

MEMS 研究的新进展—— 微型系统及其发展应用的研究^x

李路明 王立鼎

(中国科学院长春光学精密机械研究所微机械研究室, 长春 130022)

摘要 简要叙述了微电子机械系统(MEMS)研究中的多单元综合体——微型系统, 包括它的种类、结构、工作原理及相关的特性。对其应用前景作了讨论, 并提出了一些超前的设想。

关键词: 微型系统; 微机械

1 引言

八十年代后期, 随着大规模和超大规模集成电路的迅速发展, 微电子机械系统(MEMS)的研究得到了迅猛地发展。近几年, 开始了从单元发展到微型系统的研究。微型系统就是把微驱动器、微执行器及传感器等都集中在极小的几何空间内, 用现代技术把各种功能单元在微观世界统一起来。微型系统是一个综合系统, 它包含多学科交叉、多种加工技术的应用以及新原理和新结构的探索等。进入九十年代以来, 日本通产省开始实施为期10年、总投资250亿日元的“微型机械技术”大型研究开发计划, 准备研制两台微型系统样机。一台用于医疗, 进入人体血管进行诊断和微型手术; 另一台用于工业, 对飞机发动机和原子能设备微小裂纹实施维修。现在日本共有66个微机械研究小组(27个院校, 14个国家研究所和25个私营公司)。欧洲不甘落后, 于1990年建立起欧洲各国家的微型系统研究网络, 截止1993年底, 欧洲协调有8所院校, 23个国家研究所和公司共计31个微型系统研究小组。在中国, 微型系统也开始受到重视, 并在国家科委、国防科工委等科研计划中立项给予支持。

x 国家科委攀登计划 B 资助项目

收稿日期: 1996年5月9日

2 微型系统

2.1 微型系统的组成

在微小尺寸范围内,机械依特征尺寸可以划分为 $1\text{ nm}\sim 10\text{ mm}$ 的小型机械, $1\text{ Lm}\sim 1\text{ mm}$ 的微型机械以及 $1\text{ mm}\sim 1\text{ Lm}$ 的纳米机械。微型系统由微型机械各单元构成,也可以包含小型和纳米机械。它集微型驱动器、微型传感器、微型执行器以及信号处理和电路、直至接口、通讯和电源等为一体的系统。它也可以是少量单元的集成。微型系统通常可以分为几个独立的功能单元。其输入常是物理量信号,通过传感器转换为电信号,经过信号处理后,由执行器与外界作用。每一个微系统都可以通过电、光、磁等物理量信号与其它微系统进行通讯。微型系统的目标在于通过微型化、集成化来探索新原理、新功能的元件和系统,开辟一个新技术领域,形成批量化产业。微型系统研究涉及元件和系统的设计、能源、材料、制造、测试、控制、集成,以及它们与宏观世界的接口等多方面。在理论上,它涉及微电学、微机械学、微光学、微流体学、微热力学、微摩擦学、材料学、物理学、化学和生物学等理论基础。

2.2 微型系统的理论研究

a. 尺寸效应问题

当尺寸缩小到一定范围时,许多物理现象和宏观世界有很大差别。力的尺寸效应和表面效应在微观领域可能起重要作用。在微小尺寸领域,与特征尺寸 L 的高次方成比例的惯性力、电磁力(L^3)等的作用相对减小,而与尺寸的低次方成比例的粘性力、弹性力(L^2)、表面张力(L)、静电力(L^2)等的作用相对增大。这也是微型系统常以静电力、表面张力作为驱动力的原因。随着尺寸的减小,表面积(L^2)与体积(L^3)之比相对增大。因而热传导、化学反应等速度加快,表面间摩擦阻力显著增大。材料性能和摩擦现象受制作工艺的影响。

b. 理论分析问题

微型系统建模是其理论的重要组成部分,所需考虑的因素较多也较复杂。除实验建模外,微型系统的建模和仿真需用有限元法分析,如利用有限元和静电边界条件分析在静电作用下机械结构运动特性;利用有限元进行微操作器的特性分析,微激磁器的磁场分析,微悬臂梁的运动分析,微泵阀中的静态特性及流体特性分析,非理想状态下(如弯曲、过腐蚀等)的谐振器谐振频率分析等。

3 几种微型系统举例

3.1 微型化学分析系统

微小型的化学分析系统与常规的化学分析仪器相比,在样品尺寸、响应速度、试剂消耗上占有优势。微小型的化学分析系统如图1,体积小,采用的样品尺寸小,试剂消耗量少,响应速度更快。在已研制的“微小型化学分析系统模型”和“射流分析微型系统”中,系统模型包括液体处理和检测两部分,都集成在 $22\times 22\times 11\text{ mm}^3$ 的几何空间,液体处理装置包括压电泵和用微加工工艺制作硅微结构伺服阀,并用阳极键合在两玻璃板之间。上玻璃板薄膜,由压电陶瓷圆片驱动,作为泵的电影片。固体电化学传感器或微小的光学检测器作为检测元件。检测部分包括一

条液体管道, 带有传感器。这种传感器模型能检测 PO_2 、 PCO_2 和 PH , 可用于监测血气。这些传感器具有很好的线性度, 响应速度较快。其中, PH 和 PCO_2 传感器是由带参考电极的 ISFET 制成。这些传感器在液流中由多层硅氧烷环密封。常规的化学分析仪器所追求的四个特点都被这种硅结构微型化学分析系统所取得。这四个特点是:

- 1) 减小采样体积;
- 2) 很快地检测反应速度;
- 3) 多种检测功能;
- 4) 装置小型化, 成本低廉。

3.2 微型空间探测仪器

这里介绍二种用空间科学的微型系统。一种是用于太空生命科学研究的微小型生化反应器; 另一种是用于飞行导航的微型惯性测量系统。微小型生化反应器, 可用于酵母菌的连续培养。在 $87 \times 63 \times 63 \text{ mm}^3$ 的几何空间内集中了多个子系统, 重 610 g 。100 ml 的新鲜培养基由微泵以不同流速抽入培养室 (3ml), 由磁力搅拌器搅拌。微传感器监视 PH 和氧化还原的电位。在培养过程中, PH 值的减少可通过电化学方法补偿。在微小型生化反应器上开有小窗以便观察。每次采样量为 1 ml, 样品通过硅胶隔膜被采入。该系统在空间微重力实验中必须满足安全方面的要求, 在太空进行操作时, 微传感器可将培养室中各种测得的数据, 如生物 CO_2 排量、 PH 值等, 通过在线传输方式发回地面。

微型惯性测量组合 (MIMU), 是一种新兴的惯性测量系统, 它利用新的物理现象, 建立新的陀螺概念。陀螺仪测量运动物体姿态和转动角速度, 加速度表测量速度的变化。陀螺的功能是保持对加速度对准方向进行跟踪, 从而在惯性坐标系中分辨出指示的加速度。对加速度进行两次积分, 就可测出物体位置。由三个正交陀螺、三个正交加速度表和一个坐标计算机, 可集成为一个惯性测量组合 (IMU), 可提供运行物体姿态、位置和速度信息。

利用光学技术和振动质量的微型惯性仪表, 没有连续转动部件, 在寿命、可靠性、成本、体积和重量方面优于常规惯性仪表, 适用于恶劣环境。其中的微机械陀螺技术难度最大。它是由单晶硅片采用光刻和各向异性刻蚀工艺制造而成的硅微结构, 尺寸小, 重量轻, 可靠性高, 抗冲击力强, 漂移性能指标为 $10^\circ/\text{h}$, 适于短时间导航。在本质上, 微机械陀螺是一种振动式角速度传感器。微机械陀螺可分二种: 一种是框架式角振动陀螺 (见图2), 另一种是音叉式线振动陀螺 (见图3)。框架式角振动陀螺由内外两层框架组成, 内框架上有沉积金的垂直质量, 可以想象为陀螺。外框架在交变静力驱动下绕框轴振动, 可以看作是驱动马达。每个框架通过一组正交的枢轴连接在一起。这些枢轴在扭转方向上很软, 在其它方向上很硬。当外框架以小角度振动时, 内框架就敏感地绕框架平面法线有角速度产生。在理想条件下, 外框驱动频率等于内框谐振频率。为了得到高灵敏度, 谐振的 Q 值应该越高越好, 这须密封在真空 (3 mTorr) 罩内, 降低空气阻尼。此时, Q 值可达 2000。音叉式线振动陀螺仪, 采用了硅微结构梳状驱动音叉, 梳状驱动器的静电力为

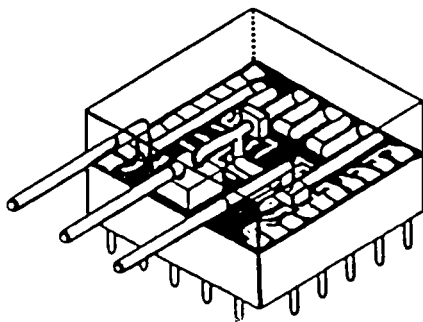


Fig. 1 The concept of three dimensional micro integrated fluid systems (3D-MIFS)

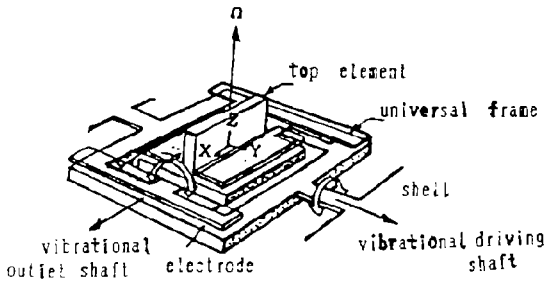


Fig. 2 Principle of framed top operation on angle vibration

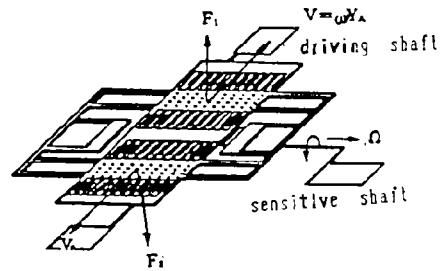


Fig. 3 Principle of tuning-forked top operation on linear vibration

$$f_s = \frac{1}{2} V^2 \frac{C}{5X}$$

式中, V ——外电压, 由直流偏置电压和交流分量组成;

C ——间隙电容;

X ——横向位移。

当音叉在平面内以线速度 $v = X\dot{\theta}Y_A$ 振动时, 如果基片沿垂直于 v 的方向在平面内有惯性角速度 δ 出现, 那么在哥氏力 F 作用下, 音叉的一个质量向上运动, 一个质量向下运动。两质量下方的电容器检测音叉位移。音叉式振动陀螺有效尺寸为 1 mm , 音叉振幅 $10 \mu\text{m}$, 在 100 mTorr 真空下, 驱动轴 Q 值为 40000 , 预置稳定性为 $10^\circ \sim 100\%/\text{h}$, 它与框架式振动陀螺相比, 优点在于: (1) 加工简单, (2) 驱动振幅大, 性能较好。

3.3 微型流体处理系统

微型流体处理系统主要用于化学分析装置和医疗药物剂量施放装置中。这些装置都需要长时间稳定传输液体。通过液体流量传感器, 能够控制流量在 $20 \sim 100 \text{ nL}$ 之间时, 达到 0.1 nL 的分辨率。下面介绍一种药物剂量施放系统, 如图4。它包括二个腔: 一个是初级压力腔, 内满载有要施放的药物; 另一个是次级腔。一次施放的剂量由次级腔的尺寸、弹性以及初级腔的压力决定。每次药物的施放由二个能动型形状记忆合金(SMA)阀来控制。微型面板上集成有控制电路。这套系统可跟药库系统相联, 固定在患者的注射部位, 由连接的注射针向患者注射药物; 也可移植在病人体内施药, 定期通过注射针给体内的药库系统加药。如给糖尿病患者注射胰岛素, 将系统植于皮下或固定在臂部注射部位, 其注射针插入皮下, 根据患者的生理周期和治疗情况, 选择不同的流量。该系统需考虑以下三个方面的问题: (1) 材料与生物相容性; (2) 系统稳定性; (3) 药库内药品性质稳定性。

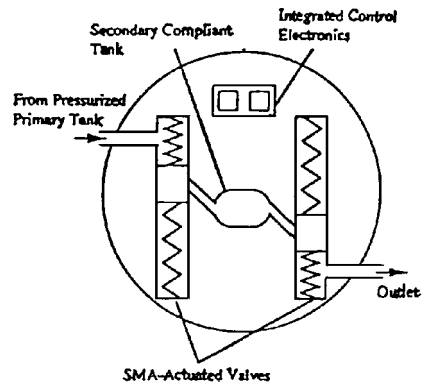


Fig. 4 Scheme of an implantable device for drug infusion

3.4 扫描探针系统

扫描探针系统是用来探测表面形貌的。如扫描力显微镜在小型化以后,温度和振动噪声的影响会变小。其关键技术包括由四个静电梳指致动器驱动的单晶硅 X- Y 线位移器,适合于精密定位和扫描。尖锐突起的硅微表面探针集成在 X- Y 位移台中间,探针基底上带中间孔,可用干涉仪来检测针尖和样品的相互作用。

以原子力显微镜(AFM)的扫描探针系统为例,如图5,AFM 是通过探测针尖和样品表面超小作用力(小于 1nN)的测量来感知样品表面三维图像,探针集成在悬臂梁的悬臂端。悬臂梁是质量极小(0.1 ng 左右)的硅梁,非常富于弹性(弹性系数约为0.05 N/m~1 N/m)。这种悬臂梁的检测适应面广,导体和绝缘体表面都适用。而扫描隧道显微镜(STM)则只适于导体。AFM 是通过测量悬臂梁表面和参考表面的相对运动来工作,在高分辨率工作方式下,探针静止,样品作扫描运动。这是因为悬臂梁的运动会增加振动干扰。如果需要探针运动,样品静止,那么就需要对振动监控,使它减到足够小的程度。在 AFM 中,通过检测探针和样品间微力来探知针尖和样品的微小间隙的方法,其分辨率高于 STM。通过压电扫描器移动样品,悬臂梁端的探针和样品表面接触。在最初接触中,探针尖的原子由于和样品表面原子的电子轨迹重叠,产生一个微弱的斥力,引起悬臂梁的变形,可测得的最小变形为 $\pm 0.02 \text{ nm}$ 。这对于典型的弹性系数为10

N/m 的梁,可测得的最小力为0.2 nN。为了减少周围环境的振动(约 100 Hz 左右)干扰,微梁要具有较高的共振频率(10 kHz~100 kHz),这种弹性系数极低的微梁可获得垂直和水平方向上很高的分辨率(小于0.1 nN)。这种微悬臂梁的材料选用 Si, SiO₂, Si₃N₄。采用光刻技术制作。微梁的宽约为100 μm 左右,厚度约为1 μm。因为已知微梁弹性系数,可通过测微梁变形量来测微力,其变形量可通过以下方法测量,如图6所示。

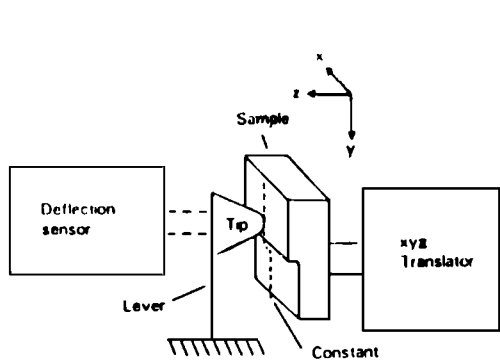


Fig. 5 Principle of operation of the AFM

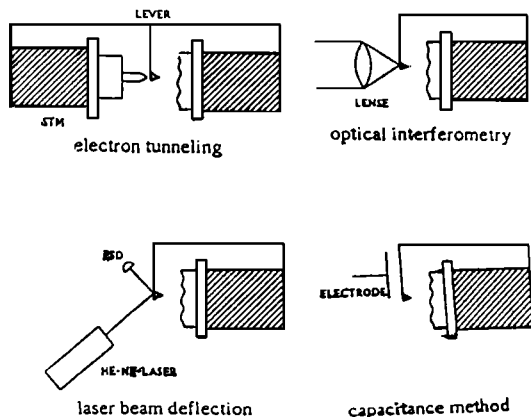


Fig. 6 Geometries of the four more commonly used detection systems for measurement of cantilever deflection

1) 隧道电流法; 2) 电容法; 3) 光学测量方法, 共分四种: a. 光学干涉法或光纤干涉法, b. 光

学偏振检测, c. 激光二极管反馈法, d. 光学杠杆法。近年来发展的压阻法和压电法, 也可用来测量微梁变形量。压阻法结构简单, 缺点是功耗大, 约10 mW, 灵敏度稍差。

3.5 微型光学机械系统

采用硅微加工制造的 Fabry-Perot 调制器, 对1.3 Lm 波长可优化。它包括双支承多晶硅梁, 由气隙分隔的多晶硅电极。二个多晶硅电极组成了 Fabry- Perot 腔的镜面。由静电驱动, 可改变镜面间的光程, 因而调制了反射率。这种调制器最大开关速率为9 dB, 最大调制速率为2.8 Mbit/s。该调制器是作为反射调制器在光纤回路中应用的。如果在网络用户端采用 Fabry-Perot 调制器, 就会大大减少网络中零部件数目, 如用单根光纤和一束激光可实现双向传输。从激光器向另一端发送数据, 激光二极管直接调制, 另一端的光检测器接收到调制信号的密度。从另一端向激光器端发送数据, 入射光由反射式调制器调制返回激光器端。半导体或铌酸锂调制器数据运转速率可达几 Gbit/s。在许多应用情况下, 反向传输速率允许比正向传输速率低很多, 几 Mbit/s 就足够了。硅微加工的调制器就可达到这个要求。

4 相关问题

微型系统是多学科交叉的前沿研究领域, 涉及电子工程、机械工程、材料工程、物理学、化学以及生物医学等多种工程技术科学。国外的 MEMS 中心按照每年20~40个项目开展研究与设计, 不少大学加强了物理学、化学、电子学(微电子和控制)、机械学(机械和力学)、材料和生物学等系所的合作。在加工手段上, 硅微加工技术已经成为推动微型系统的技术基础。其它工艺以及微米和纳米的测控技术也同样发挥重要作用。

5 微型系统应用前景及设想

微型系统的产业化问题近年来一直是研究单位和工业界关注的一个目标。1995年6月在斯德哥尔摩召开了第八届国际传感器和执行器会议, 暨第九届欧洲传感器会议, 有大量来自工业界的代表。会议期间, 美国、日本、德国、瑞典和挪威等国家工业界人士还举行了微系统产业化专题讨论。微系统是一个新兴的技术领域, 其重要性关系到国家科技、经济和国防未来。它的每一项技术难关的突破都会给人类带来影响。微型系统在八、九十年代的发展及各国在这方面的大量的研究工作, 引起企业界对汽车工业方面和医疗仪器方面采用微型系统的关注和兴趣, 预计到二十一世纪, 在微型仪器、数据存储方面会有长足的发展, 并形成庞大的高新技术产业。针对微型系统的发展, 我们提出以下一些设想:

- 1) 提倡有条件的高校, 作为学科建设设立微机械专业, 制订相关学科的教学计划, 在本科教学中扩大知识面, 采用学分制培养相应人才。

- 2) 提倡在科研领域多学科交叉, 协同攻关。

- 3) 吸纳企业界参与微型系统的研制开发, 组织市场预测, 估计3~5年内, 微型系统有希望在我国开始得到应用。

参 考 文 献

- [1] de Rooij N F. Current Applications of Silicon Based Micro Systems. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science 0- 7803- 2676- 8/95, IEEE, 1995, 7~10
- [2] Paolo Dario, Maria Chiara Carrozza. Interfacing Microsystems and Biological Systems. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science 0- 7803- 2676- 8/95, IEEE. 1995. 57~66
- [3] Koji Ikuta. Biomedical Micro Device Fabricated by Micro Stereo Lithography. Sixth International Symposium on Micro Machine and Human Science 0- 7803- 2676- 8/95, IEEE. 1995. 67~70
- [4] Bharat Bhushan. Handbook of Micro Nanotribology . 0- 8493- 8401- X95, CRC Press, Inc. , 1995
- [5] 高钟毓. 微机械陀螺原理与关键技术. 仪器仪表学报, 1995, 17(1): 40~44

Microsystem and its Development and Applications

Li Luming, Wang Liding

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

Abstract

This paper describes the sorts, structures, operational principles and characteristics of the microsystems, a new popular research field in MEMS. The future applications about the microsystem are discussed, and some new thoughts are presented at the end of the paper.

Key words: Microsystem, MEMS, Application

李路明 男, 1969年出生, 1991年毕业于哈尔滨工程大学机械系, 获学士学位。1993年考入中科院长春光学精密机械研究所攻读硕士学位, 曾从事过二维微位移工作台的研究。1995年1月推荐直接攻读博士学位, 研究领域为微电子机械系统。博士研究课题是研制“微操作系统”。