

微机械陀螺原理与关键技术

高钟毓

(清华大学)

摘要 本文介绍两种结构的微机械陀螺的基本工作原理、主要性能指标以及设计和制造中的关键技术。

0 引 言

微机械陀螺是一类技术难度较大的微机电系统(MEMS),它是在硅微结构的微米/纳米技术基础上发展起来的。它由单晶硅片采用光刻和各向异性刻蚀工艺制造而成,具有显著的尺寸小、重量轻、可靠性高、抗振动冲击能力强以及大批量生产等优点,因此成本低、价格低廉。据文献^{[1][2][3]}报导,这类陀螺目前已经能够达到 $10^\circ/\text{h}$ 漂移性能指标,在战术武器、汽车工业以及增广GPS导航等方面,都有广泛的应用前景。在2000年以前,将有微机械惯性测量单元(MMIMU)产品问世,预计每只价格军用为500美元,民用仅为10美元。并且,将进一步克服精度壁垒,研制出腰带扣大小的惯性导航系统(INS)。

1 基本工作原理

微机械陀螺的基本工作原理都是由加速度计附加抖动装置组成。抖动装置有角振动和线振动两种。所以,从本质上来说,微机械陀螺是一种振动式角速度传感器。

1.1 框架式角振动陀螺^[2]

Draper Lab 于1989年研制出一种陀螺仪,它没有连续旋转的飞轮,而是绕挠性枢轴的振动部件,其原理结构如图1所示。它由内外两层框架组成,内框架上有淀积金的垂直质量,可以想象为陀螺。外框架在交变静电力驱动下绕枢轴振动,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,而在其他方向上很硬。当外框架以小角度振动时,内框架就能敏感绕框架平面法线的角速度。这时,内框架的输出信号频率与外框架的振动频率相同,而幅值与输入角速度成正比:

$$\theta_{1x} = \frac{I\theta_{2y}Q}{I_{1x}\omega_n}\omega_z \quad (1)$$

式中 $I = (I_{1x} + I_{1y} - I_{1z})$, $Q = \frac{1}{2\zeta}$ —谐振品质因素,

θ_{2y} —外框角振动幅度, $I_{1,i} = x, y, z$; 绕内框各轴的转动惯量,

ω_n —谐振频率, ω_z —输入角速度。

陀螺外框架运动的测量和控制是由两个埋藏式的电极电容进行的。而内框架是由两个桥式电极电容测量和控制的。陀螺本身工作在力反馈状态,通过静电力矩保持陀螺平衡位置。测量和施加平衡力矩采用同一对电容器,但二者的供电频率不同。

为了完全控制该陀螺仪,需要 7 个伺服电路:陀螺仪谐振器电路,频率控制电路,外框架振幅和倾斜控制电路,内框架倾斜和 Q 值控制电路以及温度控制电路。它们再平衡内框元件,以减小框架不正交和内框元件不平衡的影响。输出角速度信号电压与克服内框元件陀螺力矩所需要的静电平衡力矩成正比。

在理想条件下,外框驱动频率等于内框的谐振频率。为了得到高灵敏度,谐振的 Q 值应该越高越好。为此,陀螺必须密封在真空(3mTorr)罩内,以降低空气阻尼。这时, Q 值可达 2000。

陀螺芯片尺寸为 $0.6 \times 0.3 \times 3 \cdot 10^{-3} \text{mm}^3$, 挠性枢轴的厚度为 $0.25 \cdot 10^{-3} \text{mm}^3$, 预计漂移不定性为 $10^\circ/\text{h}$, 或者更好,适用于短时间导航。

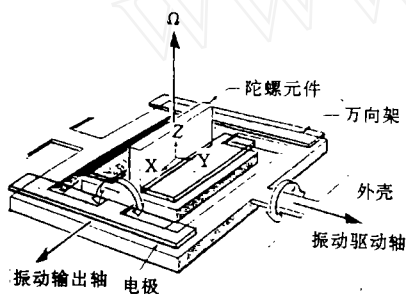


图 1 框架式角振动陀螺原理

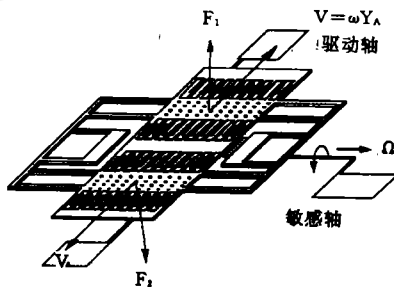


图 2 音叉式线振动陀螺原理

1.2 音叉式线振动陀螺仪^[4]

Draper Lab 和 Northrop corp. 于 1993 年和 1994 年研制了一种单晶硅音叉式线振动陀螺。它采用了硅微结构的梳状驱动音叉,原理结构如图 2 所示。

梳状驱动器的静电力可表示为:

$$f_s = \frac{1}{2} V^2 \frac{\partial C}{\partial x} \quad (2)$$

式中 V —外加电压,由直流偏置和交流分量组成,

C —间隙电容,

x —横向位移。

对于梳状驱动器, $\frac{\partial C}{\partial x} = \text{常数}$, 所以静电驱动力与质量横向位移关系极微弱,因而能采用大幅度振动,以提高陀螺仪的测量灵敏度。

当音叉在平面内以线速度 $v = \omega \cdot y_A$ 振动时,这里, ω 为振动频率, y_A 为振动幅值,如果基

片沿垂直于 v 的方向在平面内有惯性角速度 Ω 出现,那么,在哥氏力 F 的作用下,音叉的一个质量向上运动,另一个质量向下运动。两质量下方的电容器用来检测音叉的位移,并通过再平衡回路产生静电平衡力。音叉工作模式,叉子的两个质量反向运动,产生增强的陀螺信号,同时不敏感线加速度。为了优化分辨率和带宽,谐振驱动和敏感轴模式的特征频率应相差驱动频率的 5%。

折叠式悬臂桁架保证音叉(反平行)模式激励,而平移模式衰减。音叉模式的特征频率高于平移模式的特征频率。分开的特征频率使得音叉模式即使在质量和弹簧失配的条件下,也容易得到激励,因而,音叉可以在自激振荡回路中工作。回路谐振频率随温度、时间、应力或压力偏移,这就保证了不管环境干扰如何,陀螺始终工作在谐振状态,从而限制了外部频率源。

试验质量位置测量电容器由恒定的偏置电压和载波电压激励。试验质量的差动运动产生输入前置运算放大器的电流。前置放大器的关键要求是低噪音、高阻抗以及高增益带宽积。附加的处理电路是放大器和反调制器。

音叉式线振动陀螺的有效尺寸为 1mm。音叉振幅为 $10\mu\text{m}$ 。在 100mTorr 真空条件下,驱动轴 Q 值为 40000,检测轴为 5000。刻度因子为 $40\sim 90\text{mV/rad/s}$,非线性 $<0.2\%$ 。在 60Hz 带宽条件下,预期偏置稳定性和分辨率为 $10^\circ\sim 100^\circ/\text{h}$ 。

音叉式线振动陀螺与框架式角振动陀螺相比较,优点有:(1)加工简单;(2)驱动振幅大,性能较佳;(3)静平衡和较硬的弹簧降低了粘附作用。玻璃基片的低分布电容(5fp)使得该陀螺易于与混合电路相匹配。

2 关 键 技 术

发展微机械陀螺必须解决以下几个关键技术:

2.1 微机械结构参数设计

采用有限元分析和 CAD 技术,解决微结构挠性梁和挠性轴的变形、应力、振动模态分析以及抖动机构的动力学分析,选择和优化仪表结构方案。其中,必须注意以下几个问题:

首先是对称均匀性,这是设计和制造振动陀螺的最主要的因素。为了避免抖动机构和检测机构之间在力学环境条件下产生不必要的相互作用,结构上精密对称均匀是必要的。如果缺乏良好的对称均匀性,仪表就不可能有良好的平衡,外部的线加速度或振动将会引起角速度信号输出;同时,由于抖动机构具有分布质量和刚度,即使仪表在一个温度下平衡性很好,而在另一个温度下热膨胀也会破坏平衡性,因此,在设计时必须在集中质量和挠性耦合方面进行折中,使得结构的对称均匀性对微加工误差相对不灵敏。

其次是正交性,抖动和检测器的轴必须正交。如果不正交,抖动会产生巨大的干扰信号输出。虽然这种干扰信号的相位通常与有效的角速度信号相差 90° ,但是,这对于信号处理的相位精度和动态范围将造成严重的影响。

第三是灵敏度和带宽。检测器存在灵敏度、带宽以及抖动频率噪声之间的基本矛盾。为了保证仪表灵敏度和带宽,检测器必须具有合适的谐振频率和足够的品质因素 Q 。为了抑制抖动频率噪声,检测系统应该具有非周期特性,同时每个挠性轴的各个自由度尺寸比例应该加大,使得各个自由度的特征频率适当隔开。

2.2 微微法拉电容测量技术

由于微机械陀螺尺寸微小,而且只能采用电容检测方法,为了达到惯导级仪表的性能指标,电容测量要求分辨率达到 10^{-18} 法拉,位移测量应达到亚原子级。为此,在传感器结构、基片材料、布线、屏蔽等各方面都必须精心设计,使得有害的分布电容缩小到最低限度。同时,应在芯片上制造集成化的前置放大器。前置放大器应采用高输入阻抗、低噪声、高增益带宽积的结型场效应管。

2.3 恒幅、高 Q 值频率跟踪谐振器控制技术

陀螺仪的测量精度和灵敏度主要取决于谐振器的大幅度和高 Q 值的稳定性。一般硅微结构的自然频率是随温度等外界环境因素变化的,而且,由于高 Q 值,振荡的稳定性是关键。因此,必须采用自激振荡频率跟踪控制技术,以保证谐振器的恒幅、高 Q 值的高度稳定性。

2.4 三维硅微结构微米/纳米制造技术

为了得到 $1^\circ/\text{h}$ 的陀螺漂移精度,硅微结构的关键尺寸的加工必须达到 $1/10000$ 的相对精度。这对于光刻和刻蚀工艺都提出了严格的精度要求。如果光刻和刻蚀精度为 $1\mu\text{m}$,那么陀螺芯片尺寸必须为 1cm ,才能满足精度指标要求。然而,为了避免掏(凹)蚀过程释放的应力而引起大尺寸芯片弯曲,目前芯片尺寸选择为 1mm 左右,因此,加工精度必须达到 $0.1\mu\text{m}$,若依此类推, $0.01^\circ/\text{h}$ 的陀螺需要纳米级的制造精度。

2.5 传感器与电子线路集成技术

微机械陀螺是具有复杂的检测与控制电路的 MEMS 装置。硅微结构传感器与电子线路必须集成在一起。其方案有两种选择:一是全部集成在一个硅片上,这样体积小,便于大规模生产,但技术难度大,目前条件尚不成熟。二是采用混合电路结构,传感器和电子线路分为两体制造,然后组装在一起。从目前技术情况看,后者比较落实,应作为优选的过渡方案。

2.6 仪表性能和误差机理研究

与普通陀螺仪一样,微机械陀螺最终能否进入实际应用,占领惯性仪表的市场,其中一个最主要的因素是它的性能指标,因为其它的优点是明显的。因此,我们在着手进行研究时,应充分重视这类仪表性能的预报和误差机理的研究。其中包括仪表动力学方程、频率响应、灵敏度与结构参数关系式以及仪表误差与工艺误差参数的关系等。

当然,在进行仪表性能和误差机理研究时,理论分析和计算机仿真是必不可少的。但是,最终的结论应通过大量实际装置的试验才能获得。为此,需要一些专用的试验设备。

3 结 束 语

微机械陀螺是在微米/纳米制造技术基础上,最新发展起来的微型固态惯性仪表有广泛的应用前景。它的研制成功,将给惯性制导领域带来一场革命,其意义十分重大。无论是从微米/纳米技术,或者是从惯性技术,都应密切注意和积极推动这一新技术领域的进展。

参 考 文 献

- [1] 丁衡高,面向 21 世纪的军民两用技术——微米/纳米技术,中国惯性技术学报,1995 年,Vol. 3, No. 2
- [2] B. Boxenhorn, P. Greiff, A Vibratory Micromechanical Gyroscope, AIAA-88-4177-cp

- [3] J. Elwell, Progress on Micromechanical Inertial Instruments, AIAA-91-2765-cp
- [4] M. Weinberg, J. Bernstein, S. Cho, A. T. King, A. Kourepenis, and P. Ward, Micromechanical Tuning Fork Gyroscope Test Results, AIAA-94-3687-cp
- [5] A. S. Brown, MEMS: Macro Growth for Micro Systems, Aerospace America, Oct. 1994

The Operation Principle and Key Technique of Micromechanical Gyroscope

Gao, Zhong-yu

(Tsinghua University)

ABSTRACT: Two kinds of Micromechanical Gyroscopes being developed at the present time are introduced. One is gimbal vibratory gyroscope, the other comb-drive tuning fork rate gyroscope. Their operation principle and main performance are described. The Key techniques for designing and manufacturing these kinds of gyroscopes are discussed and analysed.

For a 1-mm silicon micromechanical gyroscope, the performance of 10 to 100deg/h for bias stability and resolution in a 60 Hz bandwidth has been proved to be actual in references [2][4]. It is expect that the micromechanical gyroscope will be extensively applied to auto industry, tactical weapons and augment GPS (global positioning system).

As viewed from either μm / nm technology or inertial technology, this research field is worthy of note and should be pushed forward.