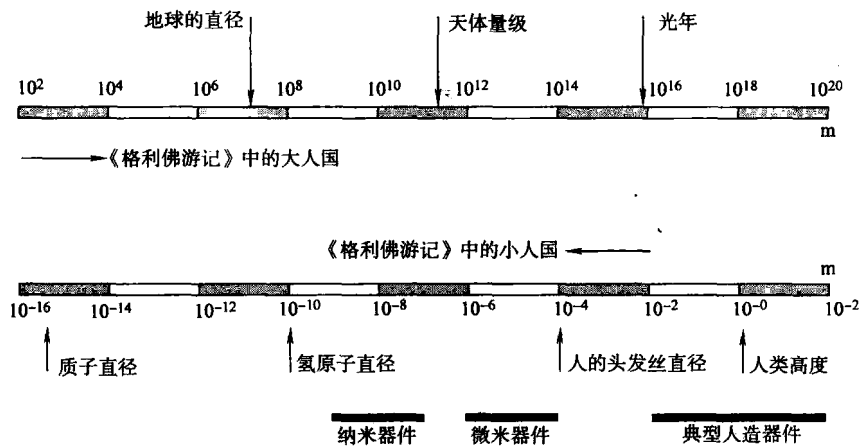


图 1-1 物质的量度

人类的发展历史，是一部探索、制造和控制各种工具的奋斗史。我们不停地挑战着时间和空间的极限，乔纳森·斯威夫特（Jonathan Swift, 1726）就在他著名的《格利佛游记》中，对世界上常规物理尺度的放大和缩小进行了大胆预测。从宏观上看，公元前 2600 年，埃及建造的胡夫金字塔高达 147m，而 1931 年竣工的帝国大厦（1950 年安装广播电视天线后）高达 449m。在建筑物高度不断创下新的世界纪录的同时，我们人类的设计也在向着另外一个方向努力。一枚硬币的直径一般只略长于 2cm，从 13 世纪制表工匠就开始尝试微小化制作工艺，17 世纪显微镜的发明则开辟了直接观察微生物、植物和动物细胞的途径，到 20 世纪后半叶，随着 1947 年晶体管的发明，集成电路技术的迅猛发展不但把我们带入了信息时代，也将我们带入了微纳时代。

微机电系统（Microelectromechanical System，简称 MEMS）的起源，可以追溯到 1959

年,著名物理学家理查德·费曼教授在美国物理协会年度会议上发表了他著名的演讲,“于细微处天地宽”,他提到,“当我们在生活中需要处理一些非常细小且极易损坏的物品时,我们会情不自禁地想到如果能够制造一只机械蚂蚁来做就好了!”当时他并没有预见到微机械的众多实用价值,还感叹“微小但活动的机械未必有用,不过制造它们一定会很有趣”。24年后,1983年2月23日费曼教授在喷气推进实验室提出了“超微小机械”,他说,“这些机器没什么用,所以我仍不明白为什么我会如此着迷于制造具有可动和可控部件的微小机器”。近年来,用于制造超精密机械的制造工艺得到了长足发展,以硅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 $100\mu\text{m}$ 的各种各样的器件先后问世,如静电的、磁的、电磁的、气动的和热驱动的致动器、电动机、阀、齿轮、悬臂、振动膜和夹具等,广泛应用于测量压力、温度、流体、速率、声音以及化学成分等;它们不仅是作为传感器和执行器,还作为复杂系统的重要组成部分,例如芯片实验室、机器人、微发动机以及微泵等。

MEMS器件是指特征尺寸在 $1\sim 1000\mu\text{m}$ 之间、利用集成电路加工技术将机械和电子元件集成的器件,MEMS器件小于人的头发丝直径,近年来出现的纳机电系统(NEMS)则进一步推动了微小型技术的发展。目前,MEMS制造技术主要包括硅表面微加工、体硅微细加工、光刻、电镀、LIGA和电火花加工(EDM)等,本书的制造技术部分由著名专家Kovacs(1998)和Madou(2002)提供了详细的资料。

当初费曼教授的一个设想,不但引出了一个新的学科MEMS,还在人类的社会生活中发挥了巨大的作用,MEMS在工业和医疗等领域的应用越来越广泛,例如:汽车安全气囊用的加速度计,无钥匙控制系统,用于高清晰光学显示的微镜阵列,用于单原子成像的扫描电子显微镜探针,电路冷却用的微换热器,分离生物细胞的反应器,血液分析仪,医学导管用的压力传感器,红外探测器用的微管道,半导体激光器,微型色谱仪,高频射流控制系统,喷墨打印技术,以及用于医学领域的微量药物的受控传输和监测等。备受关注的片上分析系统有望使生物和化学分析和处理的自动化程度与计算机相当。

全球投入微米和纳米技术研究的资金从1997年的4.32亿美元增长五倍至2002年的22亿美元。2004年,美国国家纳米技术计划的预算接近10亿美元,全球的研发投资超过35亿美元。据估计,在10到15年内,微米技术和纳米技术将在每年的材料市场占3400亿美元,电子市场占3000亿美元,药品市场占1800亿美元。

在过去十年间,MEMS的研究呈爆炸式增长,有许多期刊是专门为MEMS技术而创办的。以MEMS为主题的国际会议和研讨会也风靡世界。同时,很多研究型的微纳技术网站也非常受欢迎。

本书主要介绍MEMS技术应用方面的知识。由于有多位作者参加编写,书中各章节在长短、深度、广度和文风上难免存在差异。

本书作为MEMS手册的一册出版,对具有工程学或科学背景的读者具有很强的系统性和可读性,为专业技术人员和研究者提供MEMS这一新兴学科及其未来发展的概述。通过本书的目录,读者便可看出本书偏重于微型器件物理学,这是我们的理念:MEMS技术相对我们对其所涉及的非传统物理学的了解,已经走得太快了,只有以掌握其基本原理作为坚实基础,MEMS技术的发展才会切实受益。如果对这些物理原理的了

解可以更深入、途径更经济和效率更高,那么微器件便可以为达到各种现存的和理想的应用而设计和制造出来。按照这一理论,讨论控制理论、分布式控制与计算的章节被用来作为超前理论的支撑,以达到节约大量的能源和改善车辆及其他人工装置的高效控制策略。

开卷有益,现在你可以像格利佛一样开始在本书的各章节遨游了,你将会遇到许多奇妙的微小世界,你的旅行可能和《格利佛游记》中到“世界上几个偏远的国度”一样令人振奋和具有启发性!

参 考 文 献

- [1] Amato, I. (1998) "Formenting a Revolution, in Miniature," *Science* 282, no. 5388, 16 October, pp. 402-405.
- [2] Angell, J.B., Terry, S.C., and Barth, P.W. (1983) "Silicon Micromechanical Devices," *Faraday Transactions I* 68, pp. 744-748.
- [3] Ashley, S. (1996) "Getting a Microgrip in the Operating Room," *Mech. Eng.* 118, September, pp. 91-93.
- [4] Bryzek, J., Peterson, K., and McCulley, W. (1994) "Micromachines on the March," *IEEE Spectrum* 31, May, pp. 20-31.
- [5] Busch-Vishniac, I.J. (1998) "Trends in Electromechanical Transduction," *Phys. Today* 51, July, pp. 28-34.
- [6] Chalmers, P. (2001) "Relay Races," *Mech. Eng.* 123, January, pp. 66-68.
- [7] DeGaspari, J. (2003) "Mixing It Up," *Mech. Eng.* 125, August, pp. 34-38.
- [8] Ehrenman, G. (2004) "Shrinking the Lab Down to Size," *Mech. Eng.* 126, May, pp. 26-29.
- [9] Epstein, A.H. (2000) "The Inevitability of Small," *Aerospace Am.* 38, March, pp. 30-37.
- [10] Epstein, A.H., and Senturia, S.D. (1997) "Macro Power from Micro Machinery," *Science* 276, 23 May, p. 1211.
- [11] Epstein, A.H., Senturia, S.D., Al-Midani, O., Anathasuresh, G., Ayon, A., Breuer, K., Chen, K.-S., Ehrich, F.F., Esteve, E., Frechette, L., Gauba, G., Ghodssi, R., Groshenry, C., Jacobson, S.A., Kerrebrock, J.L., Lang, J.H., Lin, C.-C., London, A., Lopata, J., Mehra, A., Mur Miranda, J.O., Nagle, S., Orr, D.J., Piekos, E., Schmidt, M.A., Shirley, G., Spearing, S.M., Tan, C.S., Tzeng, Y.-S., and Waitz, I.A. (1997) "Micro-Heat Engines, Gas Turbines, and Rocket Engines — The MIT Microengine Project," AIAA Paper No. 97-1773, AIAA, Reston, Virginia.
- [12] Feder, T. (2004) "Scholars Probe Nanotechnology's Promise and Its Potential Problems," *Phys. Today* 57, June, pp. 30-33.
- [13] Feynman, R.P. (1961) "There's Plenty of Room at the Bottom," in *Miniaturization*, H.D. Gilbert, ed., pp. 282-296, Reinhold Publishing, New York.
- [14] Gabriel, K.J. (1995) "Engineering Microscopic Machines," *Sci. Am.* 260, September, pp. 150-153.
- [15] Gabriel, K.J., Jarvis, J., and Trimmer, W., eds. (1988) *Small Machines, Large Opportunities: A Report on the Emerging Field of Microdynamics*, National Science Foundation, published by AT&T Bell Laboratories, Murray Hill, New Jersey.
- [16] Gabriel, K.J., Tabata, O., Shimaoka, K., Sugiyama, S., and Fujita, H. (1992) "Surface-Normal Electrostatic/Pneumatic Actuator," in *Proc. IEEE Micro Electro Mechanical Systems '92*, pp. 128-131, 4-7 February, Travemünde, Germany.
- [17] Garcia, E.J., and Sniogowski, J.J. (1993) "The Design and Modelling of a Comb-Drive-Based Microengine for Mechanism Drive Applications," in *Proc. Seventh International Conference on Solid-State Sensors and Actuators (Transducers '93)*, pp. 763-766, Yokohama, Japan, 7-10 June.
- [18] Garcia, E.J., and Sniogowski, J.J. (1995) "Surface Micromachined Microengine," *Sensor. Actuator. A* 48, pp. 203-214.
- [19] Goldin, D.S., Venneri, S.L., and Noor, A.K. (2000) "The Great out of the Small," *Mech. Eng.* 122, November, pp. 70-79.

- [20] Gravesen, P., Branebjerg, J., and Jensen, O.S. (1993) "Microfluidics — A Review," *J. Micromech. Microeng.* 3, pp. 168–182.
- [21] Ho, C.-M., and Tai, Y.-C. (1996) "Review: MEMS and Its Applications for Flow Control," *J. Fluids Eng.* 118, pp. 437–447.
- [22] Ho, C.-M., and Tai, Y.-C. (1998) "Micro–Electro–Mechanical Systems (MEMS) and Fluid Flows," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 30, pp. 579–612.
- [23] Hogan, H. (1996) "Invasion of the Micromachines," *New Sci.* 29, June, pp. 28–33.
- [24] Karniadakis, G.E., and Beskok A. (2002) *Microflows: Fundamentals and Simulation*, Springer-Verlag, New York.
- [25] Knight, J. (1999) "Dust Mite's Dilemma," *New Sci.* 162, no. 2180, 29 May, pp. 40–43.
- [26] Kovacs, G.T.A. (1998) *Micromachined Transducers Sourcebook*, McGraw-Hill, New York.
- [27] Lemay, S.G., Janssen, J.W., van den Hout, M., Mooij, M., Bronikowski, M.J., Willis, P.A., Smalley, R.E., Kouwenhoven, L.P., and Dekker, C. (2001) "Two-Dimensional Imaging of Electronic Wavefunctions in Carbon Nanotubes," *Nature* 412, 9 August, pp. 617–620.
- [28] Lipkin, R. (1993) "Micro Steam Engine Makes Forceful Debut," *Sci. News* 144, September, p. 197.
- [29] Madou, M. (2002) *Fundamentals of Microfabrication*, second edition, CRC Press, Boca Raton, Florida.
- [30] Nguyen, N.-T., and Wereley, S.T. (2002) *Fundamentals and Applications of Microfluidics*, Artech House, Norwood, Massachusetts.
- [31] O'Connor, L. (1992) "MEMS: Micromechanical Systems," *Mech. Eng.* 114, February, pp. 40–47.
- [32] O'Connor, L., and Hutchinson, H. (2000) "Skyscrapers in a Microworld," *Mech. Eng.* 122, March, pp. 64–67.
- [33] Ouellette, J. (1996) "MEMS: Mega Promise for Micro Devices," *Mech. Eng.* 118, October, pp. 64–68.
- [34] Ouellette, J. (2003) "A New Wave of Microfluidic Devices," *Ind. Phys.* 9, no. 4, pp. 14–17.
- [35] Paula, G. (1996) "MEMS Sensors Branch Out," *Aerospace Am.* 34, September, pp. 26–32.
- [36] Pekola, J., Schoelkopf, R., and Ullom, J. (2004) "Cryogenics on a Chip," *Phys. Today* 57, May, pp. 41–47.
- [37] Robinson, E.Y., Helvajian, H., and Jansen, S.W. (1996a) "Small and Smaller: The World of MNT," *Aerospace Am.* 34, September, pp. 26–32.
- [38] Robinson, E.Y., Helvajian, H., and Jansen, S.W. (1996b) "Big Benefits from Tiny Technologies," *Aerospace Am.* 34, October, pp. 38–43.
- [39] Roco, M.C. (2001) "A Frontier for Engineering," *Mech. Eng.* 123, January, pp. 52–55.
- [40] Sharke, P. (2004) "Water, Paper, Glass," *Mech. Eng.* 126, May, pp. 30–32.
- [41] Sniegowski, J.J., and Garcia, E.J. (1996) "Surface Micromachined Gear Trains Driven by an On-Chip Electrostatic Microengine," *IEEE Electron Device Lett.* 17, July, p. 366.
- [42] Squires, T.M., and Quake, S.R. (2005) "Microfluidics: Fluid Physics at the Nanoliter Scale," *Rev. Mod. Phys.* 77, pp. 977–1026.
- [43] Stone, H.A., Stroock, A.D., and Ajdari, A. (2004) "Engineering Flows in Small Devices: Microfluidics Toward a Lab-on-a-Chip," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 36, pp. 381–411.
- [44] Swift, J. (1726) *Gulliver's Travels*, 1840 reprinting of *Lemuel Gulliver's Travels into Several Remote Nations of the World*, Hayward & Moore, London, Great Britain.
- [45] Tang, W.C., and Lee, A.P. (2001) "Military Applications of Microsystems," *Ind. Phys.* 7, February, pp. 26–29.
- [46] Tien, N.C. (1997) "Silicon Micromachined Thermal Sensors and Actuators," *Microscale Thermophys. Eng.* 1, pp. 275–292.

第2章 惯性传感器

Paul L. Bergstrom

Melissa L. Trombley

密歇根科技大学

Gary G. Li

飞思卡尔半导体公司

2.1 简介

惯性传感器是指将惯性力转换成可测信号（一般是具有一定灵敏度的线性输出电压）的转换器。目前，适用于宏观惯性传感器的原理和方法在微机械传感器中得到了广泛的应用，那么，是什么因素导致一定要引入微机械惯性传感器呢？首先，对不同的直线和旋转运动传感器的应用需求需要有相应的微加工技术、设计和系统架构；其次，尽管各种敏感机理和微加工技术在传统的惯性传感器中也得到了大量的应用，但是从系统的角度来说对微型传感器的需求更加迫切。本章将从如下几个方面讲述微惯性传感器：微惯性器件的经典应用；直线运动惯性传感器即加速度计的参数设计，检测惯性位移的主要物理机制；角速率传感器即陀螺的旋转运动惯性速率传感器的特有参数设计；几种常用的微加工工艺及其对微型传感器设计的影响。

2.2 惯性传感器的应用

在微型传感器的应用中通常需要考虑封装体积或尺寸、系统成本和性能等三个主要方面，一般来说一种技术不可能同时满足三个方面的要求。相对宏观情况而言，微惯性传感器的封装体积或系统总尺寸是较容易实现的，这是因为微加工技术能够将敏感元件和电路元件集成为单个芯片或将两个芯片封装在很小的塑料或陶瓷管壳中，图 2-1 所示是两个实例。

微惯性传感器的系统成本也是一个重要方面。由于采用与微电子工艺兼容的工艺，微惯性传感器能够大批量加工从而显著地降低了工艺的限制。尽管微加工的许多单步工艺比相应的宏观器件工艺贵得多，但综合考虑到微传感器小尺寸的巨大优势，单步工艺对成本的影响就明显下降了。

在保证产品性能的前提下实现利润最大化就需要降低单位生产成本，这表现在微系统中就是有效利用芯片面积，即在最小的芯片面积上加工灵敏度最高的器件。目前，乘客安全系统中的微加速度计都采用早期的表面微机械加工技术，即在硅片表面先后淀积牺牲层和结构层从而形成锚点，通过释放牺牲层得到悬浮结构，结构材料一般是厚度不超过 $3\mu\text{m}$ 的多晶

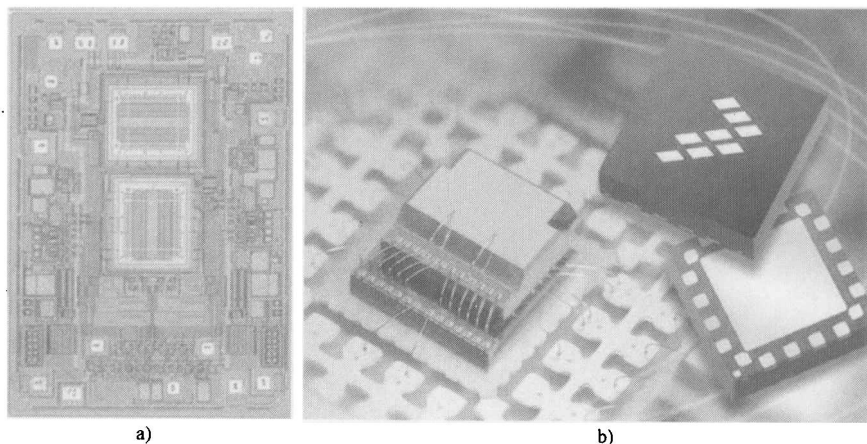


图 2-1 两个大量生产的加速度计产品实例

a) 美国模拟器件公司 ADXL250 两轴横向单片集成加速度计产品顶视图

b) 飞思卡尔半导体公司圆片级封装加速度计和控制芯片在塑胶灌注成型前固定于引线框架上的透视图

硅 (Ristic 等, 1992)。虽然这种技术应用十分广泛, 但必将被更灵活、更高效地利用芯片面积的加工技术所取代。

与宏观传感器相比, 微传感器在系统灵敏度和全量程范围方面有一定局限。对一个系统来说, 尺寸、成本以及性能方面的平衡总是交织在一起的。MEMS 技术在那些对尺寸和成本要求高, 但是性能要求一般的应用方面获得了巨大的成功, MEMS 在汽车中的应用就是一个很好的例子。

汽车中的应用是微惯性传感器技术发展的主要原动力, 表 2-1 列出了惯性传感器主要性能指标及其在汽车中的应用 (MacDonald, 1990)。加速度计是目前产量最大的微机械产品之一, 它广泛用于汽车乘客安全保障系统的安全气囊中。典型的气囊系统中, 要求加速度计能够感知 $20g \sim 100g$ 的正面冲击和 $100g \sim 250g$ 的侧面冲击, 其中 $1g$ 就是地球重力加速度。单轴惯性传感器用于汽车动力系统的主动悬架系统中时, 典型灵敏度为 $0.5g \sim 10g$ 。未来的安全系统将需要更多的传感器来适应各种碰撞情况, 测量的碰撞变量包括冲击位置、乘客的位置和重量、安全带的使用情况以及冲击的程度。未来的安全系统也可能采用遍布车身的多个多轴传感器来决定气囊的最佳弹出时机和速度。

随着技术的发展, 汽车动力和乘客安全系统的复杂程度和功能都在增加, 如主动悬架、牵引力控制系统、侧翻安全系统, 以及将低重力加速度计、偏航角速率传感器和倾斜角速率传感器安装在发动机、转向和防抱死制动系统中, 以便使汽车失去控制后恢复驾驶员对车的操控。另外, 综合正面和侧面气囊的信息, 系统就能确定冲撞的严重程度, 根据情况收紧座位安全带并弹出侧面、头部、窗口以及乘客之间的气囊。今天这些系统已经得到了广泛应用, 未来将集成为更复杂和功能更强大的汽车安全系统。

角速率惯性传感器可以感知倾斜、摇摆、偏航速率, 要求比同类的加速度计有更高的灵敏度, 例如, 只有达到 $10^{-3}g \sim 10^{-6}g$ 的分辨率, 才能对小于 $1(^{\circ})/\text{min}$ 漂移的转动惯量进行稳定测量。为获得稳定和可靠的结果, 角速率传感器在设计时不仅要考虑上述微机械技术, 器件和系统的复杂程度也明显增加。