

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2518148

MEMS 环形谐振陀螺驱动模态控制方法研究^{*}

寇志伟^{1,2} 崔啸鸣¹ 尹煜¹ 李娜¹ 齐咏生^{1,2}

(1. 内蒙古工业大学电力学院 呼和浩特 010080; 2. 内蒙古工业大学内蒙古自治区机电控制重点实验室 呼和浩特 010080)

摘要:为了有效控制微机电环形谐振陀螺驱动模态的工作状态,提高驱动幅值的稳定性能与谐振频率的实时跟踪性能,本文提出了一种基于相位控制与自动增益控制的驱动模态闭环控制方案。首先,基于环形谐振陀螺的动力学特性与机电接口特点,设计了对称静电驱动-差动电容敏感的机电接口,提出了基于相位控制与自动增益控制的闭环驱动控制方案;其次,构建了闭环驱动控制方案的机电耦合仿真模型,对驱动模态的自激振荡控制、幅值稳定性与频率跟踪状态进行了仿真,验证了系统的动态性能。最后,基于上述方案设计了驱动模态闭环控制电路,实验测试了电路性能。实验结果表明,该电路的驱动激励信号频率能够很好的跟踪陀螺驱动模态谐振频率的变化;在-40℃~60℃温度环境内变化时,驱动检测电压变化范围低于5.08%,幅值随温度的相对变化率小于0.059%,符合全温区稳幅驱动的要求。

关键词:微机电;环形谐振陀螺;驱动模态;闭环控制;相位控制

中图分类号: TN06; TP212 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 510.99

Study on control methods for driving mode of MEMS vibrating ring gyroscope

Kou Zhiwei^{1,2} Cui Xiaoming¹ Yin Yu¹ Li Na¹ Qi Yongsheng^{1,2}

(1. College of Electric Power, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China; 2. Inner Mongolia Key Laboratory of Electromechanical Control, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010080, China)

Abstract: A closed-loop control scheme for the driving mode of a vibrating ring gyroscope based on phase control and automatic gain control is proposed, which is to better control the working state of the gyroscope driving mode, thereby improving the stability of the driving amplitude and the real-time tracking ability of the resonant frequency. First, based on the dynamic characteristics of the vibrating ring gyroscope and the electromechanical interface features, an electromechanical interface with symmetric electrostatic driving and differential capacitive sensing was designed. On this basis, a closed-loop drive control scheme based on phase control and automatic gain control was proposed. Furthermore, an electromechanical coupling simulation model of the closed-loop drive control was constructed. The self-excited oscillation control of the drive mode, amplitude stability, and frequency tracking state were simulated, validating the dynamic performance of the system. Finally, a closed-loop control circuit for the driving mode was designed based on the proposed scheme, and the performance of the circuit was tested. The experimental results show that the driving signal frequency of this circuit can effectively track the variations in the resonant frequency of the gyroscope's driving mode. When the temperature varies within the range of -40℃ to 60℃, the variation range of the drive detection voltage is less than 5.08%, and the relative change in amplitude with temperature is less than 0.059%, which meets the requirements for stable amplitude drive over the full temperature range.

Keywords: MEMS; vibrating ring gyroscope; drive mode; closed-loop control; phase control

0 引言

陀螺仪是一种感测载体旋转的惯性传感器,其作为惯性导航与制导系统的核心传感元件,具有抗干扰能力强、测

量精度高、隐蔽性好等特点,可以在一个完全与外界环境隔绝及电磁信号屏蔽的相对封闭空间内实现精确制导,在航空、航天、遥测、精密制造、武器装备等领域有着广泛而重要的应用^[1-2]。

收稿日期:2025-02-23

*基金项目:内蒙古自治区自然科学基金(2024LHMS06023)项目资助

微电机(micro-electro-mechanical system, MEMS)环形谐振陀螺与半球谐振陀螺类似,是一种基于旋转的轴对称壳体中激发的弹性驻波的科里奥利效应工作的固体陀螺,具有许多独特的优点^[3]。MEMS环形谐振陀螺的敏感元件为一个中心对称的环形整体结构,使得其驱动模态与检测模态的谐振质量、刚度系数与阻尼系数等特性参数一致,可以有效的抑制由于谐振结构工作模态的参数不对称导致的对环境振动产生的虚假敏感信号^[4]。而且,环形谐振陀螺的敏感结构工作在面内四波腹挠曲模态,其工作模态对环境温度变化的敏感特性是相同的,温度性能较好。因此,环形振动陀螺受到了广泛的关注,是目前国外高端MEMS陀螺的主要研究对象之一。

MEMS环形谐振陀螺是一个复杂的机电耦合的传感器系统,其工作状态控制及角速度的感测是通过对驱动模态的控制与检测模态的信号处理实现的。其中驱动模态控制电路的作用是使陀螺的环形敏感结构在静电力作用下激励驱动模态的稳定受迫振动,而且对驱动模态的谐振频率、振幅与相位进行严格控制,以保证陀螺能够稳定可靠的工作^[5]。

驱动电路有开环控制、闭环控制等驱动方式^[6]。开环控制是应用外部振荡电路产生与陀螺敏感元件固有频率相同的激励信号驱动敏感元件稳定振动的一种方式。为了提高角速度敏感信号,激励信号的频率必须严格跟踪敏感元件的固有振动频率。然而硅基材料的热敏性质比较突出,敏感元件的固有频率受环境温度、振动等影响较大,因此开环方式下激励信号频率很难跟踪敏感元件的固有频率的变化。闭环控制方式的驱动信号频率能够实时跟踪陀螺敏感元件的固有频率变化,从而及时调整驱动信号的频率、相位与幅值等参数,可以较好的提高陀螺的检测灵敏度。

MEMS陀螺的闭环驱动控制方式有双闭环驱动、单闭环驱动等。例如,清华大学针对振动轮式陀螺提出了自激锁相驱动控制方法^[7]。中航工业飞行研究所针对双质量块音叉式硅微陀螺提出了单闭环控制方法^[8],北京大学针对梳齿式硅微陀螺提出了基于改进模糊算法和神经网络算法自动控制方法^[9],东南大学针对双质量块硅微陀螺提出了基于自激振荡技术的驱动频率控制方法^[10],南京理工大学提出的基于数字频率合成器的数字锁相环科氏振动陀螺驱动控制方法等^[11]。因此,MEMS陀螺的驱动控制方法与其敏感结构、机电接口是密切相关的,设计对应的控制电路才能获得较高的性能。

综上所述,针对具体的敏感结构设计与改进控制方法是提高MEMS陀螺仪性能的有效途径。本文基于课题组研制的硅基环形谐振陀螺开展研究,设计了基于相位控制与自动增益控制的驱动模态闭环控制方案,以期能够有效的减弱非理想因素对陀螺工作模态的干扰,更好的发挥环形谐振陀螺的结构优势。

1 环形谐振陀螺结构及工作原理

课题组研制的电容式MEMS全对称硅基环形谐振陀螺敏感结构如图1所示,其由玻璃基底、谐振结构、硅基电极等组成。

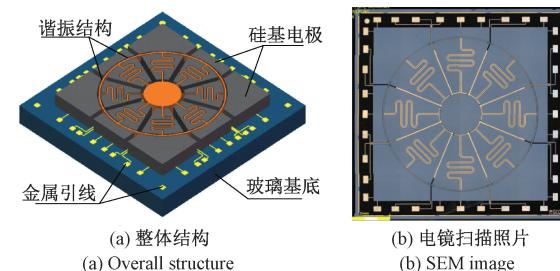


图1 MEMS硅基环形谐振陀螺敏感结构

Fig. 1 The whole structure of vibrating ring gyroscope

对于图1所示的完全对称的八弹性梁环形敏感结构,其工作模态一般为波数 $n=2$ 的面内椭圆形挠曲振动。理论上这两种工作模态的振动波腹与波节是严格正交的^[12-13],即第一模态的振动主轴(波幅轴)对应于第二模态的振动从轴(波节轴),而且两种振动模态的振动主轴之间的夹角是 45° ,如图2所示。

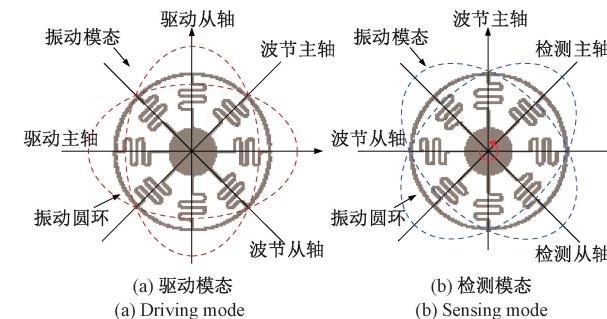


图2 环形谐振陀螺的工作模态

Fig. 2 The working modes of vibrating ring gyroscope

在陀螺的驱动电极上施加频率为 ω_0 的简谐驱动力 $f_1(t)$ 时,激励环形谐振子驱动模态的椭圆弯曲振动,其受迫振动方程为:

$$\begin{cases} m\ddot{q}_1(t) + c_1\dot{q}_1(t) + k_1q_1(t) = f_1(t) \\ f_1(t) = F_d \sin\omega_0 t \end{cases} \quad (1)$$

式中: m 、 c_1 、 k_1 、 q_1 分别为驱动模态的等效质量、阻尼系数、刚度系数与广义位移; $f_1(t)$ 为驱动模态的静电激励力, ω_0 为静电驱动力角频率。

则驱动模态的广义位移为:

$$q_1(t) = A_1 \cos\omega_0 t = \frac{Q_{n1}F_d}{k_1} \cos\omega_0 t \quad (2)$$

式中: A_1 为驱动位移幅值, Q_{n1} 为驱动模态的品质因数。

环形振动陀螺敏感模态的振动为科氏惯性力 $f_c(t)$ 耦合的二阶振动系统,其电力学方程可以为:

$$\begin{cases} m\ddot{q}_2(t) + c_2\dot{q}_2(t) + k_2q_2(t) = f_c(t) \\ f_c(t) = 4\lambda_{ag}m\Omega_z\dot{q}_1(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: m 、 c_2 、 k_2 分别为检测模态的等效质量、阻尼系数、刚度系数与广义位移, $f_c(t)$ 为驱动加速度产生的科氏惯性力, Ω_z 为敏感轴方向输入角速度, λ_{ag} 为环形固体波动陀螺的角增益。

检测模态位移的稳态解为:

$$q_2(t) = 4\lambda_{ag}A_1 \frac{Q_{n2}}{\omega_0} \cdot \Omega_z \cos(\omega_0 t) \quad (4)$$

式中: Q_{n2} 为检测模态的品质因数。

因此, 检测模态的稳态位移与输入角速率幅值 Ω_z 及驱动位移 A_1 的大小成正比。

2 驱动模态闭环控制方案设计

2.1 闭环驱动机电接口设计

为了增强敏感信号的灵敏度, 提高信噪比, 陀螺的机电接口形式设计为对称静电驱动-差动电容敏感的双层全对称方式, 如图 3 所示。

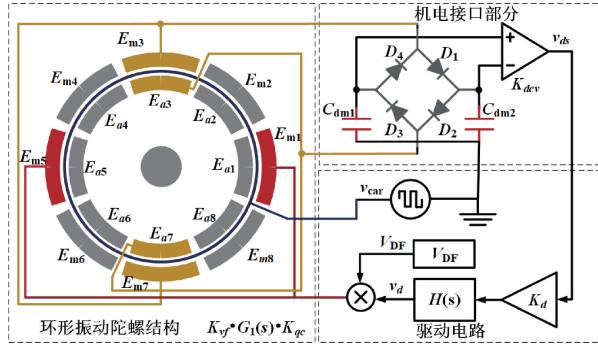


图 3 环形谐振陀螺的机电接口设计

Fig. 3 Electromechanical interface of vibrating ring gyroscope

图 3 中, 对称电极组 E_{m1} 、 E_{m5} 作为驱动电极, 输入驱动电压信号 v_{df} 。电极组 E_{m3} 、 E_{a3} 与 E_{m7} 、 E_{a7} 形成差动电容敏感传感器, 输出驱动检测电压信号 v_{ds} 。

设驱动电极施加的偏置电压为 V_{DF} , 交流驱动电压为 $v_d(t) = V_d \sin(\omega t)$, 则驱动模态所受的静电力为:

$$f_d(t) = \frac{2C_{d0}}{x_0} V_{DF} v_d(t) = \frac{2C_{d0}}{x_0} V_{DF} V_d \sin \omega_0 t \quad (5)$$

式中: C_{d0} 为静态驱动电容, x_0 为电极电容间距。

陀螺驱动模态环路的闭环传递函数为:

$$\frac{V_{ds}(j\omega)}{V_{di}(j\omega)} = \frac{K_{vf} K_{qc} G_1(j\omega)}{1 - K_{vf} K_{qc} K_d G_1(j\omega) H(j\omega)} \quad (6)$$

式中: K_{vf} 、 K_{qc} 分别为电压/力矩系数、位移/电容系数; $G_1(j\omega)$ 、 $H(j\omega)$ 分别为驱动模态传递函数与驱动电路控制函数。则驱动环路维持稳定振荡的条件为:

$$K_{vf} K_{qc} K_d G_1(j\omega) H(j\omega) = 1 \quad (7)$$

因此, 驱动环路的幅值与相位平衡条件为:

$$\begin{cases} |K_{vf} K_{qc} K_d G(j\omega) H(j\omega)| = 1 \\ \angle K_{vf} K_{qc} K_d G(j\omega) H(j\omega) = 2\pi \end{cases} \quad (8)$$

当环路的某一频率 ω 满足平衡条件式(8)时, 陀螺闭环驱动环路处于等幅自激振荡状态。为了能使振荡建立起来, 初始信号的幅值需要大于驱动模态的输入幅值, 因此闭环驱动环路的起振条件为:

$$|K_{vf} K_{qc} K_d G_1(j\omega) H(j\omega)| > 1 \quad (9)$$

2.2 闭环驱动控制方案设计

根据上述分析, 驱动控制回路的控制要求是使驱动激励信号的频率尽可能的接近驱动模态的固有频率, 同时最大限度的提高工作频率与振动幅值的稳定性^[14-15], 因此本文提出了一种基于相位控制与自动增益控制方法的环形谐振陀螺驱动模态自激振荡控制策略, 如图 4 所示。

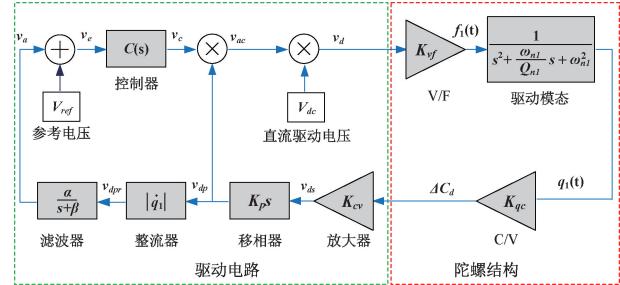


图 4 环形谐振陀螺驱动模态闭环控制设计

Fig. 4 Principle of closed-loop drive for vibrating ring gyroscope

驱动模态控制环路以驱动模态的振动位移 q_1 为控制对象, 其由驱动检测电极(E_{a3} 、 E_{m3} 与 E_{a7} 、 E_{m7})转化为电容的变化量 ΔC_{ds} , 然后由电容检测接口电路转化为电压 v_{ds} 并进行放大; 经 90° 移相电路移相后分为两路信号, 其中一路信号作为驱动电压信号 v_d 的调制基准信号, 另一路信号经整流滤波后与参考电压 V_{ref} 进行比较, 形成控制信号 v_c 。自动增益控制信号被调制基准信号调制后形成陀螺驱动的交流电压 v_d , 其与直流驱动电压 V_{DF} 叠加后成为驱动施力电压信号 v_{df} , 施加到陀螺驱动模态驱动电极(E_{m1} 与 E_{m5})上, 经 V/F 转换形成静电驱动力作用到陀螺的驱动模态主轴, 激发驱动模态的闭环振动。

陀螺驱动模态的静电驱动力为:

$$f_1(t) = K_{vf} v_{df}(t) = K_{vf} V_{DF} v_c K_p K_{cv} K_{qc} \dot{q}_1 \quad (10)$$

式中: K_{vf} 、 K_p 、 K_{cv} 、 K_{qc} 分别为驱动模态静电力转换参数、移相参数、电容电压转化参数与位移电容转化参数; v_c 为 PID 控制器输出的系统增益控制电压, 其由驱动模态的振动幅值 A_1 与振幅设定值 V_{ref} 的差值经 PID 控制器产生。设控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (11)$$

式中: K_1 、 K_1 、 K_1 分别为控制器的比例、积分与微分参数。

则 PID 控制器输出电压为:

$$\dot{v}_c(t) = -K_d \ddot{v}_a - K_p \dot{v}_a + K_i (V_{ref} - v_a) \quad (12)$$

式中: V_{ref} 为驱动模态的给定幅值电压; v_a 为低通滤波器输出的驱动模态幅值电压。

设低通滤波器的传递函数为:

$$G_{LPF}(s) = \frac{\alpha_d}{1 + s\beta_d} \quad (13)$$

式中: α_d 、 β_d 分别为低通滤波器的通带放大系数与通带截止频率。

则滤波器输出的驱动位移电压 v_a 为:

$$v_a = \alpha_d |K_{qc} K_{cv} K_p \dot{q}_1| - \beta_d v_a \quad (14)$$

将式(10)代入驱动模态动力学方程式(1),则:

$$\begin{aligned} \frac{1}{m} f_1(t) &= \ddot{q}_1(t) + \frac{\omega_{n1}}{Q_{n1}} \dot{q}_1(t) + \omega_{n1}^2 q_1(t) = \\ \frac{1}{m} K_{vf} V_{DF} v_c K_p K_{cv} K_{qc} \dot{q}_1(t) \end{aligned} \quad (15)$$

驱动模态控制环路通过静电反馈引入了一个参量可控的阻尼力,通过调整其参量 v_c 可使驱动环路的等效阻尼为零。此时,驱动模态振动为无阻尼运动,可以维持等幅振动,动力学方程为:

$$\begin{cases} \ddot{q}_1(t) + \omega_{n1}^2 q_1(t) = 0 \\ \frac{\omega_{n1}}{Q_{n1}} - \frac{1}{m} K_{vf} K_{sp} K_{cv} K_{qc} V_{DF} v_c = 0 \end{cases} \quad (16)$$

式(10)、(12)、(15)与(16)构成了图4所示闭环驱动系统的方程组。当驱动位移电压 v_a 比设定幅值 V_{ref} 小,系统会增大环路的增益以减小系统等效阻尼,使驱动幅值增加;反之,当 v_a 比 V_{ref} 大时,系统会增加环路的阻尼使驱动幅度降低。因此,该方法通过增益的自动动态控制,使得驱动环路的等效阻尼为零,从而保持驱动模态的横幅振动。

3 闭环驱动控制建模与仿真

为了进一步验证上述基于相位控制与自动增益控制的驱动模态控制方案,构建了该方案的机电耦合仿真模型,如图5所示,仿真参数如表1所示。

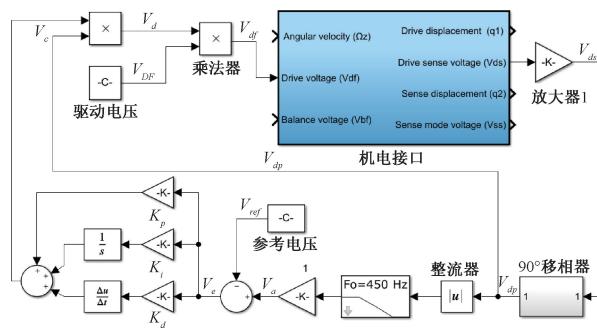


图5 驱动模态机电耦合仿真模型

Fig. 5 Electromechanical coupling model of driving mode

驱动检测电压 v_{ds} 放大后经90°移相电路移相分为两路信号,其中一路信号作为 v_d 的调制基准信号,另一路信号与参考电压 V_{ref} 比较后经PID控制器形成自动增益控

制信号 v_c 。 v_c 被基准信号调制后形成驱动电压的交流分量 v_d ,其与直流分量 v_{DF} 叠加后形成驱动电压信号 v_{df} ,激发驱动模态闭环振动。

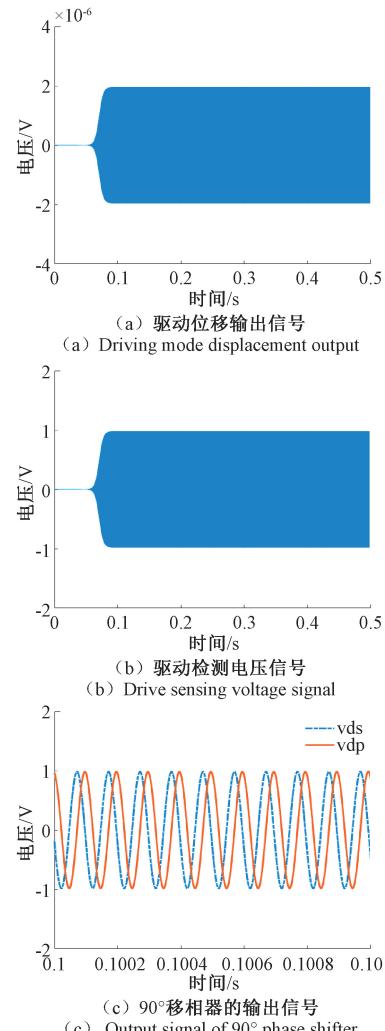
表1 机电耦合模型仿真参数

Table 1 parameters of electromechanical coupling model

参数名称	参数值
m	6.0736×10^{-7} kg
k_2	2.4206×10^3 m/s
c_2	2.1783×10^{-7} N/m/s
K_{scf}	1.0214×10^{-6}
K_{svf}	6.2586×10^{-8}
K_{scv}	600.8310

由机电耦合仿真模型得到系统控制环路的驱动位移信号(q_1)、驱动检测电压信号(v_{ds})、90°移相器的输出信号与交流驱动电压信号如图6所示。

由图6可知,驱动模态的位移振动信号在0.1 s内稳定在2 μm(图6(a)),同时驱动检测电压输出信号稳定在1 V(图6(b)),且位移信号与电压信号的频率 ω 与驱动模态谐



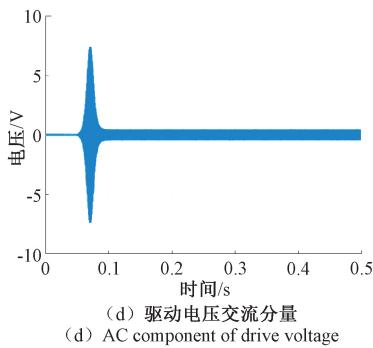


图 6 驱动模态闭环控制仿真波形

Fig. 6 Simulation of closed-loop control for driving mode

振频率 ω_0 相同,说明设计的自激驱动闭环控制环路能够较好的控制陀螺驱动模态,且瞬态性能良好。90°移相器在保证幅值与频率不变的情形下实现精密移相(图 6(c));LPF 输出放大电压信号稳定的保持在 3 V,与幅值参考电压 V_{ref} 大小相等(图 6(d))。根据上述仿真与分析可知,本文设计的基于相位控制与自动增益控制的驱动模态自激控制系统环路的各处机电信号工作点稳定,且在驱动模态振动幅值稳定的同时,系统能够很好的跟踪驱动模态的谐振频率。

4 实验与分析

为了验证上述基于相位控制与自动增益控制的驱动模态自激控制环路正确性,搭建了实验室测试方案。函数信号发生器输出的扫频信号一路输入到驱动电路板的驱动信号输入测试端(v_d),另一路输入到示波器观察;驱动电路板的驱动信号反馈端(v_{ds})输出两路信号,其中一路输入到数字万用表读取数值,另一路输出到示波器观察,如图 7 所示。

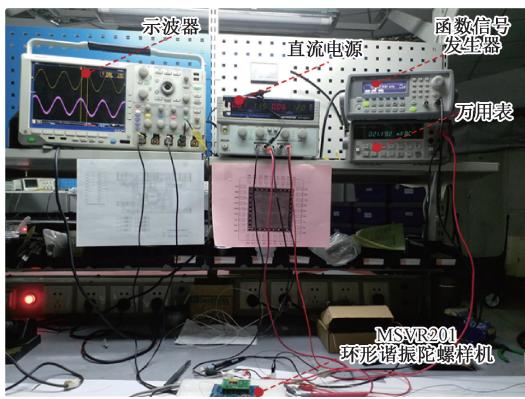


图 7 驱动模态闭环控制测试实验装置

Fig. 7 Test experiment on closed-loop control of driving mode

根据前文分析,MEMS 陀螺驱动模态控制电路主要对驱动模态的相位与振幅的控制,其中相位的控制主要表现在驱动电压信号与驱动检测信号的相位差保持为 90°,此时驱动电压频率严格的跟踪驱动模态谐振频率,并为检测模态的相敏解调提供基准解调信号;振幅控制主要为驱动模

态振动幅值的稳定控制,通过驱动检测电压的幅度稳定性测试。常温环境下测试相位的稳定性与幅值的稳定性测试如图 8、9 所示。



图 8 驱动模态幅值稳定性测试

Fig. 8 Amplitude stability test of driving mode

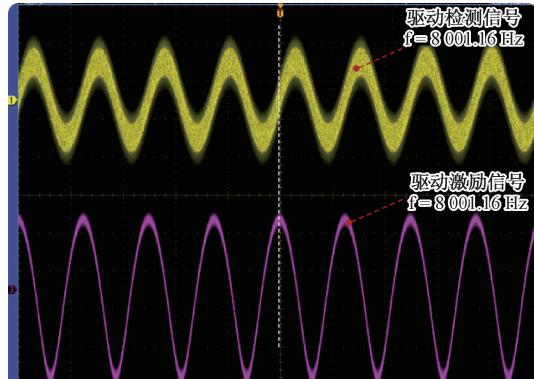


图 9 驱动模态的相位测试

Fig. 9 Phase testing of driving mode

由图 9 可知,驱动激励信号频率为 8 001.16 Hz,驱动模态在 0.2 s 内幅值达到稳定,且达稳定后超调量较小,很好的实现了驱动闭环的稳定控制。示波器通道 1 为驱动激励电压,通道 2 为驱动模态检测电压,驱动激励电压经过移相电路后在驱动检测电极上输出的电压信号相位偏移为 90°。

为了验证本文设计的 MEMS 环形谐振陀螺驱动模态闭环控制方式在不同工作温度环境下的驱动稳定性,设计了 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温区测试实验。首先,将 MEMS 环形谐振陀螺放置在温控试验箱,试验箱初始温度设置为 -40°C ;并且使用万用表以 1 Hz 的采样频率采集记录陀螺的驱动检测电压信号,采集时间为 40 min;然后将试验箱的温度分别设置为 -40°C 、 -20°C 、 0°C 、 20°C 、 40°C 、 60°C ,同时采集记录陀螺的驱动检测电压,采集时间为 60 min。

根据测试的实验数据,绘制 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度区间的温度变化与驱动检测电压曲线,如图 10 所示。

由图 10 可知,在环境温度为 $-40^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 温度区间,

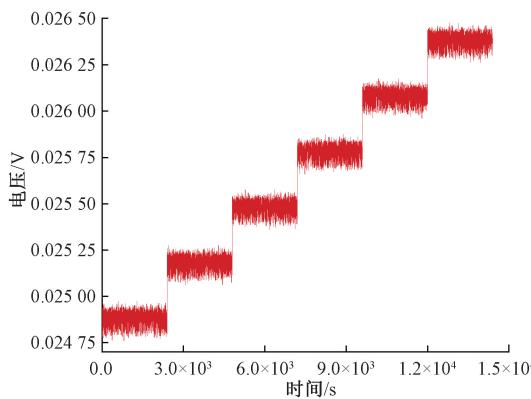


图 10 驱动模态的全温区测试

Fig. 10 Full temperature zone testing of driving mode

陀螺仪驱动检测电极输出的电压变化范围低于 5.08%，幅值随温度的相对变化率小于 0.059%，符合全温区恒幅控制要求。

5 结 论

MEMS 硅基陀螺仪的敏感结构设计、模态控制方法与信号处理电路性能决定了其性能指标,因此可以通过优化敏感结构设计与加工工艺、提升模态控制方法、改善信号处理电路性能等方式提高陀螺仪的关键指标。谐振陀螺工作模态控制方法及角速度的信号感测是通过对驱动模态的控制与检测模态的信号处理实现的,其中驱动模态的谐振频率、振幅与相位的稳定控制是实现高性能测量的关键。本文提出了一种基于相位控制与自动增益控制的环形谐振陀螺驱动模态闭环控制方法。

首先,根据环形谐振陀螺的动力学特性与机电接口特点,设计了对称电极静电驱动-差动电容敏感的机电接口形式,分析了闭环驱动的控制函数与起振稳幅条件,提出了基于相位控制与自动增益控制的环形谐振陀螺驱动模态闭环驱动控制方案。其次,构建了闭环驱动控制方案的机电耦合仿真模型,对驱动模态的自激振荡控制、幅值稳定性与频率跟踪状态进行了仿真。由仿真分析可知,驱动模态的位移振动信号在 0.1 s 内稳定在 $2 \mu\text{m}$,驱动检测电压输出信号稳定在 1 V,且位移信号与电压信号的频率 ω 与驱动模态谐振频率 ω_0 相同,系统能够很好的跟踪驱动模态的谐振频率,验证了系统的动态性能。实验测试表明,驱动模态在 0.2 s 内幅值达到稳定且达稳定后超调量很小,驱动检测信号与驱动电压信号的相位差严格保持 90° 。电路在 $-40^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 温度环境内变化时,驱动频率能够很好的跟踪驱动模态谐振频率的变化,驱动检测电压变化范围低于 5.08%,幅值随温度的相对变化率小于 0.059%,可以应用在手机、相机、仪表仪器等电子系统中。

参考文献

[1] 席翔,孙江坤,肖定邦,等.高精度微机电陀螺研究现

- 状与发展趋势[J].中国科学:技术科学,2023,53(8):1255-1271.
- XI X, SUN J K, XIAO D B, et al. Research status and development trend of high-precision MEMS gyroscope[J]. Science in China: Technical Science, 2023,53(8): 1255-1271.
- [2] 郑辛,刘飞,雷明,等.微小型惯性仪表发展现状、趋势以及对行业的影响[J].中国惯性技术学报,2021,29(6): 701-708.
- ZHENG X, LIU F, LEI M, et al. The development status, trend and impact on the industry of micro inertial instruments [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2021,29(6): 701-708.
- [3] SIEROCIU D, MACIAS M. Fractional order identification of gyroscope MEMS noise under various temperature conditions [J]. Sensors, 2024, 24 (23): 7504-7504.
- [4] 蒋军彪,刘奎,谭鹏立.微型固体波动陀螺技术发展研究[J].弹箭与制导学报,2021,41(6):12-17.
- JIANG J B, LIU K, TAN P L. Research on the development of micro solid wave gyroscope technology[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021,41(6): 12-17.
- [5] 谷留涛,张卫平,崔峰,等.微谐振陀螺仪从半球到平面的演变[J].半导体光电,2022,43(6):1011-1019.
- GU L T, ZHANG W P, CUI F, et al. Evolution of micro resonant gyroscope from hemisphere to plane[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022,43(6): 1011-1019.
- [6] 寇志伟,曹慧亮,石云波,等.电容式环形微机电振动陀螺的设计[J].光学精密工程,2019,27(4):842-848.
- KOU ZH W, CAO H L, SHI Y B, et al. Design of capacitive ring MEMS vibratory gyroscope[J]. Optics and Precision Engineering, 2019,27(4): 842-848.
- [7] 陈志勇,宋霖,张嵘,等.高 Q 值微机电陀螺的快速起振控制[J].光学精密工程,2018,26(5):1070-1077.
- CHEN ZH Y, SONG L, ZHANG R, et al. Rapid start-up control of high Q-factor MEMS gyroscope[J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26 (5): 1070-1077.
- [8] 王玉朝.高精度音叉式硅微陀螺研制进展[C].2019 年(第四届)中国航空科学技术大会论文集.中国航空学会,2019: 26-32.
- WANG Y CH. Development progress of high-precision tuning fork silicon micro gyroscope[C]. 2019(Fourth) China Aviation Science and Technology Conference. Aviation Society of China, 2019: 26-32.
- [9] 崔江,赵启成.一种高性能战术级单片双轴 MEMS 陀螺仪[J].

- off-plane coupling suppression silicon gratings [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(11): 11765-11773.
- [10] XU Y Y, LIN J, HE CH H, et al. Design of a shock-protected structure for MEMS gyroscopes over a full temperature range[J]. Micromachines, 2024, 15(2):15.
- [11] 周向奇. 电容式硅微陀螺模拟前端读出电路设计研究 [D]. 天津:天津理工大学,2023.
- ZHOU X Q. Research on the design of readout circuit for analog front-end of capacitive silicon micro gyroscope [D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.
- [12] 寇志伟, 崔啸鸣, 陈苏力德, 等. 一种高灵敏度电容式波动陀螺的设计与分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(7):39-44.
- KOU ZH W, CUI X M, CHEN S L D, et al. Design and analysis of a capacitive wave gyroscope with high-sensitivity[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(7): 39-44.
- [13] 陈钢, 刘宇鹏, 崔让, 等. MEMS 环形陀螺模态间刚度耦合频率调谐 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44 (9): 220-227.
- CHEN G, LIU Y P, CUI R, et al. MEMS ring gyro frequency tuning for intermodal stiffness coupling[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 220-227.
- [14] 李涵, 胡少兵, 程为彬. CPSO 优化 BP 网络的 MEMS 陀螺随机误差补偿[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(11): 228-234.
- LI H, HU SH B, CHENG W B. MEMS gyroscope random error compensation based on CPSO-optimized BP network[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(11): 228-234.
- [15] 张林, 李荣冰, 徐菁, 等. 微半球陀螺交直流混合电压切换驱动方法研究[J]. 电子测量技术, 2024, 47(1): 55-62.
- ZHANG L, LI R B, XU J, et al. Research on AC-DC mixed voltage switching driving method for μ HRG[J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(1): 55-62.

作者简介

寇志伟(通信作者),博士,副教授,主要研究方向为微机电传感器技术、导航与测控技术、电工理论与新技术。

E-mail:kouzhiwei@imut.edu.cn

崔啸鸣,硕士,副教授,主要研究方向为导航与测控技术、检测技术与自动化装置。

E-mail:cuixiaoming@imut.edu.cn

尹煜,硕士,实验师,主要研究方向为导航与测控技术、模式识别与智能系统。

E-mail:yinyu@imut.edu.cn

李娜,硕士,实验师,主要研究方向为导航与测控技术、电工理论与新技术。

E-mail:lina@imut.edu.cn

齐咏生,博士,教授,主要研究方向为机器人协同控制技术。

E-mail:qys@imut.edu.cn