

## Structural Design Study of the Symmetrical and Decoupled Microgyroscope

LIU Mei, ZHOU Bai-ling\*, XIA Dun-zhu

(Department of Instrument Science and Engineering Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** The cross coupling affects the performance of silicon microgyroscope. A symmetric and decoupling silicon microgyroscope was designed. The drive and sense supporting beams are same and symmetrically arranged. The drive and sense frequency are similarly affected by the manufacturing error and temperature change so that the frequency difference between drive and sense is small. The drive and sense machines vibrate linearly and are completely decoupled, so the coupling between drive and sense mode is small and the microgyroscope can oscillate steadily. Because the moving combs of the drive and sense machines glide along the fixed combs, the quality factor of the drive and sense mode is high and sensitivity is largely improved. The experiment was done and found the frequency difference between drive and sense is only 6 Hz, and their quality factors are respectively 145.2 and 117 in the atmospheric environment. The results show that the coupling error is markedly decreased compared to the undecoupling microgyroscope.

**Key words:** Silicon microgyroscope; symmetric and decoupling structure; structure design; finite element analysis

EEACC:7630;2575

## 对称解耦硅微陀螺仪结构设计研究

刘梅, 周百令\*, 夏敦柱

(东南大学 仪器科学与工程学院, 南京 210096)

**摘要:** 硅微机械陀螺仪的驱动模式和敏感模式间的交叉耦合制约了其性能的提高。设计了一种对称解耦硅微机械陀螺仪, 它的驱动机构与检测机构都做线性滑膜阻尼振动且完全解耦, 使得驱动和敏感模式之间的耦合小、结构振动平稳性好、品质因数高。该微陀螺仪的驱动与检测支承梁完全相同且对称分布, 使得驱动模式和敏感模式的谐振频率受加工误差和温度变化的影响近乎相同, 所以频率匹配性好, 结构的灵敏度大大提高。实验测试结果表明对称硅微机械陀螺仪的耦合误差得到了有效减小, 并且它的驱动和检测谐振频率仅相差 6 Hz, 其品质因数在空气条件下分别为 145 和 117, 检测模式的品质因数与采用压膜阻尼振动方式进行检测的硅微机械陀螺仪相比有了显著提高。

**关键词:** 硅微机械陀螺仪; 对称解耦; 结构设计; 有限元仿真

中图分类号: V245.554

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2008)03-0435-04

硅微机械陀螺仪是一种采用微加工技术制造, 用于测量物体的转动角或转动角速率的微型惯性传感器。与传统陀螺仪相比, 硅微机械陀螺仪具有体积小、重量轻、功耗低、可与电路集成、批量制作成本低的突出特点, 使得它在汽车、机器人、航空、炮弹等领域得到了广泛应用<sup>[1]</sup>。

硅微机械陀螺仪的工作原理是利用哥氏效应使得它的两个振动模式之间产生能量转换。但由于光

刻、刻蚀、键合、残余应力等加工误差的存在, 硅微机械陀螺仪在无哥氏效应的情况下, 其驱动模式的振动能量也会耦合到检测模式。耦合到检测模式的误差信号可分为两种, 一种与哥氏效应产生的有用信号频率相同, 相位相差 90 度, 该耦合误差称为正交耦合误差; 另一种误差信号与哥氏效应产生的有用信号同频同相或反相, 该信号称为偏移耦合误差。这两种信号均对硅微机械陀螺仪的性能产生了严重

影响<sup>[2-3]</sup>。

本文设计了一种结构对称解耦的硅微机械陀螺仪,它的驱动和检测支承梁完全相同且对称分布,使得驱动与敏感的固有谐振频率受加工误差和温度变化的影响近乎相同,因此驱动模态和检测模态的频率匹配性好。它的驱动机构和检测机构都做线性振动并完全解耦,所以驱动和敏感之间的耦合小,结构振动平稳性好。由于驱动和检测机构的梳齿都做滑膜阻尼振动,所以驱动与检测模态的品质因数高,结构的灵敏度大大提高。

### 1 工作机理

本文设计的对称解耦硅微机械陀螺仪是一种采用振动元件来检测转动角速率的双线振动式硅微机械陀螺仪。它的简单模型可表示为由质量块、驱动机构、检测机构、弹簧及阻尼器组成的两自由度系统,如图1所示<sup>[4]</sup>。

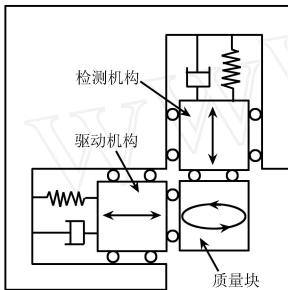


图1 对称解耦硅微机械陀螺仪模型

由图可知,该对称解耦硅微机械陀螺仪的驱动机构和检测机构都做线性振动并完全解耦,即驱动机构振动时,检测机构不产生振动,所以驱动模态与敏感模态之间的耦合大大减小。它的工作机理是由驱动机构产生静电力,驱动质量块沿着水平方向振动,当垂直纸面方向有转动时,竖直方向将产生哥氏力,激励质量块同时沿着竖直方向振动。因竖直方向的振动幅值与转动角速率成正比,所以通过检测机构检测其振动幅值,则可以得出垂直纸面方向的转动角速率。理想情况下,对称解耦硅微机械陀螺仪的运动方程如下所示:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{x}{Q_x} \dot{x} + \frac{2}{m} x &= \frac{F_d}{m} + 2 \dot{y} \\ \ddot{y} + \frac{y}{Q_y} \dot{y} + \frac{2}{m} y &= \frac{E_x}{m} - 2 \dot{x} \end{aligned} \quad (1)$$

式中,  $x$  和  $y$  分别为硅微机械陀螺仪的驱动模态和检测模态的固有谐振频率,  $Q_x$  和  $Q_y$  分别为驱动与检测模态的品质因数。假定  $F_d = f_d \sin \omega t$ ,  $f_d$  为静电驱动力的幅值。由于  $2 \dot{y}$  非常小,可忽略不计,则稳态时,驱动模态的简谐振动为

$$x = \frac{f_d Q_x \cos(\omega t - \phi)}{m \omega^2} \quad (2)$$

当采用开环检测时,  $F_s = 0$ ,那么哥氏力作用下检测方向的运动表达式为

$$y = \frac{-2 Q_y f_d \cos(\omega t - \phi)}{m \omega \sqrt{\left(\frac{2}{m} - \omega^2\right)^2 + \left(\frac{\omega}{Q_y}\right)^2}} \quad (3)$$

式中,  $\phi = \arctan\left(\frac{\omega}{Q_x}\right) / \left[\frac{2}{m} - \omega^2\right]$ 。从式(3)可知,当驱动频率与检测频率相匹配时,即  $\omega_x = \omega_y$ ,敏感模态的振动幅值达到最大,此时结构的灵敏度最高

$$\left| \dot{y} \right| = \frac{2 Q_x Q_y f_d}{m \omega^3} \quad (4)$$

### 2 结构设计

对称解耦硅微机械陀螺仪的结构简图和封装图分别如图2和图3所示。它的驱动和检测支承梁完全相同且对称分布,这使得驱动和敏感模态的谐振频率受加工误差和温度变化的影响近乎相同,因此驱动与检测模态谐振频率匹配性好,结构的灵敏度高。该微陀螺仪驱动与检测机构都做线性振动且完全解耦,使得结构振动平稳,并消除了静电驱动力引起的正交耦合误差。由图可知,检测机构的活动梳齿相对固定梳齿作滑膜阻尼振动,使得硅微机械陀螺仪敏感模态的品质因数显著提高,从式(4)可知,结构的灵敏度也得到了提高。

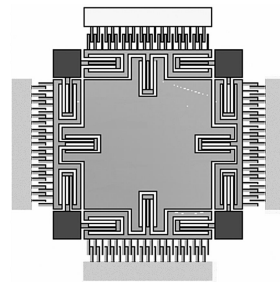


图2 对称解耦硅微机械陀螺仪

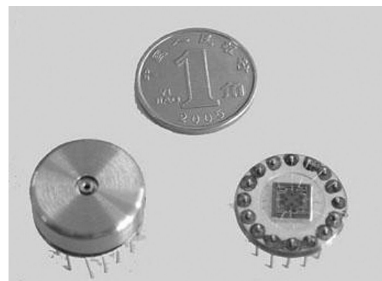


图3 对称解耦硅微机械陀螺仪封装图

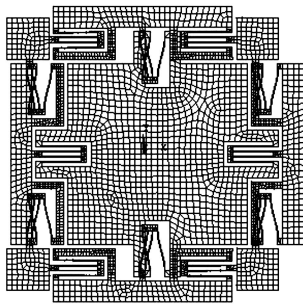
### 3 ANSYS 仿真

采用有限元分析软件 ANSYS 对所设计的对称

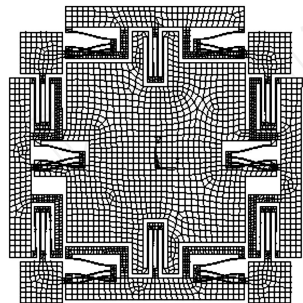
解耦硅微机械陀螺仪进行了模态仿真,仿真结果如表 1 所示。从表中可知,驱动和敏感模态相匹配,且驱动模态和敏感模态与干扰模态得到了很好的隔离。图 4 给出了结构的前两阶模态,分别为驱动模态和敏感模态。

表 1 对称解耦硅微机械陀螺仪的固有频率

模态号	1	2	3	4
固有频率/ Hz	6554	6557	12220	22004



驱动模态



敏感模态

图 4 驱动和敏感模态仿真图

## 4 实验测试

### 4.1 驱动模态

在微陀螺的左右两端固定电极上分别施加相位相反且频率等于微陀螺的固有频率的交流电压,并叠加一个直流偏置电压,使得微陀螺沿驱动方向发生谐振。在空气条件下,实验测得的驱动模态的频率特性如图 5 所示。

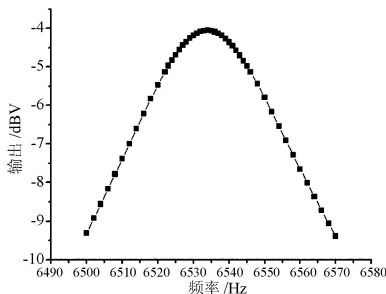


图 5 驱动模态的频率特性

从上图可知,驱动模态的谐振频率为 6 534 Hz。硅微机械陀螺仪的品质因数计算公式

$$Q = \frac{f_c}{f_H - f_L} \tag{5}$$

式中, $f_c$ 为频谱曲线峰值所对应的频率, $f_H$ 和 $f_L$ 分别为峰值下降 3 dB 所对应的前后频率。采用上述公式,计算可得驱动模态品质因数为 145.2。

### 4.2 敏感模态

采用相同的方法,在微陀螺的上下两端固定电极上施加电压,使得微陀螺沿敏感方向发生谐振得到敏感模态的频率特性曲线。从图中可知,敏感模态的谐振频率为 6 540 Hz,计算可得其品质因数为 117。

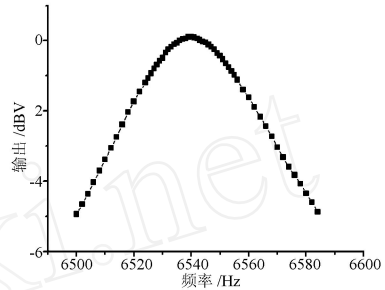


图 6 敏感模态的频率特性

### 4.3 耦合误差

耦合误差的测试方法是在对称解耦硅微机械陀螺仪的公共端加频率为 90 kHz,幅值为 4 V 的载波电压,采用自激励振荡电路使其沿驱动方向产生谐振,然后从该陀螺的固定检测电极上差分输出的信号经过前置放大器放大后,采用动态分析仪进行采集,该信号反映了对称解耦硅微机械陀螺仪耦合误差的大小,测试结果如图 7 所示。

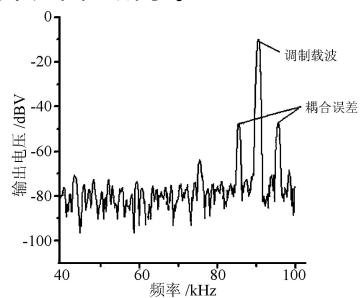


图 7 对称解耦硅微机械陀螺仪的输出信号频谱图

图中,在频率点(90 ±6.534) KHz 的幅值为微陀螺仪耦合误差的大小。经过计算,对称解耦硅微机械陀螺仪耦合误差的等效输入角速率为 98.878 9 s,由此可见,对称解耦硅微机械陀螺仪由于采用了驱动机构和检测机构解耦的结构形式,它的耦合误差得到了有效减小。

## 5 结论

本文设计了一种驱动和检测支承梁完全相同且对称分布的解耦硅微机械陀螺仪。经实验测试,

驱动和检测模式的谐振频率分别为 6 534 和 6 540 ,比仿真结果略低,这主要是由于加工时的过刻蚀引起的。但由于此陀螺的对称结构形式,加工误差对驱动和敏感模式的影响几乎相同,所以驱动与检测的谐振频率只相差 6 Hz。实验测试驱动与检测的品质因数分别为 145.2 和 117。通常情况下,采用压膜检测的硅微机械陀螺仪的检测模式品质因数只有 10 左右,由此可见该陀螺的检测模式品质因数有了显著提高。经测试对称解耦硅微机械陀螺仪耦合误差的等效输入角速率为  $98.878 \text{ }^\circ/\text{s}$ ,与本实验室设计的半解耦双线振动式硅微机械陀螺仪相比,其耦合误差得到了有效减小。

#### 参考文献:

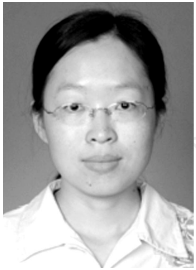
[1] Yazdi N, Ayazi F, and Najafi K, Micromachined Inertial Sen-

sors[J]. Proceedings of IEEE, 1998 86(8): 1640-1659.

[2] Clark W A. Micromachined Vibratory Rate Gyroscopes[D]: PhD Dissertation, American: Engineering-Mechanical Engineering and Computer Science, University of California, Berkeley, 1997.

[3] Braxmaier M, Gaiser A, Link, T, et al. Cross-Coupling of the Oscillation Modes of Vibratory Gyroscopes [C]// 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems, 2003: 167-170.

[4] Said Emre Alper and Tayfun Akin. Symmetrical and Decoupled Nickel Microgyroscope on Insulating Substrate[J] Sensors and Actuators A: Physical, ? 2004 115(2-3): 336-350.



刘梅(1977-),女,博士研究生,主要研究方向为微型惯性传感器的设计及仿真,lium45@163.com



周百令(1939-),男,教授、博士生导师。主要从事惯性传感器、导航定位与测控技术研究,zhoubailing@seu.edu.cn