



高等学校“十二五”重点规划教材
机械设计制造及其自动化专业系列教材

微惯性系统及应用

毛 奔 张晓宇 编著



HEUP 哈尔滨工程大学出版社

微惯性系统及应用

毛 奔 张晓宇 编著

 哈尔滨工程大学出版社

内 容 简 介

本书系统地介绍了微惯性器件的基本原理及应用问题。内容主要包括微惯性导航技术有关的基本原理;各种微惯性器件的原理、结构及加工制造技术;微惯性器件与系统的测试、标定及评价方法;基于微惯性器件的惯性系统与组合导航技术。

本书注重理论与工程实际应用相结合,在介绍理论的基础上,还融入了作者及其他研究者近年来的许多最新研究成果,理论及实践并重,具体介绍了各种基于微惯性技术的系统设计、实现及应用。

本书可作为高等院校电子、微电子、微机电系统、测控技术与仪器、导航、制导与控制、精密仪器与机械、控制工程等相关专业的研究生、本科生和教师用书或作为教学参考书,也可供从事相关领域研究的有关工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

微惯性系统及应用/毛奔,张晓宇编著. —哈尔滨:
哈尔滨工程大学出版社, 2013.7

ISBN 978 - 7 - 5661 - 0628 - 5

I. ①微… II. ①毛②张 III. ①惯性导航系统 -
研究 IV. ①TN966

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 176018 号

出版发行 哈尔滨工程大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区东大直街 124 号
邮政编码 150001
发行电话 0451 - 82519328
传 真 0451 - 82519699
经 销 新华书店
印 刷 黑龙江省地质测绘印制中心
开 本 787mm × 1 092mm 1/16
印 张 19.75
字 数 490 千字
版 次 2013 年 7 月第 1 版
印 次 2013 年 7 月第 1 次印刷
定 价 42.00 元

<http://www.hrbeupress.com>

E-mail: heupress@hrbeu.edu.cn

前言

PREFACE

微惯性技术是最近几年导航、制导和控制领域快速发展的一个分支。新型的惯性器件特别是微惯性器件不断出现,具有体积小、质量轻、成本低、动态特性好、可靠性高等独特优点。自从满足一定精度要求的微惯性器件问世以来,已经在军事武器装备和国民经济的诸多领域得到广泛应用。目前,国内外各有关研究和应用机构都对微惯性系统的研究和应用投入了极大的关注。这方面的专著和教材是很有必要编写的。

本书是在参考国内外有关文献的基础上,依据研究生专业教学大纲,并结合哈尔滨工程大学多年的教学科研实践编写而成。在编写过程中,充分注意了全书内容的系统性和完整性。

全书内容共分7章,第1章绪论,第2章介绍微惯性系统基本工作原理,第3章介绍微惯性器件的功能材料及加工制造技术,第4章介绍了微惯性器件,第5章介绍了微惯性器件的测试、标定与误差分析,第6章介绍了微惯性测量和稳定系统,第7章介绍了基于微惯性系统的组合导航技术。

本书第1章、第5章、第6章由哈尔滨工程大学张晓宇编写,其他各章由本单位毛奔编写。

本书在编写过程中得到了哈尔滨工程大学测控技术与惯性导航研究所很多老师及研究生的大力协助和支持,许多素材都直接来自他们的研究成果和文章,特此鸣谢。

由于微惯性器件及技术的理论研究和实际应用的发展速度快,该领域很多新成分不断出现,又由于本书篇幅、作者专业知识及写作时间有限,因此书中必然存在不当之处,敬请同仁批评指正。

本书的编写和出版得到了哈尔滨工程大学出版社的大力支持,同时又是哈尔滨工程大学60周年校庆规划的面向高水平研究型大学、体现哈尔滨工程大学教学和科学研究成果的教材之一。

编著者

2013年4月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 MEMS 的设计	10
1.3 MEMS 制造	12
1.4 微机电系统与微加工制造技术	14
1.5 MEMS 中的微光学 MOEMS	22
1.6 微惯性器件及微惯性技术的发展	27
1.7 微惯性系统的应用	37
第 2 章 微惯性系统基本工作原理	53
2.1 微惯性器件的动力学基础	53
2.2 微惯性航姿系统的工作原理	61
2.3 姿态角的定义和更新	62
2.4 捷联惯性导航系统的工作原理	67
2.5 GPS 定位原理	70
第 3 章 微惯性器件的功能材料及加工制造技术	72
3.1 硅材料的物理性能	72
3.2 微机电系统加工技术基础	78
第 4 章 微惯性器件	100
4.1 微传感器的敏感机理	100
4.2 压力传感器	117
4.3 加速度传感器	131
4.4 陀螺	155
4.5 与 MOEMS 有关的传感器	186
第 5 章 微惯性器件的测试、标定与误差分析	196
5.1 惯性器件测试基本概念	196
5.2 微机械加速度计的测试与标定	207
5.3 微机械陀螺仪的测试与标定	211
5.4 微机械陀螺仪随机误差建模与分析补偿	217
5.5 微机械陀螺随机误差的时间序列分析建模	218
5.6 MEMS 陀螺小波去噪	233
5.7 MEMS 陀螺随机误差的 Allan 方差分析方法	240
5.8 微惯性器件的温度性能分析	246
5.9 硅微惯性器件的测试实例	249

第 6 章 微惯性测量、稳定系统	253
6.1 微惯性测量系统	253
6.2 微惯性稳定系统	263
第 7 章 基于微惯性系统的组合导航技术	275
7.1 微惯性组合导航系统的基本原理	275
7.2 微惯性组合导航系统的实现形式	277
7.3 卡尔曼滤波在微惯性组合导航系统中的应用	279
7.4 粒子滤波在微惯性组合导航系统中的应用	286
7.5 EKF/UKF 在微惯性/GPS 组合导航系统中的应用	292
7.6 EPF/UPF 在微惯性/GPS 组合导航系统中的应用	300
参考文献	304

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

微系统(Micro System)也称微电子机械系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)或微机械(Micro Machine),是利用集成电路(Integrated Circuit, IC)制造技术和微加工技术(Micro Machining 或 Micro Fabrication)把微结构、微传感器、微执行器、控制处理电路甚至接口、通信和电源等制造在一块或多块芯片上的微型集成系统。微系统的出现使芯片远远超越了以处理电信号为目的的集成电路,其功能拓展到机、光、热、电、化学、生物等领域。广义地讲,集成电路是电子线路系统的微型化,而其他领域的微型化都可以划分在微系统的范畴。微系统具有微型化、集成化、智能化、无线通信、能源环境、生物医学、军事国防、航空航天、汽车电子以及消费电子等多个领域,已经并将继续对人类的科学技术、工业、军事国防和经济领域产生深远的影响。

典型微系统的尺寸在微米到毫米量级,包括微(机械)结构、传感器、执行器和控制电路等单元,可以实现测量、执行、能量转换和信息处理等功能,构成一个智能系统。图 1-1 所示为典型微系统的功能组成。其中,传感器感知外界信息并将其转变为电信号传递给处理电路,电信号经过电路处理后传递给执行器,执行器根据该信号作出响应、操作或者通信,从而使控制电路通过传感器、执行器和通信模块与外界联系起来,形成具有感知、思考、决策、通信和反应控制能力的智能系统。因此,微传感器、处理电路和微执行器的功能可以分别比作人的感官系统、大脑和手。

微系统的概念通常指一个较为全面的功能集成体,但是由于制造的限制,目前多数微系统只包括微机械结构、微传感器、微执行器中的一种或几种,而没有形成一个功能完善的系统。这种情况下更多地用 MEMS 一词来代替微系统。MEMS 这一名词已经被世界各国广泛接受并大量出现在文献中,目前 MEMS 已经不仅仅局限于系统的概念,根据不同的场合,可以指微系统这种“产品”,也可以指设计这种“产品”的方法学或制造它的技术手段。

1.1.1 MEMS 和微系统分类

微系统或 MEMS 包括多个功能单元,涉及的学科和应用领域十分广泛,对其进行系统分类比较困难。根据组成单元的功能不同,MEMS 大体可以分为微传感器、微执行器、微结构以及包括多个单元的集成系统。根据应用领域不同,将 MEMS 应用于无线通信、光学、生物医学、能源等领域,就分别产生了 RFMEMS、Optical MEMS、Bio MEMS 和 Power MEMS 等。实际上,几乎所有领域的微型化或应用都会产生对应的 MEMS 分支方向。

微传感器是感知和测量物理或化学信息的器件,是历史最长、产业化最早、产值最高的 MEMS 器件。图 1-2 所示为 Analog Devices 公司(ADI)制造的单片双轴微加速度传感器

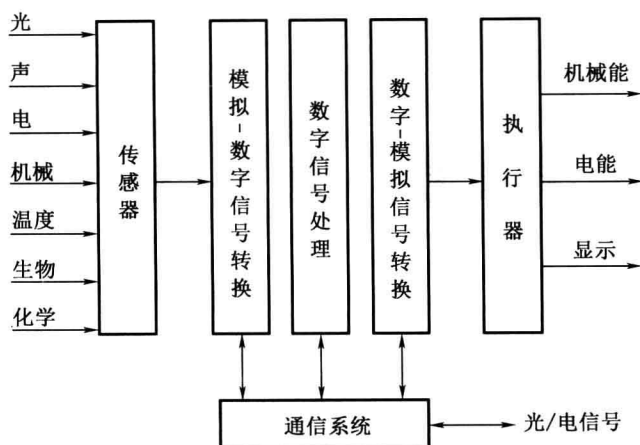


图 1-1 典型微系统的功能组成

ADXL202, 图 1-2(a) 至图 1-2(d) 分别为封装照片、加速度敏感结构静止状态、测量状态以及芯片照片。测量加速度的传感器机械结构位于芯片中心, 是利用表面微加工技术制造的悬空多晶硅梳状叉指电容, BiMOS 工艺的信号处理电路分布在结构周围。当有加速度时, 作用在可动叉指的惯性力改变了可动叉指与固定叉指之间的距离, 引起叉指电容变化, 通过集成电路测量电容的变化得到加速度信号。

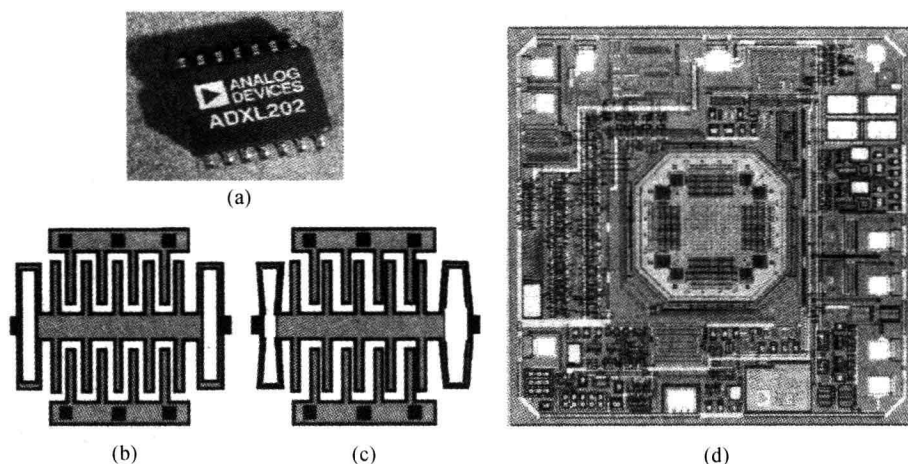


图 1-2 ADXL202 微加速度传感器

微执行器是用来驱动 MEMS 内部微结构或者对外输出动作的器件, 是 MEMS 的另一个重要组成部分。图 1-3 所示为美国加州大学 Berkeley 分校 (UCB) 研制的直径为 $100\ \mu\text{m}$ 的微静电马达, 通过静电控制输出旋转运动。微执行器除了单独使用, 还是很多 MEMS 应用器件的核心组成部分, 例如应用于光通信的微镜利用微执行器的动作反射光线。

将 MEMS 应用于无线通信系统的 RF MEMS 是 MEMS 的重要方向之一, 它通过实现高性能的集成无源器件, 如开关、谐振器、可调电容和可调电感等, 使无线通信系统能够像

CMOS 集成电路使用晶体管一样大量地使用无源器件,从而提高无线通信系统的性能、降低成本、减小体积,具有广阔的应用前景。例如 Agilent 公司开发的薄膜体声波谐振器,工作时在两个电极间的音质 AIN 压电薄膜上产生驻波,尺寸是石英谐振器的 $1/20$,频率高达 20 GHz。

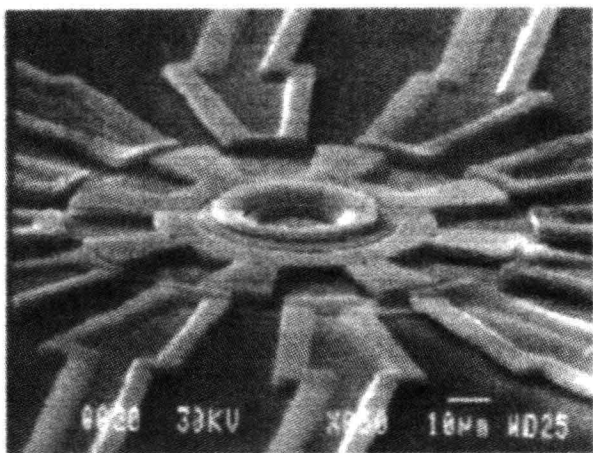


图 1-3 微静电马达

MEMS 在光通信和显示领域得到了广泛应用,例如德州仪器公司(TI)利用表面微加工技术制造的用于高清晰电视和投影机的数字微镜(DMD)。DMD 的电路首先

对光信号进行数字处理,静电执行器根据该信号控制微镜转动,数字式地控制和调整反射光的方向,实现高质量的图像。MEMS 利用技术制造的光开关具有插入损耗小、开关时间短、体积小、调整容易、功耗低等优点,能够实现光通信中的光-光转换,是光通信领域的研究热点,如日本 NTT 和日本朗讯公司等都有产品应用。

生物微系统(Bio MEMS)和芯片实验室(Lab On a Chip, LOC)是 MEMS 的另一个研究热点,包括药物释放、临床诊断、微创外科手术、微型生物化学分析系统等。LOC 可以把生化样品输运、分离、混合、纯化、反应、识别检测等多种功能集成在芯片上,具有样品用量少、效率高、速度快、自动化等优点。Bio MEMS 和 LOC 在疾病诊断、外科治疗和生化分析等领域有广泛的应用。

尺度的缩小将 MEMS 向纳米尺度延伸,产生了纳电子机械系统(NEMS)。但很多 NEMS 又不完全是 MEMS 的缩小,而是利用纳米尺度出现的效应,大幅度提高灵敏度、减小体积、降低功耗。例如有些 NEMS 传感器可将灵敏度提高 10^6 倍,功耗减小两个数量级。采用多壁纳米碳管研制的纳米谐振器,通过谐振频率的变化可测量 3×10^{-14} g 的质量,能够作为检测分子或细菌质量的分子秤;而尺度为 100 nm 的 SiC-NEMS 谐振器,频率高达吉赫(GHz), Q 值高达数万以上,而驱动功率只有 10^{-12} W。

1.1.2 微系统的特点

如图 1-4 所示,MEMS 的设计、制造、应用等涉及自然科学及工程技术的多个领域,如电子、机械、物理、化学、生物医学、材料、力学、能源等,是多学科交叉的前沿性研究领域。MEMS 的应用领域则更加广泛,几乎所有的学科领域都可以应用和发展自己的微系统。

1. MEMS 的典型特点

MEMS 多样性和复杂性的特点,使得很难给其一个准确的定义,但是一般来说,它们具有以下一些共同的特点。

(1) 结构尺寸微小。MEMS 的尺寸一般在微米到毫米量级,例如 ADXL202 加速度传感器和微马达的结构尺寸在一百至几百微米,而单分子操作器件的局部尺寸仅在微米甚至纳米水平。尽管 MEMS 器件的绝对尺寸很小,但一般说来其相对尺寸误差和间隙却比较大,

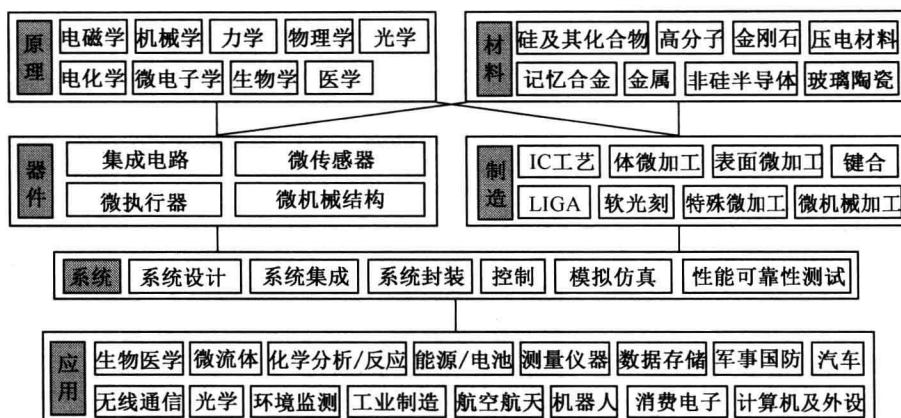


图 1-4 MEMS 的相关研究和应用领域

例如传统宏观机械的相对精度高达 1:200000,而 MEMS 的相对精度一般只有 1:100 左右。

(2)多能量域系统。能量与信息的交换和控制是 MEMS 的主要功能。由于集成了传感器、微结构、微执行器和信息处理电路,MEMS 具有了感知和控制外部世界的能力,能够实现微观尺度下电、机械、热、磁、光、生化等领域的测量和控制。例如加速度传感器是将机械能转换为电信号;打印机喷头将电能转换为机械能;生化传感器可以将化学和生物反应能量转换为电能或机械能。

(3)基于微加工技术制造。MEMS 起源于 IC 制造技术,大量 IC 制造方法,力求与 IC 制造技术兼容。但是,由于 MEMS 的多样性,其制造过程引入了多种方法。这些新方法的不断引入,使 MEMS 制造与 IC 制造的差别越来越大。

(4)MEMS 不完全是宏观对象的按比例缩小。尽管多种不同领域的微型化都可以发展和应用自己的微系统,但是 MEMS 并不是宏观系统的简单缩小,而是包含着新原理和新功能。这是由比例效应决定的。例如微马达不仅结构与传统宏观马达不同,其利用静电驱动的工作原理也与传统宏观马达的磁力驱动明显不同。

(5)在 MEMS 范畴内,经典物理学规律仍然有效,但影响因素更加复杂和多样。物理化学场互相耦合、器件的表面积与体积比急剧增大,使宏观状态下忽略的与表面积和距离有关的因素,例如表面张力和静电力,跃升为 MEMS 范畴的主要影响因素。进入纳米尺度后,器件将产生量子效应、界面效应和纳米尺度效应等新效应。目前人们还没有能够像掌握宏观世界一样掌握微尺度下的规律。

微小的尺寸使 MEMS 具有宏观结构所不具有的优点。首先,微加工技术可以像 IC 制造一样大规模生产,降低制造成本;其次,微器件具有宏观对象不具有的新效应或新性能,如原子力显微镜、隧道式传感器等都利用了小尺度的特性,而细胞操作等利用了小尺度下精确、灵活的特性;第三,MEMS 器件容易形成阵列,并与电路集成,可以简化系统、降低噪声干扰、提高信号处理能力;第四,MEMS 器件的尺寸、质量以及功耗等更低,响应速度更快,灵敏度和分辨率更高,动态范围更大。

集成电路技术的发展方向是不断缩小特征线宽,使其集成度、功能、性能以及性价比不断提高;而 MEMS 的性能取决于精细的微机械结构,这些结构制造复杂、难以缩小,因此 MEMS 的性价比取决于微机械结构。一般地,微系统中晶体管的数量基本标志着系统处理

信息的能力,微机械结构的数量基本标志着感知和控制能力。图 1-5 为典型的 MEMS 系统中集成的微机械结构与晶体管数量之间的关系曲线,其中 T/M 表示晶体管与机械结构的数量之比。ADXL 系列加速度传感器和 DMD 分别是晶体管和微机械结构高度集成的代表,这两个器件所在的位置也代表了集成测量、驱动和信号处理功能的 MEMS 的发展方向。

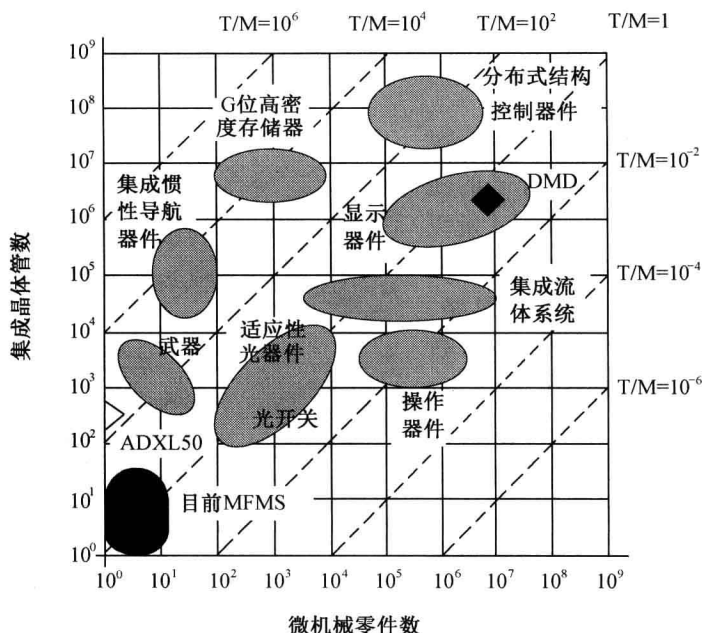


图 1-5 微系统的微机械结构与晶体管数量

2. 尺寸效应

尺寸效应是尺寸等比例缩小效应的简称。一般情况下,常规的宏观物理定律和规律在 MEMS 尺度仍旧适用,但是尺寸的缩小使 MEMS 的控制因素发生了变化。器件特征尺寸缩小 s 倍和 s^3 倍时,表面积和体积分别缩小 s^2 倍,对于特征长度是 1 m 和 $1\text{ }\mu\text{m}$ 的结构,其表面积与体积比分别为 1 m^{-1} 和 10^6 m^{-1} 。在宏观状态下,很多性能受到与体积和质量相关的特性控制;在微尺度下,与体积相关的质量已经不是重要控制因素,而与表面积相关的性质(如表面张力)开始上升为主要控制因素。控制因素是表面力还是体积力的分界临界长度在 1 mm 左右。宏观情况下,两固体间的摩擦力正比于正压力而与接触面积无关,这是由于相对于宏观物体的重力,分子间作用力可以忽略;在 MEMS 中,分子间作用力变得很重要,摩擦力与器件的质量无关而正比于它的表面积。从这种意义上说, MEMS 是研究表面的科学。将器件或系统微型化,必须充分考虑尺寸效应所带来的物理现象的变化。

当物体的线性尺寸各方向都缩小 s 倍时,机械强度只降低了 s 倍,远远小于质量的缩小。这种强度和重量缩小速度的差异使微机械结构可以承受相当大的惯性力而不会被破坏,例如用于炮弹引信的微型加速度传感器可以承受 10^5g 的加速度。但是惯性力缩小过快也使得加速度传感器灵敏度较低,对检测电路的要求很高。在微尺度下,流体系统的特性与宏观情况下差别很大。宏观情况下惯性力控制流体的行为,流体处于湍流状态;微观情况下黏性力控制流体行为,流体处于层流状态。尺度越小,层流效应越明显,这给微流体的

混合带来了很大的困难。

物体以线性比例缩小 s 倍时,热质量(等于热容量乘以体积)下降的速度 s^3 大于热传导下降的速度 s^2 ,因此微观物体的加热和散热都非常迅速。在光学系统中,由于可见光的波长限制(蓝光 475 nm,红光 650 nm),可见光系统等比例缩小时器件尺度不能小于这个尺寸。生化系统缩小的基本限制来自于被操作的生物分子的尺度和检测灵敏度。对于细胞操作应用,器件需要在 $5 \sim 20 \mu\text{m}$ 的尺度,而涉及 DNA 操作的器件可以更小。当器件尺寸缩小时,被检测的样品数量随之减少,因此需要更高的检测灵敏度。显然,当生物分子数减小到 1 个时,器件尺寸达到了极限。

多数 MEMS 传感的性能基本上决定于热噪声。温度的波动和分子的随机振动引起微机械结构以 10^{-15} J 量级的平均动能作随机振动,在宏观尺度下,该振动引起的影响完全可以忽略,但是微米和纳米器件对该振动非常敏感。例如对于 MEMS 加速度传感器,空气分子随机热运动对质量块产生的冲击使质量块产生布朗运动,只有加速度振幅超过布朗运动幅度时才能够测量。所有 MEMS 器件都有一个微型化的最低限度,以使器件具有足够高的质量或者刚度来抵抗特定环境产生的影响。

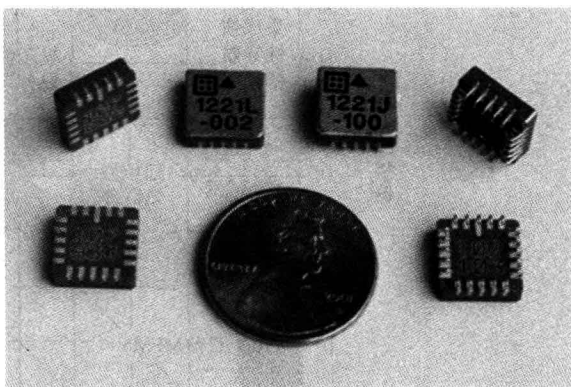


图 1-6 微加速度计、微陀螺仪外观

1.1.3 MEMS 的产生与发展

MEMS 是在 20 世纪 50 年代随着 IC 制造技术的发展而出现的,这一时期 MEMS 的主要研究内容是半导体材料的物理现象及其在传感器中的应用。1954 年, Bell 实验室发现并研究碱金属溶液对硅的不同晶向产生不同的刻蚀效果。1959 年, 美国著名物理学家 Feynman 在美国物理学年会上发表题为“*There is plenty of room at the bottom*”的具有划时代意义的演讲,提出了微计算机、微机械和微器件等设想,并预言了研究中将会遇到的理论问题、表面加工工艺和单原子操作技术等。这一演讲不但为 MEMS 的发展指引了研究方向,还吸引很多后来对 MEMS 领域有着杰出贡献的研究人员开始从事 MEMS 的研究,对 MEMS 的发展产生了巨大的影响。

20 世纪 60 年代, MEMS 的主要研究内容是硅微型传感器和各自异性刻蚀技术。Waggener 等在 1967 年进一步完善了 KOH 和 EDP 的各向异性刻蚀技术,使微压力传感器的承载硅膜片得以实现,它与压阻效应的结合促使了硅微压力传感器的出现。Kulite 公司分别于 1961 年和 1970 年开发出世界上首个压阻式硅压力传感器和加速度传感器。20 世纪 60 年代后期, Honeywell 和 Philips 公司向市场推出了基于各向异性刻蚀技术的压阻压力传感器。1967 年 Nathanson 用表面工艺实现了静电力驱动的 SiO_2 悬臂梁谐振 FET 和光反射镜,标志着表面工艺开始出现。尽管这些器件由于不够完善而没有商品化,但是这些工作却构成了硅微加工技术早期成果的一部分。

20 世纪 70 年代是 MEMS 发展的加速时期。在研究方面,1976 年 Michigan 大学实现了

第一个电路集成的压力传感器;斯坦福大学于1977年和1979年研制出电容压力传感器和电容加速度传感器,并开始了神经探针和硅色谱器件等生物学方面的研究。为了降低汽车尾气排放和避免医疗设备交叉感染,20世纪70年代开始,汽车用传感器和医用压力传感器成为MEMS研究的重点,促进了硅传感器和各向异性刻蚀、阳极键合等微加工技术的完善。1974年美国国家半导体公司生产出大批量压力传感器,Honeywell和Motorola等公司也于20世纪70年代末期推出了大批量生产的压力和加速度传感器。IBM和HP分别于1977年和1979年利用MEMS技术实现了喷墨打印机喷头。目前打印机喷头仍旧是MEMS领域重要的产品之一,所能产生的墨滴体积已经缩小到10 pL,打印分辨率超过1 000 dpi。这些产品的出现,标志着MEMS开始走向应用。

20世纪80年代是MEMS的快速发展时期,世界各国相继开始MEMS领域的研究,制造技术不断涌现和完善,应用领域不断拓展,基础理论和设计方法学的研究不断深入。在制造技术方面,1985年UCB的Howe等人实现了与MOS电路集成的多晶硅谐振梁,证明了多晶硅结构与IC工艺的兼容性。随后,UCB,MIT和Wisconsin大学等完善了牺牲层微加工技术,成功制作了复杂的MEMS系统,奠定了MEMS与IC集成的基础,并由HP的Barth于1985年将这种技术命名为“表面微加工”。UCB采用多晶硅和二氧化硅作为结构层材料和牺牲层材料,而MIT采用铝和聚酰亚胺作为结构层和牺牲层材料。表面微加工的发展也促进了微传感器的发展,相继出现了利用表面微加工技术制造的压力和加速度传感器。1984年Michigan大学发明了基于硅玻璃键合和浓硼阻挡KOH刻蚀的溶硅技术,1985年在德国诞生了LIGA加工技术,能够制造高深宽比的三维结构,1986年Shimbo发明了硅-硅键合技术,1987年,IEEE召开了第一届MEMS学术会议,1989年在盐湖城召开的Micro-Tele-Operated Robotics会议上,UCB的Howe建议用MEMS作为这一领域的名称。

在新器件和新应用方面,1980年IBM公司的Petersen研制成功第一个扭转微镜,开始了早期光学MEMS的研究;Michigan大学先后实现了第一个非制冷红外探测器和实用的神经探针。1982年Honeywell公司推出一次性可抛弃型血压传感器。1986年IBM公司的Binning发明了基于微加工技术的原子力显微镜,随后获得了诺贝尔奖。UCB用表面微加工技术分别于1984年、1989年和1991年制作出悬臂梁、梳状驱动器和铰链,并与MIT分别于1987年和1988年研制出微静电马达。Berkeley的静电马达直径120 μm ,厚度1 μm ,电压驱动350 V,转速500 r/min;MIT的静电马达直径100 μm ,转子和定子间隙2 μm ,在100 V驱动电压下能够输出12 pN·m的扭矩,在80 V电压驱动下转速达到2 500 r/min。尽管到目前为止微马达仍旧没有获得应用,但在当时却对MEMS的大规模兴起起到了极大的促进作用。

在基础研究领域,1992年IBM公司的Petersen发表了题为《Silicon as a mechanical material》的论文,详细给出了硅的力学性能和刻蚀数据,促进了硅成为MEMS领域的主流材料。1983年,Feynman在加利福尼亚的喷气推进实验室进行了一次题为“Infinitesimal machinery”的演讲。Feynman回顾了上次演讲的预言,详细阐述了如何制造微机器,如何利用微机器、静电力驱动、微型机器人,如何用低精度工具制造高精度产品,以及如何解决摩擦和粘连等问题,并预言到原子计算、电子计算和量子计算等。这次演讲除了指引MEMS的应用和发展,更大胆地把MEMS拓展到纳米领域。到20世纪80年代后期,包括微加工、结构设计、微动力学、材料科学、控制理论、测量等多个领域在内的MEMS的研究全面展开。

20 世纪 90 年代开始 MEMS 进入高速发展时期,世界各国对 MEMS 研究投入了大量的资金,对 MEMS 相关原理、材料、加工、设计、仿真以及集成等方向的研究更加加大投入, MEMS 在国防、生物医学、汽车、通信、航空航天等领域的应用全面开始,并有大量的 MEMS 产品推向市场。我国在 20 世纪 90 年代初期由清华大学微电子所、复旦大学和东南大学率先开始了 MEMS 的研究。ADI 公司于 1993 年推出了基于表面微加工技术的微型加速度传感器 ADXL50,并在随后的十年推出了系列加速度传感器,广泛应用于汽车电子领域。1994 年德州仪器公司推出了 DMD,Stanford 大学在 1992 年研制成衍射光栅,十年后由 Sony 公司成功地应用在高清晰度电视上。由于这些 MEMS 器件更加复杂、集成度更高,从实验室初期原型到产品都经历了十年左右的不断发展和完善。

这期间微加工技术在持续发展。为了降低 MEMS 的制造成本,1993 年美国北卡罗来纳州微电子中心(MCNC)开始为 MEMS 提供加工支持的 MUMP(multi-user MEMS process),它采用 UCB 的表面微加工技术,能够制造 3 层多晶硅结构,有力地推动了 MEMS 研究在大学和科研机构的广泛开展。美国 Sandia 国家实验室开发的 Summit V 表面微加工工艺可以制造 5 层多晶硅微机械结构,并相继实现了复杂的谐振器、马达、齿轮、可调微镜等器件,代表着微加工的世界最高水平。Harvard 大学的 Whitesides 发展的软光刻技术能够制造高分子聚合物微流体器件,成本和周期大大降低,极大地促进了微流体和芯片实验室的发展。在体微加工方面,1994 年 XF_2 干法刻蚀技术应用于 MEMS,同年,德国博世公司发明了时分复用单晶硅干法刻蚀技术,随后日立公司开发成功低温硅刻蚀技术。由于干法刻蚀具有刻蚀速度快、兼容性好、能够刻蚀高深宽比结构等优点,基于这两种刻蚀原理的干法深刻蚀设备在 20 世纪 90 年代后期迅速得到了应用,成为现在 MEMS 领域最重要的刻蚀方法。

在应用领域方面,1990 年 Manz 提出了“芯片实验室”的概念,Michigan 大学在 1998 年实现了集成的 PCR 芯片分析系统,目前生化和流体应用已成为 MEMS 领域最大的分支之一。20 世纪 90 年代初,美国 Hughes 公司和 Rockwell 公司等在美国国防高级研究计划署(DARPA)的资助下开始 MEMS 通信器件的研究,并陆续发表了 MEMS 开关等研究成果,这些成果与 UCB 的硅微谐振器一起,促进了 RF MEMS 领域的诞生,RF MEMS 的优势和巨大的市场需求使 RF MEMS 成为 20 世纪 90 年代后期的研究热点。20 世纪 90 年代中期,光学 MEMS 器件开始出现并快速发展,包括光开关等器件应用于光纤通信领域。20 世纪 90 年代后期出现了 NEMS,其特征尺寸在几纳米到几百纳米,质量约 10^{-18} g,以纳米尺度和纳米结构的新效应为特征。制造纳米尺度器件需要分辨率相当的光刻和加工技术,尽管电子束光刻可以实现小于 10 nm 的器件,扫描隧道显微镜和原子力显微镜可以作为制造手段移动和装配原子、分子、构造纳米结构,但是 NEMS 的发展仍面临着较大的困难。首先,如何利用纳米器件以及纳米器件与宏观世界之间的信号传输仍是难题,例如以碳纳米管作为敏感器件时的信号传输。其次,纳米尺度下热传导具有量子效应,NEMS 器件的行为由表面特性决定,这意味着小器件的能量可能通过随机振动发生耗散,需要抑制能量耗散以获得高 Q 值。第三,纳米结构要求用单晶或超高纯度的异质材料制造,材料必须具有极低的缺陷,这对材料提出了极高的要求。第四,目前还没有可重复和低成本的纳米器件批量制造方法,纳米器件几乎不具有可重复性,而可批量重复的纳米加工技术是 MEMS 发展的先决条件。

21 世纪,MEMS 的研究领域不断扩展,逐渐形成纳米器件、生物医学、光学、能源、海量数据存储、信息等新方向,并从单一的 MEMS 器件和功能向着系统功能集成的方向发展,与

之相关的纳米科学、生化分析、微流体理论等迅速发展。总结微系统技术在过去近五十年的发展可以发现,制造技术的发展是微系统发展的基础,每一次制造技术的进步都促进了新器件的诞生和性能的提高;同时,提高器件性能和开发新器件又成为推动制造技术不断发展的重要因素。Feynman 在半个世纪前高瞻远瞩的预言和设想,为人类打开了认识、利用、改选微观世界的大门,推动着 MEMS 领域的发展。

1.1.4 MEMS 的产业状况

MEMS 的产业发展是市场拉动和技术推动共同作用的结果。MEMS 目前的商品化已经取得了很大的成功,如压力传感器、加速度传感器、陀螺、麦克风、打印机喷嘴、DMD 等,而 RF MEMS、微光学器件、Bio MEMS 和微流体芯片等也显示出了巨大的市场潜力。

MEMS 产业呈波浪式发展,第一轮商业化浪潮始于 20 世纪 70 年代末,为了提高汽车安全性、降低油耗和排放,以及为了避免医疗器械造成的交叉感染,用体加工技术制造的膜片式压力传感器开始应用于汽车和医疗领域,包括 Honeywell, Nova Sensor, Motorola 等公司大量生产压力传感器。MEMS 的第二轮商业化出现于 20 世纪 90 年代,主要围绕着 PC 和信息技术的兴起以及汽车工业对传感器的巨大需求,如 TI 公司的 DMD, HP 和 IBM 等公司的喷墨打印头,以及 ADI, Motorola, Denso 和 Bosch 等公司的加速度传感器,广泛用于汽车电子领域。第三轮商业化出现于 20 世纪末,主要是 RF MEMS 和光学 MEMS 器件。第四轮 MEMS 商业化主要围绕 Bio MEMS 和芯片实验室等生化分析和生物医学应用。尽管由于技术和市场等原因,这些领域没有出现预期中的快速增长,但是由于 MEMS 的优势和需求,从长期来看这些领域将是 MEMS 强劲的增长点。在这些新兴的 MEMS 市场处于暂时沉寂的时候,已经产生或者已经出现多年的 MEMS 器件,如打印机喷头、陀螺、加速度传感器、微麦克风等,成为支承 MEMS 市场的主角。

目前全球大约有 250 家公司从事 MEMS 产品的研究和开发,主要集中在美国、欧洲、日本和新加坡。2005 年前 15 家 MEMS 制造商为: TI, HP, Bosch, Lexmark, ST, Epson, BEI, Canon, Freescale, Denso, ADI, GE-Novasensor, Omron, Honeywell 和 Delco, 前 20 家 MEMS 生产商的收入之和占世界 MEMS 总收入的 87%。按销售额的占有率为: 打印机喷墨头 28.3%, 压力传感器 24.3%, 数字微镜 (DMD) 18.4%, 陀螺 10.7%, 加速度传感器 7.5%, 其他 10.8%。其中 Motorola 压力传感器已累计销售 1.5 亿个, TI 的 DMD 累计销售 1 000 万个, ADI 的加速度传感器累计销售超过 2 亿个。

在 MEMS 市场上,大型半导体制造商和应用产品制造商占据着市场和技术的主要地位。大型半导体制造商有 Freescale, ADI, TI, ST, Infineon, Samsung 等,其中大多数公司都有自己的 MEMS 生产线,占据着计算机、汽车、医疗、电信和消费电子等领域 MEMS 产品的主要市场。大型专业公司如生产 MEMS 传感器的 Delco, Bosch 和 Denso 都是世界著名的汽车零配件供应商,而 HP, Epson, Lexmark 等生产打印机喷头的都是打印机的世界巨头,前十名中只有 BEI 和 GE-Novasensor 是专业传感器生产商。小型 MEMS 公司依靠一项领先技术从事新兴的、高风险领域的应用,如通信、生物、光学等。

1.2 MEMS 的设计

MEMS 技术的主要内容包括基础理论、设计与仿真、材料、制造、封造、测量与测试以及系统集成技术等,其中设计与仿真是 MEMS 的重点之一。

1.2.1 MEMS 设计

MEMS 设计过程包括系统设计、结构设计、模型设计、工艺设计以及版图设计等几个方面,涉及多学科领域,因此设计者往往需要掌握多学科的背景知识。早期 MEMS 设计的重点是工艺设计,并经过了向器件设计转移的阶段,目前 MEMS 设计更重视系统级的设计。MEMS 的设计一般采用“自上而下”(top-down)的设计方法,即从系统设计开始,然后进行器件和工艺设计,最后完成版图设计。系统设计从分析应用和性能指标开始,设计能够实现性能指标的结构和器件,经过结构仿真模拟,然后进行工艺和版图设计,再经过工艺模拟,最后完成制造和测试。经过多次重复这一过程,以达到满意的结果。图 1-7 所示为 MEMS 的设计和制造过程中的关键环节。

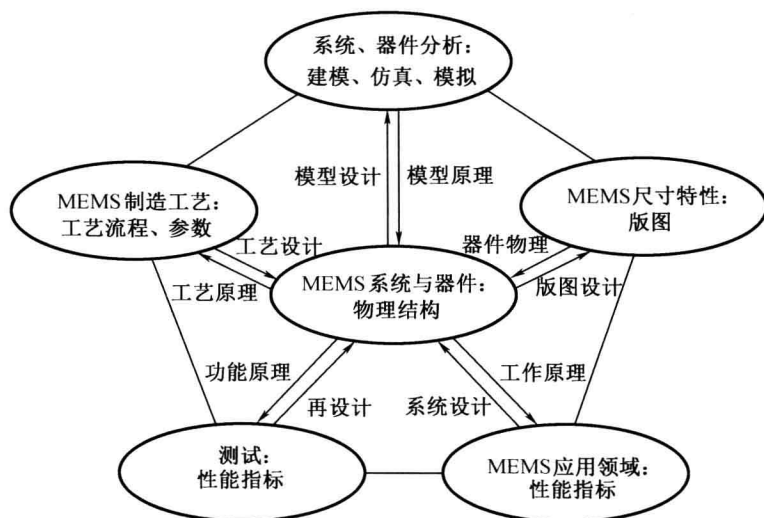


图 1-7 MEMS 的设计和制造过程

MEMS 的设计、制造和封装有很强的相互依赖性,设计很大程度上受限于制造工艺,不同器件所使用的 MEMS 工艺差别很大,即使最普通的 MEMS 器件也需要设计一个合适的加工工艺才能实现。因此掌握 MEMS 制造工艺对设计非常重要。由于 MEMS 的复杂性和多样性,设计制造等各个环节还没有发展成熟,没有固定的设计方法,MEMS 设计的自动化工具发展很慢,还没有高层次的系统级综合工具。MEMS 首先需要标准工艺,然后才能得到标准的设计准则和设计工具。尽管目前 MEMS 代工厂提供一些标准工艺,但是这些工艺的局限性很大,许多 MEMS 器件难以用标准工艺实现。随着代工服务的发展,MEMS 设计工作的重点转变为如何适应工艺技术。

1.2.2 建模、模拟与数值计算

根据 MEMS 模型所描述的层次,可以将 MEMS 的模型分为系统级、器件级、物理级和工艺级。系统级模型描述整个系统的动态行为,可以采用框图法或者集总参数形式的电路模型描述,表示为常微分方程的形式,然后借助各种模拟工具如 MATLAB, PSpice 等进行模拟。物理级模型描述实际器件在三维连续空间的行为,用偏微分方程表示。由于 MEMS 多领域交叉的特点,往往多个物理场和化学场同时甚至相互作用,形成多场耦合,即使一个简单的传感器也涉及力学、物理和电学等多种参量。这使得通常的理论分析难以得到能够描述耦合系统的方程;即使能够得到这些方程,也会因为边界条件和器件结构过于复杂而难以获得解析解。因此, MEMS 建模和分析过程中更多地借助于数值计算软件进行多场耦合分析,然后确定优化的设计结果,例如有限单元法(FEM)、边界元法(DEM)、有限差分(FD)、时域有限差分法(FDTD)等。有限单元法和边界元法能够获得较为精确的物理级分析计算结果,利用综合法可以获得结构在每个能量域内行为的精确描述,但是这种方法不适合系统级的分析计算,也不能同时考虑电路和结构器件。实现这些分析需要减少系统参数,即降阶模型。

多场耦合问题的模型包括非耦合模型、顺序耦合模型、集总或降阶模型,以及分布式耦合场模型。非耦合模型是早期分析 MEMS 器件常采用的方法,它单独分析每种物理场对器件的作用而不考虑各种场之间的相互作用。非耦合模型在分析梳状叉指电容和谐振器方面被广泛应用,其分析过程忽略静电场边缘效应,通过简化静电模型计算电场、电容以及电极间的作用力,最后计算静电力引起的机械结构变形。如果多物理场(如机电)耦合系统可以简化、解耦,并能够计算耦合参数(如静电力),该系统可以用非耦合模型方便地描述。对于强耦合情况,例如扭转微镜等,由于机电耦合程度很高,非耦合法计算结果误差较大。随着商用有限元软件如 ANSYS 和边界元软件如 Coventor 的发展,非耦合模型逐渐被更精确、更复杂的数值计算所取代。

顺序耦合也称为弱耦合或负载矢量耦合,是将不同场的建模、模拟相结合来解决耦合场的问题。分析过程每次只针对某一物理场,将前一个分析结果作为下一个分析过程的边界或者初始条件完成耦合。例如,用顺序耦合法分析机电耦合时,顺序求解静电和结构问题的解,并通过负载矢量(作用在机械结构边界上的静电力)将机电域的相互作用(耦合)联系起来。通过这一步,电场对机械结构的耦合作用表现出来,在得到机械结构的解以后,再将其代入静电场求解过程,实现机械结构与静电场的耦合。即电场会改变机械结构的初始形状,而结构的变形又会影响到电场分布和静电力的大小。经过多次迭代后,两次解的差别收敛在一个允许的区间内,完成耦合求解过程。这种方法的核心问题是收敛与否以及收敛速度,对于电容的下榻效应等突变现象难以求解。

利用顺序耦合的商用软件包括 CFD-ACE+, MEMSCAD, ANSYS 等。在计算机电耦合过程中,使用有限元法离散化机械结构,使用边界元法离散化电场,对所有未变形的机械结构计算初始电场力,然后利用电场力作为载荷计算结构的变形和位移。结构的形变导致了电场的变化,形成了新的电场力载荷,再利用电场力对第一次变形的结构进行计算。例如,静电驱动扭转微镜与另一个极板构成电容,施加驱动电压后静电力使支承微镜的梁扭转变形,微镜平衡时静电力的扭矩与扭转梁的扭矩相等。在 FEM 计算时,静电力与扭矩是互相反馈的。初始静电力的大小由微镜的面积、极板距离、驱动电压等因素决定,而扭矩由梁的