

文章编号 1000-5013(2001) 04-0380-05

微机械振动陀螺隔离耦合的结构设计

李文望

(鹭江大学机械系, 厦门 361005)

摘要 微机械振动陀螺是新型的惯性元件. 其误差源主要有微机械结构的 Brownian 噪声、电路噪声、机械耦合误差, 以及电子机械耦合误差等. 这些误差严重影响着陀螺仪的精度. 由于制造误差等引起的机械耦合误差, 可以通过改善陀螺仪的结构来减小耦合误差. 文中从结构设计方面, 提出单级隔离耦合和双级隔离耦合的结构方案, 有效减小机械耦合误差, 提高了精度.

关键词 微陀螺, 机械耦合误差, 隔离耦合

中图分类号 TH 824+. 301

文献标识码 A

微机械振动陀螺, 是一类难度较大的微机电系统(MEMS). 这种新型陀螺仪具有体积小、重量轻、可靠性高、抗冲击、易于数字化和智能化等一系列优点. 提高机械振动陀螺的精度、灵敏度和降低费用, 是研究的重点.

1 机械振动陀螺仪的工作原理及机械耦合原理

1. 1 机械振动陀螺仪的工作原理^[1, 2]

微机械振动陀螺可以简化为质量-弹簧-阻尼集中参数系统. 它一般由振动质量和梁组成. 振动质量可以在两个正交方向自由振动. 图1是振动陀螺的集中参数模型. 当质量块受到外力的作用沿 x 轴方向振动, 且整个模型在基座带动下以角速度为 Ω 旋转时, 质量块会受到沿 y 轴方向的哥氏惯性力的作用, 从而使质量块沿 y 轴方向振动. 两个方向的运动方程分别为

$$m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = F_0 \sin \omega t, \tag{1}$$

$$m\ddot{y} + c_y\dot{y} - 2m\Omega\dot{x} + k_y y = 0, \tag{2}$$

m 代表质量, c_x, c_y 分别表示 x, y 方向的粘性阻尼, k_x, k_y 分别表示 x, y 方向的弹簧刚度. 当质

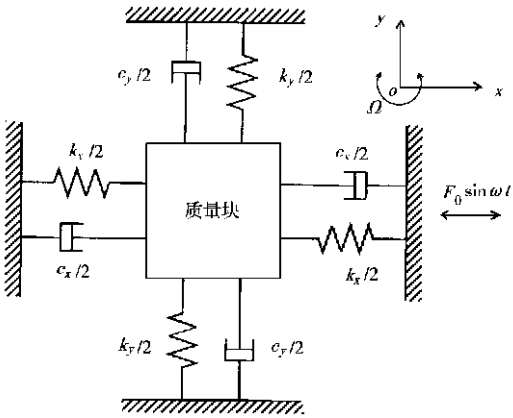


图1 振动陀螺集中参数模型

量块以其固有频率振动时, 由式(1)和(2)可得

$$x(t) = -x_m \cos \omega t,$$

$$y(t) = \frac{2m\Omega\omega x_m}{k_y} \cdot \frac{\sin(\omega t - \varphi)}{\{1 - (\omega/\omega)^2\}^2 + (\omega/Q_y\omega)^2},$$

其中 $x_m = \frac{F_0 Q_x}{k_x}$, $\varphi = \tan^{-1} \frac{\lambda}{Q_y(1-\lambda^2)}$, $\lambda = \frac{\omega}{\omega}$, $Q_x = \frac{m\omega}{c_x}$, $Q_y = \frac{m\omega}{c_y}$.

1.2 机械耦合原理^[1]

微机械振动陀螺的质量块和梁由于存在制造误差, 一般不能完全对称. 因此, 驱动振动的能量会传递给 y 方向, 导致两个方向振动的耦合. 这种耦合取决于驱动振动的振幅和速率, 其运动方程分别为

$$m\ddot{x} + (c_x - c_c)\dot{x} + c_c\dot{y} + (k_x - k_c)x + k_y y = F_0 \sin \omega t,$$

$$m\ddot{y} + (c_y - c_c)\dot{y} + (c_c - 2m\Omega)\dot{x} + (k_y - k_c)y + k_c x = 0,$$

其中 k_x 和 c_c 分别为振幅和速率的耦合系数. 当 c_c 很小, 且 $\Omega = 0$ 时, 其运动方程为

$$m\ddot{x} + c_x \dot{x} + (k_x - k_c)x = F_0 \sin \omega t,$$

$$m\ddot{y} + c_y \dot{y} + k_y y + k_c x = 0.$$

这里, $c_c = 0$, $x \gg y$, $k_x \gg k_c$, 且 $\Omega = 0$. 当质量块以其固有频率振动时, 方程的解为

$$x(t) = -x_m \cos \omega t,$$

$$y(t) = - (k_c x_m / k_y) \cdot \sin(\omega t - \varphi) / \{ [1 - (\omega/\omega)^2]^2 + (\omega/Q_y\omega)^2 \}.$$

当 $\varphi = 0$ (或 180°) 时, 质量块沿着与 x 轴成一个角度作直线运动, 如图2(a)所示^[1]. 另一方面, 当 k_c 很小且 $\Omega = 0$ 时, 其运动方程为

$$m\ddot{x} + c_x \dot{x} - c_c \dot{y} + k_x x = F_0 \sin \omega t,$$

$$m\ddot{y} + c_y \dot{y} + c_c \dot{x} + k_y y = 0.$$

这里, $k_c = 0$, $x \gg y$, $c_x, c_y \gg c_c$, 且 $\Omega = 0$. 当质量块以其固有频率振动时, 方程的解为

$$x(t) = -x_m \cos \omega t,$$

$$y(t) = (c_c \Omega x_m / k_y) \cdot \frac{\cos(\omega t - \varphi)}{\{1 - (\omega/\omega)^2\}^2 + (\omega/Q_y\omega)^2}.$$

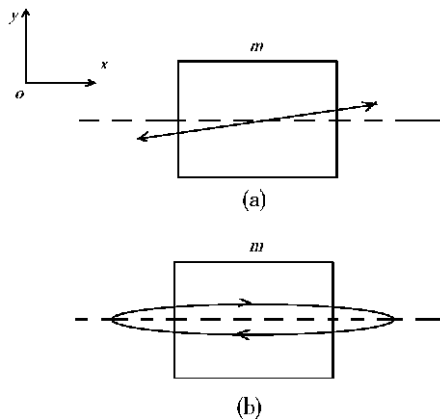


图2 耦合运动轨迹

当 $\varphi = 0$ (或 180°) 时, 质量块的运动轨迹为椭圆, 如

图2(b)所示^[1]. 分析结果表明, 对于微机械振动陀螺, 机械耦合的类型可以通过质量块的振动形式来确定.

2 隔离耦合的微机械振动陀螺的结构设计

以梳状驱动平板式振动陀螺为例, 对隔离耦合的微机械振动陀螺的结构设计进行分析. 图3所示是结构简单的、没有隔离耦合的梳状驱动平板式振动陀螺. 带有梳状电极的长方体多晶硅平板, 通过挠性支臂与单晶硅底座相连, 并被支悬在底座的上方. 当在固定的梳状电极上施

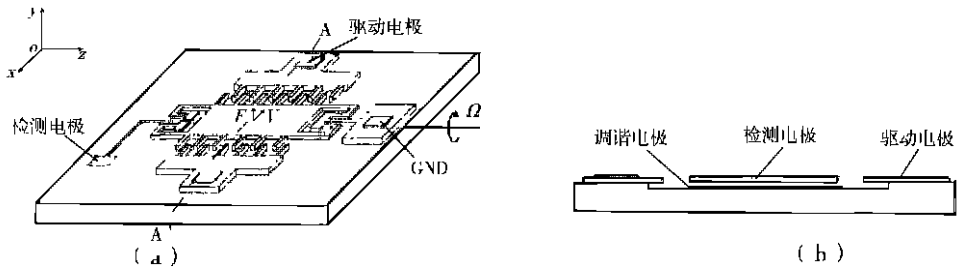


图3 梳状驱动平板式振动陀螺

加带有直流偏置,但相位相差 180° 的交流电压时,将产生沿驱动轴交变的静电驱动力,从而引起平板沿驱动轴作交变的线振动.当壳体绕输入轴以角速度 Ω 相对对惯性空间转动时,将形成沿输出轴交变的哥氏惯性力.由此引起平板沿输出轴作线振动,且振幅与输入角速度 Ω 成正比.此振幅可由平板与底座之间的电容的变化检测,其驱动模态和检测模态的振动形式,如图4所示^[1].

2.1 单级隔离耦合的结构设计

单级隔离耦合的梳状驱动平板式振动陀螺的结构,如图5所示.它的特点是驱动部分和检测部分有各自独立的梁,振动质量通过4条梁(内梁)支撑与支悬在底座上方的框架连接.其它结构与没有隔离耦合的梳状驱动平板式振动陀螺一样.陀螺仪工

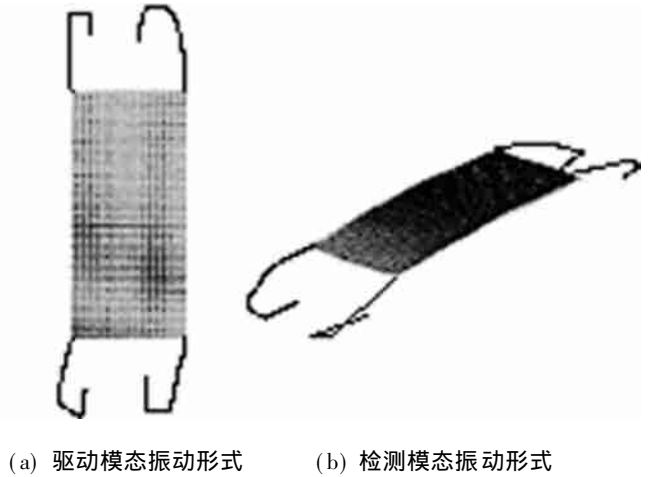


图4 没有隔离耦合的振动模态

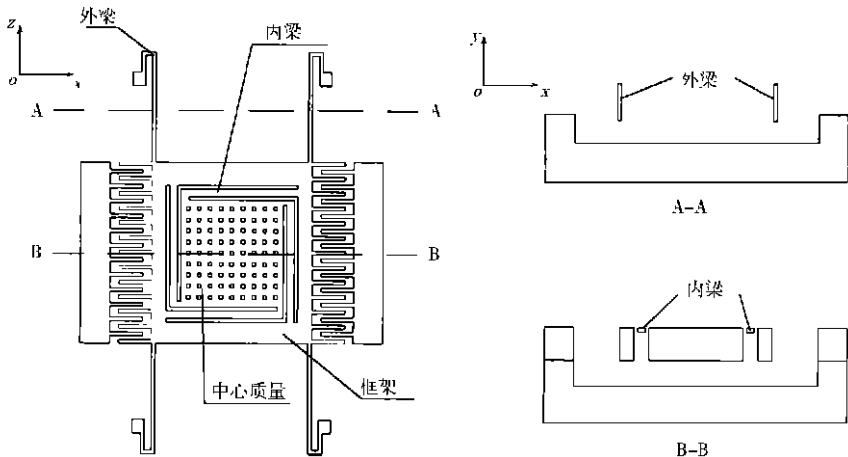


图5 单级隔离耦合结构

作时,对于驱动的振动形式,外梁沿着 x 方向弯曲,而内梁不会产生变形.对于检测的振动形

式, 内梁沿着 y 方向弯曲, 外梁不会产生变形. 这表明了外梁和内梁各自对 y 和 x 方向有很好的刚度, 它们在两种振动形式中有各自的独立性. 由于驱动的振动形式对检测部分的梁没有影响, 所以它们之间的机械耦合就很弱. 单级隔离耦合的梳状驱动平板式振动陀螺驱动模态和检测模态的振动形式, 如图6所示.

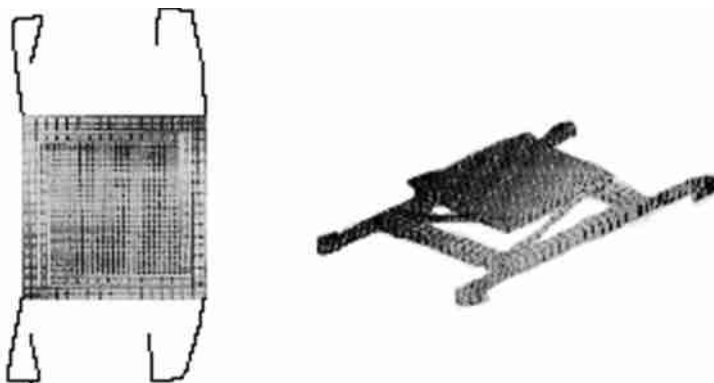


图6 隔离耦合的振动模态

2.2 双级隔离耦合的结构设计

经过对单级隔离耦合的梳状驱动平板式振动陀螺的分析可以看出, 检测模态的质量运动有两个自由度. 这样固联在振动质量的检测电极反映了两个方向的运动, 从而存在着另一个误差源. 为了解决这个问题, 可以采用双级隔离耦合, 其结构如图7所示^[1]. 当陀螺仪工作

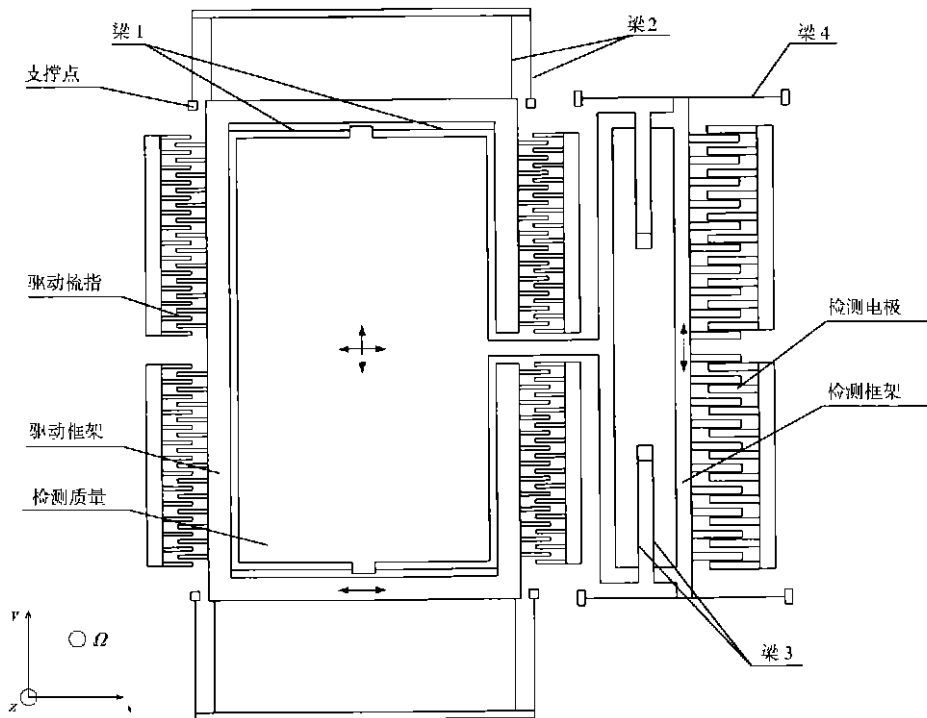


图7 双级隔离耦合结构

时, 振动质量一方面随驱动力的交变沿着 x 方向振动, 另一方面在哥氏惯性力的作用下沿着 y 方向. 右边的检测部分单独支悬在底座上, 通过梁5和梁4与振动质量相连, 使得检测部分只有沿着 y 方向的振动, 隔离了 x 方向的振动.

3 结束语

采用隔离耦合的设计, 可以大大降低由于制造误差使结构不对称引起的藕合. 同时, 还可以降低检测模态的振动影响梳状驱动电极间的电场对称, 降低“悬浮效应”. 这样, 可大幅度提高陀螺仪的精度.

参 考 文 献

- 1 Mochida Y, Tamura M. Micromachined vibrating rate gyroscope with independent beam for the drive and detection modes[J]. *Sensors and Actuators*, 2000, (80): 170 ~ 178
- 2 Kawai H, Atsuchi K I, Tamura M. High-resolution microgyroscope using vibratory motion adjustment technology[J]. *Sensors and Actuators*, 2001, (90): 153 ~ 159
- 3 Geiger W, Folkmer B. New designs micromachined vibrating rate gyroscope with decoupled oscillation modes [J]. *Sensors and Actuators*, 1998, (66): 118 ~ 124
- 4 阮爱武. 硅微机械陀螺仪的新进展及其方案分析[J]. *中国惯性技术学报*, 1998, 6(2): 67 ~ 72

Structural Design of Spacer Coupling for a Micromachined Vibrating Gyroscope

Li Wenwang

(Dept. of Mech. Eng., Lujang College, 361005, Xiamen)

Abstract Micromachined vibrating gyroscope is a new type inertial component. Its error source includes Brownian noise, circuit noise, error of mechanical coupling, and error of electro-mechanical coupling of micromachined structure. These errors seriously affect the precision of gyroscope. Among them, the error of mechanical coupling, which comes from structural unsymmetry due to manufacturing error, can be reduced by improving structure of gyroscope. From structural design, the author proposes structural plan of single spacer coupling and double spacer coupling. By which the error of mechanical coupling can be effectively reduced and the precision can be improved.

Keywords microgyroscope, error of mechanical coupling, spacer coupling