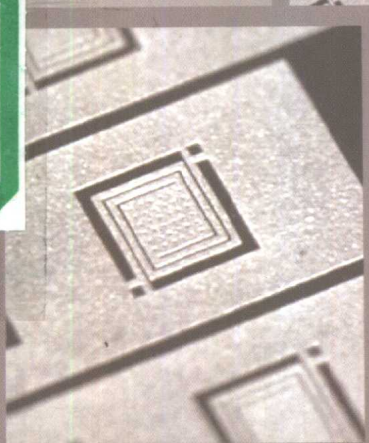
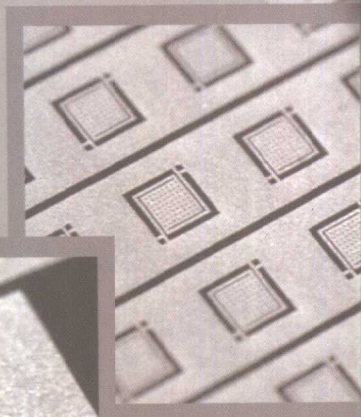
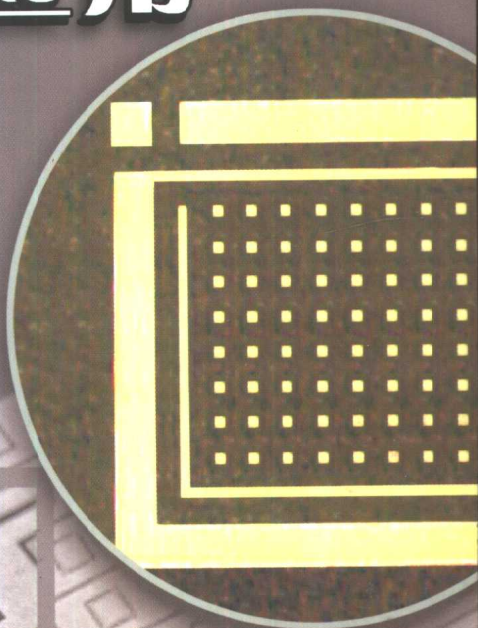


MEMS

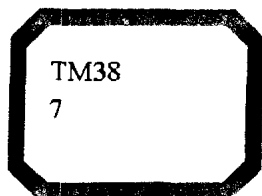
技术及其应用

李德胜 王东红 编著
孙金玮 金 鹏

4



哈尔滨工业大学出版社



国家自然科学基金资助课题

哈尔滨工业大学研究成果专著出版基金资助出版

MEMS 技术及其应用

李德胜 王东红 编著
孙金玮 金 鹏

哈尔滨工业大学出版社

·哈尔滨·

内 容 提 要

本书共有八章,在概述微机电技术(MEMS)的发展背景、现状及应用前景的基础上,介绍了 MEMS 基本理论,随后对 MEMS 相关工艺做了详尽的讲述。作为 MEMS 应用,分别介绍了数种典型的物理量传感器和化学量传感器的工作原理及制造工艺,对各类微操作器(执行器)、微机械零件及微机电系统也做了比较详细的论述,最后开辟一章介绍了生物芯片相关技术。

本书可作为微电子、机电一体化、精密仪器及仪器仪表等专业高年级的教学参考书,也可供其他专业师生及有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

MEMS 技术及其应用/李德胜编著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2002.3

ISBN 7-5603-1694-8

I . M… II . 李… III . 微机电 - 技术 IV . TM38

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 094095 号

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区教化街 21 号 邮编 150006

传 真 0451—6414749

印 刷 黑龙江省教委印刷厂

开 本 850×1168 1/32 印张 9.75 字数 253 千字

版 次 2002 年 3 月第 1 版 2002 年 3 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 7-5603-1694-8/TN·63

印 数 1~2 000

定 价 18.00 元

前 言

微机电技术(MEMS)是 20 世纪 80 年代末在欧美日等发达国家兴起的高新技术,它是在微电子工艺技术基础上结合其他特殊工艺发展起来的新学科。由于其巨大的应用潜力,自其问世以来受到了各国政府和学者的普遍重视,是目前科技界的热门研究领域之一。MEMS 技术的研究和发展必将对 21 世纪的航空航天、军事、传感器技术、医疗器械、仿生机器人、家用电器等领域产生深远的影响。

近年来,国内许多高校、科研院所竞相开展了 MEMS 方面的研究工作,但是有关 MEMS 内容的教材、中文参考书十分匮乏,给开展这方面的教学和科研工作带来不便。鉴于上述情况,作者在开展这方面研究及在教授 MEMS 的讲义基础上编著了该书。本书内容较丰富、新颖,具有一定深度和广度,内容安排上力求由浅入深,各章相对独立。

本书包括八章内容。第一章绪论部分首先介绍了 MEMS 的历史背景、发展现状及应用前景;第二章着重介绍微构造情况下各种物理参数的尺寸效应,它是正确认识、分析和设计微构造的基础;第三章详细且系统地叙述

了各种 MEMS 工艺原理;第四章着重以 ANSYS 软件为背景介绍 MEMS 的分析仿真工具;第五章介绍基于 MEMS 工艺的数种典型物理和化学传感器的工作原理及制造工艺;第六章介绍各种微执行器的构造原理及制造工艺,同时也介绍了一些微机械零件的制造工艺;第七章对一些典型微机电系统的工作原理及制造工艺作了介绍;第八章介绍生物芯片技术。

本书一、二、四、六、七章由哈尔滨工业大学李德胜教授编著,第三章由王东红教授编著,第五章由孙金玮副教授编著,第八章由金鹏博士编著。

哈尔滨工业大学虞敦教授对本书提出了许多宝贵意见。另外,在本书的编写过程中,得到了吴铁梅、韩萍、张宇峰、陶隽源、张鹏飞、金明等师生的大力帮助,在此表示衷心感谢。

在本书编著过程中参考了国内外大量文献资料,限于篇幅不能一一列举,在此向文献作者致以崇高的敬意。

MEMS 技术是一门日新月异、快速发展的技术,本书仅作为一本入门参考书,不可能覆盖它的所有内容。由于时间仓促,特别是笔者才学疏浅,书中不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

编著者

2001 年 10 月

目 录

第一章 绪论	(1)
1.1 MEMS 的定义	(2)
1.2 国内外研究概况及展望	(4)
1.3 纳米技术及展望	(15)
第二章 MEMS 基础理论	(23)
2.1 尺寸效应	(24)
2.2 微机械常用材料	(26)
2.3 微构造的机械特征	(28)
2.4 微构造的振动特性	(31)
2.5 微构造的热特性	(32)
2.6 摩擦磨损的减小办法	(33)
2.7 微流路中液体的流动	(35)
2.8 微机械的驱动原理	(37)
2.9 超小型机械实现的障碍及对策	(37)
第三章 微机械制造技术	(40)
3.1 概述	(42)
3.2 体加工工艺	(44)
3.3 硅表面微机械加工技术	(75)
3.4 结合加工	(82)
3.5 逐次加工	(92)

3.6	LIGA 技术	(94)
3.7	微机械加工技术中的微电子工艺和设备	(111)
3.8	本章小结	(137)
第四章	MEMS CAD 辅助分析设计	(138)
4.1	ANSYS 的主要技术特点	(139)
4.2	ANSYS 使用中几个应注意的问题	(142)
4.3	ANSYS 的分析步骤	(142)
4.4	微型电磁继电器受力及磁场分布的 ANSYS 模拟	(143)
4.5	仿真分析的一些经验	(153)
4.6	本章小结	(155)
第五章	微传感器	(156)
5.1	传感器的基本物理效应	(158)
5.2	压阻效应与半导体应变传感器	(160)
5.3	电容式三维加速度计	(167)
5.4	振动式微陀螺仪	(176)
5.5	微型热式湿度传感器	(179)
5.6	微型光栅读码器	(182)
5.7	微型磁通门	(184)
第六章	微操作器	(194)
6.1	静电型微操作器	(194)
6.2	电磁型微操作器	(203)
6.3	热膨胀型微操作器	(205)
6.4	压电型微操作器	(206)
6.5	微机械零件	(207)

第七章 微机电系统	(210)
7.1 微机电系统的特点	(211)
7.2 微机电系统实现所面临的课题	(212)
7.3 微机电系统介绍	(213)
第八章 生物芯片	(244)
8.1 生物芯片概述	(244)
8.2 生物芯片中常用的几种检测原理	(252)
8.3 生物芯片加工技术	(271)
8.4 生物芯片	(282)
8.5 本章小结	(297)
参考文献	(298)

第一章 绪 论

MEMS 是 Micro Electro Mechanical Systems 的缩写,可译为微电子机械系统。微机械的发展史如表 1.1 所示,它最早可追溯到 19 世纪。在 19 世纪,作为照相制版技术诞生了光制造技术。20 世纪 60 年代美国相继开发出了结晶异方向腐蚀、杂质浓度依存性腐蚀、阳极键合等基本微加工技术。进入 70 年代,美国学者提出了基于硅半导体材料的微机械的设想,那时已有人用硅平面加工技术制造微梁和压力传感器。70 年代到 80 年代硅传感器随着半导体加工技术的进步也有很大发展,利用微加工技术(Micromachining)制造出多种微小尺寸的机械零部件。1988 年美国加州大学伯克利分校 Muller 研究小组发表了转子直径为 $60 \sim 100 \mu\text{m}$ 的硅静电马达,它的报道在当时引起了很大的轰动。同期,MIT, Berkely, Stanford 等大学和 AT&T 及 NSF 的 15 名科学家向美国政府提出了“小机器、大机遇、关于新兴领域——微动力学(微系统)”的建议书,NSF 又于 1989 年召开了研讨会,其中有报告提出了“微电子技术应用于电机系统”。自此 MEMS 一词就渐渐成为一个世界性的学术用语,MEMS 技术的研究开发也日益成为国际上的一个热点。一般地说,MEMS 具有以下几个非约束性的特征:

(1) 尺寸在毫米到微米范围内,区别于一般宏(Macro),即传统的尺寸大于 1cm 尺度的“机械”,但并非进入物理上的微观层次;

(2) 基于(但不限于)硅微加工(Silicon Microfabrication)技术制造;

(3) 与微电子芯片类同,在无尘室大批量、低成本生产,使性能价格比比传统“机械”制造技术大幅度提高;

(4) MEMS 中的“机械”不限于狭义的力学中的机械,它代表一

切具有能量转化、传输等功能的效应,包括力、热、光、磁,乃至化学、生物等效应;

(5)MEMS 的目标是“微机械”与 IC 结合的微系统,并向智能化方向发展。

用以上特征来衡量,用微电子技术(不限于)制造的微小机构、器件、部件和系统等都属于 MEMS 范围,微机械和微系统只说明 MEMS 发展的不同层次,而有关的科学技术都可统称为 MEMS 技术。

当前,信息技术已走上多媒体、网络化和智能化的道路,微电子信息处理已向系统级芯片集成发展。无论从微型化或性能价格比发展看,信息获取(传感)技术和信息执行技术,即所谓“外部设备”技术都已成为发展的瓶颈,它们与“主机”的接口(interface)也成为阻碍处理速度的关键。MEMS 技术的目标是把信息获取、处理和执行一体化地集成在一起,使之成为真正的信息处理系统,因此它对信息技术的革命意义是不言而喻的。对于传统的“机械学”来说,MEMS 技术不仅为之打开了“微尺寸”新领域大门,也是真正实现机电一体化的开始。所以,MEMS 被认为是微电子技术的又一次革命,对 21 世纪的科学技术、生产方式和人类生活质量都会有深远的影响。

1.1 MEMS 的定义

MEMS 即微机电系统目前尚无统一的定义,但一般认为它是以微电子、微机械及材料科学为基础,研究、设计、制造具有特定功能的微型装置,包括微结构器件、微传感器、微执行器和微系统等。有时根据不同场合或习惯,微机电系统也称微机械、微构造或微电子机械系统。一般来说,微机械多指构造较简单能动作的微构造,它是构成微机电系统的要素技术,而微机电系统指由微机械和控制电路组成的微系统,它是微机械的高级形式和发展方向。

在欧美,微机电系统通常称为 MEMS,顾名思义,MEMS 是由机械和微电子线路组成的微系统。在日本,它通常称之为 Micro-machine(マイクロマシン)或 Microsystem(微系统)。它们都以微小(Micro)为特征,有的强调机械,有的强调系统,但当前人们常不加区别地统称为 MEMS。日本国家 MEMS 中心[<http://www.ijnet.or.jp/MMC/>]给 Micromachine 下的定义是: A micromachine is an extremely small machine comprising very small(several millimeters or less) yet highly sophisticated functional elements that allow it to perform minute and complicated tasks.

表 1.1 微机械发展史

19 世纪	照相制版
1951 年	布劳恩(Braun)影空板(shadow mask)(美,RCA 公司), [用于光制造工程]
1954 年	压阻效应的发现
1962 年	结晶各向异性腐蚀
1963 年	半导体压力计(日本丰田研究所)
1967 年	振动栅极晶体管(美,Westinghouse 公司), [利用牺牲层腐蚀方法]
1968 年	阳极键合(美,Mallory 公司)
1969 年	杂质浓度依存性腐蚀
1970 年	硅微小电极(美,斯坦福大学),[硅细微构造体]
1973 年	导管用硅压力传感器(斯坦福大学) 微型离子敏场效应管(日本,东北大学)
1975 年	集成化气体色谱仪(斯坦福大学),[传感器 + 执行器]
1979 年	集成化压力传感器(美,密歇根大学),[传感器 + 电路]
1981 年	水晶微机械(日本,横河电机)
1986 年	LIGA 工艺(原西德原子力研究所),[高深宽比细微加工技术]
1986 年	硅伺服型加速度传感器(瑞士,CSEM) 集成化微流量控制器(日本,东北大学),[闭环控制的集成化]
1987 年	微型齿轮等(美,加州大学伯克利分校,贝尔研究所)
1988 年	微静电电机(伯克利)

1.2 国内外研究概况及展望

MEMS 的特点和优点是体积小、重量轻、性能稳定,通过 IC 等工艺可批量生产,成本低,性能一致性好,功耗低,谐振频率高,响应时间短,综合集成度高,附加值高,具有多种能量转化、传输等功能,包括力、热、声、磁及化学、生物能等。

鉴于上述特性和优点, MEMS 自 20 世纪 80 年代中期发展至今一直受到世界各发达国家的广泛重视,被认为是一项面向 21 世纪可以广泛应用的新兴技术。许多有影响的大专院校、研究机关纷纷投巨资建立实验室,投入到 MEMS 的研究开发中。以日本为例, 1991 年成立了国家 MEMS 开发中心,从 1991 年到 2000 年政府投入了 250 亿日元开展这方面的研究,其最终目标是确立 MEMS 技术体系。该计划的前期研究从 1991 年到 1995 年,投入了 100 亿日元着重进行要素技术的研究。后期实施的研究有三大课题,一是发电设施用高性能维护技术的开发,着重研究导管内检查用微型机器人;二是微型工厂的技术开发,即研制微机械的工作母机和装配线;三是人体内诊断治疗设备的技术开发。由于高强度的资金支持,日本在一些 MEMS 研究方面处于国际领先地位。如奥林帕斯公司研制的直径仅 1 mm,长度数厘米的柔型机器人,它将形状记忆合金 SMA(Shape Memory Alloy)、传感器及控制电路全部集成到机器人体内,其末端能吊起 1 g 的重块并自由运动。三菱重工研制的直径 1.2 mm 的电磁型发电机,10 万 r/min 的转速时输出空载电压约 18 伏。

美国是开展 MEMS 研究最早的国家,在美、日、欧三雄中其 MEMS 研究处于领先地位。德国人因发明了 LIGA(Lithographie Galvanoformung, Abformung 德语)技术,而闻名于世。

国内开展 MEMS 研究比较早的单位有上海冶金所。近年来,北京大学、清华大学、复旦大学、哈尔滨工业大学、上海交大、西安

交大、河北工业研究院、航天工业总公司等许多单位都在开展这方面的工作。目前, MEMS 技术已作为我国“十五”规划中 863 和 973 计划的专题项目, 受到了我国政府的高度重视。

经过十多年的发展, 概括来说 MEMS 技术已由初期的平面加工向以 LIGA 技术为代表的三维加工拓展, 已由各种要素技术向系统集成发展, 已由基础探索向实用化方向迈进。目前 MEMS 已从实验室探索走向产业化轨道, 据美国 MCNC(北卡罗莱纳微电子中心) MEMS 技术应用中心预测, 当前 MEMS 业界的年增长率为 10% ~ 20%, 2001 年有高于 80 亿美元的 MEMS 市场。而其中的大量产品主要包括汽车加速度计, 压力、化学、流量传感器等以及微光谱仪、一次性血压计等微型仪器 (microinstrument) 产品。

1.2.1 微型仪器

关于微型仪器, 目前在文献及互联网检索中尚未见到有关对其概念的确切的定义和描述。一般可以认为, 微型仪器实际上就是具有仪器化功能的 MEMS 产品, 是 MEMS 技术的实际应用, 它具有一般仪器具有的监测、测量、分析、诊断、控制和执行等功能, 是一种新型的智能结构。其基本结构模式为微传感器 + 信号和数据处理电路 (含控制软件) + 外显示器或信号输出或微执行器等。随着微电子技术的发展, 有些微型仪器的基本结构已经集成在芯片上, 所以国外也开始将微型仪器称为芯片上的仪器 (instrument on chip 或 chip - sized microinstrument)。

从技术和工艺上来说, 微型仪器技术涵盖了微小尺度的传感器和执行器的设计、材料合成、微型机械加工、装配、总成和封装及微专用集成电路等一系列微型工程技术, 它是 MEMS 技术与微电子技术综合集成的产物。

1.2.1.1 微光谱仪

德国 karlsruhe 研究中心的微结构技术研究所和公司合作, 每年生产数千台微光谱分析仪, 利用 LIGA 工艺制作, 在 400 ~ 1 100

nm 范围内的分辨率为 7 nm,用于传输、反射和荧光测量;用于微分析系统的微型泵尺寸为 $7\text{ nm} \times 10\text{ nm}$,用模铸和薄膜技术,热致动线圈厚 250 nm,功率为 100 mW。

1.2.1.2 MEMS 显示器

美国的 Texas Instruments 公司从 20 世纪 80 年代初就着手研究用于投影显示装置的数字驱动微镜阵列芯片(digital micromirror device, DMD),已成功地演示了利用 768×576 像素的 DMD 芯片的彩色电视投影仪,并研制出 2048×1152 像素的 DMD 芯片样机。所研制的 DMD 芯片利用硅表面微加工工艺制作,一个微镜的尺寸仅 $16\text{ }\mu\text{m} \times 16\text{ }\mu\text{m}$ 。微镜通过支撑柱和扭曲梁悬于基片上,每个微镜下面都有驱动电极,在下电极与微镜间加一定的电压,静电引力使微镜倾斜,入射光线被反射到镜头上,投影到屏幕上,未加电压的微镜处的光线反射到镜头外,高速驱动微镜使每点产生明暗,投影出图像。

1.2.1.3 微型化学传感器及微型粘度计

伯克利微仪器公司(BMI)设计并推向市场的成熟的微型仪器产品,包括测量空气中化学浓度的化学气体传感器 BMC200 及测量流体密度和粘度的微型粘度计 BMV105。

BMC200 和 BMV105 均采用了一个独特的获得专利的称为 FPW(flexural - plate - wave)的硅微机械传感器技术。包括一个微硅的 MEMS 芯片($3.5\text{ mm} \times 7.6\text{ mm}$),芯片上有一个约 0.5 mm 宽、6 mm 长、 $3\text{ }\mu\text{m}$ 厚的微机械薄膜,该薄膜由氮化硅层、金属层与压电氧化锌层构成。薄膜上集成了两个用来发射和接收超声波的交互数字式传感器。通过测量薄膜之间传递的声波的波速和振幅,微型粘度计 BMV105 则可确定液体的粘度和密度。对化学浓度传感器 BMC200 来说,当传感器放在化学气体中时,一些化学成分被聚合薄膜吸收,增加了薄膜的体积,降低了波速,从而测出化学浓度。

与传统的类似的仪器相比,这些微型仪器的优势是无可争议的,即体积更小、重量更轻、效率更高、价格更低,可以提供高精度

的实时测量信息,这些信息可以用来有效地进行过程控制、调整、报警或为其他自动监测和控制设备提供前馈或反馈,微型仪器既可以单独作为工作单元实现独立的功能,又可以作为在线的过程控制单元。

通过对微型仪器的性能、特点和应用情况进行分析,可得到以下几点认识:

(1)微型仪器是 MEMS 技术的实际应用,是 MEMS 技术与微电子技术综合集成的成果之一,它具有一般 MEMS 器件或 MEMS 系统特有的优点和性能,更为主要的是大大提高了仪器的功能密度和性能价格比。

(2)微型仪器技术中的核心技术之一是微型传感器技术,采用各种新原理、新概念的各类微型传感器,是实现微型仪器的关键,也是实现仪器小型化、微型化的必要条件。此外,由于有的微型仪器上既有固定的部件又有活动的部件,而且采用诸如生物或化学活化剂之类的特殊材料,因此还需要认真重视微装配、微封装、微能源等问题。

(3)从广义上看,微型仪器还是一种新型的智能结构。目前,国际上对智能结构的研究尚处在基础研究和实验阶段,今后的研究方向将包括:①研制低能耗、大应变量、高稳定和长寿命的微操作器材料;②研制耐高温、低成本、易与基体材料融合的光传感器;③研制可植入基体材料中的高性能微电子器件;④新的结构控制技术;⑤开发智能结构的设计、制造技术等等。

(4)微型仪器具有广阔的市场应用前景,并且新产品层出不穷,我们应密切跟踪国外发展动态,在研究和开发上采取联合攻关、成果共享的方式,加快研制进度,在 21 世纪 MEMS 产业化的道路上迈出我们坚实的步伐。

1.2.2 MEMS 在医疗和生物技术领域的应用

生物细胞的典型尺寸为 $1 \sim 10 \mu\text{m}$,生物大分子的厚度为纳米

量级,长为微米量级。微加工技术制造的器件尺寸也在这范围之内,因而适合于操作生物细胞和生物大分子。另外,临床分析化验和基因分析遗传诊断所需要的各种微泵、微阀、微摄子、微沟槽、微器皿和微流量计都可用 MEMS 技术制造。

1.2.2.1 临床化验分析

随着许多生化分析仪器和生物传感器的微型化、集成化,及其投入使用(如集成酶反应器,集成光化学酶传感器,微酶固定柱,微乙醇胆碱传感器,集成葡萄糖传感器,微谷氨酸传感器,微蛋白质传感器,微果糖传感器和集成尿分析系统),将使临床化验分析发生革命性变化。由于这些仪器和系统是由微电子技术和微加工技术制造的,它们的价格便宜、体积小,因而化验分析所需样品质量小、费用低、时间短,而且不受场所限制,不限于大医院的化验室,为危急病人赢得了宝贵的抢救时间。

1.2.2.2 基因分析和遗传诊断

现在约有 400 种疾病可用基因分析来诊断,而且这个数目还在与日俱增。人类的遗传信息包含在 DNA 的长链中。遗传信息的提取包含一系列化学操作,即样品提取、样品与试剂混合、热循环放大、示踪、断裂分析等。传统的实验室基因分析法的缺点是仪器体积大,所需样品多,费时费钱。采用微加工技术制造的基因分析仪器,样品数量、分析时间和费用都下降几个数量级。

已经开发出多种基因分析微器件,最早的是微镜。1996 年和 1997 年推出的 8 镜和 24 镜微镜阵列都是用阳极键合法将硅片和玻璃键合在一起制成的,它们能快速完成遗传信息提取中的热循环放大功能。电泳微器件是基因分析用的另一种器件,由两根互相垂直的毛细管构成。它采用湿法在硼硅玻璃上蚀刻出 $10\text{ }\mu\text{m}$ 深的槽键合起来得到,能高分辨率地分析 DNA。用细胞融合系统 (cell fusion system) 已成功地实现了 DNA 分子操作,使 DNA 分子沿电场方向排列,并用附着在激光处理的小珠滴上的酶,对 DNA 分子进行修饰。用于 DNA 倍增和检测的 MEMS 器件也正在开发中。

1.2.2.3 介入治疗

近年发展起来的介入治疗技术,在医疗领域有越来越重要的地位,和其他治疗技术相比,它有疗效好、病人痛苦少等优点。但现有介入治疗仪器价格贵、体积大,且治疗时仪器进入体内,而作判断和操作的医生在体外,很难保证操作的准确性,特别是对心、脑、肝、肾等重要器官的治疗有一定风险。MEMS 技术的微小(可进入很小的器官和组织)和智能(能自动地进行细微精确的操作)的特点,可大大提高介入治疗的精度,降低其风险。

1.2.3 MEMS 在汽车工业的应用

汽车工业是 MEMS 的主要应用市场之一。传感器、软件、控制器和执行器构成了现代化汽车的重要部分。现代化的汽车由动力系统、车架系统、保证驾驶员和乘客舒适方便的系统,以及通信系统组成。这些系统都要求性能好、价格低的传感器和执行器, MEMS 技术能满足这些要求。

1.2.3.1 微加工压力传感器

发动机控制模块是最早使用 MEMS 技术的汽车装备。该模块由微型计算机和进气管绝对压力(MAP)传感器等组成。能根据需要控制发动机的工作状态,例如最省油或排污最少的状态。通用汽车公司用体微加工技术和标准 IC 工艺结合开发了硅压阻型 MAP 传感器。福特公司用类似工艺开发出硅电容型 MAP 传感器。当今几乎每辆汽车都装有某种类型的 MAP 传感器。

压阻式压力传感器的另一个重要应用是检测轮胎压力。检测汽车燃油蒸汽的压力传感器也有巨大应用前景。它和 20 年前的 MAP 传感器的结构和工艺类似,但由于要求能检测 ± 10 kPa 范围的漏油蒸汽压力,要特别注意消除封装引起的应力对灵敏度的影响。电容型压力传感器比压阻型的功耗低,它已被用于检测车轮胎压力,预计它很快会被用来监控汽车中各种流体的压力,如悬浮流体、机油、燃油、空调用流体和操纵用流体等。