

微机械陀螺的发展现状*

李新刚 袁建平

西北工业大学航天工程学院, 西安 710072

摘要 随着对微电子机械系统 (MEMS) 的深入研究和取得的进展, 属于 MEMS 研究内容之一的微机械陀螺, 在汽车工业需求的推动下, 已经成为过去几十年内广泛研究和发展的主题. 微机械陀螺与传统机械式陀螺、固体陀螺、光学陀螺等相比, 具有成本低、尺寸小、重量轻、可靠性高等优点, 其精度正不断得到提高, 应用领域也随之不断扩大. 本文首先简要介绍了微机械陀螺的定义及特征、性能指标、工作原理、分类以及加工技术, 随后对已出现的不同类型微机械陀螺的结构、加工方式、工作原理以及性能进行了综述, 最后对微机械陀螺的商业化现状以及发展趋势进行了展望.

关键词 MEMS, 微机械, 陀螺, 哥氏加速度, 加工

1 引言

微机械的研究与制造已形成了一个广泛的领域, 在欧洲称为微系统技术 MST (micro system technology), 在日本称为微机械 (micromachines), 在其他国家则称为微电子机械系统 MEMS (micro electro-mechanical systems). 1998 年欧洲的 NEXUS (network of excellence in multifunctional microsystems) 将 MST 定义为^[1]:“微结构产品是具有微米尺度的结构, 其技术功能由微结构的形状提供, 微系统组合了几个微结构部分并最优化成为一个整体, 来提供一种或几种特定的功能, 在许多情况下包括微电子.” 本文沿用 MEMS 名称.

通常而言, MEMS 的特征尺寸量级在微米到毫米之间. 微传感器具有尺寸小, 输出信号微小, 与宏观外界有特殊接口等特点. 事实上, 微传感器本身不能作为一个完整的实体存在, 不仅需要敏感的微结构部分, 还需要接口和封装. 在微传感器的设计和开发中, 需要同时包括以上 3 个部分.

MEMS 技术包括硅材料、照相平板、材料生长与沉积、掺杂、体微机械加工 (最早始于 20 世纪 60 年代末, 指涉及到对硅基层的加工技术)、表面微机械加工 (始于 20 世纪 80 年代, 仅涉及对晶片表面进行加工的技术)、LIGA (lithographie, galvanoförmung and abformung) (平板印刷、电铸板 (电镀) 和浇铸的

德文缩写)、键合与化学机械磨光等^[2~4].

2 微机械陀螺的工作原理

大部分微机械陀螺属于振动陀螺 (vibratory gyroscope, VG), 本文所述的微机械陀螺均指振动陀螺. 振动陀螺的基本工作原理都是产生并检测哥氏加速度, 也即利用哥氏效应使陀螺结构的 2 个振动模态之间产生能量转换. 哥氏加速度是以法国科学家 G.G. de Coriolis (1792~1843) 命名的出现在旋转坐标系中的表征加速度, 其与旋转坐标系的旋转速率成比例.

用图 1 可以理解振动陀螺的基本原理, 其中质量块 P 固连在旋转坐标系的 xoy 平面, 假定其沿 x 轴方向以相对旋转坐标系的速度 v 运动, 旋转坐标系绕 z 轴以角速度 ω 旋转. 因哥氏效应产生哥氏力的公式为 $F_{\text{Cor}} = -2m[\omega \times v]$, 则质量块 P 在旋转坐标系的正 y 轴产生哥氏力 $F_{\text{Cor}} = 2m\omega v$, 其中 m 为质量块 P 的质量. 可以看出哥氏力 F_{Cor} 直接与作用在质量块 P 上的输入角速度 ω 成正比, 并会引起质量块在 y 轴方向的位移, 获得该位移的信息也即获得输入角速度 ω 的信息.

概而言之, 振动陀螺的振动部件受到驱动而工作在第一振动模态 (又称驱动模态) (如图 1 质量块 P 沿 x 轴运动), 当与第一振动模态垂直的方向有旋转

角速度输入时 (如图 1 沿 z 轴的旋转角速度), 振动部件因哥氏效应产生了一个垂直第一振动模态的第二振动模态 (又称敏感模态) (如图 1 质量块沿 y 轴产生的位移), 该模态直接与旋转角速度成正比。

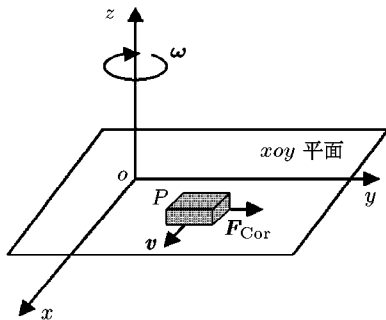


图 1 振动陀螺工作原理图

3 微机械陀螺的性能指标

分析和评价陀螺的性能需要制定一系列的衡量准则, 这些准则为我们应用陀螺提供了参考依据。总体而言, 微机械陀螺有以下几个主要的性能指标^[3,5]:

(1) **刻度因子 / 线性度** 陀螺刻度因子是指陀螺输出与输入角速率的比值, 该比值是根据整个输入角速率范围内测得的输入 / 输出数据, 通过最小二乘法拟合求出的直线斜率。实际上刻度因子拟合的残差决定了该拟合数据的可信程度, 表征了与陀螺实际输入 / 输出数据的偏离程度。由此从不同角度引出了刻度因子精度、刻度因子线性度、刻度因子不对称度、刻度因子重复性以及刻度因子温度灵敏度等概念。陀螺制造商一般给出的是刻度因子精度和非线性度。比如, 某陀螺给出的刻度因子精度 $< 1.0\%$, 刻度因子非线性度为 $< 0.3\%$ FS (FS 指满量程)。

(2) **阈值与分辨率** 陀螺的阈值表示陀螺能敏感的最小输入角速率, 分辨率表示在规定的输入角速率下能敏感的最小输入角速率增量。这 2 个量均表征陀螺的灵敏度。通常分辨率是根据带宽给出来的, 如某微硅陀螺的分辨率 $< 0.05^\circ/\text{s}$ (带宽 $> 10\text{ Hz}$)。

(3) **测量范围与满量程输出** 陀螺正、反方向输入角速率的最大值表示了陀螺的测量范围。该最大值除以阈值即为陀螺的动态范围, 该值越大表示陀螺敏感速率的能力越强。对于同时提供模拟信号和数字信号输出的陀螺, 满刻度输出可以分别用电压和数据位数来描述。如某陀螺的测量范围为 $\pm 150^\circ/\text{s}$, 满刻度输出模拟量为 $\pm 4\text{ VDC}$, 数字量为 $-32\ 768 \sim 32\ 767$ 。

(4) **零偏与零偏稳定性** 零偏是指陀螺在零输入状态下的输出, 其用较长时间输出的均值等效折算为输入角速率来表示。在零输入状态下的长时间稳态

输出是一个平稳的随机过程, 即稳态输出将围绕均值 (零偏) 起伏和波动, 习惯上用均方差来表示。这种均方差被定义为零偏稳定性, 也称为“偏置漂移”或“零漂”, 也用相应的等效输入角速率表示。零漂值的大小标志着观测值围绕零偏的离散程度。陀螺的零偏随时间、环境温度等因素的变化而变化, 并带有极大的随机性, 由此又引出了零偏重复性、零偏温度灵敏度、零偏温度速率灵敏度等概念。对于微机械陀螺, 由于其结构材料 (多为硅材料) 受温度的影响较大, 所以零偏稳定性往往在某温度条件下给出。如某陀螺的零偏稳定性在 25°C 条件下为 $\pm 1^\circ/\text{s}$, 在 $(-40^\circ\text{C} \sim 85^\circ\text{C})$ 范围下为 $\pm 9^\circ/\text{s}$, 经过温度补偿后则保持在 $\pm 2^\circ/\text{s}$ 。

(5) **输出噪声** 当陀螺处于零输入状态时, 陀螺的输出信号为白噪声和慢变随机函数的叠加 (图 2)。其慢变随机函数可用来确定零偏或零偏稳定

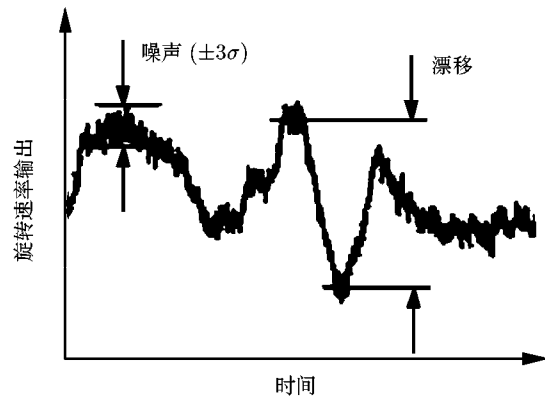


图 2 典型振动陀螺零速率输出中的噪声和漂移

性指标, 白噪声定义为单位检测带宽平方根下等价旋转角速率的标准偏差, 单位 $(^\circ/\text{s})/\sqrt{\text{Hz}}$ 或 $(^\circ/\text{h})/\sqrt{\text{Hz}}$ 。这个白噪声也可以用单位为 $^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 的角度随机游走系数来表示, 随机游走系数是指由白噪声产生的随时间累积的陀螺输出误差系数。当外界条件基本不变时, 可认为上面所分析的各种噪声的主要统计特性是不随时间推移而改变的。从某种意义上讲, 随机游走系数反映了陀螺的研制水平, 也反映了陀螺的最小可检测角速率, 并间接指出与光子、电子的散粒噪声效应所限定的检测极限的距离。据此可推算出采用现有方案和元器件构成的陀螺是否还有提高性能潜力, 故此指标极为重要。

(6) **带宽** 带宽是指陀螺能够精确测量输入角速率的频率范围。这个范围越大表明陀螺的动态响应能力越强。如某型号的微硅陀螺, 带宽指标 10 Hz 。

在上述的性能指标中, 刻度因子、分辨率、零偏及零偏稳定性和输出噪声 (通常用随机游走表示) 是确定陀螺性能的重要参数。根据不同的性能要求, 可依据上述几个主要的性能指标将陀螺划分成 3 类: 惯性级、战术级和速率级^[2,3], 见表 1。

表 1 不同级别陀螺的性能要求

性能级别	速率级	战术级	惯性级
偏差漂移 (°/h)	10~1 000	0.1~10	< 0.01
随机游走 (°/√h)	> 0.5	0.5~0.05	< 0.001
刻度因子精度 (% FS)*	0.1~1	0.01~0.1	< 0.001
满量程范围 (°/s)	50~1 000	> 500	> 400
1 ms 内承受最大冲击 (g·s)	10 ³	10 ³ ~ 10 ⁴	10 ³
带宽 (Hz)	> 70	~ 100	~ 100
成本 (US\$)	50~10 000	10 000~50 000	> 100 000
应用	照相机, 医学仪器, 游戏, 汽车, 专用航空等	商业姿态航向参考系统, 制导弹药等	商用 / 军用飞机, 船舶, 航天器等

* FS 指满程

4 微机械陀螺的分类

微机构陀螺可以从以下几个方面进行划分: 振动结构, 材料, 加工方式, 驱动方式, 检测方式和工作模式.

(1) 按振动结构可将微机械陀螺划分成线振动结构和旋转振动结构. 在线振动结构里又可划分成正交线振动结构和非正交线振动结构. 正交线振动结构指振动模态和检测模态相互垂直, 在正交线振动结构里有振动梁结构, 振动音叉结构, 振动平板结构, 加速度计振动陀螺等; 而非正交线振动结构主要指振动模态和检测模态共面且相差 45° 的振动结构, 如薄壁半球共振陀螺 (hemispherical resonator gyroscope, HRG), 又称 Wine Glass, 以及在其基础上发展形成的共振环结构陀螺和共振圆柱结构陀螺. 在旋转振动结构中有振动盘结构陀螺和旋转盘结构陀螺等, 这种类型陀螺多属于表面微机械双轴速率陀螺.

(2) 按材料可将微机械陀螺划分为硅材料陀螺和

非硅材料陀螺. 在硅材料陀螺中又可分成单晶硅陀螺和多晶硅陀螺; 在非硅材料陀螺中又包括石英材料陀螺和其它材料陀螺.

(3) 按驱动方式可将微机械陀螺划分成静电式驱动 (electrostatic, ES)、电磁式驱动 (electromagnetic, EM) 和压电式驱动 (piezoelectric, PE) 等.

(4) 按检测方式可将微机械陀螺划分成电容性检测 (capacitive, Cap)、压阻性检测 (piezoresistive, PR)、压电性检测 (piezoelectric, PE)、光学检测 (optical, Opt) 和隧道效应检测 (tunnelling) 等.

(5) 按工作模式可将微机械陀螺划分成速率陀螺和速率积分陀螺. 速率陀螺包括开环模式和闭环模式 (力再平衡反馈控制); 速率积分陀螺则指整角模式. 一般非正交线振动结构中的陀螺多可在整角模式下工作, 而其它类型的大部分陀螺均属于速率陀螺.

(6) 按加工方式可以将微机械陀螺划分成体微机械加工、表面微机械加工、LIGA 等.

上述对微机械陀螺的分类归纳起来如图 3 所示.

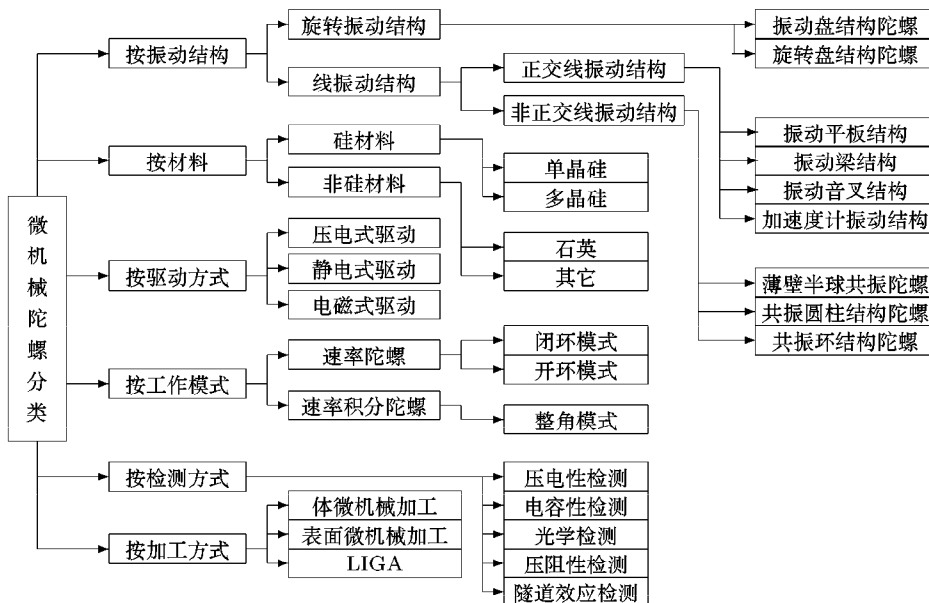


图 3 微机械陀螺的分类

在对微机械陀螺的发展历史进行回顾中则基本按照微机械陀螺的振动结构进行归类阐述。

5 微机械陀螺的加工技术

如前面对微机械陀螺的分类所述,微机械陀螺的加工技术包括体微机械加工、多晶硅表面微机械加工和 LIGA 等工艺技术 [6]。

体微机械加工主要基于各向异性蚀刻,即某种水碱性溶液在不同的单晶硅晶体方向对硅的腐蚀速率存在非常大的区别。在所有情况下,沿 (111) 方向的刻蚀最慢,在其它方向的相对刻蚀速度取决于蚀刻剂和加工条件。各向异性蚀刻产生一个三维特性,其几何形状由晶片表面的掩模图案和硅晶体结构决定。各向异性的一个明显的缺点是只能制造有限范围的几何图案,其由硅晶体结构决定。体微机械加工适于制造结构简单且有一定厚度的大质量体微机械陀螺如振动音叉式陀螺、振动梁式陀螺等,但是很难制造精细的结构如支撑和梳状电容等。此外体微机械加工本身与 IC 制造工艺不兼容,不能直接与微电子线路混合制造。

表面微机械加工允许同时具有固定和运动部件的微机械结构在一个多晶硅晶片上通过一系列的沉淀、光刻蚀和蚀刻操作来制造。其关键材料为与 IC 制造工艺兼容的多晶硅,硅氮化物和硅 dioxide。表面微机械加工能够制造非常复杂的多层平面结构表面微机械陀螺如振动盘结构陀螺、旋转盘结构陀螺等,此外由于与 IC 制造工艺兼容,可以直接与微电子线路进行集成。表面微机械加工存在的缺点主要是不能很好的制造立体结构(沉淀多晶硅层最大厚度约 $10\mu\text{m}$),在应用上受到了一定的限制。

LIGA 加工是 1980 年末在德国开发的,是平板印刷,电铸板(电镀)和浇铸的德文缩写,也即描述了该工艺的基本加工步骤。LIGA 加工的关键特征是它的高精度、深度和高宽比加工与大规模复制相结合。LIGA 加工能够制造大范围的 MEMS 部件如齿轮、马达和线性执行机构等。目前 LIGA 加工对于复杂的多级结构还需要手工进行装配,此外 LIGA 高的制造成本也使其不能广泛得到应用,仅被用来制造关键部件。

由上可知,微机械陀螺的制备工艺主要集中在体微机械加工和表面微机械加工上,这 2 种加工技术进行混合则在一定程度提高了制造的灵活性。

表面微机械陀螺(图 4)与体微机械陀螺(图 5)相比,由于存在“质量”因素,使得它本身很难达到军用高端市场需要的精度,因此目前的研究集中到对体微机械和体面混合微机械陀螺的开发,其中最为重要的技术问题是高尺寸比蚀刻技术、晶片键合和真空

封装 [7]。

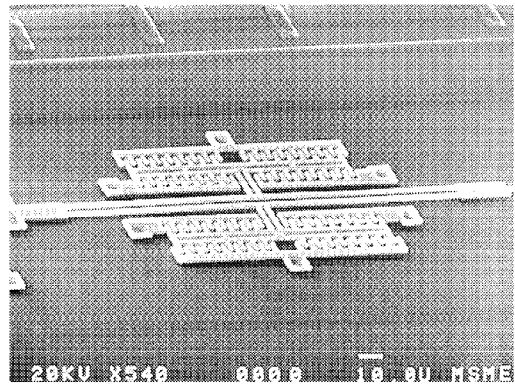


图 4 表面微机械结构

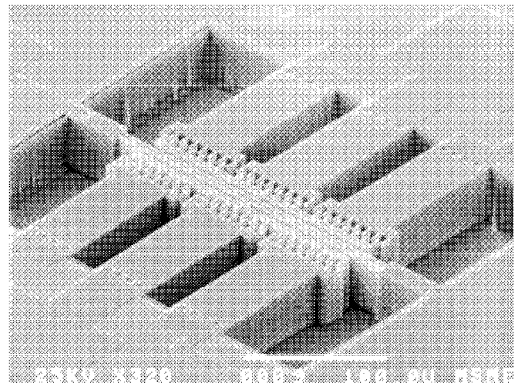


图 5 体微机械结构

深活性离子蚀刻技术允许制造具有垂直壁、高度可达几百个微米的硅结构。STS 和 Plasmatherm 利用这种技术成功的在单晶硅体微机械陀螺上进行深窄槽的快速蚀刻,极大的简化了对高性能陀螺的设计,使制造高尺寸比陀螺振动结构成为可能, Litton 则采用了这种技术开发出一个战术级陀螺。

硅 - 绝缘体 (silicon-on-insulator, SOI) 晶片粘结是通过将 2 个具有中间氧化层的单晶硅晶片粘结到一起,然后在硅的一边加工成特定的厚度,最后合成的晶片可以用于表面微机械。与表面微机械加工的重要区别是单晶硅晶片的厚度可达到几百微米。IMI 采用新的 SOI 处理技术以非常经济的成本生产出高性能微机械陀螺。这种技术直接在一个半导体晶片上安装固态陀螺结构和微电子电路,制造过程使用了标准的 CMOS 铸造技术。这种厚、坚固、高敏感的陀螺器件与集成电路集成可获得最大的性能和最小的成本,与成熟的体微机械和传统技术相比(图 6),成本、尺寸、重量和功率消耗都得到了极大降低,并具有极好的稳定性、抗冲击、抗振动、可靠性和长寿

命 [8].

以上 2 种技术在体微机械加工中的应用一定程度上克服了体微机械加工的缺陷, 使制造高尺寸比结构成为可能, 从而有利于大幅提高微机械陀螺的性能.

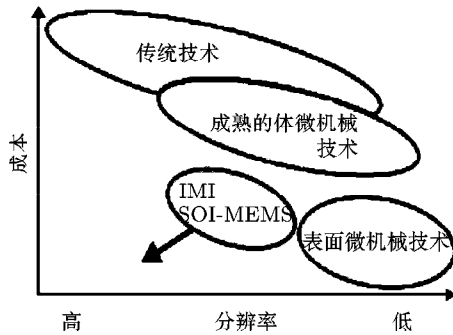


图 6 陀螺技术的成本与性能对比

体微机械陀螺也可以像表面微机械陀螺那样将机械结构与电极集成, 但存在晶片之间的焊接加工问题. 用在表面微机械加工中的阳极化和低共熔焊接低温处理技术, 无法提供给高性能体微机械陀螺需要的足够强度和热稳定焊接要求. 目前唯一合适的选择是属于高温处理的熔化焊接技术 (高达 1000°C), 但这种焊接技术却与 IC 制造不兼容, 因而晶片焊接技术还有待进一步的研究.

微机械陀螺在振动模式下工作, 高品质因子 (其与阻尼系数成反比) 是极为重要的. 在实验室环境, 品质因子为 1000 对体微机械陀螺通常足够高, 但为了实现高性能, 陀螺的品质因子必须要达到 10000, 这需要通过提高真空度来实现, 因而真空封装技术显得尤为重要.

6 微机械陀螺的发展历史及现状

振动陀螺最早的一个应用是 Foucault 在 1851 年演示的一个用来测量地球旋转的钟摆 [9].

日本制造了 2 种基于振动梁结构的微机械陀螺. Murata 的“Gyrostar”微机械陀螺设计成一个横截面为三角形的刚性梁结构, 梁受到驱动并通过粘帖在上面的压电陶瓷元件来检测输入角速率. Tokin 的设计则使用了一个压电陶瓷圆柱梁. 在这 2 种设计中, 梁受到节点的支撑在第一弯曲模式下保持振动, 且没有对第二模态进行反馈控制 [9].

音叉式陀螺是最为经典的振动陀螺结构 (图 7). 这种陀螺由 2 个连接到一个基轴上的音叉齿组成, 在工作状态下, 2 个音叉齿受到驱动以一个固定的幅度进行差分共振 (第一模态), 基轴的旋转输入角速

度在每个音叉齿上产生与驱动方向垂直的哥氏加速度, 并引起该方向的振动 (第二模态), 该加速度形成的力与旋转输入角速度成正比且可从音叉齿的弯曲或基轴的扭转振动中检测出来.

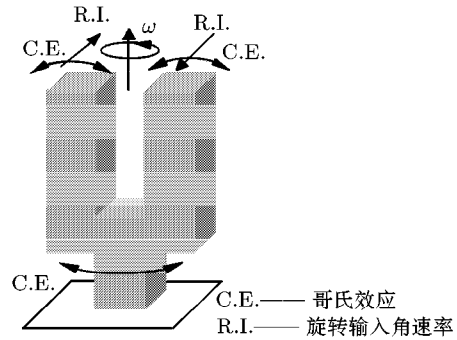


图 7 音叉振动陀螺示意图

Systron Donner 制造的微机械石英速率传感器 (QRS) 是一种双音叉型陀螺 (图 8) [10] 使用单晶压电石英共鸣器, 并与一个两端带有音叉的扭力轴连接. 设计中采用的 2 种振动模态有不同的固有频率, 对第二振动模态没有采用反馈控制.

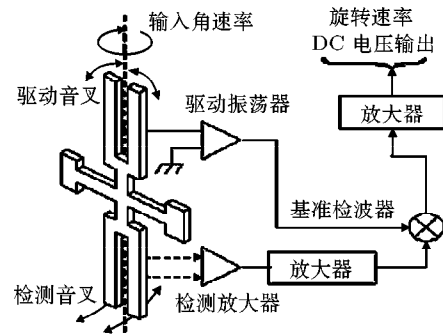


图 8 QRS 的工作原理图

1991 年美国 Charles Stark Draper 实验室制造出第一个体硅微机械速率陀螺 [11] (图 9). 由扭性弯曲支撑组成双平衡架振动结构, 振动结构由 P++ 硅制造. 通过静电方式驱动外部平衡架以一个恒定幅度摆动, 摆动通过内部挠性部件的刚性轴传到内平衡架, 当在垂直框架平面方向有输入角速度时, 哥氏力引起内平衡架关于其挠性轴以一个与驱动频率相同的摆动. 所以, 当外平衡架以内平衡架的共振频率被驱动时, 灵敏度通过传感器结构共振模态的机械品质因子得到放大. 使用这种结构可以获得 1 Hz 带宽下 $4^{\circ}/\text{s}$ 的旋转速率分辨率.

Draper 随后在 1993 年报道了一种 1mm^2 玻璃基硅音叉陀螺 [9,12] (图 10). 这种陀螺在其平面内通过静电方式用一组交叉梳驱动检测质量 (为了降低阻

尼, 检测质量做成网格结构) 振动来获得一个很大的振幅 ($10\ \mu\text{m}$), 在垂直基座平面内的所有运动将产生结构平面外的摆动模式, 该模式通过电容性方式检测. 这种陀螺在 $1\ \text{Hz}$ 带宽下的输出噪声为 $0.02^\circ/\text{h}$, 即 $0.72^\circ/\sqrt{\text{h}}$ 的角度随机游走, 比例因子的精度好于 0.1% , 偏差稳定性为 $55^\circ/\text{h}$ 并预计可在 $60\ \text{Hz}$ 带宽下达到 $10^\circ/\text{h} \sim 100^\circ/\text{h}$.

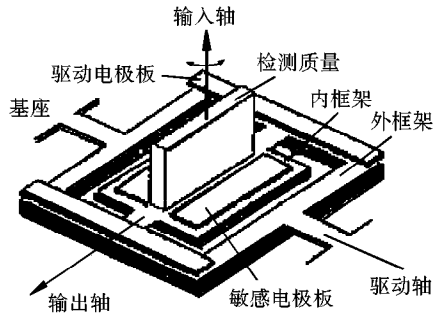


图 9 硅微机械双框架振动陀螺 (Draper)

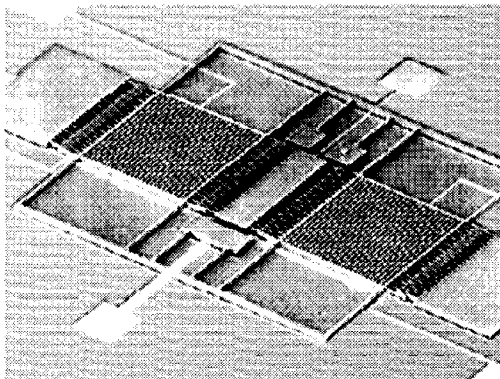


图 10 单晶硅玻璃基硅音叉陀螺 (Draper)

中东技术大学的学者提出一种新的对称微机械陀螺结构 (图 11)^[13]. 通过新的支撑梁设计同时实现解耦特征. 该陀螺不仅允许驱动和敏感模式进行共振频率的匹配来获得比较好的分辨率, 也能对驱动和敏感模式进行解耦来防止因力学耦合产生的不稳定工作状态.

瑞典 IMEGO 研究机构提出一种可用于汽车工业的新型硅微蝴蝶形体陀螺 (图 12)^[14]. 陀螺采用单边静电激励和电容检测. 因 2 个检测质量反相振动, 减小了偏差和对线性和角振动的敏感, 获得了极好的线性度. 在 $50\ \text{Hz}$ 带宽下, 分辨率可达 $0.1^\circ/\text{s}$.

德国 IMT 开发了一种 H 型振动陀螺 (图 13)^[15]. 这种传感器是一种玻璃-硅-玻璃夹层结构, 由 4 个检测质量和连接悬梁构成一个双音叉结构, 连接悬梁

与位于质心的鞍形结构相连, 鞍形结构由一根与基座相连的扭转轴支撑.

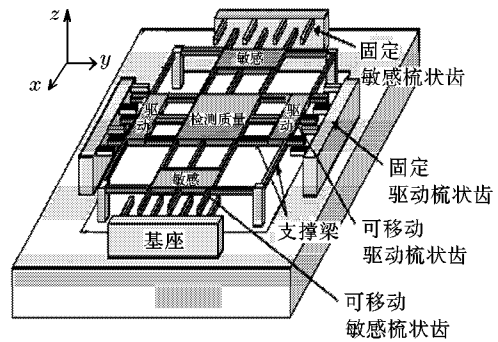


图 11 新型对称结构陀螺 (中东大学)

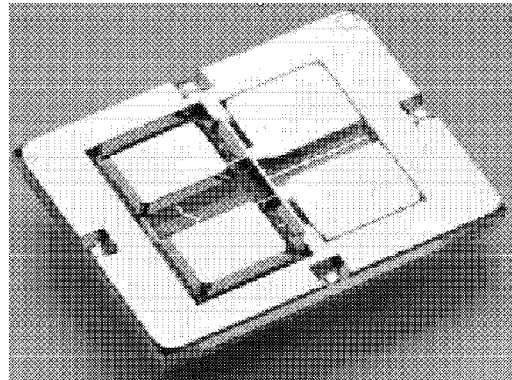


图 12 硅微蝴蝶形体陀螺 (IMEGO)

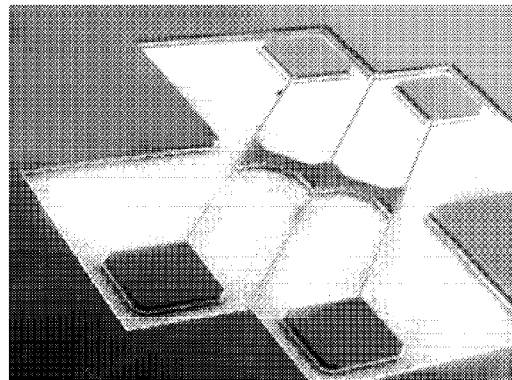


图 13 H 型振动陀螺 (德国 IMT)

瑞士 Neuchatel 大学的微技术研究开发了一种基于 2 个相互隔离的振动检测质量的硅微共振音叉陀螺 (图 14)^[16]. 每个音叉由一个四梁桥式悬挂支撑, 采用压阻检测和电磁激励方式, 2 个音叉在一个平面内反向振动, 在垂直平面方向检测哥氏力效应.

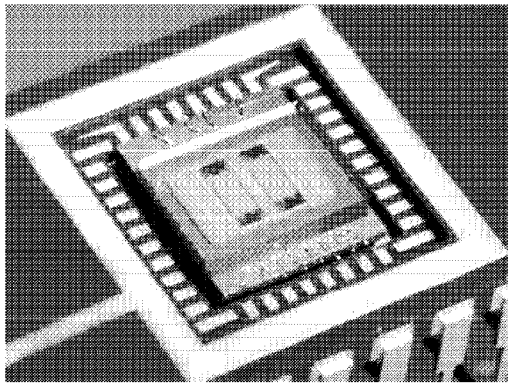


图 14 硅微共振音叉陀螺 (瑞士 Neuchatel 大学)

以上微机械振动陀螺均是采用体微机械结构。若采用表面微机械结构则可以在一个单独硅芯片上与电子电路进行集成, 这样降低了寄生电容而提高了信噪比。另外, 这种面振动结构多由多晶硅制造, 具有很高的品质因子和独立方向杨氏模量。加利福尼亚大学伯克利分校和韩国三星公司的研究学者分别研制了单轴和双轴多晶硅表面微机械陀螺。

伯克利分校研制了第一个直径 1mm 的表面微机械 z 轴振动速率陀螺 (图 15)^[17]。这种陀螺包括一个检测质量, 通过梳状驱动器以静电力方式驱动到共振状态, 因哥氏加速度引起的振动通过交叉梳状齿在感应模态中进行差分检测。该陀螺的分辨率达 $1^\circ\text{s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$, 计划在第二代中要提高到 $0.1^\circ\text{s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。

韩国三星公司研制出的表面微机械 z 轴振动速率陀螺是通过 4 个鱼钩形的弹簧支撑一个 $7\mu\text{m}$ 厚的多晶硅共振质量 (图 16)^[18]。该陀螺在 2Hz 带宽下具有 $0.1^\circ/\text{s}$ 的分辨率, 工作带宽为 100 Hz, 在满量程 $90^\circ/\text{s}$ 情况下具有 1% 的线性度。

日本 Murata 提出一种对横向 (x 轴或 y 轴) 角速率敏感的表面微机械多晶硅陀螺^[19]。该器件的开环噪声等效速率为 $2^\circ\text{s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。随后, 1997 年, 韩国三星公司报告一种具有相似结构的陀螺^[20], 其开环等效噪声速率为 $0.1^\circ\text{s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$, 并在 $100^\circ/\text{s}$ 内具有很好的线性。

通用汽车公司的研究学者在 1960 年利用薄壁圆柱振动的旋转效应开发了一种基于薄壁半球共鸣器的陀螺 (HRG) (图 17)^[21]。它包括一个既是执行元件又是敏感元件的熔石英半球共鸣器, 驱动和敏感均采用静电方式。目前这种陀螺品质因子可达 10^7 并达到了惯性级性能, 可以与现代环激光陀螺相竞争^[22]。随后美国的 Delco Systems 和俄罗斯的 Medicon 公司分别独立开发一种新型半球共振陀螺, 直径约为 60mm^[23]。虽然这类陀螺具有非常好的性能, 但是开发出来的导航系统的尺寸和成本与传统导航

系统相差不多, 难于在高竞争的民航市场应用。因此目前 Delco 和 Medicon 正决定构造一个 30mm 的 HRG 来解决尺寸问题, 通过简化设计半球壳来降低成本^[23]。

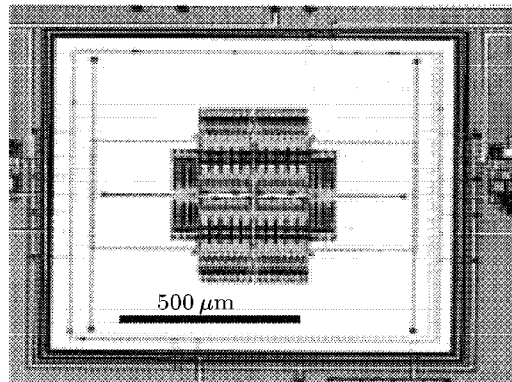


图 15 z 轴平面振动速率陀螺 (伯克利)

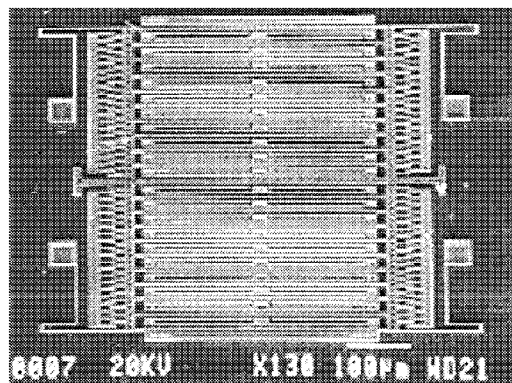


图 16 z 轴平面振动速率陀螺 (韩国三星)

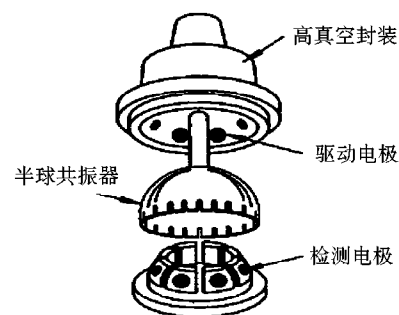


图 17 半球共鸣器陀螺 (HRG) 结构

为了利用 HRG 的特点并降低制造难度和成本, 通用汽车和美国密歇根州立大学的研究学者将半球壳简化成环开发了一种振动环陀螺 (图 18)^[24]。该器件包括一个环和多个半圆形支撑弹簧片, 围绕该外环

安装驱动和检测电极. 基于对称性的考虑需要至少 8 个弹簧片使结构平衡并有 2 个相同自然频率的弯曲模态. 环通过静电驱动进入平面内具有固定振幅的椭圆形第一弯曲模态, 当它围绕法线轴旋转时, 哥氏力使得能量从第一模态转移到偏离第一模态 45° 的第二模态, 第二模态的振幅与输入角速率成比例, 并可通过电容性方法来检测. 与其它类型陀螺相比, 振动环陀螺有一些很重要的特征: 结构固有的对称性使得对寄生振动不敏感, 只有当环具有质量和硬度不对称时, 环境振动才会导致寄生响应; 因为该结构具有“原理上相同共振频率”的 2 个弯曲模态, 当弯曲模态被用来敏感旋转输入, 可以得到更高的灵敏度; 振动环因其振动模态受温度的影响相同而对温度也不敏感; 对该结构可以采用电子平衡来补偿任何发生在制造加工过程中由于质量或硬度不对称引起的频率不匹配.

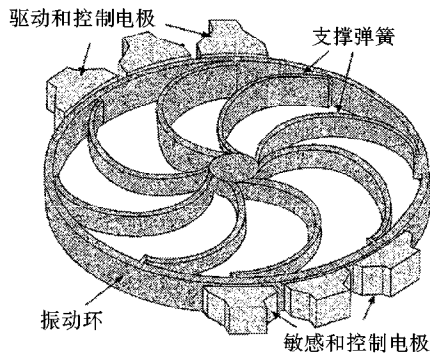


图 18 振动环陀螺结构

第一个振动环陀螺采用电镀镍制造, 在 25 Hz 带宽下具有 $0.5^\circ/\text{s}$ 的分辨率, 零位偏差漂移小于 $10^\circ/\text{s}$ ($-40^\circ\text{C}\sim 85^\circ\text{C}$), 比例因子非线性小于 0.2% ($\pm 100^\circ/\text{s}$ 速率范围). 为了进一步提高性能, 密歇根大学开发了一种新的多晶硅环陀螺 (PRG)^[25~28] (图 19). 这种陀螺通过一个单片、全硅、高尺寸比 $\text{P}++/\text{多晶硅槽填充技术}$ 进行制造, 具有获得高性能的几个重要特征: 增加敏感电容的环 - 电极间隙空间 ($< 1\mu\text{m}$); 采用大的结构高度可增加结构半径和敏感电容并降低共振频率; 使用的较好的多晶硅材料增加了各方向独立的杨式模量. 利用上述特征, 这种陀螺的性能预计可达到战术级, 随机游走将小于 $0.05^\circ/\sqrt{\text{h}}$. 目前该大学设计的这种振动环陀螺高 $80\mu\text{m}$, 直径 1.1 mm , 使用了组合多晶硅和多晶硅 (HARPSS) MEMS 技术 (HARPSS 为一种微制造技术的混合模式, 其组合了体微机械和表面微机械的最好特征来生产具有各种尺寸空气间隙从亚微米到 $10\mu\text{m}$ 范围的上百种微米厚硅结构). 在混合方式下进行低真空度测试表明, 这种陀螺在 1 Hz 带宽下的

分辨率小于 $0.5^\circ/\text{s}$. 通过消除寄生电容和提高结构的品质因子, 预计分辨率可提高到 $0.01^\circ\text{s}^{-1}/\sqrt{\text{Hz}}$.

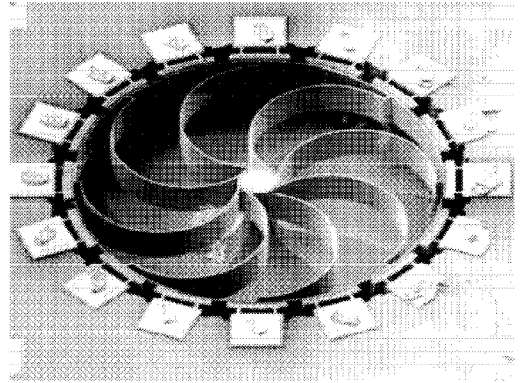


图 19 多晶硅振动环陀螺

为了利用梳齿式微机械陀螺大电容性面积的优点, Delphi Delco Electronics Systems 提出一种混合梳齿环式振动陀螺 (图 20)^[29]. 引入梳齿能明显提高从振动环测得的信号强度, 以差动方式工作也提高了温度性能, 当温度增加, 环与固定电极之间的间隙由于电铸结构与硅基层的膨胀系数不同而减小. 使用差动梳齿结构可消除温度引起的间隙改变的一阶影响.

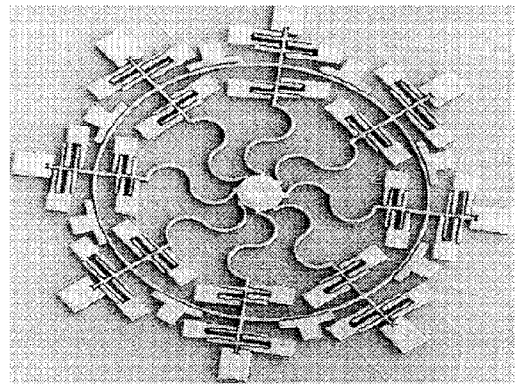


图 20 混合音叉环结构振动陀螺

伯克利分校研制出一种表面微机械双轴陀螺 (图 21)^[8]. 其中一个能进行旋转共振的 $2\mu\text{m}$ 厚多晶硅转动盘, 转动盘在正交轴方向对称, 因此敏感器可以敏感这 2 个轴的旋转输入. 这种陀螺的随机游走系数最低为 $10^\circ/\sqrt{\text{h}}$, 通过频率匹配, 分辨率可以进一步提高到 $2^\circ/\text{h}$.

美国 JPL 与加利福尼亚大学合作, 开发出一种基于空间应用的三叶草形体微机械硅振动陀螺^[30]. 该陀螺的偏差稳定性为 $70^\circ/\text{h}$, 角度随机游走为 $6.3^\circ/\text{h}$.

德国 HSG-IMIT 的研究学者验证了一种表面微机械 x 轴振动陀螺 (MARS-RR) (图 22)^[31]. 这

种陀螺的性能非常好: 角度随机游走为 $0.27^\circ/\sqrt{h}$, 偏差稳定性为 $65^\circ/h$, 比例因子非线性为 $< 0.2\%$.

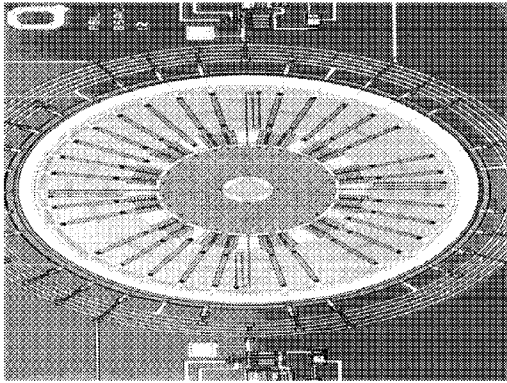


图 21 双轴速率陀螺 (伯克利分校)

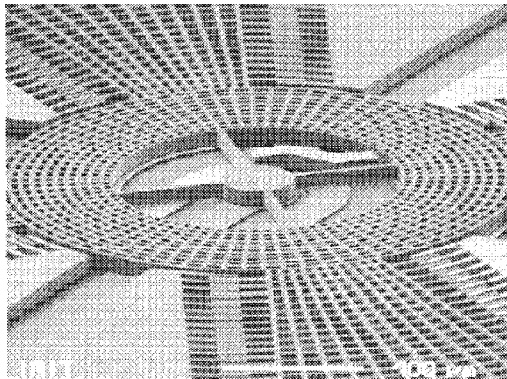


图 22 表面微机械 x 轴振动陀螺 (HSG-IMIT)

BOSCH 在 1993 年开始研制带有 2 个检测质量的表面微机械准旋转陀螺 (图 23)^[32]. 围绕这种结构研制的陀螺在 10 Hz 带宽下具有 $1.26^\circ/s$ 的分辨率. 韩国三星制造出一个双轴多晶硅表面微机械陀螺 (图 24)^[33]. 它基于 4 个平板的角振动并采用闭环速率检测方式. 驱动梳旋转体是每个与基座平行的输入轴翘起, 翘起运动通过底部电极和结构之间的电容变化监测出来. 这 2 个翘起模式可以使陀螺同时在一个晶片上检测 2 个输入轴的角速率. 特别是这种结构利用一个简单的力平衡扭转力矩来降低电容敏感部件的内在非线性, 而不需要在上部安装电极层. 由于振动结构受到空气的强阻尼, 因此需要真空封装. 该陀螺的等价噪声输出为 $0.1^\circ/s$.

其它类型微机械陀螺也有报道. 如悬浮微机械转盘陀螺^[34~36], 这个概念基于一个转动盘, 使用电磁或静电方法使之悬浮, 通过一个电机让它以一个非常高的速度旋转产生角动量. 由于附加的静电场作用, 当传感器被倾斜或倒置, 旋转则保持在一个平衡点. 预计旋转微陀螺可以提供比振动结构陀螺要

低的漂移. 此外还有与光学相结合的微机械光学振动速率陀螺得到验证^[37,38], 其中采用了光学探测器来检测输入旋转角速率. 美国 Northrop 公司验证了一种加速度计微机构陀螺^[39]. 这种陀螺由 2 个静电力再平衡式加速度计构成. 2 个加速度计的检测质量同时受到线加速度引起的同向惯性力和输入角速度引起的反向哥氏力, 通过对其输出进行加减操作, 则可以提出相关输入角速度的信息.

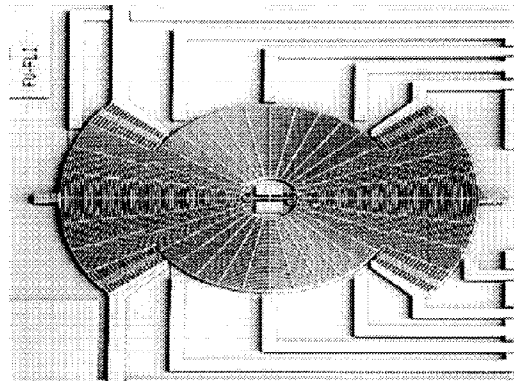


图 23 表面微机械准旋转陀螺 (BOSCH)

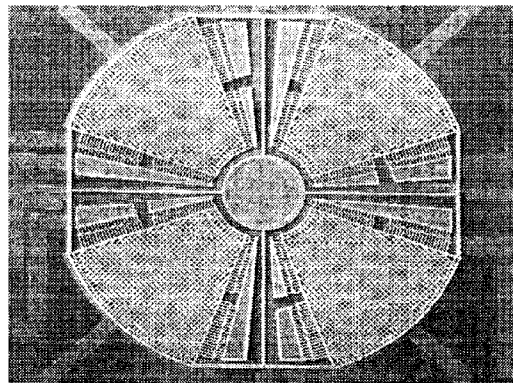


图 24 双轴多晶硅表面微机械陀螺 (韩国三星)

7 微机械陀螺的商业化及发展趋势

现代工业控制, 航空航天, 军用技术不可能离开惯性传感器; 汽车, 消费品和娱乐市场也开始依赖这些设备. 许多市场调查包括 SRI, NEXUS, System Planning 公司, SEMI 等一致认为微机械惯性传感器市场将每年以 $15\% \sim 25\%$ 的年增长率增长, 到 2003 年将超过 10 亿美元的产业.

微机械使用现代半导体制造技术来铸造机械结构. 使得成本、尺寸、功耗、环境生存能力、工作寿命与传统技术相比有量级上的提高. 如同半导体取代真空管, 微机械传感器正逐步替代传统惯性传感器.

目前, 低性能传感器市场已经由硅微机械占据.

微机械陀螺的性能在很短的几十年内得到了迅速的提高, 目前正由速率级向战术级精度迈进. 从1991年起, 根据随机游走系数定义的陀螺性能指标, 体微机械和表面微机械陀螺的性能在每2年便以10倍的速度得到提高(图25)^[3], 表面微机械陀螺与体微机械陀螺的性能差距也正越来越小, 微机械陀螺技术与传统陀螺技术在成本与性能上的对比见图6.

生产成本、性能和可靠性是微机械陀螺商业化的关键因素. 将产品成本降低到大规模汽车市场可接受的水平, 需要精密微机械、高度真空封装、高性能接口电路和电子调谐技术. Draper 和 Rockwell International 从1993年开始合作将 Draper 的硅音叉陀螺商业化应用到汽车领域. 其它许多公司也纷纷将各种类型的微机械陀螺推向商业市场, 如 BEI Systron Donner Inertial Division 的“GyroChip”系列微机械速率陀螺(www.systron.com), Irvine Sensors-MicroSensors 公司的硅“Microring”微机械音叉振动陀螺(www.microsensors.com), 韩国三星公司的单轴音叉陀螺(www.sem.samsung.com), Gyration 公司的“MicroGyro100”双轴速率陀螺(www.gyration.com), Inertial Science 公司的“RRS75”的微机械共振速率陀螺(inertialscience.com), CrossBow 的“VG”振动陀螺(www.xbow.com), 日本 MURATA 的“ENV”系列微机械陶瓷压电振动速率陀螺(www.murata.co.jp), Silicon Sensing Systems 公司(由日本 Sumitomo Precision Products 和英国 BAE Systems 组建)的“CRS”环形振动陀螺(www.siliconsensing.com), Watson Industries 公司的“ARS”压电型振动陀螺以及“VSG”振动壳型压电陶瓷陀螺等(www.watson-gyro.com).

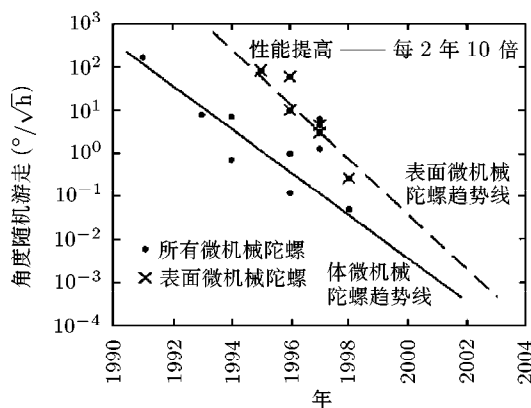


图 25 微机械陀螺性能发展趋势

在一个芯片上组合多轴微机械传感器是微机械惯性传感器的发展方向. 目前已经有6自由度、手指

甲大小的惯性测量单元(IMU), 其中组合了信号处理和电路.

BSAC (Berkeley Sensors & Actuators Center) 和 IMI 小组在 DARPA 赞助的 iMEMS 项目中为 BSAC 开发了一个集成在 $5\text{mm}\times 9\text{mm}$ 微片上的6自由度微惯性测量单元(MIMU)(图26), 该MIMU在Sandia国家实验室进行制造(www.imi-mems.com/pastproj.htm). Draper 最近验证了一个 131.1cm^3 大小的MIMU, 采用了 Draper 先进的混合信号专用集成电路和多芯片模块封装技术, 他们更进一步的工作是开发组合GPS和微机械传感器的微型组合制导系统. 其它公司如CrossBow公司也已经将开发出的6自由度MIMU(图27)形成产品推向了商业市场^[40].

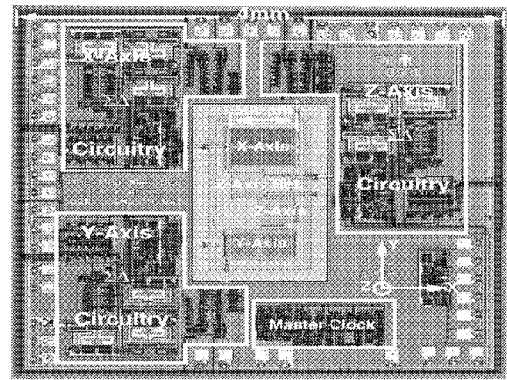


图 26 6自由度 MIMU 结构 (BSAC)

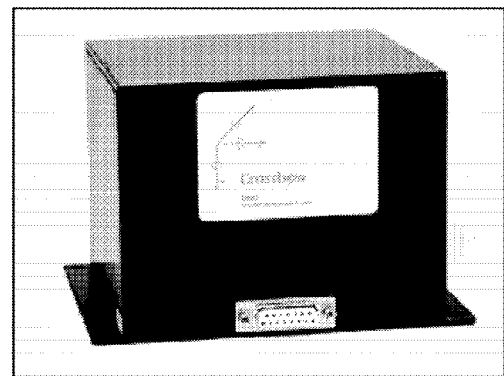


图 27 6自由度 MIMU (CrossBow)

全硅结构、混合模式(体/表面微机械)制造技术、高纵横比深度干蚀刻技术与集成电路技术相结合, 可以为未来高性能微机械陀螺提供需要的技术条件. 通过牺牲层蚀刻、高尺寸比、具有高品质因子的厚结构和一致性材料特性及应用芯片级真空封装技术来制造亚微米结构间隙, 将有助于微机械陀螺在性能上获得数量级的提高. 深干蚀刻技术形成的

厚、高尺寸比结构可以提供具有大尺寸振动结构的大的敏感电容,其有助于提高性能并简化封装.将结构间隙缩小到亚微米级,可使偏差和控制电压下降到CMOS能够接受的水平.此外对于未来的高性能战术级和惯性级微机械陀螺,利用结构的动态电子调谐技术对温度进行补偿则有助于消除传感器的长期漂移影响.

8 结束语

包括微机械陀螺应用的MEMS,在与材料和结构相关的行为和物理特征的整体表现和宏观理论存在很大的不同,在不同环境(如阻尼、热、电、磁、力等)和工作过程,力学参数存在明显的变化,尺度效应,表面效应,隧道效应将远离宏观力学和物理定律的约束,宏观物理定律已经不能完全对MEMS的设计、制造工艺、封装以及应用进行解释和指导.

尺度效应是指物理量随尺寸缩小并非等比例变化,当尺寸缩小到一定程度,宏观结构的模拟原理和相似理论的已知结论不再适用.如随尺寸的降低,与表面积相关的效应(如毛细现象和分子层吸附)增强,而与体积相关的效应(如重力和惯量)减弱.对于作用力,在尺度低于1mm时,表面力的影响相对体积力和惯性力的影响而言居主导地位,如静电力的强度与重力相比相对变强,因而在微机械结构的设计中多采用静电力驱动机构.但是使用现存的微制造技术,在功耗、体积或电压的限制下不能实现很大的作用力和作用位移,如静电力取决于作用电压,静磁力由电功率决定,而以硅材料为主的结构不能承受较大的弯曲变形^[6],这些限制妨碍了微机械陀螺性能的提高.此外,微机械陀螺与传统陀螺相比表现在尺寸的缩小,但实际的工作原理存在根本的区别,微机械陀螺通过驱动结构进行高频振动,因哥氏效应产生与输入角速度比例的哥氏加速度来感知输入角速度,其驱动和检测方式也必须遵循结构尺寸缩小情况下的尺度效应,即需要具有足够高检测灵敏度的方法来检测微小的作用力和作用位移的变化.

在微尺度下起主导作用的表面力包括静电力、表面张力、Van Der Waals力(原子和分子间量子力学效应产生的瞬时极化)、Casimir力(真空中具有高导电性的中性平面间的相互作用力)等.如何利用或克服这些力的效应是微机械研究的关键问题之一.但是在流体介质中,上述表面力的作用减弱,微尺度系统中以层流为主的流动形式不同于宏观系统中常观测到的湍流和不规则流动形式,这使微尺度下对不同流体介质进行完全混合变得比较困难,此外在微尺度下流体的行为也不能完全用现存的流体力学方程进行预测^[41].

MEMS中还包含大量的微尺度接触问题,如零外载荷下接触面的塑性屈服和接触过程的突跳现象等,尺度减小到一定程度,表面能和由其派生的表面力决定了固体表面粘着、接触、变形等微观现象,传统的连续介质力学方法不足以处理该类问题,新的微尺度粘着接触理论将是表面能(或表面力)与经典接触力学的结合^[42].此外在表面微机械制造中,如果表面粘附力高于微结构的恢复力,则存在一个广泛已知的摩擦问题,更困难的问题是微结构发生接触产生的运行摩擦,这种摩擦可能因毛细力,静电吸引力和直接化学粘接引起,使得表面微机械应用比体微机械应用更为困难.

以上表明,在MEMS中还存在着大量具有挑战性的力学问题需要研究,对这些问题的有效解决则会加快推动MEMS技术的发展.

参考文献

- 1 NEXUS Task Force. Market Analysis for Microsystems. <http://www.nexus-mems.com>
- 2 Yazdi N, Ayazi F, Najafi K. Micromachined inertial sensors. *Proc IEEE*, 1998, 1640~1659
- 3 Elwenspoek M, Henri Jansen. *Silicon Micromachining*. Cambridge: Cambridge University Press, 1999
- 4 Holmes A S. Microengineering—the next revolution? [http://www.ee.ic.ac.uk/optical/ProcIFHTSE\(2000\).pdf](http://www.ee.ic.ac.uk/optical/ProcIFHTSE(2000).pdf)
- 5 杨培根, 龚智炳. 光电惯性技术. 北京: 兵器工业出版社, 1999
- 6 Liu Chang, Cohen Y Bar. Scaling laws of microactuators and potential applications of electroactive polymers in MEMS. In: Proc of SPIE's 6th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Electroactive Polymer Actuators and Devices, 1999-05. 1999. 3669, 345~354
- 7 Tung Steve. An overview of MEMS inertial sensors. In: NSF 2000 Workshop on Manufacturing of Micro-Electro-Mechanical Systems, Florida, 2000. http://www.eas.asu.edu/~nsf2000/Table_of_Contents/ST.pdf
- 8 IMI. IMI history. <http://www.imi-mems.com>
- 9 Philip Wayne Loveday. Analysis and compensation of imperfection effects in piezoelectric vibratory gyroscopes: [dissertation]. Blacksburg: Virginia, Polytechnic Institute and State University, 1999. 4~8
- 10 BEI Systron Donner Inertial Division. A Quartz rotational rate sensor. <http://www.systron.com>
- 11 Greiff P, Boxenhorn B, King T. Silicon monolithic micromechanical gyroscope. *Transducers '91*. San Francisco CA, 1991. 966~968
- 12 Neil M Barbour, George T Schmidt. Inertial Sensor Technology Trends. In: Proceedings of the 1998 Workshop on Autonomous Underwater Vehicles. Cambridge: MA, 1998. 56~62
- 13 Alper Said Emre, Akin Tayfun. A symmetric surface micromachining gyroscope with decoupled oscillation modes. *Sen-*

- sors and Actuators, 2002, A97-98: 347~358
- 14 Andersson Gert I, Hedenstierna Nils, Svensson Per, et al. A Novel Silicon Bulk Gyroscope. In: The 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Sendai, Japan, 1999-06-07-10. 3D 1.1
 - 15 H Type Vibrating Gyroscope, IMT, <http://www.tu-bs.de/institute/imt/mitarbeiter/buetefisch/projekte/gyros.htm>
 - 16 Paoletti F, Gretillat M A, de Rooij N F. A silicon micromachined vibrating gyroscope with piezoresistive detection and electromagnetic excitation. In: Proceedings of the 9th IEEE Workshop on Micro Electro Mechanical Systems MEMS'96, Diego, USA, 1996-01-11-15. 162~167
 - 17 William A Clark, Roger T Howe, Roberto Horowitz. Surface micromachined z-axis vibratory rate gyroscope. In: Proc Solid State Sensor and Actuator Workshop, Hilton Head Island. SC. 1996-6
 - 18 Park K Y, Lee C W, Oh Y S, Cho Y H. Laterally oscillated and force-balanced micro vibratory rate gyroscope supported by fish hook shape springs. In: The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 97), Nagoya, Japan, 1997-01. 1997. 494~499
 - 19 Tanaka K, Mochida Y, Sugimoto M, et al. A micromachined vibrating gyroscope. *Sensors Actuators A*, 1995, 50: 111~115
 - 20 Oh Y, Lee B, Baek S, et al. A surface-micromachined tunable vibratory gyroscope. In: The Tenth Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 97), Nagoya, Japan, 1997-01. 1997. 272~277
 - 21 Richard Michael Kuhns. Design and Fabrication of a Micromechanical Gyroscope: [dissertation]. Wright-Patterson Air Force Base, Ohio: Air Force Institute of Technology. Air University, 1995. 21~15
 - 22 Rangen R R. Inertial technology for the future. Part X: Hemispherical resonator gyro. *IEEE Trans Aerosp Electro Syst*, 1984, AES20: 432
 - 23 ISTC Project 0138. Low-cost hemispherical resonator for small, commercial navigation systems. <http://www.techdb.ru/istc>
 - 24 Putty M W. A Micromachined Vibratory Ring Gyroscope: [dissertation]. Michigan: University of Michigan, 1995
 - 25 Ayazi F, Najafi K. Design and fabrication of a high-performance polysilicon vibration ring gyroscope. In: Eleventh IEEE/ASME International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems. Germany, 1998-01-25-29
 - 26 Ayazi F, Najafi K. High aspect-ratio polysilicon micromachining technology. In: The 10th International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Sendai, Japan, 1999-06-07-10. 2A3.1
 - 27 Ayazi F, Najafi K. A high aspect-ratio polysilicon vibrating ring gyroscope. Solid-State Sensor and Actuator Workshop. South Carolina, 2000
 - 28 Ayazi F, Najafi K. A HARPSS polysilicon vibrating ring gyroscope. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2001, 10(2): 169~179
 - 29 Zarabadi S, Vas T, Sparks D, Johnson J, et al. A resonating comb/ring angular rate sensor vacuum packaged via wafer bonding. In: International Congress and Exposition, Detroit Michigan, 1999-03-01-04. <http://delphi.com/news/techpapers/1999/> SAE Technical Paper series: 1999-01-1043
 - 30 Tony K Tang, Roman C Gutierrez, Christopher B Stell, et al. A packaged silicon MEMS vibratory gyroscope for microspacecraft. In: Proc IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS'97). Japan, 1997. 500~505
 - 31 Geiger W, Folkmer B, Merz J, et al. A new silicon rate gyroscope. In: Proc IEEE Micro Electro Mechanical Systems Workshop (MEMS'98). Germany, 1998. 615~620
 - 32 Funk K, Emmerich H, Schilp A, et al. A surface micromachined silicon gyroscope using a thick polysilicon layer. In: Micro Electro Mechanical Systems, 1999, MEMS'99. Twelfth IEEE International Conference, 1999-01-17-21. 1999, 57~60
 - 33 An S, Oh Y S, Park K Y, et al. Dual-axis microgyroscope with closed-loop detection. *Sensors and Actuators*, 1999, 73: 1~6
 - 34 McNie M, King D, Vizard C, et al. High aspect ratio micromachining (HARM) technologies for microinertial device. *Microsystem Technologies*, 2000, 6: 184~188
 - 35 Torti R, Tran H, Sandberg D, et al. Electrostatically suspended and sensed micromechanical rate gyroscope. In: Proc SPIE 1994 Symp. On Micromachining and Microfabrication. Austin, TX, 1994. 27~31
 - 36 Michael Kraft, Farooqui Mateen M, Evans Alan G R. Modelling and design of an electrostatically levitated disk for inertial sensing applications. *J Micromech Microeng*, 2001, 11(4): 423~427
 - 37 Seter D J, Degani O, Socher E, et al. Characterization of a novel micromachined optical vibrating rate gyroscope. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(2): 1274~1276
 - 38 Ofir Degani, Dan J Seter, Eran Socher, et al. A novel micromachined vibrating rate gyroscope with optical sensing and electrostatic actuation. *Sensors and Actuators A*, 2000, 83(1~3): 54~60
 - 39 Blanco J, John Geen. Micromachined inertial sensor development at northrop. In: Pro 49th Annual Meeting, Cambridge, MA. 1993-06-21-23. 1993. 577~586
 - 40 Crossbow Technology Inc. Inertial system. Inertial Product Training. <http://www.xbow.com>
 - 41 Jack W Judy. Microelectromechanical systems. (MEMS): Fabrication, design and applications. *Smart Materials and Structures*, 2001, 10: 1115~1134
 - 42 赵亚涛, 王立森, 孙克豪. Tabor 数、粘着数与微尺度粘着弹性接触理论. *力学进展*, 2000, 30(4): 529~537

THE STATE OF THE ART OF MICROMACHINED GYROSCOPES*

LI Xingang YUAN Jianping

College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract Along with the research and rapid development of Micro Electro-Mechanical Systems (MEMS), micromachined gyroscope as a part of MEMS driven by automobile industry has become a major focus of wide research and development in the past decades. Comparing with the conventional mechanical gyroscope, the solid-state gyroscope and optical gyroscope, the micromachined gyroscope has the advantages of low cost, small size, low weight and high reliability. With its performance improved further, the micromachined gyroscope can be applied in more extensive fields. In this paper, following a brief introduction of its definition, properties, performance indices, operation principles, classification and processes, various micromachined gyroscopes are discussed with respect to their structure, processes, operation principles and performance. Finally the current status of its commercialization and the trend of its developments in future are presented.

Keywords MEMS, micromachined, gyroscope, coriolis acceleration, process

~~~~~

欢迎投稿 欢迎订阅

## 中国自然科学核心期刊, 力学研究的向导 《力学进展》2004 年征订单

《力学进展》是我国力学界唯一的以综述、评论力学研究进展为特色的学术期刊, 由中国科学院力学研究所主办, 1971 年 9 月创刊, 自创刊以来共出版 135 期, 刊载内容包括综述评论性论文、译文, 力学学术动态, 自然科学基金力学学科相关信息. 它记录了力学科学前进的脚步, 丰富了力学科学资源的宝库. 1996 年荣获中国科学院优秀期刊三等奖, 2000 年荣获中国科学院优秀期刊二等奖. 2002 年在国内期刊统计结果排名中, 荣获 2001 年度百种中国杰出学术期刊. 主编谈镐生, 副主编钱伟长、王仁、庄逢甘、薛明伦、白以龙、洪友士、朱如曾等.

《力学进展》所登文章由力学界专家撰写或指导撰写. 对力学重大科研方向和课题进行全面、系统、深入的综述、评论和展望. 它站在力学研究的前沿, 覆盖力学的所有领域, 具有很高的科研导向作用和参考价值, 深受我国力学界专家、各层次科研人员、工程技术人员、科研管理人员和高校师生喜爱. 设置栏目有综述、译文、力学界、简评、书刊评介、科学基金和学术动态等. 读《力学进展》能使您开拓视野, 并从中获得更多的新知识与新信息.

本刊为季刊, 每期 144 页, 邮发代号: 82-331; 国外代号: Q693; 刊号: CN11-1774/O3; ISSN1000-0992. 2004 年每期定价 30 元, 全年 120 元.

欢迎力学及相关学科同仁订阅我刊, 定刊可到邮局, 也可与编辑部直接联系.

地址: 北京海淀区北四环西路 15 号, 中国科学院力学研究所, 《力学进展》编辑部.

邮编: 100080

电话: 010-62637035      传真: 010-62559588

E-mail: lxjz@cstam.org.cn

网址: [www.cstam.org.cn/publication/periodical/lxjz/homepage/lxjz.htm](http://www.cstam.org.cn/publication/periodical/lxjz/homepage/lxjz.htm)