

清华大学微机电系统工程系列教材

微型传感器

Microsensor

董永贵 编著

Dong Yonggui

清华大学出版社

清华大学微机电系统工程系列教材

微型传感器

Microsensor

董永贵 编著

Dong Yonggui

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

针对微传感器技术发展速度快,一些理论、方法及实现技术尚未成熟的特点,本书紧密结合微传感器的最新发展动态,对热、辐射、机械、磁、化学量微传感器的基本理论及实现技术进行分类阐述,同时介绍了微传感器系统及其数据获取与处理方面的知识,旨在为读者提供一本微传感器方面的入门读物。本书帮助读者在掌握微传感器基础知识的基础上,建立微传感器设计、研究、制作及实验分析等方面的基本概念。当遇到具体的微传感器问题时,能查到专业文献,能读懂文献内容,能自行设计实验,能对实验结果进行分析总结。

本书所涉及的微传感器,是指那些至少有一个物理尺寸在亚毫米量级的传感器。全书共分10章:引言、微传感器与信号、微传感器的常用材料及加工工艺、热学量微传感器、辐射量微传感器、机械量微传感器、磁微传感器、化学量微传感器常用技术、化学量微传感器、微传感器的数据获取。

本书可供高等工科院校微机电系统、测控技术与仪器、自动化工程、机电一体化及仪器仪表等专业师生使用,也可供从事仪器相关专业的研究、设计、制造、使用的工程技术人员学习和参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

微型传感器/董永贵编著. —北京:清华大学出版社,2007.7

(清华大学微机电系统工程系列教材)

ISBN 978-7-302-15333-7

I. 微… II. 董… III. 传感器—高等学校—教材 IV. TP212

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 078034 号

责任编辑:张秋玲

责任校对:赵丽敏

责任印制:孟凡玉

出版发行:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

c-service@tup.tsinghua.edu.cn

社总机:010-62770175

投稿咨询:010-62772015

印装者:北京鑫海金澳胶印有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印 张:27.75

版 次:2007年7月第1版

印 数:1~3000

定 价:42.00元

地 址:北京清华大学学研大厦A座

邮 编:100084

邮购热线:010-62786544

客户服务:010-62776969

字 数:568千字

印 次:2007年7月第1次印刷

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:024062-01

前言



随着微加工技术的不断进步,以微、纳米加工工艺为核心技术的微型传感器(microsensor)(以下简称微传感器),成为微机电系统(microelectromechanical system, MEMS)领域的一个重要发展方向。与传统意义上的传感器相比,微传感器的体积很小,敏感元件的尺寸一般在 $0.1\sim 100\ \mu\text{m}$ 之间。然而,微传感器并不仅仅是传统传感器按比例缩小的产物,其理论基础、结构工艺、设计方法等有许多自身的特殊现象和规律。

微传感器是利用硅加工工艺制作出的传感器,尺寸小自然是其重要特征。然而,由于在实际测量中会受到测量环境的限制,并不是传感器的全部尺寸都要很小,而本书所涉及的微传感器,是指那些至少有一个物理尺寸在亚毫米量级的传感器。

与传统的传感器技术类似,微传感器同样是一门多学科交叉的技术,涉及电子学、物理学、化学、生物学、医学、材料科学等多个学科领域。此外,微传感器的发展历史不长,一些理论、方法及实现技术尚未成熟,目前正处于高速发展时期,不断有新型微传感器出现。希望用这样一本书涵盖全部微传感器方面的知识自然是不现实的。本书的编写目的在于为读者提供一本入门性质的读物,希望能帮助读者通过学习,在掌握微传感器常用知识的基础上,建立微传感器设计、研究、制作及实验分析等方面的基本概念。读者在学习本教材的过程中,也应该注意结合专业文献资料的检索与阅读,争取做到面对具体的微传感器问题时,能查到专业文献,能读懂文献内容,能自行设计实验,能对实验结果进行分析总结。

本书内容共分10章。

第1章,引言。介绍微传感器及微传感器系统的一些基本概念。考虑到专业文献资料的掌握在微传感器学习方面的重要性,本章结合编著者在实际科研中的体会,专门就文献资料的检索与阅读、实验的设计与数据整理,给出了建议。这方面的能力是微传感器学习及应用的重要基础,建议读者在学习本书内容的过程中,尽可能广泛地涉猎高水平的专业文献,提高自身的专业素养。

第2章,微传感器与信号。介绍微传感器及微传感器信号获取的基本知识,并对微传感器中常见的电阻及电容的检测方式进行分析阐述。

第3章,微传感器的常用材料及加工工艺。这方面的内容比较繁杂。考虑到许多微电子、微加工及微器件等方面的书籍中,都涉及了这方面的知识,本章仅概要介绍一些与微传感器相关的基本知识。更深入的理论及技术细节,读者在需要的时候可参考其他专业书籍。

第4章,热学量微传感器。主要介绍用于接触式温度测量的微传感器,包括热电偶、热电阻、热敏二极管、热敏三极管等,同时也概要介绍了一些其他非硅工艺的传感器,如基于石英体声波器件、声表面波器件及光纤的温度微传感器。

第5章,辐射量微传感器。包括核辐射探测器与电磁辐射微传感器。虽然核辐射的常规探测多数还是采用大型的仪器,但随着应用中对便携式乃至微型仪器需求的增长,核辐射微传感器已经成为一个重要的研究方向。该章主要介绍电导型及光电型微传感器,并重点介绍了广泛应用的红外辐射微传感器方面的知识。

第6章,机械量微传感器。机械量微传感器的种类很多,该章重点介绍机械量测量的基本知识,并结合压力、加速度及流量的测量,对这类微传感器的基本原理及实现方法进行了阐述。

第7章,磁微传感器。磁传感器所检测的参量比较单一,传感器的种类也不是很多。本章主要介绍基于微加工工艺的霍尔传感器、磁阻传感器、半导体磁传感器等,并给出了磁微传感器的一些典型应用实例,包括用于无损探伤及微位移检测的电涡流微传感器。

第8章,化学量微传感器常用技术。化学量微传感器所涉及的领域很广泛,一些检测原理及技术虽然不能归结为微传感器的范畴,在微传感器的专业文献中却非常常见。本章重点介绍电化学、石英晶体微天平(QCM)、表面等离子体谐振(SPR)等技术,并对化学量微传感器系统中常用的主元分析方法进行了阐述。

第9章,化学量微传感器。介绍化学量微传感器的基本概念,重点对各种类型的气体微传感器、生物量微传感器的基本原理及实现方法进行分析阐述。这部分的内容对于机械电子专业的学生来说,学习起来会有一些难度。但化学量的检测在微传感器中占有非常重要的位置。建议读者在学习过程中不要受自身专业领域所限,努力掌握相关知识。

第10章,微传感器的数据获取。数字电路技术在微传感器中占有非常重要的位置。本章重点介绍以频率、脉宽、占空比等时间调制信号为特征的准数字传感器的数据获取技术,并对微传感器系统的数据获取、灵巧传感器的基本组成以及微传感器数据获取系统的软/硬件协同设计方法等进行阐述。

为方便读者对本书内容的学习,在每章结尾都给出了推荐阅读、练习与思考。受文献资源所限,推荐阅读中所列均为英文资料。建议读者在学习完一章的内容之后,深入阅读所推荐的文献,结合练习与思考,提高实际掌握文献资料的能力。

本书可供高等工科院校微机电系统、测控技术与仪器、自动化工程、机电一体化及仪器仪表等专业师生使用,也可供从事仪器相关专业的研究、设计、制造、使用的工程技术人员学习和参考。

由于水平有限,书中难免有不妥甚至错误之处,殷切希望读者提出宝贵意见。

作 者

2007 年 2 月于清华园

目录

1 引言	1
1.1 微电子与微传感器	1
1.1.1 微电子与微器件	1
1.1.2 微传感器	4
1.1.3 微机电系统	6
1.1.4 微器件的相关理论与技术	9
1.2 微传感器与测量系统	12
1.2.1 测量系统	12
1.2.2 微传感器的分类	14
1.2.3 微传感器系统	17
1.3 本书内容的学习	24
1.3.1 专业文献的查找	24
1.3.2 专业文献的阅读	26
1.3.3 数据的总结与表达	29
推荐阅读	34
练习与思考	34
2 微传感器与信号	36
2.1 微传感器的理想特性及实用中的局限性	36
2.1.1 微传感器的误差	36
2.1.2 微传感器的静态特性	38
2.1.3 微传感器的动态特性	44
2.2 微传感器的标定	48

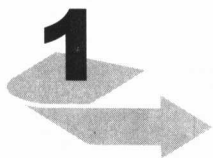
2.2.1	微传感器标定的基本概念	48
2.2.2	精度、精密度、误差、不确定度	49
2.2.3	微传感器的标定与数据处理	51
2.2.4	微传感器标定实验的设计	53
2.3	微传感器信号的数据获取	55
2.3.1	微传感器的信号调理	56
2.3.2	接口与数域	57
2.3.3	电阻的检测	59
2.3.4	电容的检测	65
	推荐阅读	75
	练习与思考	75
3	微传感器的常用材料及加工工艺	78
3.1	材料的基本知识	78
3.1.1	材料的基本物理特性	78
3.1.2	导体、半导体和电介质材料	81
3.1.3	MEMS 常用材料	84
3.2	微传感器的常用材料	86
3.2.1	半导体敏感材料	86
3.2.2	敏感陶瓷材料	87
3.2.3	高分子敏感材料	94
3.2.4	磁性材料	101
3.2.5	微传感器的封装	104
3.3	常用的微加工技术	106
3.3.1	硅的刻蚀技术	106
3.3.2	表面膜的加工工艺	111
3.3.3	硅的平面微加工工艺	119
3.3.4	三维结构的微加工工艺	121
	推荐阅读	123
	练习与思考	124
4	热学量微传感器	125
4.1	基本知识及定义	125
4.1.1	基本的热学量	126
4.1.2	温度及其标定	127

4.1.3	热学量微传感器的分类	131
4.2	热电偶	132
4.2.1	热电效应	132
4.2.2	热电偶的材料及其制作	133
4.3	热电阻	138
4.3.1	金属热电阻	138
4.3.2	半导体热敏电阻	140
4.4	热敏二极管和热敏三极管	142
4.4.1	热敏二极管	142
4.4.2	热敏三极管	143
4.5	其他形式的热学量传感器	144
4.5.1	石英体声波温度传感器	144
4.5.2	声表面波温度传感器	147
4.5.3	光纤温度传感器	150
	推荐阅读	153
	练习与思考	153
5	辐射量微传感器	155
5.1	辐射量微传感器的基本概念与定义	155
5.1.1	核辐射与电磁辐射	155
5.1.2	辐射的计量参数	157
5.1.3	辐射量微传感器的分类	159
5.2	核辐射微传感器	160
5.2.1	核辐射的类型及其计量	161
5.2.2	闪烁探测器	163
5.2.3	固态探测器	166
5.3	紫外光、可见光与近红外光微传感器	168
5.3.1	电导型光敏微传感器	168
5.3.2	光电型光敏微传感器	173
5.4	红外辐射微传感器	179
5.4.1	红外辐射的基本知识	179
5.4.2	红外光敏微传感器	181
5.4.3	红外热敏微传感器	184
	推荐阅读	188

练习与思考	188
6 机械量微传感器	190
6.1 机械量的测量	190
6.1.1 常见机械量及机械量微传感器	190
6.1.2 微机械元件	192
6.1.3 微机械谐振器	197
6.1.4 谐振式微传感器	204
6.2 压力微传感器	209
6.2.1 压力测量的基本概念	209
6.2.2 压阻式压力微传感器	211
6.2.3 电容式压力微传感器	216
6.2.4 硅谐振式压力微传感器	221
6.3 加速度微传感器	225
6.3.1 加速度微传感器的基本概念	225
6.3.2 压阻式加速度微传感器	227
6.3.3 电容式加速度微传感器	231
6.3.4 谐振式加速度微传感器	236
6.4 流量微传感器	241
6.4.1 机械式流量微传感器	241
6.4.2 热式流量微传感器	243
推荐阅读	244
练习与思考	244
7 磁微传感器	246
7.1 磁微传感器的基本知识	246
7.1.1 磁场的描述	246
7.1.2 微传感器中的磁效应	247
7.2 霍尔传感器	250
7.2.1 霍尔效应	250
7.2.2 基于霍尔效应的微传感器	251
7.2.3 霍尔传感器的检测电路	254
7.3 磁阻效应与磁敏电阻	257
7.3.1 磁阻效应	257
7.3.2 各向异性磁敏电阻	258

7.3.3	巨磁阻微传感器	260
7.4	磁敏二极管及磁敏三极管	263
7.5	磁微传感器的典型应用	264
	推荐阅读	271
	练习与思考	271
8	化学量微传感器常用技术	273
8.1	电化学检测技术	273
8.1.1	电极电位与电极过程	273
8.1.2	电化学分析方法	284
8.1.3	离子选择电极	290
8.2	石英晶体微天平	297
8.2.1	石英晶体谐振器	298
8.2.2	石英晶体谐振器对表面负载的敏感特性	301
8.2.3	石英晶体微天平在化学量检测方面的应用	304
8.3	表面等离子体谐振检测技术	308
8.4	主元分析方法	313
8.4.1	多元数据分析中的特征提取	313
8.4.2	主元分析原理	315
8.4.3	主元分析实例	317
	推荐阅读	321
	练习与思考	322
9	化学量微传感器	326
9.1	化学量微传感器的基本概念	326
9.1.1	化学量微传感器的基本原理	326
9.1.2	化学量微传感器的分类	328
9.2	气体微传感器	331
9.2.1	气体的检测与气体微传感器	332
9.2.2	电化学气体微传感器	335
9.2.3	半导体气体微传感器	338
9.2.4	湿度敏感元件	343
9.2.5	基于 MEMS 技术的气体微传感器	348
9.3	生物微传感器	350
9.3.1	生物微传感器概述	351

9.3.2	生物微传感器的特性	353
9.3.3	分子识别与生物探针	358
9.3.4	生物探针的固定	361
9.3.5	电化学生物微传感器	368
9.3.6	热量型生物微传感器	372
9.3.7	声表面波生物微传感器	374
9.3.8	悬臂梁式生物微传感器	377
9.3.9	基于 MOSFET 器件的生物微传感器	380
推荐阅读		385
练习与思考		385
10	微传感器的数据获取	387
10.1	准数字传感器	387
10.1.1	传感器输出信号的类型及其离散化	388
10.1.2	准数字传感器中的参数转换	391
10.1.3	几种准数字微传感器	392
10.2	时间调制信号的数字编码转换	396
10.2.1	频率测量法	397
10.2.2	周期测量法	399
10.2.3	混合测量方法	401
10.2.4	基于傅里叶变换的频率-编码转换	403
10.2.5	相位-编码转换	405
10.3	微传感器系统的数据获取技术	407
10.3.1	数据获取系统的基本概念	407
10.3.2	灵巧传感器的结构及数据获取	409
10.3.3	多通道数据获取系统的主要误差	411
10.4	微传感器数据获取系统的软硬件协同设计	412
10.4.1	数据获取系统的构成及虚拟仪器	412
10.4.2	数据获取系统的软硬件协同设计	416
推荐阅读		420
练习与思考		421
参考文献		423



引 言

随着微加工技术的不断进步,以微、纳米加工工艺为核心技术的微传感器(microsensor)成为一个重要的发展方向。与传统意义上的传感器相比,微传感器的体积很小,敏感元件的尺寸一般在 $0.1\sim 100\mu\text{m}$ 之间。然而,微传感器并不仅仅是传统传感器按比例缩小的产物,在理论基础、结构工艺、设计方法等方面,都有许多自身的特殊现象和规律。微传感器的学科跨度很大,对微传感器知识的学习、研究与应用,需要涉及多个领域的专业知识。专业文献资料的收集、阅读、总结以及在实践中运用专业知识的能力非常重要。本章首先介绍微传感器的一些基本概念,包括微电子与微器件、测量系统、微传感器、微传感器系统等方面的基础知识,然后就本书内容的学习给出一些建议。

1.1 微电子与微传感器

微电子(microelectronics)技术的起源可追溯到1948年,在这一年出现了世界上第一只晶体管,从此开始了微电子技术的研究与发展。第一只晶体管是点接触的,这种晶体管很快便在1950年后被双极结型晶体管(bipolar junction transistor, BJT)所取代。第一只结型场效应管(junction field-effect transistor, JFET)是在1952年由硕克雷(W. Shockley)提出的。迄今为止,BJT及JFET这两种晶体管仍然是全部微电子器件的核心单元。然而,真正意义上的微电子技术起源于1958年,集成电路芯片的出现直接导致了现代计算机工业的诞生。

1.1.1 微电子与微器件

在过去的近60年中,集成电路技术取得了飞速发展。硅加工工艺的不断进步使得器件的尺寸不断缩小,现在最小的特征尺寸约在200 nm左右。这样,在同一集成电路芯片上可以集成的晶体管越来越多,从1970年的约100只发展到2000年的上亿只。这种近

乎飞速的发展速度被总结为摩尔(Moore)定律,即一只芯片上可集成的晶体管数目每 18 个月翻 1 倍。图 1-1 给出了近 30 多年来集成电路中晶体管数目的增长情况以及微处理器中时钟速度的提升情况。正是这种集成度的快速发展,才使得集成电路,尤其是微型计算机,成为人们日常生活中的重要部分。

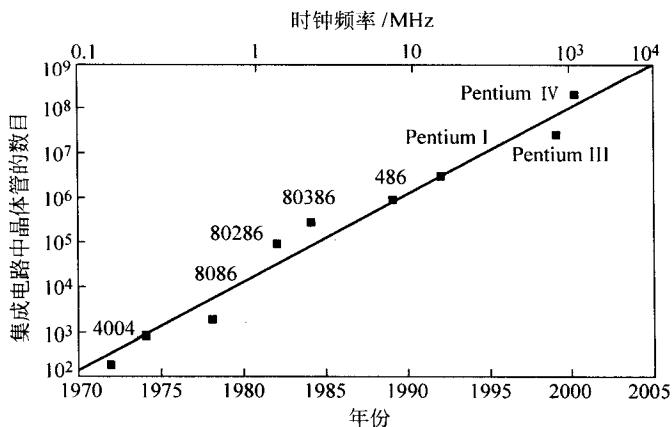


图 1-1 集成电路的摩尔定律

与微处理器芯片类似,存储器芯片由晶体管与电容器组成,因此,动态随机存取存储器(dynamic random access memories, DRAM)的发展与时间的关系同样符合摩尔定律,如图 1-2 所示。如果维持这一发展速度,到 2030 年,人们就可以在市场上买到相当于人

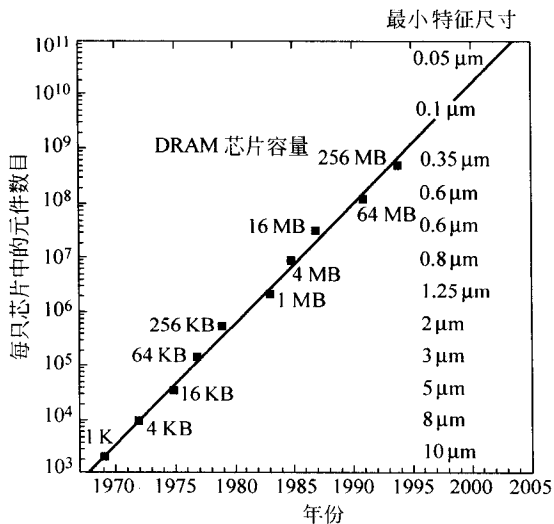


图 1-2 DRAM 芯片的容量及芯片的最小特征尺寸随时间变化的情况

脑容量的存储器芯片,而到 2075 年,一只存储器芯片的容量甚至会相当于全世界所有人的大脑容量。

集成电路技术发展到今天,已经出现了多种微电子加工技术,用于制作各种各样的微电子器件。常见的微电子器件包括运算放大器、逻辑门电路、微处理器等。具体到测量与控制方面,微电子技术的发展直接导致了信号处理芯片复杂程度的上升及价格的下降,在实际的测控电路系统中,以微处理器为代表的数字电路芯片被大量采用。

然而,如图 1-3 所示,一个测控系统是由传感器、处理器、执行器 3 个部分组成的。处理器性能价格比的提高,仅仅是影响测控系统性能的因素之一。相比之下,传感器与执行器这两部分的发展要滞后很多。图 1-4 给出了 1960—2000 年传感器、处理器、执行器的性能价格比变动情况。显然,处理器的性能价格比有了大幅提升,相比之下,传感器与执行器性能价格比的提高速度要小很多。图 1-5 给出了 1990—2000 年 10 年间集成电路及微传感器的市场情况。显然,微传感器的市场情况要远落后于集成电路,性能价格比可能是导致这一现象的重要因素。

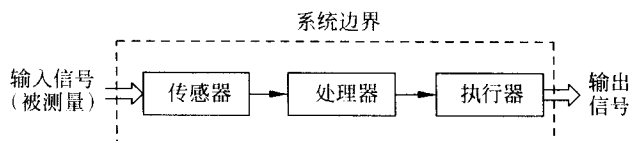


图 1-3 测控系统的基本组成

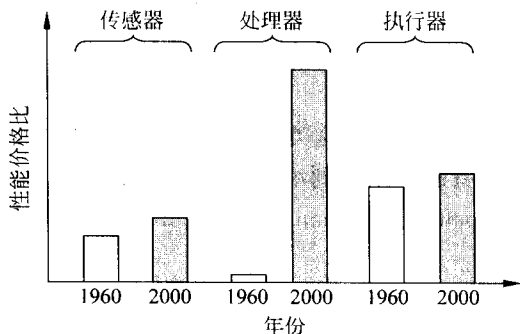


图 1-4 传感器、处理器、执行器的性能价格比变动情况

在 20 世纪 80 年代,人们开始意识到传感器与执行器的性能价格比已经大大落后于处理器。这不仅使得整个测量系统尺寸庞大,而且价格昂贵。基于此,人们开始在将微电子技术应用于硅传感器的研究开发上投入大量的人力物力,出现了微传感器。

微传感器可以认为是利用微加工工艺,尤其是硅加工工艺制作出的传感器,尺寸小自然是微传感器的重要特征。然而,由于在实际测量中会受到测量环境的限制,并不是传感

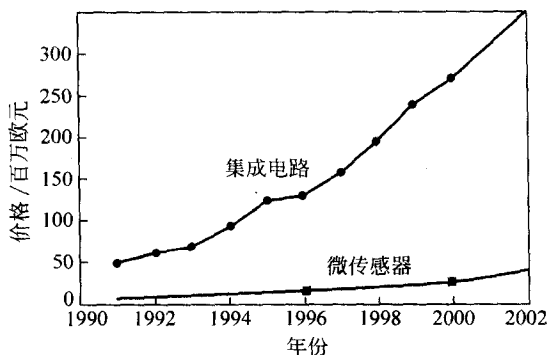


图 1-5 集成电路及微传感器的国际市场情况

器的全部尺寸都要很小,因此对微传感器比较合适的定义为:微传感器是一种至少有一个物理尺寸在亚毫米量级的传感器。

采用微加工技术制作微传感器还会带来很多好处,包括:

- (1) 可充分利用目前完善的微细加工工艺;
- (2) 可实现传统传感器的微型化,可生产出更小、更轻的传感器;
- (3) 可大批量生产,产品的一致性高,成品率高;
- (4) 可与检测电路、处理器芯片集成为一体。

1.1.2 微传感器

微传感器所涉及的领域很广,具体的定义目前尚未形成一个统一的认识。一般来说,微传感器包括 3 个层面的含义。

(1) 微传感器是单一的敏感元件,这类传感器的一个显著特点就是尺寸小(敏感元件的尺寸从毫米级到微米级,有的甚至达到纳米级)。在加工中,主要采用精密加工、微电子技术以及微机电系统(microelectromechanical system, MEMS)技术,使得传感器的尺寸大大减小。

(2) 微传感器是一个集成的传感器,这类传感器将微小的敏感元件、信号处理器、数据处理装置封装在一块芯片上,形成集成的传感器。

(3) 微传感器是微型测控系统,在这种系统中,不但包括微传感器,还包括微执行器,可以独立工作。此外,还可以由多个微传感器组成传感器网络或者通过其他网络实现异地联网。

微传感器具有一系列的优点,主要包括:

(1) 体积小,重量轻。利用 MEMS 技术,微传感器的敏感元件尺寸大多在微米级,这使得微传感器的整个尺寸也大大缩小,微传感器封装后的尺寸大多为毫米量级,有的甚至

更小。例如,压力微传感器已经可以小到放在注射针头内,送进血管测量血液流动情况;或装载到飞机或发动机叶片表面,用来测量气体的流速和压力。体积的减小也带来了重量的减轻,微传感器的重量一般都在几克到几十克之间。

(2) 能耗低。绝大多数微传感器都是将非电量信号转换为电量信号,并且是无源的,也就是说工作时离不开电源。随着集成电路技术的发展,便携式测量仪器得到越来越多的应用。在很多场合,传感器及配套的测量系统都是利用电池供电的。因此传感器能耗的大小,在某种程度上决定了整个仪器系统可供连续使用的时间。微传感器一般都是低能耗,工作电压也比较低,不仅延长了电池的使用时间,而且为在某些需要采用电池供电且需要长时间工作的场合提供了可能。

(3) 性能好。微传感器在几何尺寸上的微型化,在保持原有敏感特性的同时,提高了温度稳定性,不易受到外界温度干扰。敏感元件的自谐振频率提高,工作频带加宽,敏感区间变小,空间解析度提高。

(4) 易于批量生产,成本低。微传感器的敏感元件一般是利用硅微加工工艺制造的,这种工艺的一个显著特点就是适合于批量生产。大批量生产使得微传感器单件的生产成本大大降低。

(5) 便于集成化和多功能化。微传感器的集成化一般包含3方面的含义。其一是将微传感器与后级的放大电路、运算电路、温度补偿电路等集成在一起,实现一体化;其二是将同一类的微传感器集成于同一芯片上,构成阵列式微传感器;其三是将几个微传感器集成在一起,构成一种新的微传感器。微传感器的多功能化是与集成化相对应的一个概念,是指微传感器能感知与转换两种以上不同的物理或化学参量。在微传感器中,可以充分发挥和利用微加工工艺的特点,使其做到集成和多功能。例如,在同一硅片上制作应变计和温度敏感元件,制成同时测量压力和温度的多功能微传感器,将处理电路也制作在同一硅片上,还可以实现温度补偿。将检测几种不同气体的敏感元件用厚膜制造工艺制作在同一基片上,制成检测氧气、氨气、乙醇、乙烯等多种气体的多功能微传感器。现在已经开发出可同时检测钠、钾和氢离子的微传感器阵列,用于检测血液中的钠、钾和氢离子的浓度,对诊断心血管疾病有重大意义。该微传感器尺寸为 $2.5\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$,可直接用导管送到心脏内测量。

(6) 提高传感器的智能化水平。智能传感器是测量技术、半导体技术、计算技术、信息处理技术、微电子学和材料科学互相结合的综合密集技术。与一般传感器相比,智能传感器具有自补偿能力、自校准功能、自诊断功能、寻址处理能力、双向通信功能、信息存储、记忆和数字量输出功能。MEMS技术在传感器方面的应用,大大提高了传感器的智能化水平。利用MEMS技术,可以将信号调节电路、信号处理电路(甚至包含微处理器)、接口电路等与传感器封装成一体,组成微传感器系统。

图1-6给出了微加工技术的进步对微传感器、微传感器系统乃至射频通信技术的影