

## 基于隧道效应振动梁式陀螺仪自检电极设计\*

王凌云, 陈义华, 孙道恒

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 在微机电系统内建立自检系统是提高系统运行可靠性、安全性的重要手段之一。陀螺仪中的 Coriolis 力和其他惯性力存在一定的差别, 即使在恒定的角速度输入下, Coriolis 力也是一种动态变化的力。通过一对平板电极, 其中一个平板电极的边缘按照一定的函数变化, 当陀螺仪的悬臂梁振动时, 其平板间的静电力的变化能很好地模拟陀螺仪中的 Coriolis 力, 有限元分析结果也表明: 应用该方法完全能实现陀螺仪的自检和测试。

**关键词:** 隧道效应; 可靠性; 自检; 陀螺仪; 平板电极

**中图分类号:** TP212      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-9787(2006)05-0061-03

## Design of self-test electrode for tunneling-based gyroscope with vibrating cantilever\*

WANG Ling-yun, CHEN Yi-hua, SUN Dao-heng

(Department of Mechanical and Electric Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** One of important way to improve the reliability and safety of MEMS is to use a built-in self-test. There are some differences between Coriolis force and other inertial force in gyroscope. The Coriolis force is dynamic, although the angular rate is constant. A pair of plate electrodes is used, the boundary of one of them changes according to a special function. When the gyroscope's cantilever oscillates, the electrostatic force between the two plate electrodes can perfectly simulate the Coriolis force in gyroscope. The result of finite element analysis (FEA) also indicates this design can be used to realize the aim of self-testing in the gyroscope.

**Key words:** tunnel effect; reliability; self-test; gyroscope; plate electrode

### 0 引言

随着微电子技术和微机电技术的快速发展, 器件的集成度越来越高, 因而, 器件的可靠性问题已经引起微系统设计、生产和消费人员越来越多的注意, 一种提高微器件可靠性的方法就是在微系统内部建立自检系统<sup>[1,2]</sup>。通过自检系统的建立, 就能方便知道器件的工作状况, 从而能及时避免因器件失效所造成的不良后果, 这一点对于关键性安全领域使用的传感器 (例如: 车辆上安全气囊使用的加速度计) 显得尤为重要。除此之外, 在器件中建立自检系统, 能大大地提高器件的可测试性, 缩短器件的测试时间。

在微机电系统中, 自检系统的建立往往是通过一定的方式在器件的内部模拟器件的敏感输入量 (如, 压力, 加速度等), 使器件输出测试信号, 通过输出信号和标定信号的比较来达到系统的自检。模拟敏感输入的主要方式有: 压

电效应<sup>[2]</sup>、热效应<sup>[3]</sup>和静电力。本文将在对振动梁式陀螺仪工作原理的分析的基础上, 应用静电力, 提出一种隧道梁式陀螺仪自检电极的设计方法。

### 1 隧道梁式陀螺仪的工作及检测原理

#### 1.1 振动梁式陀螺仪中的 Coriolis 力

一种基于隧道效应的振动梁式陀螺仪的设计<sup>[4]</sup>如图 1 所示, 其工作原理是: 悬臂梁受到驱动电极两端的驱动电压的激励时, 沿着  $x$  方向前后振动, 当整个结构感受到绕  $y$  方向的角速度时, 由于哥氏效应, 悬臂梁将沿  $z$  方向上下振动, 使得悬臂梁和硅尖之间的间距发生变化, 从而引起隧道电流的变化, 这种变化趋势通过反馈电路在控制电极上加上反向电压使隧道间距处于平衡状态, 由反向电压便可得出角速度的大小。

设陀螺仪在驱动方向 ( $x$  方向) 受到  $F(t) = F_0 \sin \omega t$  的作用, 当在  $y$  方向有角速度  $\omega_y$  输入时, 陀螺仪的驱动模态和

收稿日期: 2005-10-21

\*基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50275127); 福建省自然科学基金资助项目 (A0110003); 福建省科技计划重点资助项目 (2002H022)

检测模态分别由如下动力学方程来表示 [5, 6]

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

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

式中  $m$  为检测质量;  $c_x, c_y$  分别为驱动方向和检测方向的阻尼系数;  $k_x, k_y$  分别为驱动方向和检测方向的弹性系数;  $F_0$  为静电驱动力的最大幅值;  $\omega$  为静电驱动的角频率;  $\ddot{x}, \dot{x}, x$  分别为  $x$  方向的振动加速度、速度和位移;  $\ddot{y}, \dot{y}, y$  分别为  $z$  方向的振动加速度、速度和位移。为了获得较高的灵敏度和驱动方向上较大的振幅, 其外加静电驱动电压的频率往往等于梁在驱动方向上的固有频率 [6]。在该状态下, 其驱动模态的稳态解为

$$x(t) = -x_m \cos \omega t, \tag{3}$$

式中  $x_m = \frac{F_0 Q_x}{k_x}, Q_x = \frac{m}{c_x \omega}$ ,  $x_m$  为振动方向上的最大振幅;  $Q_x$  为振动方向上的品质因数;  $\omega$  为驱动方向上的固有频率。

由于 Coriolis 力  $F_c = 2m\dot{x}\dot{z}$  因而, 当一恒定的角速度输入时, 振动梁式陀螺仪的 Coriolis 力为

$$F_c = 2m\dot{x}_m \dot{z} \sin \omega t. \tag{4}$$

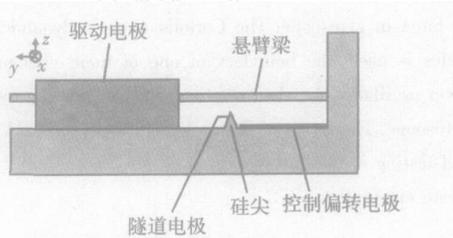


图 1 振动梁式陀螺仪的结构

Fig 1 Structure diagram of gyroscope with vibrating cantilever

### 1.2 隧道梁式振动陀螺仪的检测原理

隧道陀螺仪的检测原理如图 2 所示, 当外界有角速度输入时, 悬臂梁将敏感到由于 Coriolis 力在检测模态方向上产生的振动, 这种振动引起隧道电流的改变, 隧道电流信号经放大后, 输出给检测反馈控制电路与被控参考值进行比较。反馈控制系统根据误差得出控制量, 通过控制电路改变偏转电极上的电压, 平衡 Coriolis 力作用在悬臂梁上的力矩, 以此保证悬臂梁的动态平衡, 使隧道电流保持在一个恒定的值。通过反馈控制的调整量, 就可以检测出输入角速度的大小, 由于反馈控制调整输出信号的大小是调制在驱动电极的驱动频率上的, 因而, 通过同步解调就可以读出角速度的大小。

由于隧道电流对隧道间隙的位移非常敏感, 而通过上述的动态平衡可以保证该电流恒定在某一个特定的值, 因此, 在正常工作状态下, 可以认为隧道间距和悬臂梁在敏感方向上的振动幅度非常的小。

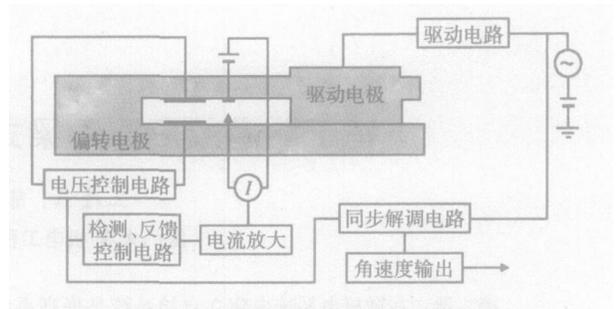


图 2 隧道梁式振动陀螺仪的检测原理

Fig 2 Testing principle diagram of tunneling-based gyroscope with vibrating cantilever

### 2 Coriolis 力的模拟

在很多加速度计中, 都使用了平板电极作为自检电极, 通过改变驱动电压, 导致平板间静电力的改变, 以此来模拟外界加速度所产生的惯性力。在陀螺仪中, 比较方便简单的方式也是使用平板电极作为自检电极, 然而, 在陀螺仪中, 要通过平板来模拟一个 Coriolis 力和普通的传感器中模拟一个惯性力存在一些不一样的地方。通过式 (4) 可以发现, 即使在恒定的角速度输入的情况下, Coriolis 力是在驱动方向上的振动下随着时间不断变化的量, 而在普通的加速度传感器中, 当外界有一个恒定的加速度输入时, 在加速度计内部将产生一个恒定的惯性力, 因而, 只要通过平板的静电力模拟一个静态的惯性力就可以完成自检, 没有动态的变化。在陀螺仪中, 如何设计一个自检电极, 能让它随着驱动方向的振动而按式 (4) 变化, 则是设计自检电极所要考虑的。

在悬臂梁的末端加一个自检的平板电极, 在不考虑边缘效应的情况下, 两平板电极之间的静电力为

$$F_c = \frac{AU^2}{2d^2}, \tag{5}$$

式中  $\epsilon_0$  为两平板之间的介电常数;  $A$  为两平板之间的正对面积;  $U$  为加在两平板之间的电压;  $d$  为两平板之间的距离。

要由静电力模拟 Coriolis 力, 所以, 可以令  $F_c = F_c$ 。由式 (4) 和式 (5) 可得

$$A = M \sin \omega t, \tag{6}$$

式中  $M = \frac{4m\dot{x}_m \dot{z} d^2}{U^2}$ ,  $\dot{z} = \omega z$  因而, 使梁在横向的振动中自检电极的正对面积能按式 (6) 变化, 就能很好地模拟出 Coriolis 力的大小。

考察极坐标的面积积分公式, 如图 3, 内曲线是半径为  $r_0$  的圆, 外曲线是半径按式  $r = r(\theta)$  变化的曲线。因而, 能找到一条曲线  $r(\theta)$ , 使其面积积分的结果等于式 (6) 中的  $A$ , 则可以设计出满足需要的电极。从而有

$$S = \int_0^d \int_0^{r(\theta)} r dr = M \sin \omega t. \tag{7}$$

上式两边对  $\theta$  求导, 并积分可得

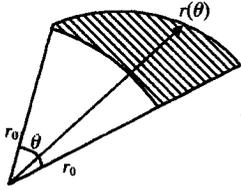


图 3 扇形阴影图形

Fig 3 Sector graphics with shadow

$$r(\theta) = \sqrt{2M \cos \theta + r_0^2} \tag{8}$$

如果悬臂梁的末端最大偏转角度为  $\theta_0$ , 因而, 其角度相当于梁在振动方向上最大振幅所对应的角度  $\frac{\theta_0}{2}$ , 因而, 式 (8) 可变为

$$r(\theta) = \sqrt{2M \cos(\frac{\theta}{2}) + r_0^2} \tag{9}$$

如果一个平板电极的边缘按上式规律变化, 则可以很好地模拟出 Coriolis 力的动态变化。

### 3 陀螺仪自检电极的设计

只要知道悬臂梁末端振动的最大偏转角度  $\theta_0$ , 选取适当的  $M$ , 就可以设计出如图 4 所示自检电极, 上电极为一个扇形圆环 (位于悬臂梁的末端), 下电极的内边是一个与上电极半径一样的圆, 外边是一个按式 (9) 规律变化的曲线, 其中  $\theta = 0$  的位置为悬臂梁的自由平衡位置, 其  $M$  取值的大小决定了自检电极在径向方向上的宽度及下电极外边缘曲线变化的程度, 不妨取为  $N$ 。

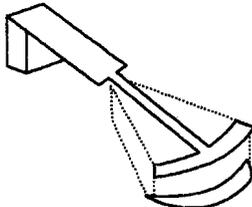


图 4 自检电极设计示意图

Fig 4 Scheme of self-test electrode

当悬臂梁以  $\omega_x$  的角频率按式 (3) 振动时, 相对于悬臂梁的最大偏转角度  $\theta_0$  来说, 在时间  $t$  时, 转动的角度为  $\frac{\theta_0}{2} \sin \omega_x t$ , 此时, 正对面积变为

$$A = \frac{2N}{d^2} (1 + \sin \omega_x t) \tag{10}$$

将式 (10) 代入式 (5), 可得在  $t$  时刻, 自检电极之间的静电力为

$$F_e = \frac{N U^2}{d^2} + \frac{N U^2}{d^2} \sin \omega_x t, \tag{11}$$

在式 (11) 中, 前一项是一个静态的偏转电压, 从前面所述的隧道陀螺仪的检测原理可知, 该项在陀螺仪检测的稳定状态下不会引起隧道电流的变化, 即不会产生反馈控制量, 所以, 第一项在自检中将不起作用, 由于第二项是一个

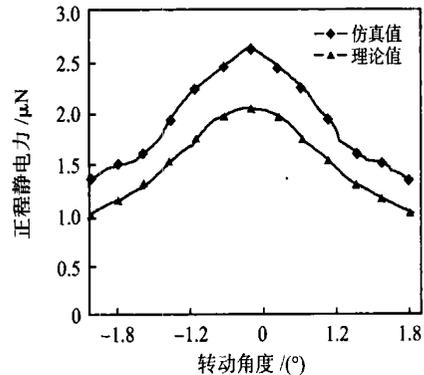
动态变化的量, 和式 (4) 相比, 该项可以看作相当于 Coriolis 力引起的变化。其有效的静电力为

$$F_e = \frac{N U^2}{d^2} \sin \omega_x t. \tag{12}$$

通过两式的比较还发现,  $\omega_x^2$ , 即输出角速度正比于自检电极两极板之间的电压。可以通过改变不同的电压  $U$  值, 测量输出的角速度, 通过其线性度的分析, 实现陀螺仪的测试和线性评估。

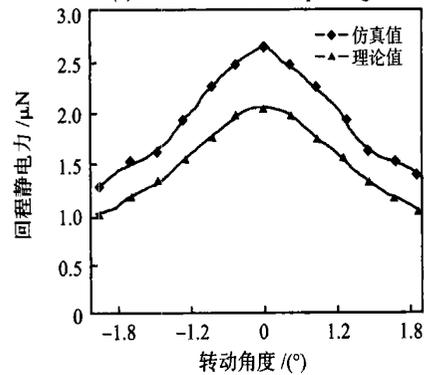
### 4 仿真分析

由文献 [7] 的分析可知, 当长为  $200 \mu\text{m}$ , 宽度和厚度都为  $2 \mu\text{m}$  的硅悬臂梁在  $U = 50 \pm 8 \sin 53000 t$  (V) 的电压驱动时, 悬臂梁的最大振动幅角  $\theta_0 = 1.8^\circ$ ; 在检测状态时, 悬臂梁的末端与基底的距离  $d = 0.5 \mu\text{m}$ 。在式 (9) 中取  $M = 800$ ,  $r_0 = 200 \mu\text{m}$ , 在悬臂梁的末端设计如图 4 所示电极, 在两极板上加  $60 \text{V}$  电压, 通过 ANSYS 分析, 当悬臂梁从  $-1.8^\circ \sim 1.8^\circ$  然后, 再转回  $-1.8^\circ$  的一个周期内, 正程和回程所对应的静电力理论值和仿真值的曲线如图 5 所示。虽然理论曲线和仿真曲线不能完全重合, 其主要误差在于理论计算没有考虑两电极的边缘效应, 但两曲线在形状变化上却趋向一致。由此可见, 该形状的自检电极能很好地模拟 Coriolis 力的动态变化, 从而达到实现自检的功能。



(a) 正程静电力

(a) electrostatic forces of plus angles



(b) 回程静电力

(b) electrostatic forces of minus angles

图 5 一个周期内不同角度所对应的静电力

Fig 5 Electrostatic force for different angles in one cycle (下转第 66 页)

$$C_s = \frac{(S_{T_2} - S_{T_1})}{(U_{T_2} - U_{T_1})}, \quad (6)$$

式中  $C_s$  为压力灵敏度倒数的温度系数,  $(\text{Pa}/\text{mV}^2) \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ 。

$$C_T = \frac{(O_2 - O_1)}{(U_{T_2} - U_{T_1})}, \quad (7)$$

式中  $C_T$  为压力零漂系数倒数的温度系数,  $(\text{Pa}/\text{mV}) \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$O_1$  为  $T_1$  时的零漂, Pa;  $O_2$  为  $T_2$  时的零漂, Pa。

在实际温度下,温度传感器相对于在参考温度下输出电压的变化量为

$$dU_T = U_T - U_{T_1}, \quad (8)$$

式中  $U_T$  为在实际温度  $T$  时,温度传感器的输出值。

$$O_T = O_1 + C_T dU_T, \quad (9)$$

式中  $O_T$  为校正后的压力零漂, Pa。

校正后的压力灵敏度为

$$S_T = S_{T_1} + C_s dU_T, \quad (10)$$

校正后的压力为

$$p = U_{pT} S_T - O_T, \quad (11)$$

式中  $U_{pT}$  为在压力为  $p$ , 温度为  $T$  下,压力传感器的输出值, mV。其中,参数  $S_{T_1}$ ,  $O_1$ ,  $C_s$ ,  $C_T$ ,  $U_{T_1}$ , 温度系数存储在 PROM 中。根据上述表达式即可算出压力校正值。

### 3 试验结果

对所设计的高度计的性能进行了试验测试,测量温度在 14 左右,采用 ADT101 飞行器气压原理检测仪,精度为 0.01%。数字压力传感器置于其密封腔内,保持传感器与微处理器通信;通过真空泵改变密封腔内的大气压,分别读取两者的显示的高度值,其数据如表 1 所示。从表中测量数据可知,微型高度计在 180~300m 范围内,绝对误差 < ±3m,相对误差 < 1.0%。满足其性能指标要求。

(上接第 63 页)

### 5 结论

本文通过对隧道梁式振动陀螺仪中 Coriolis 力及其检测原理的分析,结合极坐标的面积积分公式及两平行极板间的静电力计算公式,设计了一种能模拟动态 Coriolis 力的平板自检电极;通过对运用该方法设计的自检电极的计算结果分析和比较,及其有限元结果仿真,可以得出:该方法能很好地模拟出陀螺仪中的 Coriolis 力,从而实现陀螺仪的自检和测试功能。

### 参考文献:

- [1] Puers R, Reyntjens S. RASTA: real acceleration for self test accelerometer: a new concept for self-testing accelerometers[J]. *Sensors and Actuators A*, 2002, 97-98: 359-368.
- [2] Bruyker D De, Cozma A, Puers R. A combined piezoresistive/capacitive pressure sensor with self-test function based on thermal actuation[J]. *Sensor and Actuators A*, 1998, 66: 70-75.

表 1 实测数据

Tab 1 Experimental data

标准高度 (m)	测量高度 (m)	绝对误差 (m)	相对误差 (%)
180	179.0	1.0	0.5
200	201.0	1.0	0.5
220	218.7	1.3	0.5
240	241.0	1.0	0.4
260	258.0	2.0	0.8
280	281.5	1.5	0.5
300	303.0	3.0	1.0

### 4 结束语

本文介绍了一种基于 PC 单片机的新型的微型高度计,利用数字传感器和单片机相结合,用软件进行数据处理,全数字化、抗干扰,具有较高的灵敏度和精度。且低电压、低功耗;它是 MEMS 技术在航空领域的又一应用,目前,该装置已在某型微型飞行器上经过飞行试验,证实其具有极高的精度和良好的可靠性。另外,这种装置加上数字显示,还可用于登山高度、大气压的精密测量。

### 参考文献:

- [1] Intersema MS5534. datasheet [DB/OL]. www.intersema.com, 2004-11-25.
- [2] 李学海. PIC 单片机原理. [M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003. 15-150.
- [3] 陈鹏万. 大学物理学手册 [M]. 济南:山东科学技术出版社, 1985. 110-120.

### 作者简介:

王秀琳(1967-),女,江苏盐城人,南京航空航天大学自动化学院,硕士,研究方向为计算机控制。

- [3] Oliver A D, Wise K D. A 1024-element bulk-micromachined the mophile infrared imaging array [J]. *Sensor and Actuator A*, 1999, 73: 222-231.
- [4] 孙道恒. 一种微机械隧道陀螺仪原型方案初探 [J]. *微纳米科学与技术*, 2000, 5(1): 106-108.
- [5] Kubena R L, Vickers-Kirby D J, Joyce R J, et al. A new tunneling-based sensor for inertial rotation rate measurements [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, 8(4): 439-447.
- [6] Yoichi Mochida, Masaya Tamura, Kuniki Ohwada. A micromachined vibrating rate gyroscope with independent beams for the drive and detection modes [J]. *Sensors and Actuators A*, 2000, 80: 179-178.
- [7] 李文望. 基于隧道效应的微机械振动陀螺的结构设计与性能分析 [D]. 厦门:厦门大学, 2003. 48-65.

### 作者简介:

王凌云(1978-),男,四川通江人,硕士研究生,主要研究方向为微机电系统设计及其工艺。