

Error Suppression Circuit for Micromachined Gyroscope*

ZHOU Zhiguang, CHANG Honglong*, SHEN Qiang, XIE Jianbing, YUAN Weizheng

(Micro and Nano Electromechanical Systems Laboratory, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The quadrature error and in-phase error of micromachined gyroscope were analyzed, and an electrostatic force feedback control scheme was presented to suppress the errors. The equivalent stiffness and damping in the sense mode generated by electrostatic feedback force were used to change the coupling between the two modes of the gyroscope. Thus the errors can be suppressed. A closed-loop detective circuit with feedback compensation was designed and implemented, and the simulation results showed that the gain margin and the phase margin could reach 25dB and 36.5° respectively. The effect of the error suppressing circuit was verified by spectrum analysis and performance testing. The errors were decreased by 50%, the nonlinearity of scale factor decreased from 2.89% to 1.47%, the bandwidth increased 15 Hz, and the bias stability increased by 1.3 times.

Key words: close-loop detective circuit; error suppression; feedback control; compensation

EEACC: 1205

微机械陀螺的误差抑制电路研究*

周志广, 常洪龙*, 申强, 谢建兵, 苑伟政

(西北工业大学微/纳米陕西省重点实验室, 西安 710072)

摘要: 分析了微机械陀螺的正交误差和同相误差的来源及特点, 提出了利用静电力反馈控制来抑制误差的技术方案。该方案利用反馈静电力在检测模态上产生等效电刚度和电阻尼, 从而影响陀螺仪驱动和检测模态之间的刚度和阻尼耦合系数, 进而抑制误差。为实现误差抑制设计了带有反馈校正环节的闭环检测电路并完成了仿真, 仿真结果表明校正环节能够使系统的幅值和相位裕度达到 25 dB 和 36.5°。对微机械陀螺进行频谱分析和性能测试比较, 结果表明闭环检测情况下, 误差量较开环测试减小了 50%, 标度因子的非线性度从 2.89% 减小到 1.47%、带宽增加了 15 Hz、零偏稳定性提高了 1.3 倍。

关键词: 闭环检测电路, 误差抑制, 反馈控制, 校正环节

中图分类号: TN911.71

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)06-0808-04

微机械陀螺仪是当前惯性领域研究的热点和难点。由于微机械陀螺在制造过程中存在加工误差, 梁和梳齿的尺寸发生变化使陀螺的模式之间产生刚度耦合、左右驱动位移不对称等结构误差。这些误差将直接影响陀螺仪零位输出的稳定性、标度因子的非线性度、工作带宽等关键技术指标。微机械陀螺的结构误差是限制陀螺精度的主要因素^[1]。因此, 有效抑制陀螺误差对提高陀螺仪性能有着重要的意义。

按照陀螺仪误差信号与角速度信号之间的相位差可将结构误差分为正交误差及同相误差^[2-3]。同

相误差与陀螺仪有用信号相位相同, 因此对于该信号的分离和抑制比较困难; 对于正交误差可采用相位干涉解调的方法进行抑制^[4,6], 但不能完全消除。

本文设计了静电力反馈误差抑制电路。该电路将陀螺仪的检测模态分为两路进行闭环控制, 对陀螺仪的两种误差进行抑制。

1 微机械陀螺工作原理

本文采用的微机械陀螺结构及电极分布如图 1 所示, 该陀螺仪采用对称解耦结构, 减小了驱动和敏感模态的运动耦合, 提高了陀螺仪检测精度。

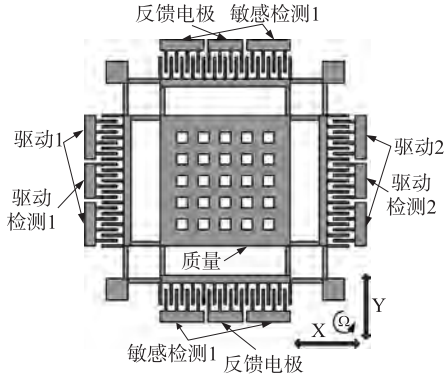


图1 微机械陀螺结构

该陀螺仪具有两个运动模式，X方向为驱动模式，Y方向为敏感模式。陀螺正常工作时，质量块受到周期性外力 $F = F_0 \cos(\omega t)$ 的作用在X方向做简谐振动，当Z轴有角速度 Ω 输入时质量块在Y方向受到科氏力的作用同样做简谐振动。通过检测敏感模式的位移来得到输入角速度的大小。

陀螺仪理想条件下的动力学方程为：

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{\omega_d}{Q_d} \dot{x} + \omega_d^2 x &= a_x \\ \ddot{y} + \frac{\omega_s}{Q_s} \dot{y} + \omega_s^2 y &= 2\Omega \dot{x} \end{aligned} \quad (1)$$

式中 x 、 y 分别是驱动和检测模式的位移， ω_d 、 ω_s 分别为陀螺仪的驱动和敏感模式谐振频率， Q_d 、 Q_s 分别为陀螺仪的驱动和敏感模式的品质因数， Ω 为外界输入角速度。

陀螺两模式位移为：

$$\begin{aligned} x &= x_0 \cdot \sin(\omega_d t) \\ y &= 2x_0 \omega_d A \cos(\omega_d t + \phi) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\text{其中, } A = \frac{1}{\omega_s^2 \sqrt{[1 - (\frac{\omega}{\omega_s})^2]^2 + 4\xi_s^2 \cdot (\frac{\omega}{\omega_s})^2}}$$

电容变化经电路信号处理后，可得到反映角速度输入的电压信号。

2 微机械陀螺误差分析

非理想条件下的模式方程^[3]：

$$\begin{aligned} \ddot{x} + \frac{\omega_d}{Q_d} \dot{x} + \omega_d^2 x &= a_x \\ \ddot{y} + \frac{\omega_s}{Q_s} \dot{y} + c_{ds} \dot{x} + \omega_s^2 y + \omega_{ds} x &= 2\Omega \dot{x} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 ω_{ds} 为驱动到敏感模式的刚度耦合系数， C_{ds} 为驱动到敏感的阻尼耦合系数。由微机械陀螺正常工作时，驱动模式处于恒幅恒频的谐振状态，可令驱动位移为：

$$x = x_0 \cdot \sin(\omega_d t) \quad (4)$$

可得敏感方向的位移为：

$$y = -\omega_{ds} \cdot x_0 \cdot A \cdot \sin(\omega_d t + \phi) + [(2\Omega + c_{ds}) \cdot x_0 \cdot \omega_d A] \cdot \cos(\omega_d t + \phi) \quad (5)$$

由图2结合式(5)可以看出，敏感位移 y 受到耦合系数的影响，式中第一项受刚度耦合影响，与哥氏加速度信号同频正交，引起的误差为正交误差；式中第二项受阻尼耦合影响，与哥氏加速度信号同频同相，引起的误差为同相误差。这两项误差都将直接影响陀螺仪输出的稳定性^[5]。

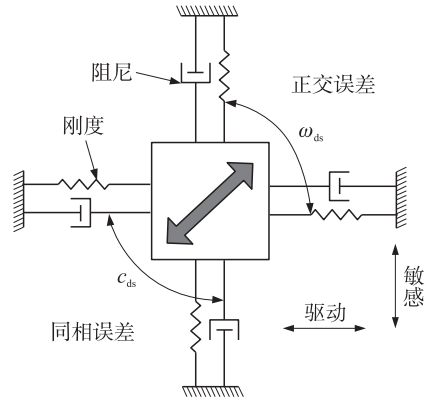


图2 误差的产生机理

同相误差与哥氏信号耦合在一起，分离较困难，目前没有很好的方法对其进行有效的抑制。正交误差可以通过相干解调对其抑制^[7-8]，但由于系统中引入较多的相位误差，导致相干解调方法不能完全消除。

静电力作用在敏感模式产生等效的电刚度和阻尼，减小驱动和敏感模式之间的刚度耦合系数和阻尼耦合系数。本文利用静电力反馈控制调节结构刚度和阻尼，对正交误差进一步抑制，同时抑制部分同相误差。

3 误差抑制电路设计

3.1 静电力反馈控制原理

通过对微机械陀螺误差的分析，陀螺仪存在两个相位差 90° 的正交误差和同相误差，这两个误差是通过相位解调区分开的。静电力反馈控制分两路进行，分别对正交误差及同相误差进行抑制。静电力反馈控制原理如图3所示，该电路驱动环路采用闭环方式进行稳幅稳频控制^[9]。图中仅给出了检测闭环控制。

正交误差抑制支路的控制过程：经驱动信号 $\cos(\omega_d t)$ 解调得到输出信号 V_q ，引入校正环节对 V_q 补偿，用 $\sin(\omega_d t)$ 对补偿过的信号进行再调制，调制信号与调谐直流 V_{dc} 相加后，通过移相及幅度调节后加载到陀螺的反馈电极，同相误差支路控制类似，实现陀螺的检测闭环控制。

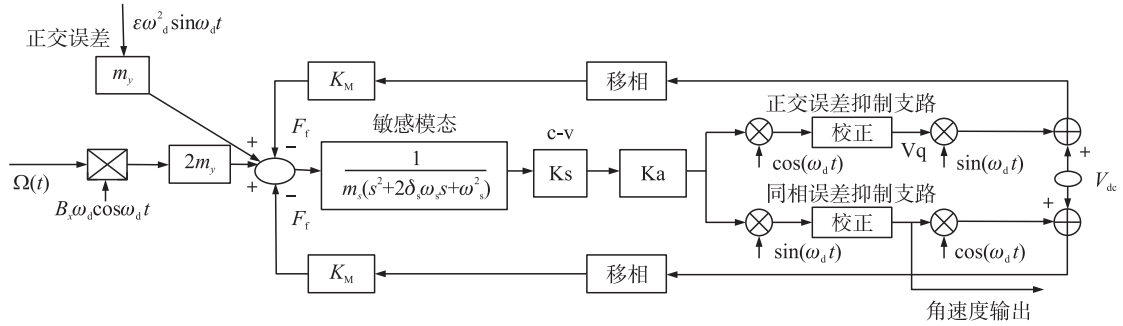


图 3 静电力反馈控制

通过实际电路调试发现,反馈信号相位和调谐直流量的调节是陀螺仪闭环电路调试中的重点和难点,反馈信号相位直接影响到误差抑制的程度;调谐直流量是调节敏感模式的谐振频率关系到两个模式匹配程度。

未引入校正环节前系统的开环传递函数为:

$$G_0 = \frac{K_s K_a K_d K_m}{m_s (s^2 + 2\delta_s \omega_s s + \omega_s^2)} \quad (6)$$

其中, K_d 为滤波环节, K_m 为调制解调环节的增益。

3.2 校正环节设计

微机械陀螺信号解调后易受外界信号的干扰,且在高输入角速度情况下误差作用下输出信号会出现的非线性,引入校正环节,可有效减小上述不利因素的影响。

结合控制理论对采用校正环节进行了设计。常见的校正环节有串联校正、前馈校正、反馈校正和复合校正。由微机械陀螺结构和反馈校正的特点决定,必须选取反馈校正方式^[10-11]。反馈校正电路如图 4 所示,反馈校正电路的传递函数:

$$G_f(s) = \frac{(R_1 + R_2)C_1 s + 1}{R_1 C_1 s + 1} \cdot \frac{R_4}{R_3} \cdot \frac{1}{C_2 R_4 s + 1} \quad (7)$$

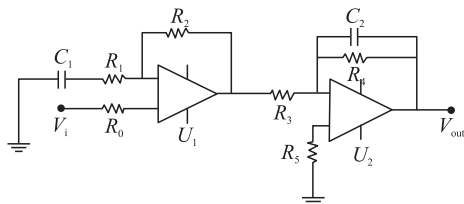


图 4 反馈校正环节

为得到满足系统稳定及动态性能的要求,结合式(7),由频域分析法^[10],可得各参数的值: $R_1 = 3.2 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 1 \text{ nF}$, $R_3 = R_4 = 3.2 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 41 \text{ k}\Omega$, $C_2 = 10 \text{ pF}$ 。

仿真结果如图 5,可以看出,引入积分校正环节后的闭环较开环情况,相位裕度增加了 36.5° ,幅值裕度 25 dB 。结果表明,该环节能提高陀螺仪闭环带宽、稳定裕度等,满足系统稳定的条件。

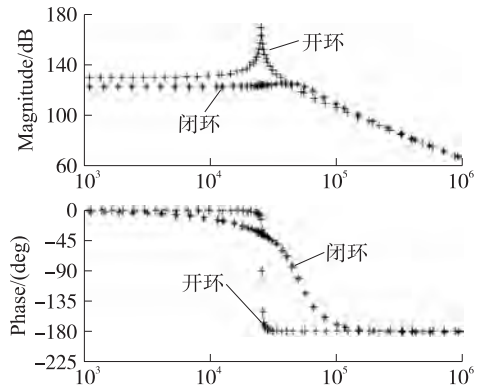


图 5 系统响应分析

3.3 实验验证

当外界无角速度输入,分析陀螺仪敏感模式 C/V 转换后输出信号频谱可知,正交误差作用下,高频载波两边有两个调制信号,该调制信号能够反映误差量的大小。图 6 和图 7 分别为开环和闭环检测情况下的 C/V 转换输出的频谱。闭环情况下调制信号 $147 \mu\text{V}$ 较开环 $270 \mu\text{V}$ 减小了 $123 \mu\text{V}$,可见,误差信号得到了有效抑制。

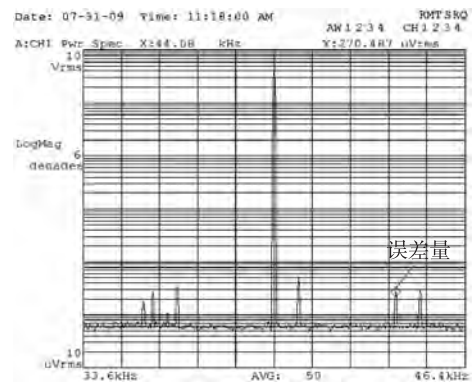


图 6 开环检测陀螺仪 C/V 转换后输出频谱

基于带校正环节的反馈控制电路对相应的陀螺仪进行性能测试^[12]。试验结果:所测试的微机械陀螺仪标度因子: 10 mV/deg/s 较开环 17 mV/deg/s 减小了,标度因子非线性度: 1.47% 较开环 2.89% 减小了 2 倍;零偏稳定性: $79.8^\circ/\text{h}$,零偏稳定性较开环提高了 1.3 倍;带宽达到 65 Hz 。检测闭环反馈控制

有效的抑制了误差对陀螺仪输出信号的影响。

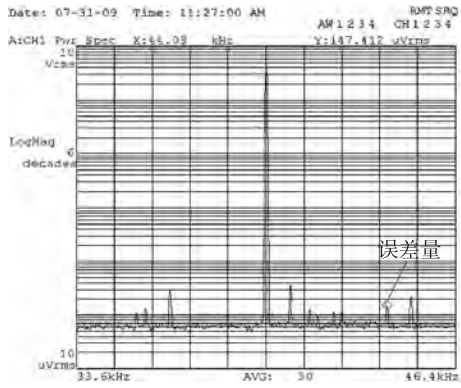


图7 闭环检测陀螺仪 C/V 转换后输出频谱

4 结语

实验结果表明,论文所设计的闭环误差抑制电路可有效降低正交误差量,对于同相误差也有较好的抑制效果。传感器的偏置稳定性、系统响应、带宽等指标都得到了提高。

参考文献:

[1] Marc S. Weinberg, Member, ASME, and Anthony Kourepenis,

Error Sources in In-Plane Silicon Tuning-Fork MEMS Gyroscope [J]. Journal of Microelectro Mechanical Systems, 2006, 15(3): 479 - 491.

- [2] 杨军,高钟毓,张嵘,等. 线振动硅微机械陀螺结构误差参数分离和辨识[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(3):327 - 333.
- [3] 杨军,高钟毓,张嵘,等. 微机械陀螺仪结构误差的控制技
- [4] 周舟,黄丽斌,杨波,等. 微机械陀螺仪模拟信号检测技术[J]. 传感技术学报,2009,22(4):495 - 498.
- [5] 罗兵,张辉,吴美平,等. 硅微陀螺正交误差及其对信号检测的影响[J]. 2009,17(5):604 - 607. 术[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(4):488 - 493.
- [6] 施芹,裴安萍,苏岩,等. 硅微陀螺仪的误差分析[J]. 传感技术学报,2006,19(5).
- [7] 夏敦柱,周百令,王寿荣. 双闭环真空硅微陀螺仪设计及性能测试分析[J]. 传感技术学报,2008,21(2):241 - 243.
- [8] 温佰仟,刘建业,李荣冰. MEMS 陀螺正交误差分析与仿真[J]. 传感器与微系统,2008,27(9):82 - 84.
- [9] 李芊,李晓莹,常洪龙,等. 振动式微机械陀螺驱动控制电路研究[J]. 传感技术学报,2006,19(5):2230 - 2235.
- [10] 胡寿松,自动控制原理[M]. 第四版,北京:科学出版社,2001,170 - 204:251 - 253.
- [11] 曾辉,周百令,苏岩,等. 微机械陀螺仪检测反馈系统研究[J]. 传感器技术,2005,24(3):32 - 34.
- [12] 杨金显,袁赣南,徐良臣. 微机械陀螺测试与标定技术研究[J]. 传感技术学报,2006,19(5):2264 - 2267.



周志广(1983 -),男,硕士研究生,研究方向为 MEMS 惯性传感器接口电路设计;



常洪龙(1979 -),男,博士,副教授,要从事微机电系统设计技术及微惯性技术方面工作,changhl@nwpu.edu.cn.