

文章编号 1004-924X(2016)01-0134-09

硅微陀螺正交误差校正方案优化

曹慧亮^{1,2,4*}, 王玉良³, 石云波^{1,2}, 申冲^{1,2}, 李宏生⁴, 刘俊^{1,2*}, 杨志才^{1,2}

- (1. 中北大学 电子测试技术国防科技重点实验室, 山西 太原 030051;
2. 中北大学 仪器科学与动态测试教育部重点实验室, 山西 太原 030051;
3. 北京航天控制仪器研究所, 北京 100094;
4. 东南大学 仪器科学与工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 本文意在寻求双质量硅微机械陀螺仪正交校正最优方案。首先介绍了带有正交校正和检测力反馈梳齿的双质量硅微机械陀螺结构, 量化分析了正交误差对输出信号的影响并进行了仿真, 结果显示解调相角变化为 $\pm 2^\circ$, $200^\circ/\text{s}$ 的正交误差等效输入角速率可引起 $15^\circ/\text{s}$ 的输出信号变化。然后, 对目前 3 种比较主流的硅微机械陀螺仪正交校正方法(电荷注入法(CIM)、正交力校正法(QFCM)和正交耦合刚度校正法(QCSCM))进行了实验研究, 从理论上证明了这 3 种方法的可行性。对未加入正交校正环节的陀螺进行了实验, 结果显示其左、右质量块输出的正交误差信号峰峰值分别为 150 mV 和 300 mV。针对两质量块正交误差不等的实际问题提出了质量块单独校正的方案。采用 CIM、QFCM 和 QCSCM 对校正前零偏及其稳定性分别为 $-4.589^\circ/\text{s}$ 和 $378^\circ/\text{h}$ 的陀螺进行了实验校正, 结果显示 3 种方法均可有效消除检测通道中正交信号, 3 种方法的零偏及零偏稳定性结果分别为 $-8.361^\circ/\text{s}$ 和 $423^\circ/\text{h}$, $2.419^\circ/\text{s}$ 和 $82^\circ/\text{h}$, $1.751^\circ/\text{s}$ 和 $25^\circ/\text{h}$, 证明了正交耦合刚度校正法为 3 种方法中的最优方案。

关键词: 硅微机械陀螺仪; 电荷注入法; 正交力校正; 正交耦合刚度校正

中图分类号: U666; TH824.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162401.0134

Optimization of quadrature error correction method for silicon MEMS gyroscopes

CAO Hui-liang^{1,2,4*}, WANG Yu-liang³, SHI Yun-bo^{1,2}, SHEN Chong^{1,2},
LI Hong-sheng³, LIU Jun^{1,2}, YANG Zhi-cai^{1,2}

- (1. *Science and Technology on Electronic Test & Measurement Laboratory, North University of China, Taiyuan 030051, China;*
2. *Key Laboratory of Instrumentation Science and Dynamic Measurement of the Ministry of Education, North University of China, Taiyuan 030051, China;*
3. *Beijing Institute of Aerospace Control Devices, Beijing 100094, China;*
4. *School of Instrument Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)*
** Corresponding author, E-mail: liuj@nuc.edu.cn*

Abstract: This paper focuses on finding out a optimum quadrature error correction method for a dual-mass Micro-electro-mechanical System (MEMS) gyroscope with quadrature error correction combs

收稿日期: 2015-05-15; **修订日期:** 2015-06-17.

基金项目: 总装预研基金资助项目 (No. 9140A09011313JW06119); 江苏省科技攻关计划资助项目 (No. BE2014003); 国家杰出青年科学基金资助项目 (No. 51225504); 国家安全重大基础研究计划资助项目 (No. 2012CB723404); 中北大学科研基金资助项目

and sense feedback combs. The structure of the gyroscope was introduced, and influences of quadrature errors on the output signals were simulated and quantized. The results show that quadrature error equivalent angular rate is $200(^{\circ})/s$ and the demodulation phase error is less than 2° , which generates $15(^{\circ})/s$ variation of output signal. Three kinds of quadrature error correction methods used commonly in measuring this structure were investigated, and they are Charge Injecting Method (CIM), Quadrature Force Correction Methods (QFCM) and Quadrature Coupling Stiffness Correction Method (QCSCM). The feasibility of the three method was verified in theory. A gyroscope without quadrature error correction was tested, the results show that the quadrature signal peak-peak amplitudes from left and right mass preamplifiers are 150 mV and 300 mV respectively. Then, the correction method based on left mass and right mass independently was proposed. The the experiments based on CIM, QFCM and QCSCM were performed. The results show that the quadrature error signals are eliminated basically, their bias values and bias stabilities are $-8.361(^{\circ})/s$ and $423(^{\circ})/h$, $2.419(^{\circ})/s$ and $82(^{\circ})/h$, $1.751(^{\circ})/s$ and $25(^{\circ})/h$, respectively. According to the results, the QCSCM is verified to be the optimal method for quadrature error correction, and the theory analysis result is correct.

Key words: silicon MEMS gyroscope; charge injection method; quadrature force compensation; quadrature coupling stiffness correction

1 引 言

硅微机械陀螺仪作为新型的角速率敏感器件,具有体积小、成本低、功耗小、抗冲击性能好、可批量生产等优点,在导航制导、机器人、汽车安全、消费电子、工业控制等方面有着广泛应用^[1-3]。近年来,随着加工工艺的改进以及结构和电路设计的优化,硅微机械陀螺仪的精度不断提高,有报道显示零偏稳定性指标已达到 $0.1(^{\circ})/h$ 以内,可在某些高精度领域取代传统陀螺^[4-5]。但高精度的硅微机械陀螺仪的产出比还比较低,基本是从大量的陀螺结构样本中筛选得到,绝大多数陀螺处于中低精度状态,只能满足低端市场需求。纵观硅微机械陀螺仪加工制造过程,由结构加工产生的误差(主要表现为正交误差)是目前影响陀螺精度的主要因素,其原因主要是由于加工后结构的弹性主轴发生偏斜^[6-7],其等效输入角速率可达数百 $(^{\circ})/s$ ^[8],而且该误差针对不同陀螺结构个体呈现不同的误差值。

双质量硅微机械陀螺仪采用音叉振动形式,且可有效削弱检测轴向共模加速度引起的误差信号,成为目前线振动陀螺结构的主流形式^[9-12]。但双质量结构也存在一些缺陷,首先其结构更为复杂,模态包含了驱动同相、反相,检测同相和反相模态,相关分析也更为困难。其次,经过实际测量发现,加工过程产生的正交误差在左、右质量块

上的分布并不一致,直接增加了正交校正的难度,所以需要对双质量陀螺正交校正技术进行深入研究。

2 双质量硅微机械陀螺仪及正交误差

2.1 双质量硅微机械陀螺仪结构

本文研究的双质量硅微机械陀螺结构包含左、右两个对称部分,每部分包含各自的哥式质量、驱动框架、检测框架、驱动梳齿、驱动检测梳齿、检测梳齿、检测反馈梳齿、正交校正梳齿以及驱动和检测梁支撑系统,整体结构如图 1 所示^[9]。其中,检测反馈梳齿用于产生施加在检测框架上的静电力,以抵消正交力的作用;正交校正梳齿可产生静电负刚度,用于平衡正交耦合刚度^[6,13]。

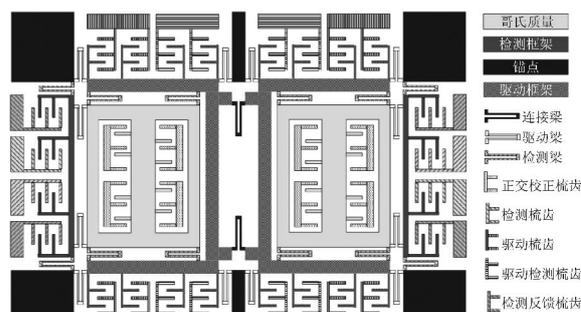


图 1 双质量硅微机械陀螺仪结构示意图

Fig. 1 Schematic of dual-mass silicon MEMS gyroscope structure

2.2 正交误差的影响

在正交误差作用下,陀螺结构理想运动模型的刚度矩阵副对角线会引入耦合刚度^[6,14]:

$$\begin{bmatrix} m_x & 0 \\ 0 & m_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c_{xx} & 0 \\ 0 & c_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} \\ k_{yx} & k_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{dx} \\ -2m_c\Omega_z\dot{x} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中: m_x 、 m_y 和 m_c 分别为驱动、检测和哥氏质量; c_{xx} 和 c_{yy} 分别为驱动和检测模态等效阻尼; k_{xx} 和 k_{yy} 分别为驱动和检测模态的等效刚度; k_{xy} 和 k_{yx} 分别为驱动和检测模态间的耦合刚度; x 和 y 为驱动和检测方向的位移; Ω_z 为绕 z 轴的输入角速率;令驱动力 $F_{dx} = F_d \sin(\omega_d t)$ 与驱动模态谐振频率同频,且 $m_y = m_c$,可得到陀螺检测通道前放哥氏信号和正交信号为:

$$V_{sC} = 2\Omega_z A_x \omega_d m_c G_{sV/F} \sin(\omega_d t), \quad (2)$$

$$V_{sMk} = \alpha_{sMk} A_x G_{sV/F} \cos(\omega_d t), \quad (3)$$

其中: V_{sC} 和 V_{sMk} 分别为检测通道中的哥氏分量和正交误差分量; A_x 为驱动模态运动幅度; $G_{sV/F}$ 为陀螺结构检测模态和前级放大器串联后的传递函数; α_{sMk} 为正交误差系数(与 k_{yx} 有关),不同的表头结构之间的机械耦合信号不同,可以通过筛选表头得到机械耦合信号小的陀螺应用在高精度场合。正交信号与哥氏信号同频但相位相差 90° ,

这也是正交误差命名的由来。进一步可得正交信号的等效输入角速率为:

$$\Omega_{QE} = \frac{\alpha_{sMk}}{2m_c\omega_d}. \quad (4)$$

由于正交信号和哥氏信号的频率相同但相位相差 90° ,所以相敏解调是从检测通道中区分哥氏信号和正交信号的有效的方法之一^[6,8,10],且容易实现。通常情况下,正交误差引起的等效输入角速率可达数十到数百 $^\circ/\text{s}$ ^[7],所以解调效果受解调相角误差 φ_{derror} 和解调相角噪声 φ_{dnoise} 的影响较大。只要解调相角稍有偏差,正交信号便会对陀螺输出产生非常大的影响,所以需要正交误差进行较为彻底的校正和补偿。图2所示为陀螺仪输出信号中哥氏同相信号(由耦合阻尼等因素产生,其与哥氏信号同频同相,无法有效消除)和正交信号分量的量化影响,其中令同相信号为定值 $\Omega_{IP} = 5^\circ/\text{s}$,正交信号为变量 $\Omega_{QE} < 200^\circ/\text{s}$,解调相角误差和噪声 $\varphi_{derror} + \varphi_{dnoise}$ 在 $-2^\circ \sim 2^\circ$ 。可以看出正交信号的大小并不影响同相信号分量在陀螺仪输出信号中的占有量,解调相角变化范围内同相信号对应的 Ω_O (陀螺输出等效角速率)只变化了 $0.003^\circ/\text{s}$,而正交误差分量随着解调相角变化的比较剧烈, Ω_O 变化了近 $15^\circ/\text{s}$ 。所以,抑制正交误差可有效提高陀螺性能^[15]。

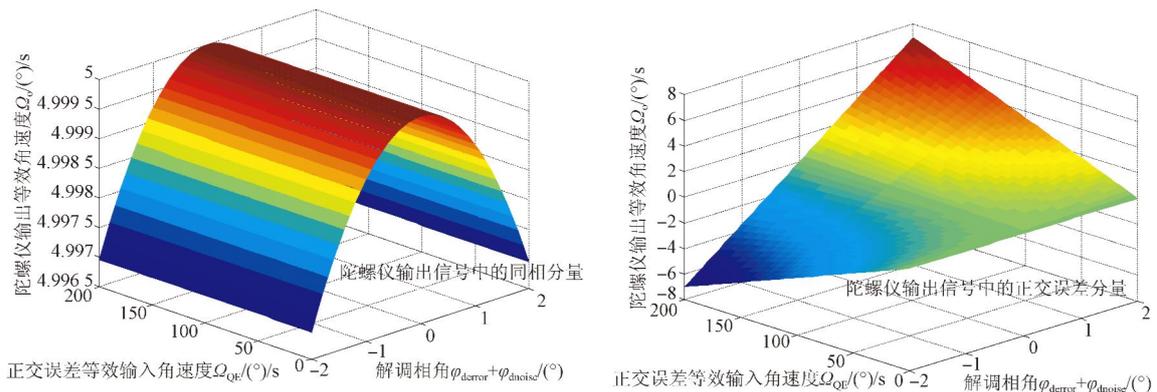


图2 正交误差对陀螺输出信号影响量化分析图

Fig. 2 Quantitative analysis diagram of quadrature error

3 双质量硅微机械陀螺正交校正

正交误差对输出信号影响的途径为:加工误差引起结构的不等弹性,继而产生正交耦合刚度,

该刚度被驱动位移调制后形成正交力并施加在检测框架上,检测框架正交运动被检测通道提取并转化为正交误差信号^[12]。目前,在陀螺结构加工成形后针对上述正交误差作用过程,主流正交校正方法有^[6]:

量为：

$$q_{\text{ecos}}(t) = [A_{\text{QE}}(t) - V_{\text{iQE}}(t)] \cos(\omega_d t) \approx 0. \quad (12)$$

可以看出，正交误差信号基本被消除，达到了补偿目的。

3.2 正交力校正法

正交力校正法是通过在检测反馈梳齿上施加与正交力同频反相的静电力来抵消正交力对检测框架的影响^[10,18]。该方法需要外部控制电路与结构中的检测反馈梳齿相互配合完成，控制参数和结构参数需相互协调以达到控制最优状态。结构中产生校正力的部分是检测力反馈滑膜梳齿，采用固定直流电压，调节交流电压的方式，控制方法也参照上节介绍的闭环方式。正交力校正法的工作原理如图 5 所示。

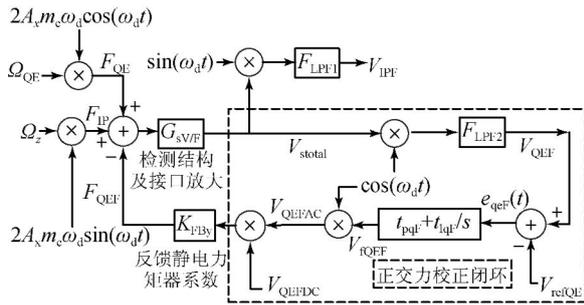


图 5 基于正交力校正法的正交校正系统原理图

Fig. 5 Schematic of quadrature error correction based on QFCM

图中，虚线框内的为正交力校正闭环回路：

$$V_{\text{iQEF}} = \frac{2A_x m_c \omega_d}{K_{\text{FBX}} V_{\text{QEFDC}}} \Omega_{\text{QE}}, \quad (13)$$

其中： F_{QE} 、 F_{IP} 、 F_{QEF} 分别为正交力、哥氏同相等效力、正交反馈力； V_{QEFAC} 和 V_{QEFDC} 分别为校正电压的交流 and 直流分量； V_{refQEF} 为控制点基准电压，通常设为零。由于静电力是由 V_{QEFAC} 和 V_{QEFDC} 乘积决定，所以在图 5 中表示为乘积。根据图中所示的系统框图，结合上节中的分析方法可得反馈控制电压如式(13)所示，控制电压与正交误差等效输入角速率成线性关系，达到控制效果。绘制图 5 所示系统的奈奎斯特曲线，如图 6 所示，曲线不包围 $(-1, 0j)$ 点，则可判定系统稳定。

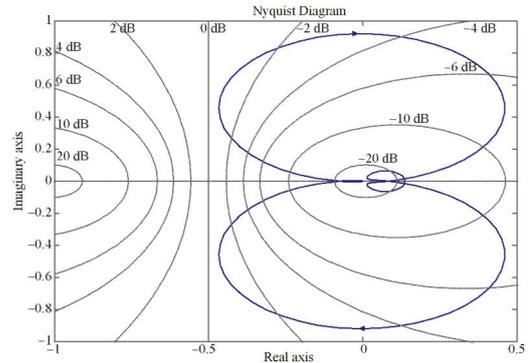


图 6 正交力校正系统奈奎斯特曲线

Fig. 6 Nyquist diagram of quadrature error correction based on QFCM

3.3 正交耦合刚度校正法

结合式(1)中刚度矩阵可知，要想从根本上消除正交误差，必须消除耦合刚度 k_{yx} 。同时，该方法需要在结构中加入辅助校正机构以产生静电负刚度，与控制电路组成耦合刚度校正系统^[7,10-11]。在外接电路的控制下，正交耦合刚度校正梳齿产生相应的静电负刚度以抵消正交刚度，达到正交校正的目的。正交耦合刚度校正法控制系统如图 7 所示，其中， k_{qcoup} 为校正梳齿结构耦合刚度系数； V_{qd} 为校正梳齿电压直流分量； k_{pqS} 和 k_{iqS} 分别为 PI 控制器比例和积分系数； V_{refQES} 为控制点基准电压，通常设为零。对该系统的分析也可参照电荷注入法的过程，当积分系数足够大时，梳齿产生的静电负刚度可近似抵消耦合刚度 k_{yx} ：

$$k_{\text{Qyx}} = -\frac{4n_q \epsilon_0 h}{y_{q0}^2} \left(1 - \frac{1}{\lambda^2}\right) V_{\text{qd}} V_{\text{qc}} \approx -k_{\text{yx}}, \quad (14)$$

其中： n_q 、 h 、 y_{q0} 、 λ 与正交校正梳齿的个数和尺寸有关。

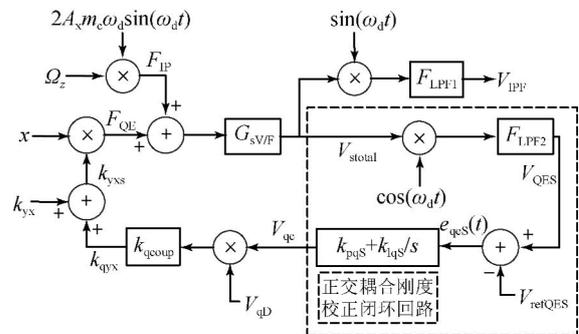


图 7 基于正交力耦合刚度校正法的正交校正系统原理图

Fig. 7 Schematic of quadrature error correction based on QCSCM

对图 7 中的系统进行稳定性判定,绘制奈奎斯特图,如图 8 所示。图中曲线不包围 $(-1, 0j)$ 点,则系统稳定。

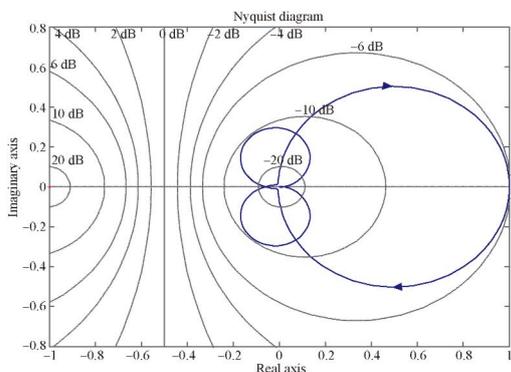


图 8 正交耦合刚度校正系统奈奎斯特曲线

Fig. 8 Nyquist diagram of quadrature error correction based on QCSCM

4 实验

双质量结构中左、右质量块的正交误差通常情况不相等,导致正交校正需要针对两质量块各自进行。实验用陀螺表头及其 PCB 板如图 9 所示,系统由 3 块 PCB 板组成,其中,左侧的为 I 板主要包含陀螺表头接口电路和自激振荡驱动回路;中间为 II 板主要包含左、右检测通道各自输出信号的正交误差分量解调以及电荷注入法和正交耦合刚度校正法电路;右侧为 III 板,主要搭载左、右检测通道的哥氏信号解调、正交力校正法及检测回路。



图 9 微机械陀螺仪实物照片

Fig. 9 Photos of MEMS gyroscope

4.1 正交校正前实验

令陀螺驱动模态正常工作,在不加入任何正交校正方法的前提下,观测陀螺左、右通道的输出

信号,曲线如图 10 所示。其中,最上方通道为驱动位移信号,上方第二通道和第三通道分别为左侧和右侧质量块前级放大器的输出信号,最下方通道为第二和第三通道的叠加。可以看出,左、右质量块输出信号基本与驱动位移信号同频反相,证明了目前两通道中正交信号为主体(哥氏信号应于驱动位移相位差 90°),哥氏信号被淹没。同时,左、右通道输出信号峰峰幅值分别约为 150 mV 和 300 mV,直接证明了两质量块正交误差相等,且右质量块正交误差约为左质量块的 2 倍。



图 10 正交校正前陀螺检测通道中信号

Fig. 10 Signal curves in sense loop before quadrature error correction

对陀螺输出信号进行采集,采样率为 1 Hz,采样时间为 3 600 s,得到实验曲线图如图 14 左上所示,可以看出曲线漂移情况比较严重,而且在很大程度上受测试环境的温度影响。经计算,这两次测试的零偏值及其稳定性(1σ)指标分别为: $-4.589^\circ/s$ 和 $378^\circ/h$ 。

4.2 电荷注入正交校正法实验

在 II 号 PCB 板上搭建电荷注入法的闭环控制回路,控制对象分别为左、右检测通道中前级放大器的输出信号。对检测通道信号进行观测,曲线如图 11 所示(图中略去了两通道叠加曲线),两通道中基本上只包含了噪声,正交误差几乎完全消除,但右通道中噪声明显高于左通道,这可能与

其正交误差值较大及相角噪声的二次调制影响有关(由于两通道控制器参数相同,而右通道控制对象幅值为左通道两倍)。其输出曲线如图 14 右上,由于陀螺检测检测通道中哥式信号和正交信号均采用相敏解调方式,同时,正交耦合刚度及其产生的正交力依然作用(这才是引起陀螺漂移和零位值的源泉),所以该方法对陀螺输出信号漂移和零位等并无实质作用,只是从表面上削弱了检测通道中正交信号值,无法提高陀螺性能。相反,由于正交解调和调制等一系列作用,电荷注入法还引入了一定的误差和额外的噪声,其零偏值和零偏稳定性(1σ)指标分别为: $-8.361^\circ/\text{s}$ 和 $423^\circ/\text{h}$ 。

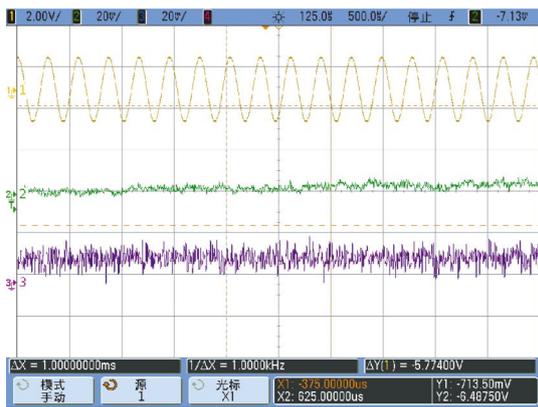


图 11 电荷注入正交校正后陀螺检测通道中信号

Fig. 11 Signal curves in sense loop with quadrature error correction based on CIM

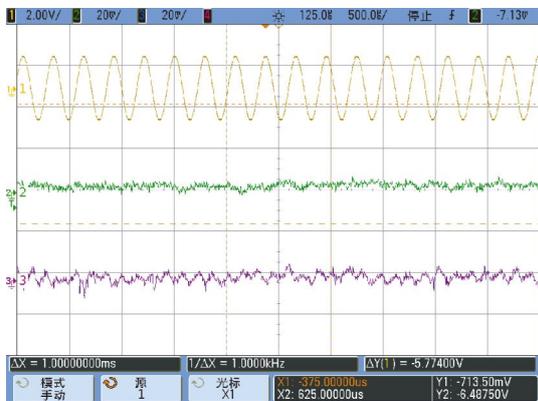


图 12 正交力校正后陀螺检测通道中信号

Fig. 12 Signal curves in sense loop with quadrature error correction based on QFCM

4.3 正交力校正法实验

结合检测力反馈梳齿搭建正交力校正闭环系统,控制对象分别为左、右检测框架的正交力信号。对检测通道信号进行观测,曲线如图 12 所示,从图中可看出,正交误差几乎完全消除,且两通道中噪声明显优于电荷注入法。其输出曲线如图 14 左下所示,由于该方法针对检测框架的正交力且从正交信号中判断正交力几乎被完全平衡,所以检测位移受正交力漂移的影响也基本消除,输出信号的零位值和漂移趋势大大减小,但其依然存在信号调制的问题,进一步放大了由正交解调相角误差和噪声产生的影响。其零偏值和零偏稳定性(1σ)指标分别为: $2.419^\circ/\text{s}$ 和 $82^\circ/\text{h}$ 。

4.4 正交耦合刚度校正法实验

结合正交校正梳齿搭建正交力校正闭环系统,控制对象分别为左、右质量块的正交耦合刚度。系统工作后检测通道信号如图 13 所示,正交误差几乎完全消除,由于该方法直接针对正交误差根源-正交耦合刚度,而不存在信号调制的问题,所以其效果优于前两种方法。其输出曲线如图 14 右下所示,其零偏值和零偏稳定性(1σ)指标分别为 $1.751^\circ/\text{s}$ 和 $25^\circ/\text{h}$ 。

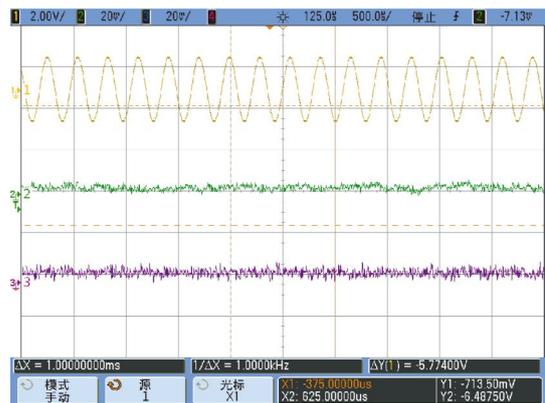


图 13 正交耦合刚度校正后陀螺检测通道中信号

Fig. 13 Signal curves in sense loop with quadrature error correction based on QCSCM

表 1 所示为正交校正前以及采用 3 种正交校正方法后相关的测试结果,结果证明采用正交耦合刚度校正法的结果最优。

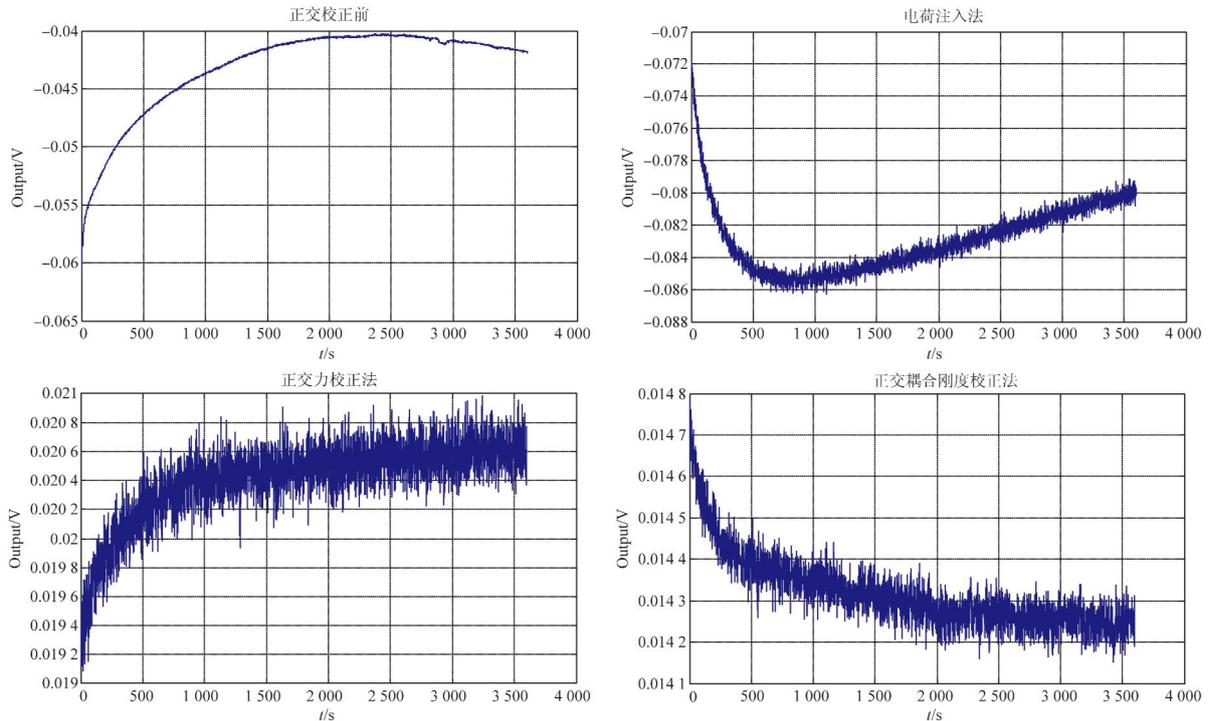


图 14 陀螺输出信号实验结果

Fig. 14 Output signal test curves of MEMS gyroscope

表 1 正交校正测试结果

Tab. 1 Result of quadrature error correction

	正交校正前	电荷注入法 CIM	正交力校正法 QFCM	正交耦合刚度校正法 QCSCM
零偏($^{\circ}/s$)	-4.589	-8.361	2.419	1.751
1σ 零偏稳定性($^{\circ}/h$)	378	423	82	25

5 结 论

本文针对目前 3 种比较主流的硅微机械陀螺仪正交校正方法进行了研究和实验,目的是找出双质量硅微机械陀螺仪正交校正的最优方法。首先指出了双质量结构中左右两部分的正交误差相等,并通过实验进行了验证。其次,对 3 种正交校正方法进行了分析和稳定性判断,从理论上证

明了这 3 种方法的可行性。最后,通过实际的实验对 3 种方法进行了测试,结果显示 3 种方法均可有效消除检测通道中的正交信号,但 QCSCM 的噪声效果最好。同时,采用 CIM, QFCM 和 QCSCM 3 种方法后对应的零偏值和零偏稳定性参数从校正前的 $-4.589^{\circ}/s$ 和 $378^{\circ}/h$ 分别变化到了 $-8.361^{\circ}/s$ 和 $423^{\circ}/h$, $2.419^{\circ}/s$ 和 $82^{\circ}/h$, $1.751^{\circ}/s$ 和 $25^{\circ}/h$ 。理论和实验均证明了 QCSCM 在正交校正方面的效果最优。

参考文献:

[1] 曹慧亮,李宏生,王寿荣,等. 硅微机械陀螺仪测控电路的温度补偿[J]. 光学精密工程,2013,21(12): 3118-3125.
CAO H L, LI H SH, WANG SH R, *et al.*. Temperature compensation methods for silicon MEMS gyroscope monitoring circuit [J]. *Opt. Precision*

Eng., 2013, 21(12): 3118-3125. (in Chinese)
[2] 杨波,王寿荣,李坤宇,等. 利用负刚度效应调谐的硅调谐式陀螺仪[J]. 光学精密工程,2010,18(11): 2398-2406.
YANG B, WANG SH R, LI K Y, *et al.*. Silicon turning gyroscope tuned by negative stiffness effect [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(11): 2398-2406. (in Chinese)

- [3] 夏国明, 杨波, 王寿荣. 硅微机械陀螺自激驱动数字化技术[J]. 光学精密工程, 2010, 19(3): 635-640.
XIA G M, YANG B, WANG SH R. Digital self-oscillation driving technology for silicon micro machined gyroscopes [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 19(3): 635-640. (in Chinese)
- [4] PRIKHODKO I P, ZOTOV S A, TRUSOV A A, *et al.*. Sub-degree-per-hour silicon MEMS rate sensor with 18million Q-factor[C]. *Proc. 16th International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference Transducers*, 2011, 2809-2812.
- [5] SHARMA A, ZAMAN N F, AYAZI F. A sub-0.2°/hr bias drift micromechanical silicon gyroscope with automatic CMOS mode-matching [J]. *Journal of Solid-State Circuits*, 2009, 44(5): 1593-1608.
- [6] PAINTER C. Micromachined vibratory gyroscopes with imperfections [D]. *University of California Irvine*, 2005.
- [7] LI H, CAO H, NI Y. Electrostatic stiffness correction for quadrature error in decoupled dual-mass MEMS gyroscope [J]. *J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS*, 2014, 12(3): 033003.
- [8] SAUKOSKI M, AALTONEN L, HALONEN K A I. Zero-rate output and quadrature compensation in vibratory MEMS gyroscopes [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2007, 7(12): 1639-1652.
- [9] CAO H, LI H. Investigation of a vacuum packaged MEMS gyroscope architecture's temperature robustness [J]. *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, 2013(41): 495-506.
- [10] CHAUMET B, LEVERRER B, ROUGEOT C, *et al.*. A new silicon tuning fork gyroscope for aerospace applications [J]. *Symposium Gyro Technology* 2009, 1: 1-13.
- [11] TATAR E, ALPER S E, AKIN T, *et al.*. Quadrature-error compensation and corresponding effects on the performance of fully decoupled MEMS gyroscopes [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2012, 21(3): 656-667.
- [12] MO B, ZHOU H, ZHENG Q, *et al.*. Quadrature error and offset error suppression methods for micro-gyroscopes [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 503: 174-178.
- [13] 倪云舫, 李宏生, 杨波, 等. 硅微陀螺正交误差直流校正设计与分析[J]. 中国惯性技术学报, 2014, 22(1): 104-108.
NI Y, LI H, YANG B, *et al.*. Design and analysis of a quadrature correction method using DC voltages for silicon micro-gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2014, 22(1): 104-108. (in Chinese)
- [14] 罗兵, 张辉, 吴美平. 硅微陀螺正交误差及其对信号检测的影响[J]. 中国惯性技术学报, 2009, 17(5): 604-607.
LUO B, ZHANG H, WU M. Quadrature signal of micro gyroscope and its effect on signal detection [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2009, 17(5): 604-607. (in Chinese)
- [15] 曹慧亮. 硅微机械陀螺仪静电补偿与控制技术研究和实验 [D]. 南京: 东南大学, 2014.
CAO H. *Research and experiment on the technology of electrostatic compensation and control of silicon micro-machined gyroscope* [D]. Nanjing: Southeast University, 2014. (in Chinese)
- [16] 刘学, 陈志华, 肖定邦, 等. 振动式微陀螺正交误差自补偿方法[J]. 传感技术学报, 2012, 25(9): 1221-1225.
LIU X, CHEN ZH H, XIAO D B, *et al.*. The self-compensation method for eliminating quadrature error of the vibratory micro-gyroscope [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2012, 25(9): 1221-1225. (in Chinese)
- [17] SEEGER J, PARK M, RASTEGAR A, *et al.*. Method and apparatus for electronic cancellation of quadrature error [P]. *United States Patent*, 7290435B2.
- [18] ANTONELLO R, OBOE R, PRANDI L, *et al.*. Open loop compensation of the quadrature error in MEMS vibrating gyroscopes [C]. *IEEE 35th Annual Conference of Industrial Electronics*, 2009: 4034-4037.

作者简介:



曹慧亮(1986—),男,河北石家庄人,讲师。2014年于东南大学获得博士学位。主要从事微系统测控技术方面的研究。E-mail: caohuilang@nuc.edu.cn



刘俊(1968—),男,教授,博导,国家杰出青年科学基金获得者,享受国务院政府特殊津贴专家,中北大学仪器与电子学院院长。2001年毕业于北京理工大学获博士学位。主要从事微纳机电系统,惯性器件与导航,动态测试等方面的研究。E-mail: liuj@seu.edu.cn