

文章编号 1004-924X(2024)20-3059-12

MEMS 速率陀螺仪力平衡控制回路相位误差分析与验证

高 阳¹, 贾 佳², 孟 琳¹, 阮志虎¹, 曹慧亮^{3*}

(1. 南京工程学院 人工智能产业技术研究院, 江苏 南京 211167;

2. 江苏科技大学 自动化学院, 江苏 镇江 212100;

3. 中北大学 仪器与电子学院, 山西 太原 030051)

摘要:为明晰基于力平衡(FTR)检测模式的 MEMS 速率陀螺仪中相位误差对陀螺仪静态和动态性能的影响规律,构建了包含相位误差的 FTR 速率控制回路模型,以此分析不同相位误差对静态性能的影响。首先,介绍了采用 FTR 速率模式的陀螺仪基本原理,简要分析了相位误差对驱动模态的影响。接着,提出了包含反馈通路和前向通路相位误差的 FTR 速率控制回路模型,并对该模型进行了等效变换。然后,根据上述模型分析不同类型的相位误差对陀螺仪动态和静态性能的影响。最后,进行了相应的试验验证。实验结果表明:反馈通路中的相位误差的两小时测量值的稳定性为 0.094 9,且该误差仅会改变标度因数;前向通路中的相位误差为温度敏感项,且补偿前后的零偏值和零偏漂移值分别缩小了 4.8 和 2.9 倍,零偏不稳定性 and 角度随机游走分别提升了 0.8 和 0.9 倍。反馈通路的相位误差可以通过标度的方法来获取进行补偿,且该误差仅影响标度因数的数值大小,并不影响零偏和带宽性能;前向通路中的相位误差严重制约了静态性能,但室温状态下并不影响动态性能。

关键词:MEMS 速率陀螺仪;力平衡控制;相位误差;零偏性能;标度因数;带宽

中图分类号:TP394.1;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/OPE.20243220.3059

Analysis and verification of phase error in force balance control loop of MEMS rate gyroscope

GAO Yang¹, JIA Jia², MENG Lin¹, RUAN Zhihu¹, CAO Huiliang^{3*}

(1. Artificial Intelligence Industrial Technology Research Institute, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China;

2. College of Automation, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212003, China;

3. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China)

* Corresponding author, E-mail: caohuiliang@nuc.edu.cn

Abstract: In order to clarify the influence of phase error on the static and dynamic performance of MEMS rate gyroscopes based on the force to rebalance (FTR) measurement mode, the model of FTR rate control loop with phase error was constructed to analyze the influence of different phase errors on the dynamic

收稿日期:2024-08-24;修订日期:2024-09-14.

基金项目:国家重点研发计划“智能传感器”重点专项(No. 2022YFB3205000);国家自然科学基金重点联合项目(No. U2230206);江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(No. 24KJB510007);南京工程学院创新基金面上项目(No. CKJB202306)

and static performance. Firstly, the basic principle of the gyroscope using FTR rate mode was introduced, and the effect of phase error on the driving modes was briefly analyzed. Secondly, the model of FTR rate control loop containing phase errors in the feedback and forward channels was proposed, and an equivalent transformation of the model was performed. Thirdly, the effects of different types of phase errors on the dynamic and static performance of the gyroscope were analyzed according to the above model. Finally, the corresponding experimental validation was conducted. Experimental results indicate that the stability of the two-hourly measured value of the phase error in the feedback channel is 0.094 9, and the error only changes the value of scale factor; the bias and bias drift values before and after the compensation of the phase error in the forward channel are reduced by 4.8 and 2.9 times, respectively, and the bias instability and angular random walking are improved by 0.8 and 0.9 times, respectively. The phase error in the feedback channel can be compensated by the calibration, and this error only affects the value of the scale factor, and does not affect the bias and bandwidth performance; the phase error in the forward channel seriously restricts the static performance, but does not affect the dynamic performance at room temperature.

Key words: MEMS rate gyroscope; force-to-rebalance control; phase error; bias performance; scale factor; bandwidth

1 引 言

MEMS 陀螺仪作为一种不依赖外部信号进行角运动检测的传感器,具有较低的 CSWaP(成本^[1-4],尺寸^[1,3-6],重量^[1,3]和功率^[2,4-5])。不同结构类型的 MEMS 陀螺仪都具有检测旋转角度(速率积分模式^[7])或角速度(速率模式^[8]和频率调制模式^[9])的能力。其中,速率积分模式又称为全角模式,具有优异的动态性能,但仅适配于轴对称结构形式的谐振子,其测量精度依赖于谐振子结构对称性^[7];频率调制模式同样具有优异的动态性能,但其角增益系数较小,使其鉴频精度的要求较高,制约了其静态性能^[9]。

速率模式又分为开环检测模式和力平衡(Force to Rebalance, FTR)检测模式,其中开环检测模式通过检测模态的振动直接获取速率信息,其测量范围受限于驱动模态的振动幅度^[10]和检测模态拾取梳齿的间距^[11],且带宽约为模态频率的 0.5 倍^[12];力平衡检测模式通过平衡力抵消哥氏力所引起的检测模态的振动,并通过平衡力的大小反应速率信息,具有较优的动态性能,且相较于上述两种检测模式具有控制方法简单且精度较高的优势,目前已广泛应用于消费电子领域及汽车系统^[1-6]。FTR 检测模式的性能由工作模态的频差(Δf)和品质因数(Q 值)决定^[13]。因此,大多数高性能 MEMS 速率陀螺仪都具有较

高 Q 值且工作于退化状态^[8,14-15],但实用且可靠的 MEMS 陀螺仪在线模态频率调谐方法相对较少。此外,由于封装技术、结构设计水平和成本控制的原因,一些陀螺仪的品质因数较低。为了保证这些陀螺仪的测量精度,它们的频差通常设计较小。然而,低 Q 值(温度敏感项)和小 Δf 会导致检测模态速率输出信号的相角出现偏差^[16-17]。而且,陀螺仪的前端检测以及激励电路也会产生相位滞后^[1,3,18-19]。

上述相位误差会引起正交信号与角速度信号的耦合,恶化 MEMS 陀螺仪的性能^[20-21]。因此,有必要分析相位误差对速率 MEMS 陀螺仪的影响,为进一步实现相位误差补偿指明方向。文献[1]研究了数字系统中相位误差对陀螺仪零偏性能的影响并进行了补偿。文献[3]提及了力平衡控制回路中不同位置存在的相位误差,并通过标定获取了 FTR 控制回路前向通路的相位误差,改善了零偏性能。文献[6]研究了检测模态前向通路的相位误差对陀螺仪零偏性能的影响,并通过双边带激励信号实时获取该误差从而实现补偿;文献[16]探究了检测模态品质因数对解调相角的影响规律并对其进行标定与补偿;文献[18]和文献[22]分析了前端电容-电压(C/V)转换电路的相位延迟对零偏性能的影响,并重新设计了合理的 C/V 转换电路以降低相位延迟;文献[23]分析了检测模态前向通路的相位误差对静

态性能的影响,并通过驱动模态激励信号和正交信号的相位差进行解调参考信号的相位补偿。

但上述文献并未分析 FTR 速率测量控制回路中不同位置的相位误差对 MEMS 陀螺仪的静态和动态性能的影响。本文针对 MEMS 速率陀螺仪的力平衡控制回路中存在的相位误差进行分析,不失一般性地提出包含反馈通路和前向通路相位误差的力平衡控制回路模型,并对包含相位误差的力平衡控制回路模型进行等效变换,从而获取对应的等效单位负反馈控制回路模型,并基于该等效单位负反馈控制回路进行了力平衡控制回路的时域和频域分析,研究反馈通路和前向通路中存在的相位误差对 MEMS 陀螺仪零偏、标度因数和带宽的影响规律,以此揭示不同相位误差对陀螺仪静态和动态性能的影响权重。

2 MEMS 速率陀螺仪基本原理

2.1 速率陀螺仪工作原理

图 1 所示为基于 FTR 控制方法的 MEMS 陀螺仪的基本控制框图。陀螺仪系统分为两个控制回路:驱动模态控制回路和力平衡(FTR)速率

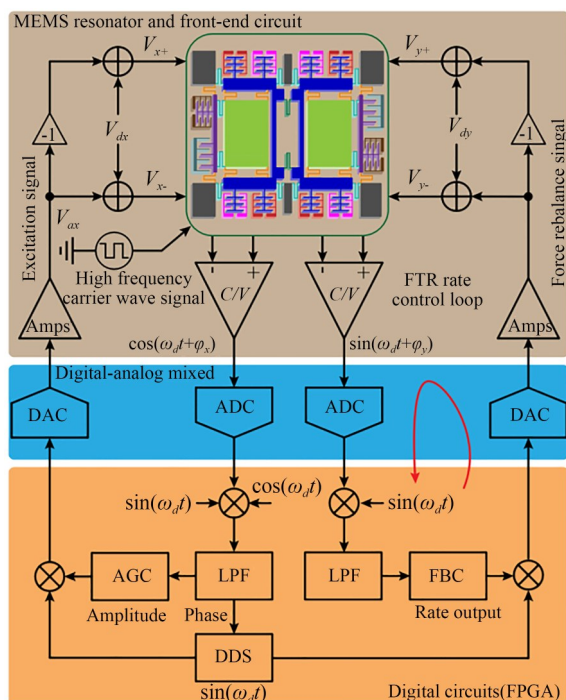


图 1 基于 FTR 速率控制模式的 MEMS 陀螺仪原理框图
Fig.1 Schematic block diagram of MEMS gyroscope based on FTR rate control mode

控制回路(检测模态控制回路)。为了提取两种工作模态的振动信号,在前端电路中采用了基于环形二极管的电容检测电路^[24],该检测电路需在谐振器的公共端施加高频方波信号,以产生模态振动信号和高频信号的调制,并利用二极管的正向导通性实现模态振动信号的提取,从而抑制馈通对两个模态前端电路处信号的干扰^[25]。驱动模态控制回路采用自动增益控制器(Automatic Gain Control, AGC)和直接式数字频率合成器(Direct Digital Synthesis, DDS)分别实现恒幅控制和模态频率跟踪。FTR 速率控制回路被设计为产生一个反馈力来抵消由科里奥利力引起的检测模态振动,因此采用反馈控制器(Feedback Controller, FBC)的输出来表征速率信息。

考虑阻尼耦合和刚度耦合的陀螺仪运动方程可表示为:

$$\begin{cases} m_c \ddot{x} + c_x \dot{x} + c_{xy} \dot{y} + 2m_c \Omega_z \dot{y} + k_x x + k_{xy} y = f_x \\ m_c \ddot{y} + c_y \dot{y} + c_{xy} \dot{x} - 2m_c \Omega_z \dot{x} + k_y y + k_{xy} x = f_y \end{cases} \quad (1)$$

其中: m_c 为参与谐振器振动的质量, x 和 y 分别为驱动模态和检测模态的振动位移, c_x 和 c_y 分别为两模态的阻尼系数, c_{xy} 为两模态间的耦合阻尼系数; k_x 和 k_y 分别为两模态的刚度系数, k_{xy} 为两模态间的耦合刚度, f_x 和 f_y 分别为两模态的外部作用力。 Ω_z 为敏感轴向的转速。

根据速率模式的特点,令 $f_x = A_d \sin(\omega_d t)$ 。则由 f_x 引起的驱动模态位移,以及由阻尼耦合、转速和刚度耦合引起的检测模态的振动位移可表示为:

$$x(t) = A_x \sin(\omega_d t - \varphi_x), \quad (2)$$

$$y(t) = A_i \sin(\omega_d t - \varphi_y) + A_q \cos(\omega_d t - \varphi_y). \quad (3)$$

式(3)中, $A_i \sin(\omega_d t - \varphi_y)$ 为同相分量, $A_q \cos(\omega_d t - \varphi_y)$ 为正交分量,其中:

$$\varphi(x) = \arctan \frac{\omega_x \omega_d}{(\omega_x^2 - \omega_d^2) Q_x}, \quad (4)$$

$$\varphi(y) = \arctan \frac{\omega_d \omega_y}{(\omega_y^2 - \omega_d^2) Q_y}, \quad (5)$$

$$\omega_x = \sqrt{k_x / m_c}, \quad (6)$$

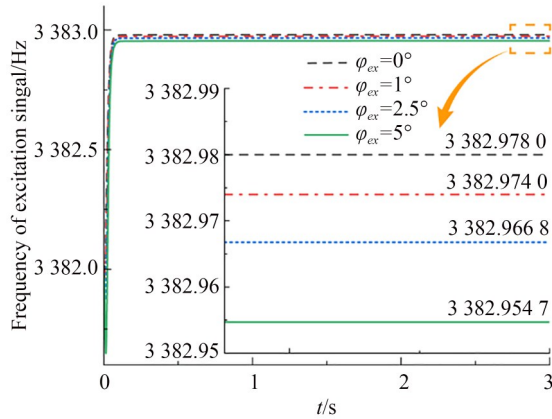
$$\omega_y = \sqrt{k_y / m_c}, \quad (7)$$

$$Q_x = m_x \omega_x / d_x, \quad (8)$$

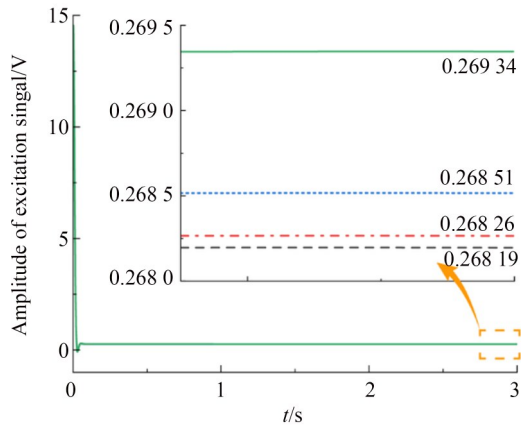
$$Q_y = m_y \omega_y / d_y. \quad (9)$$

Fig. 3 Trends in the effect of $\omega_d - \omega_r$ on φ_r for different Q_r

根据表 1 中所列参数,图 4 展示了相位误差对驱动模态控制回路的影响。图 4(a)展示了相位误差对模态频率跟踪的影响。随着相位误差的增大,DDS 的输出频率逐渐偏离实际的模态谐振频率。根据如图 1 所示的模态激励方法,激励信号的幅值与激励力呈正相关。如图 4(b)所示,随着相位误差的增大,激励信号的幅值也随之增大。



(a) 激励信号幅值
(a) Amplitude of excitation signal



(b) 激励信号的频率
(b) Frequency of excitation signal

图 4 相位误差对驱动模态控制回路的影响

Fig. 4 Effect of phase error on drive modal control loop

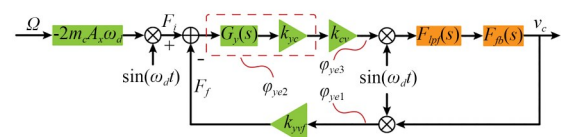
根据以上分析可以看出,驱动模态控制回路中的相位误差会使控制回路无法跟踪模态谐振频率,激励信号的频率与实际谐振频率存在差异。因此,将增加模态激励信号的幅值,以保证固定的模态振动幅值。这种情况将导致拾取端馈通信号变大。由于本文采用的前端接口电路

可以有效抑制馈通^[25]的不利影响,因此相位误差对驱动模式的影响可以忽略不计。

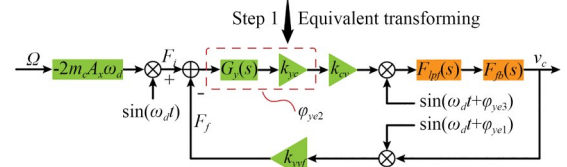
3 相位误差对检测模态的影响

3.1 包含相位误差的力平衡速率测量回路分析

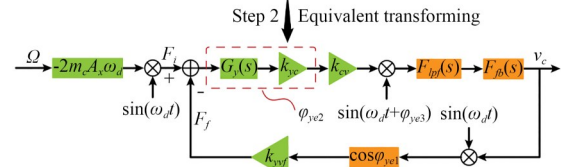
基于文献[10]中 FTR 速率控制回路的理想模型,提出了如图 5 所示的包含相位误差的控制回路示意图。其中,PSD 相当于单位增益乘法器



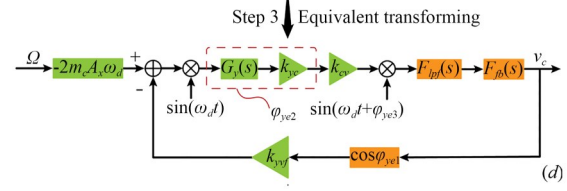
(a) 等效变换前的 FTR 速率控制回路
(a) FTR rate control loop before equivalent transforming



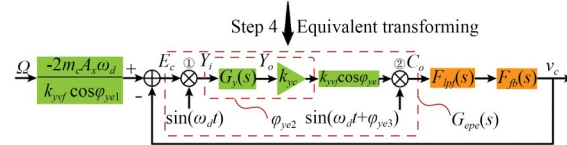
(b) 经过步骤 1 后的 FTR 速率控制回路
(b) FTR rate control loop after step 1



(c) 经过步骤 2 后的 FTR 速率控制回路
(c) FTR rate control loop after step 2



(d) 经过步骤 3 后的 FTR 速率控制回路
(d) FTR rate control loop after step 3



(e) 经过步骤 4 后的 FTR 速率控制回路
(e) FTR rate control loop after step 4

图 5 包含相位误差的 FTR 控制回路框图

Fig. 5 Schematic diagram of FTR control loop with phase error

和低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)。 φ_{ye1} 为数字信号处理引入的相位误差, φ_{ye2} 为模态参数引入的相位误差, φ_{ye3} 为前端电路引入的相位误差。

步骤 1: 首先, φ_{ye1} 被等效至反馈通路 $\sin(\omega_d t)$ 之中, φ_{ye3} 被等效至前向通路中的解调参考信号, 从而将图 5(a)变换成图 5(b);

步骤 2: 根据图 5(b), 将相位误差的 FTR 速率反馈信号变换为:

$$V_c k_{vf} \sin(\omega_d t + \varphi_{ye1}) = V_c k_{vf} [\sin(\omega_d t) \cos \varphi_{ye1} + \cos(\omega_d t) \sin \varphi_{ye1}]. \quad (12)$$

式(12)中的 $V_c k_{vf} \sin(\omega_d t) \cos(\varphi_{ye1})$ 分量被用来抵消哥氏力, $V_c k_{vf} \sin(\omega_d t) \sin(\varphi_{ye1})$ 分量可视为正交分量, 不影响 FTR 速率测量, 从而将图 5(b)变换为图 5(c);

步骤 3: 将图 5(d)所示的反馈通路中乘法器等效变换至前向通路之中, 从而图 5(c)变换为图 5(d);

步骤 4: 将图 5(d)所示的反馈通路中的增益等效变换至前向通路之中, 从而图 5(d)变换为图 5(e)。

根据附录可知 $G_{epe}(s)$ 可表示为:

$$G_{epe}(s) = \frac{k_{dv} k_{yvf} \cos \varphi_{ye1} \sin \varphi_{ye3} N_1(s) - \cos \varphi_{ye3} N_2(s)}{2m_c 4D_1(s) D_2(s)}. \quad (13)$$

3.2 力平衡激励通路中相位误差 φ_{ye1} 的影响

接下来分析 φ_{ye1} 对 FTR 速率控制回路的影响。图 6 显示了 φ_{ye1} 不同值对 FTR 速率测量的影响。

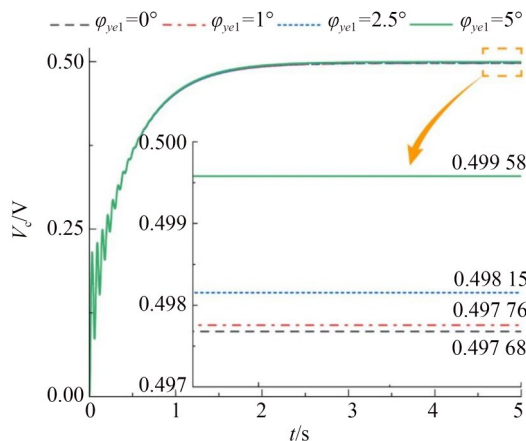


图 6 φ_{ye1} 对恒定速率输入下速率测量的影响

Fig. 6 Effect of φ_{ye1} on rate measurement with constant rate input

响, 其中输入速率为 $100^\circ/\text{s}$ 且 φ_{ye3} 被忽略。随着 φ_{ye1} 的增大, 表征速率输出的 V_c 也随之增大。由式(12)和图 6 可知, φ_{ye1} 的存在改变了 FTR 速率测量的标度因数, 导致速率反馈信号增大。由于前端检测电路具备抑制馈通的能力, 因此增大的速率反馈信号不影响前端电路的测量。

图 7 展示了相位误差对 FTR 速率测量带宽的影响。对于实际陀螺仪系统而言 φ_{ye1} 通常小于 5° , 故而 φ_{ye1} 对 FTR 速率测量带宽的影响较小, 可以忽略不计。

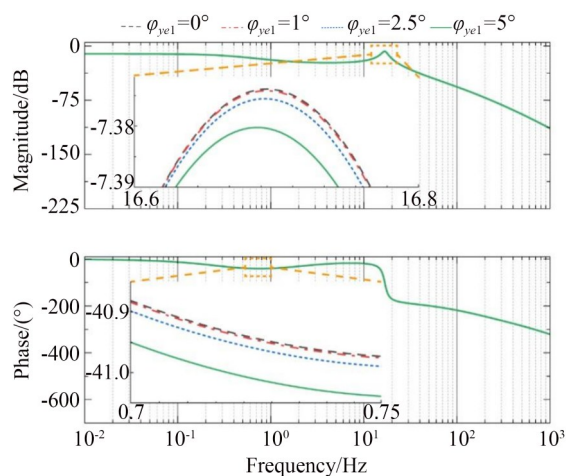


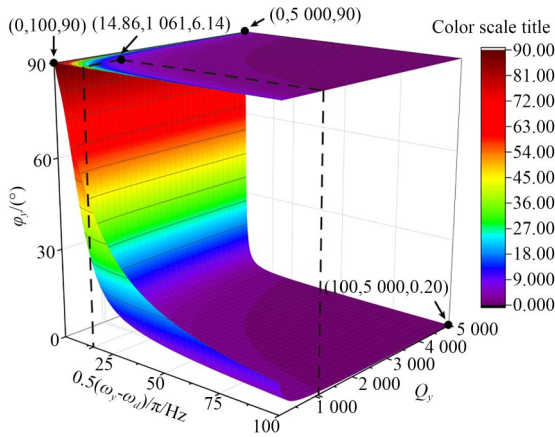
图 7 φ_{ye1} 对 FTR 速率测量回路幅相频率特性的影响

Fig. 7 Effect of φ_{ye1} on magnitude-phase frequency characteristic of FTR rate measurement loop

3.3 力平衡前向通路中相位误差 φ_{ye2} 和 φ_{ye3} 的影响

由式(5)可知, φ_y 即为 φ_{ye2} , 且 φ_{ye2} 与驱动模态激励频率 ω_d 、检测模态谐振频率 ω_y 、检测模态品质因数 Q_y 有关。图 7 展示了 $\omega_y - \omega_d$ 和 Q_y 对 φ_y 的影响。当 $\omega_y - \omega_d = 0$ 时, $\varphi_y = 90^\circ$ 且与 Q_y 的值无关。此外, 当 $\omega_y - \omega_d > 200 \times 2\pi \text{ rad/s}$ 时, φ_y 可以近似为 180° 。当 $\varphi_y = 90^\circ$ 或 180° 时, 相敏解调器可以有效地分离 $y(t)$ 中的同相分量和正交分量。但是, 较小的 ω_d 和 Q_y 将造成 $\varphi_y \neq 90^\circ$ 或 180° , 这意味着一个不可忽略的相位误差。

由上述分析可知, φ_{ye2} 作为检测模态品质因数所引入的相位误差, 对速率信号和正交信号所造成的耦合可体现于解调参考信号的初相之中。因此 φ_{ye2} 和 φ_{ye3} 可作为前向通路的相位误差一起被分析。可以看出, 较低的 Q_y 、较小的 $\omega_y - \omega_d$ 和

图 8 $\omega_y - \omega_d$ 和 Q_y 对 φ_y 的影响趋势Fig. 8 Trends in the effect of $\omega_y - \omega_d$ and Q_y on φ_y

前端电路的相位滞后使得哥氏力与其对应的响应信号之间的相位差不再是 180° 。同样的现象也存在于刚度耦合误差产生的正交信号中。包含 φ_{ye2} 和 φ_{ye3} 的检测模态输出信号可以表示为:

$$y_{po}(t) = y_i(t) + y_q(t) = A_i k_{yc} k_{cv} \sin(\omega_d t - 180^\circ - \varphi_{ye2} - \varphi_{ye3}) + A_q k_{yc} k_{cv} \cos(\omega_d t - 180^\circ - \varphi_{ye2} - \varphi_{ye3}). \quad (14)$$

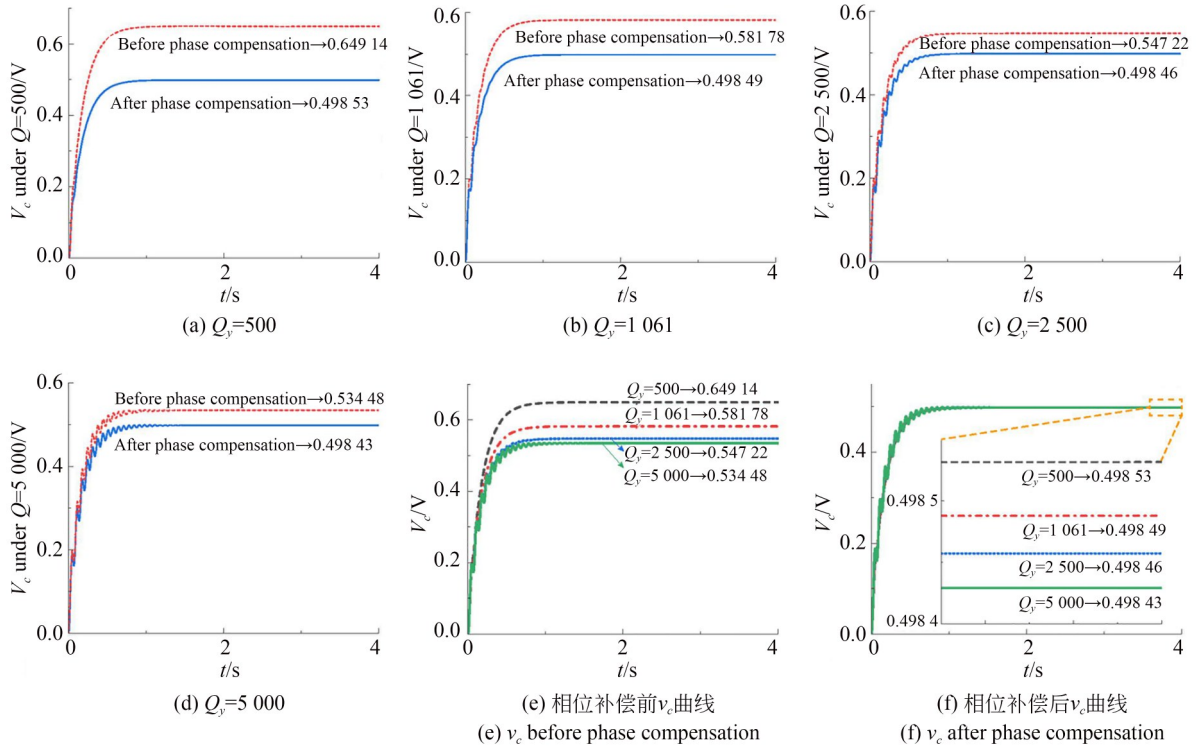
当速率测量通道中的解调参考信号为 $\sin$

($\omega_d t$) 时, LPF 的输出可以表示为:

$$V_{lpf} = A_i k_{yc} k_{cv} \cos(\varphi_{ye2} + \varphi_{ye3}) + A_q k_{yc} k_{cv} \sin(\varphi_{ye2} + \varphi_{ye3}). \quad (15)$$

由上式可知, 正交信号耦合至速率输出信号, 是导致零偏性能恶化的重要原因^[13]。图 9 比较了在 PI 参数恒定且考虑刚度耦合误差的情况下, 不同 Q_y 情况下恒定速率下的 FTR 速率测量结果。恒定 Q_y 下相位补偿前后 v_c 的显著差异是由于正交误差的存在, 如图 9(a)~9(d) 所示。此外, 图 9(e) 给出了不同 Q_y 情况下相位补偿前 v_c 的变化曲线。这一现象表明, 在温度变化的情况下, 速率测量更容易受到正交信号的影响, 从而导致更显著的漂移。而且, 在不同 Q_y 情况下, 相位补偿后 v_c 的变化非常小, 如图 9(f) 所示。这一现象表明, 经过相位补偿后, 泄漏到 v_c 的正交信号分量明显减小。

接下来, 根据式 (13) 分析 φ_{ye2} 和 φ_{ye3} 对 FTR 速率控制回路带宽的影响。在比例积分控制器参数相同的情况下, 随着 Q_y 的变化, FTR 速率测量的带宽也会产生显著变化, 如图 10 所示。此外, 图 11 显示 φ_{ye3} 也会影响带宽, 但影响很小, 可

图 9 不同 Q_y 下相位补偿前后的 FTR 速率测量曲线Fig. 9 FTR rate measurement curves before and after phase compensation for different Q_y

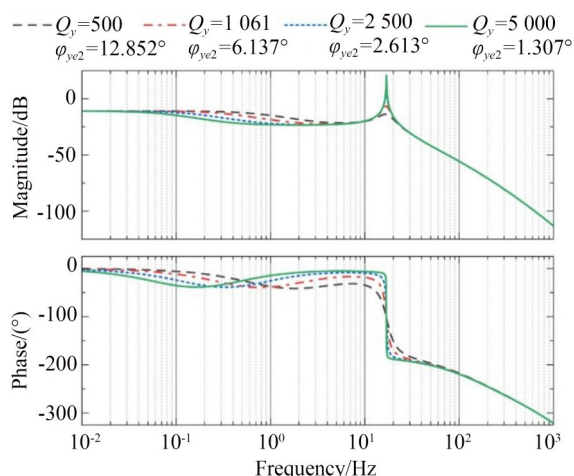


图 10 φ_{ye2} 对 FTR 速率测量回路幅相频率特性的影响
Fig. 10 Effect of φ_{ye2} on magnitude-phase frequency characteristic of FTR rate measurement loop

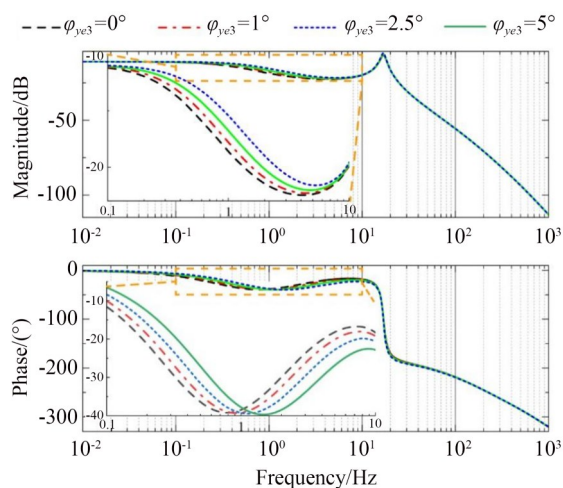


图 11 φ_{ye3} 对 FTR 速率测量回路幅相频率特性的影响
Fig. 11 Effect of φ_{ye3} on magnitude-phase frequency characteristic of FTR rate measurement loop

以忽略不计。

由以上分析可知, FTR 反馈通道中的相位误差 φ_{ye1} 使标度因数变大, 但对带宽的影响较小。而且, φ_{ye1} 是一个对温度不敏感的项, 可以通过校准获得。FTR 前向通道中的相位误差 φ_{ye2} 和 φ_{ye3} 会降低零偏性能, φ_{ye2} 对带宽的影响也较大。

4 实验验证

4.1 实验平台搭建

图 12 展示了实验验证所用的 MEMS 陀螺仪及其试验所需的测试设备, 其中示波器和万用表

用于陀螺仪测控系统调试过程中观测陀螺仪测控系统中的信号; 频率计用于测试信号频率和同频率信号之间的相位差; 直流电源用于提供额定的工作电源; 数据采集电脑用于采集陀螺仪系统的输出信号; 角振动台用于测试带宽; 速率台用于测量标度因数。

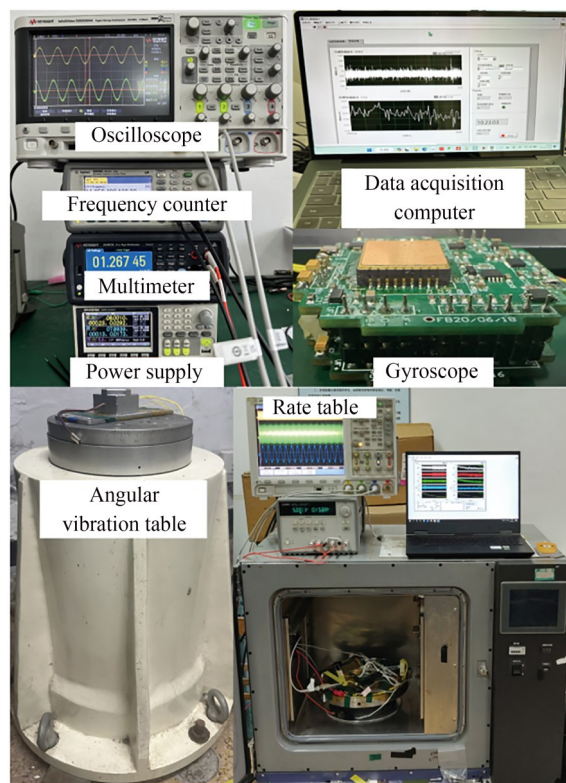


图 12 陀螺仪测控系统及其测试设备

Fig. 12 Gyroscope measurement and control system and its test equipment

4.2 反馈通路中相位误差测量

首先, 利用频率计采集了两个小时的检测模态激励信号和驱动模态输出信号之间的相位差, 即 φ_{ye1} , 如图 13 中实线曲线所示 (彩图见期刊电子版)。其结果表明, φ_{ye1} 的值未产生较大的波动, 其稳定性为 0.094 9。因此, 室温状态下此类误差可通过标定的方式获取, 进而实现相位差 φ_{ye1} 的补偿。此外, 图 13 中虚线曲线展示了陀螺仪静止状态下检测模态输出信号和检测模态输出信号的相位差。当正交信号远大于阻尼耦合信号时, 上述两种信号的相位差可反映前向通路的相位误差变化量。蓝色曲线的漂移反映了 φ_{ye2} 为温度敏感项, 需采用有效地在线提取方法获取该误差。

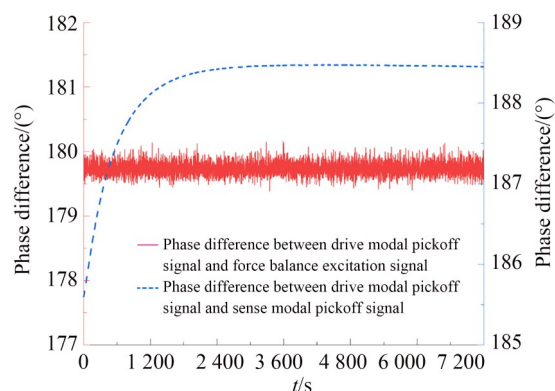


图 13 驱动模态输出信号分别与力平衡激励信号(实线)和检测模态输出信号(虚线)的相位差

Fig. 13 Phase difference between the drive modal pickoff signal for the force balance excitation signal (solid) and the sense modal pickoff signal (dash)

4.3 标度因数试验

为了标定 $\varphi_{ye2} + \varphi_{ye3}$ 的值,将陀螺仪测控系统放置于速率转台之上并待其工作环境温度稳定,实时调节检测模态控制回路中解调参考信号的相位,使得正交输出信号在转台以恒定转速转动的情况下,无显著速率响应变化,即认为实现了 $\varphi_{ye2} + \varphi_{ye3}$ 的补偿。表 2 列出了检测模态相位差补偿前后的标度因数的数值,为了验证 φ_{ye1} 对标度因数的影响,测控系统设定了 5° 的相位误差。其结果表明, φ_{ye1} 将影响标度因数的数值,而 φ_{ye2} 和 φ_{ye3} 并不会影响标度因数。

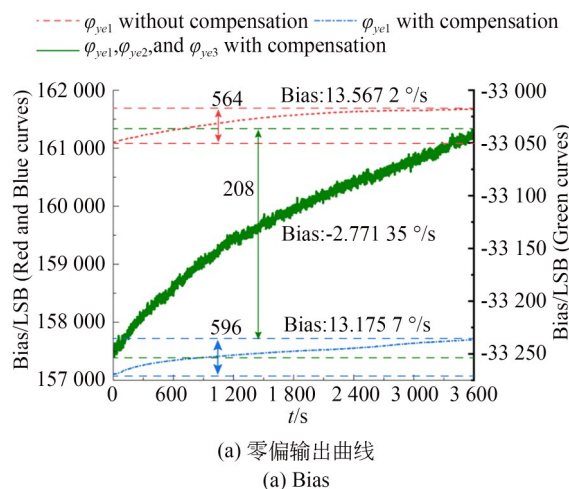
表 2 相位误差补偿前后的标度因数

Tab. 2 Scale factor before and after phase error compensation

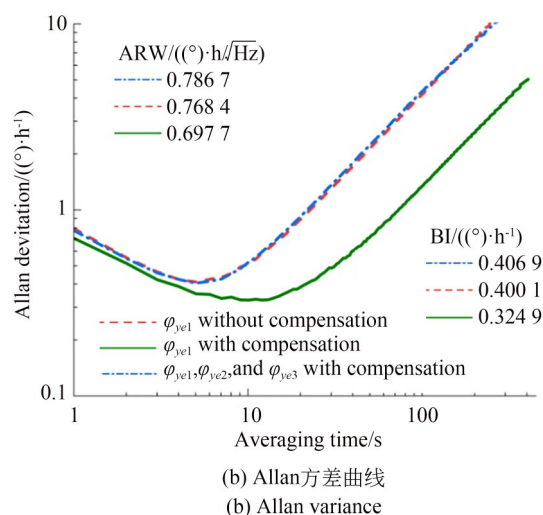
相位/ $^\circ$	状态	标度 LSB/ $((^\circ) \cdot s^{-1})$
$\varphi_{ye1} = 5$	补偿前	11 904
	补偿后	11 951
$\varphi_{ye2} + \varphi_{ye3} = 8.5$	补偿前	11 950
	补偿后	11 958

4.4 零偏试验

然后,进行了相位补偿前后的零偏试验。图 14 展示了相位误差补偿前后的零偏输出曲线和 Allan 方差曲线,采集时间为 3 600 s,数据更新率为 1 s。由图 14(a)可知, φ_{ye1} 补偿前后的零位由 $13.567 2^\circ/s$ 变化为 $13.175 7^\circ/s$,对应了标度因



(a) 零偏输出曲线
(a) Bias



(b) Allan 方差曲线
(b) Allan variance

图 14 相位补偿前后零偏输出曲线和 Allan 方差曲线
Fig. 14 Bias curves and Allan variance curves before and after phase compensation

数的差异,其零偏漂移及其性能差异不大,故可认为 φ_{ye1} 对静态性能无影响。但前向通道相位误差 φ_{ye2} 和 φ_{ye3} 补偿前后的零位由 $13.175 7^\circ/s$ 减小至 $-2.771 4^\circ/s$;零偏漂移由 596 LSB 减小至 208 LSB;零偏不稳定性由 $0.400 1^\circ/h$ 下降至 $0.324 9^\circ/h$;角度随机游走由 $0.768 4^\circ/h/\sqrt{Hz}$ 降低至 $0.697 7^\circ/h/\sqrt{Hz}$ 。因此,故前向通道的相位误差对陀螺仪静态性能的影响较大。

4.5 带宽试验

最后,进行了室温状态下相位补偿前后的带宽试验,如图 15 所示。在检测模态品质因数不变的情况下,相位误差补偿前后的 FTR 速率检测的带宽曲线变化不显著,其之间的差异均小于

0.8 dB。因此,可认为室温状态下 FTR 速率控制回路中相位误差对速率检测的带宽影响可以忽略。

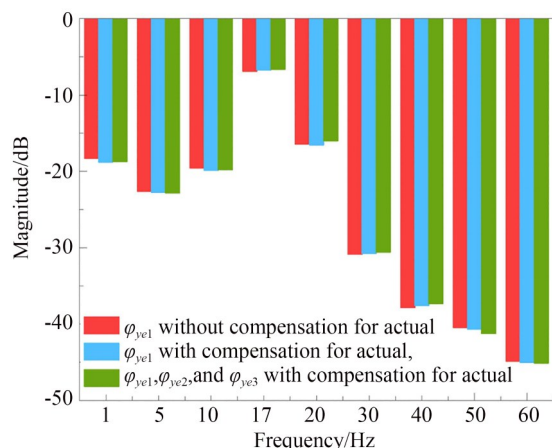


图 15 相位补偿前后速率检测带宽测试曲线

Fig. 15 Rate measurement bandwidth test curves before and after phase compensation

5 结 论

本文针对力平衡检测模态的 MEMS 陀螺仪测控系统中的相位误差进行了分析,明确了主要影响陀螺仪静态性能和动态性能的相位误差的所在位置。本文从 FTR 速率检测控制回路的反

馈通路和前向通路两个角度进行了相位误差的分类,相位误差主要由反馈通路(φ_{ye1})、模态品质因数(φ_{ye2})和前端信号检测电路(φ_{ye3})所造成。试验所测的相位误差 φ_{ye1} 两小时测量值的稳定性为 0.0949,且相位误差会造成标度因数的变化,但对零偏和带宽性能无影响。而前向通道的相位误差会随着温度改变而变化,该现象将影响陀螺仪的零偏性能。前向通路中的相位误差(φ_{ye2} 和 φ_{ye3})补偿前后的零偏值由 $13.1757^\circ/\text{s}$ 降低至 $-2.7714^\circ/\text{s}$,零偏漂移值由 596 LSB 降低至 208 LSB,零偏不稳定性由 $0.4001^\circ/\text{h}$ 下降至 $0.3249^\circ/\text{h}$,角度随机游走由 $0.7684^\circ/\text{h}/\sqrt{\text{Hz}}$ 下降至 $0.6977^\circ/\text{h}/\sqrt{\text{Hz}}$,但前向通道中的相位误差对标度因数和带宽无影响。

通过上述仿真和试验结果表明,室温状态下 FTR 速率测量反馈通路中的相位误差仅会改变标度因数的数值,对陀螺仪的静态和动态性能无影响;前向通路的相位误差为温度敏感项(尤其是与模态品质因数相关的 φ_{ye2}),对陀螺仪的静态性能有较大的影响,但对动态性能的影响较小。因此,本文的后续工作将是提出一种有效的相位在线提取及补偿方法,用以抑制此类误差对 MEMS 陀螺仪 FTR 速率测量的静态和动态性能的影响。

参考文献:

- [1] XIA G M, YANG B, WANG S R. Phase correction in digital self-oscillation drive circuit for improve silicon mems gyroscope bias stability[C]. 2010 10th IEEE International Conference on Solid-State and Integrated Circuit Technology. Shanghai, China. IEEE, 2010: 1416-1418.
- [2] ZHANG H, CHEN W P, YIN L, et al. Design of MEMS gyroscope interface ASIC with on-chip temperature compensation [J]. *Measurement*, 2023, 220: 113331.
- [3] BU F, GUO S W, CHENG M M, et al. Effect of circuit phase delay on bias stability of MEMS gyroscope under force rebalance detection and self-compensation method [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2019, 29(9): 095002.
- [4] MI J, WANG Q, HAN X T. Low-cost MEMS gyroscope performance improvement under unknown disturbances through deep learning-based array [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2024, 368: 115086.
- [5] SHEN Q, YANG D F, LI J Y, et al. Bias accuracy maintenance under unknown disturbances by multiple homogeneous MEMS gyroscopes fusion [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2023, 70(3): 3178-3187.
- [6] WU H B, ZHENG X D, WANG X T, et al. Effects of both the drive- and sense-mode circuit phase delay on MEMS gyroscope performance and real-time suppression of the residual fluctuation phase error [J]. *Journal of Micromechanics and Microengi-*

- neering, 2021, 31(5): 055006.
- [7] FAN Q, ZHOU Y, LIU M X, *et al.* A MEMS rate-integrating gyroscope (RIG) with In-Run automatic mode-matching [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(3): 2282-2291.
- [8] REN J B, ZHOU T, ZHOU Y, *et al.* An In-Run automatic mode-matching method with amplitude correction and phase compensation for MEMS disk resonator gyroscope [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 7505911.
- [9] WANG X T, ZHENG X D, SHEN Y J, *et al.* Noise analysis and modeling for a digital control architecture for Lissajous frequency-modulated MEMS gyroscope with amplitude-modulated readout [J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2023, 33(9): 095008.
- [10] JIA J, DING X K, QIN Z C, *et al.* In-Run scale factor compensation for MEMS gyroscope without calibration and fitting [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(6): 7316-7325.
- [11] YANG C, LI H S. Digital control system for the MEMS tuning fork gyroscope based on synchronous integral demodulator [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(10): 5755-5764.
- [12] NI Y F, LI H S, HUANG L B, *et al.* On bandwidth characteristics of tuning fork micro-gyroscope with mechanically coupled sense mode [J]. *Sensors*, 2014, 14(7): 13024-13045.
- [13] JIA J, SONG Z Q, GAO Y, *et al.* A low-complexity In-Run modal frequency tuning method for MEMS disk gyroscopes without gain calibration and phase shifting [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2024, 73: 7504512.
- [14] WANG P, LI Q S, ZHANG Y M, *et al.* Bias thermal stability improvement of mode-matching MEMS gyroscope using mode deflection [J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2023, 32(1): 1-3.
- [15] ZHANG H, ZHANG C, CHEN J, *et al.* A review of symmetric silicon MEMS gyroscope mode-matching technologies [J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 1255.
- [16] JIA J, DING X K, GAO Y, *et al.* Demodulation phase angle compensation for quadrature error in decoupled dual-mass MEMS gyroscope [J]. *Nanolithography, MEMS, and MOEMS*, 2018, 17(3): 035001.
- [17] ZHAO M, ZHAO Q C, LU W G, *et al.* An interface ASIC for an atmospheric-pressure MEMS gyroscope with PLL-based phase adjustment and SC amplitude regulation [C]. 2020 *IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*. Seville, Spain. IEEE, 2020: 1-5.
- [18] EZEKWE C D, GEIGER W, OHMS T. 27.3 A 3-axis open-loop gyroscope with demodulation phase error correction [C]. 2015 *IEEE International Solid-State Circuits Conference - (ISSCC) Digest of Technical Papers*. San Francisco, CA, USA. IEEE, 2015: 1-3.
- [19] LIU X W, QIN Z C, LI H S. Online compensation of phase delay error based on P-F characteristic for MEMS vibratory gyroscopes [J]. *Micromachines*, 2022, 13(5): 647.
- [20] BALACHANDRAN G K, PETKOV V P, MAYER T, *et al.* A 3-axis gyroscope for electronic stability control with continuous self-test [C]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. IEEE, 2016: 177-186.
- [21] OMAR A, ELSHENNAWY A, ABDELAZIM M, *et al.* Analyzing the impact of phase errors in quadrature cancellation techniques for MEMS capacitive gyroscopes [C]. 2018 *IEEE SENSORS*. New Delhi, India. IEEE, 2018: 1-4.
- [22] LIU M X, FAN Q, ZHAO J, *et al.* A phase compensation method for MEMS quadruple mass gyroscope in zero bias drift [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(3): 3087-3096.
- [23] PAGANI L G, GUERINONI L, FALORNI L, *et al.* Investigation of gyroscopes mechanical and electronic phase drift with $2 \mu\text{rad}/\sqrt{\text{Hz}}$ resolution and $12 \mu\text{rad}/\text{K}$ accuracy [C]. 2020 *IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*. Hiroshima, Japan. IEEE, 2020:

1-4.

- [24] TAO Q, TANG B. A high-linearity closed-loop capacitive micro-accelerometer based on ring-diode capacitance detection[J]. *Sensors*, 2023, 23(3):

1568.

- [25] CAO H L. *Dual-Mass Linear Vibration Silicon-Based MEMS Gyroscope*[M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023.

作者简介:



高 阳(1988—),男,山东沂水人,博士,讲师,2018年于东南大学获得博士学位。主要从事微惯性器件结构设计与优化、智能感知技术等方面的研究。
E-mail: ygao@njit.edu.cn

通讯作者:



曹慧亮(1986—),男,河北石家庄人,博士,教授,博士生导师,2014年于东南大学获博士学位,2011-2012年于美国佐治亚理工学院联合培养博士。主要从事 MEMS 器件、极端环境传感技术与系统。E-mail: caohuiliang@nuc.edu.cn