

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2413231

MEMS 环形陀螺仪带宽拓展控制器设计*

崔 让¹, 魏雯强¹, 蔡 麒¹, 刘宇鹏², 曹慧亮¹

(1. 中北大学仪器与电子学院 太原 030051; 2. 湖北三江航天红峰控制有限公司 孝感 432000)

摘 要:设计一种基于零极点补偿的比例积分控制器,用于 MEMS 环形振动陀螺的检测模态闭环回路控制。文章分别分析了环形陀螺仪机械灵敏度、带宽与陀螺仪模态之间谐振频率差值、品质因数的关系,并通过伯德图分析了零极点与陀螺带宽的关系。设计了基于零极点补偿的比例积分控制器(PZ-PIC),通过在检测闭环回路中使用该控制器,可以拓展陀螺仪的带宽,解决环形陀螺仪机械带宽与机械灵敏度相互矛盾的问题。提出的新型控制器具有参数少,参数确定简单等优点,适用于 MEMS 陀螺仪的批量化生产。经过实验验证,3 只陀螺仪样机带宽均得到有效拓展,拓展后带宽超过 90 Hz。

关键词: MEMS 环形陀螺仪; 振动陀螺仪; 带宽拓展; 检测模态闭环控制

中图分类号: TH824 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Design of bandwidth extension controller for MEMS ring gyroscope

Cui Rang¹, Wei Wenqiang¹, Cai Qi¹, Liu Yupeng², Cao Huiliang¹

(1. School of Instrument and Electronics, North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Hubei Sanjiang Aerospace Hongfeng Control Co. LTD, Xiaogan 432000, China)

Abstract: This article designs a pole-zero compensation proportional-integral controller for the sense mode closed-loop control of MEMS ring vibration gyroscope. The relationships between the mechanical sensitivity and bandwidth of the ring gyroscope and the difference of resonant frequencies and the quality factor are analyzed. The effectiveness of pole-zero on the gyroscope bandwidth is analyzed by the bode diagram. A pole-zero compensation proportional-integral controller (PZ-PIC) is designed. By using this controller in the sense mode closed-loop circuit, the bandwidth of the gyroscope can be expanded. In this way, the contradiction between the mechanical bandwidth and mechanical sensitivity of the ring gyroscope is addressed. The proposed new controller has the advantages of few parameters and simple parameter determination, which is suitable for the mass production using MEMS gyroscopes. After experimental evaluation, the bandwidth of the three prototypes is effectively expanded, with the expanded bandwidth exceeding 90 Hz.

Keywords: MEMS ring gyroscope; vibratory gyroscope; bandwidth expansion; sense mode closed-loop control

0 引 言

机电系统(micro-electro-mechanical system, MEMS)振动陀螺仪是一种惯性传感器,利用科氏效应获取外部角速度信息。陀螺仪是组成惯性导航系统的基础部件,其性能对惯导系统的可靠性与准确度极为重要^[1-3]。MEMS 陀螺仪与其他陀螺仪相比有很多优点:低成本、低功耗、小体积、易集成等^[4-8]。为了提升 MEMS 陀螺仪性能,各研究单位进行了大量的研究,包含陀螺结构的设计

与改进、测控电路改进、控制算法的优化等。

在本文中,主要研究 MEMS 环形陀螺仪带宽拓展技术。环形陀螺仪相比于其他结构形式的陀螺具有众多优点^[9-12]:结构对称性高,有助于减少由于不对称性引起的误差;具有较低的制造工艺难度,适合低成本、批量化生产;模态之间谐振频率差值小,具有较高的机械灵敏度。

陀螺仪的带宽是反映陀螺仪性能的一个重要参数,当陀螺仪在力平衡模式下工作,且处于开环检测状态时,其带宽受限于检测模态与驱动模态之间的谐振频率差值。

收稿日期:2024-09-01 Received Date: 2024-09-01

* 基金项目:国家重点研发计划(2022YFB3205000)、国家自然科学基金(U2230206)项目资助

许多研究单位开展了陀螺检测模态闭环控制方案的研究,以此拓展陀螺仪的带宽。在工作^[13]中分析了力平衡闭环控制下陀螺仪带宽与噪声的关系,阐述了力平衡闭环控制可实现陀螺的带宽拓展,但是噪声问题不可忽略。一种优化后的用于陀螺仪检测模态闭环回路控制算法被提出^[14],有效拓展了陀螺带宽,并提升了陀螺性能。但该方法使用较多控制器参数,且参数确定过程复杂,适用于小批量陀螺性能优化。在工作^[15]中设计了一种利用现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)实现的数字力平衡控制系统,在角速度随机游走参数没有恶化的情况下拓展了陀螺带宽。中北大学^[16-19]研究了在模拟电路上实现的陀螺检测模态闭环控制电路,有效实现了陀螺带宽拓展。但模拟电路修改电路参数较为复杂,适用于小批量陀螺性能优化。同样使用力平衡闭环控制的方案,Wan等^[20]将具有较小频差且品质因数较高的陀螺仪带宽拓展了十余倍,但控制器参数不通用,需要根据陀螺个体进行调整。

研究人员不只是在电路方面对陀螺进行带宽拓展,在结构设计方面也有大量的研究。Iqbal等^[21]在结构设计时将检测模态谐振频率与驱动模态谐振频率的差值扩大,以实现陀螺具备高带宽特性。Wang等^[22]研究检测模态受到角速度影响时产生的非线性硬化特性,但是仍然需要考虑增益与带宽之间的矛盾。Zhang等^[23]提出了应用杠杆放大原理来提高陀螺的增益,该研究为陀螺仪的带宽拓展提供了新的思路。Gadhavi等^[24]设计了一种新型单轴角速率传感器,避免了开环模式下微机械振动陀螺带宽不足的问题。

有许多研究单位更换了陀螺仪工作模式,控制陀螺工作于速率积分模式^[25-27]。在这种工作模式下,陀螺带宽不受限制,但也存在许多其他工程问题,在此不做叙述。本文研究的陀螺工作于力平衡模式下,陀螺结构振动处于受控状态,可减少陀螺受到外界的影响,提高测量精度。

当前国内外关于陀螺带宽拓展的研究中,电路控制方案居多,这是因为结构上具有较小的频差可以带来较高的机械灵敏度,使得陀螺对角速度更加敏感。对于通过电路进行带宽拓展的研究中,带宽拓展效果相似(大多拓展至100 Hz附近),但电路或控制器参数确定过程较为复杂,与MEMS陀螺适合批量化生产的特性不符。

本文研究对象是高品质因数低频差的MEMS环形陀螺仪,通过研究新型的闭环回路控制器,实现力平衡工作模式下的陀螺带宽拓展。提出的新型控制器具有参数少,参数确定简单等优点,适用于MEMS陀螺仪的批量化生产。文章先分析了陀螺仪机械带宽与机械灵敏度之间的矛盾关系,之后设计并仿真了陀螺仪检测模态闭环控制器,最后进行实验,测试了陀螺仪样机的带宽。

1 理论分析

1.1 环形固体波陀螺结构

本研究使用的MEMS环形陀螺结构^[28]如图1所示。结构的中心是固定的圆盘形锚点,谐振圆环通过8个支撑梁连接到锚点。16个内部电极和8个外部电极均匀分布在环形谐振子的两侧,用于为环形谐振子施加激励、施加反馈并获取其响应信号。

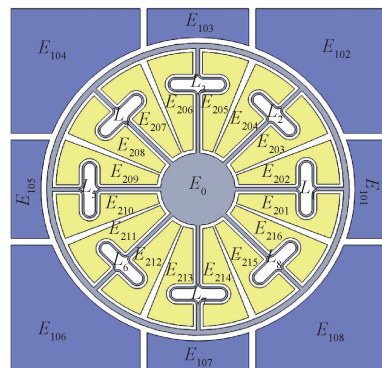


图1 MEMS 环形振动陀螺结构

Fig. 1 MEMS ring gyroscope structure

环形谐振陀螺驱动模态与检测模态的动力学方程可以表示为:

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x + k_{xy}y = F_d(t) + 2\Omega_z m\dot{y} \\ m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y + k_{yx}x = F_c(t) - 2\Omega_z m\dot{x} \end{cases} \quad (1)$$

其中, m 为驱动模态和检测模态的等效质量,环形陀螺结构对称,因此有效质量相同; c_x 和 c_y 分别是两个模态的阻尼系数,表示振动系统的能量损耗程度; k_x 和 k_y 分别是两个模态的刚度系数,表示结构受力后抵抗弹性变形的能力,其量纲表达式为力除以位移; k_{xy} 和 k_{yx} 分别是两模态之间耦合的刚度系数; x 和 y 分别是驱动模态位移和检测模态位移,表示结构形变程度; $F_d(t)$ 是施加在驱动模态上的激励信号, $F_c(t)$ 是施加在检测模态上的力反馈信号; Ω_z 是角速度输入,表示单位时间内,转动的角度。

当陀螺工作在力平衡模式下,检测模态位移极小,因此式(1)中的 $2\Omega_z m\dot{y}$ 可忽略。因为主要研究陀螺带宽拓展部分,耦合刚度系数主要影响两模态之间的耦合信号,在本研究中忽略该系数,得到式(2)。

$$\begin{cases} m\ddot{x} + c_x\dot{x} + k_x x = F_d(t) \\ m\ddot{y} + c_y\dot{y} + k_y y = F_c(t) - 2\Omega_z m\dot{x} \end{cases} \quad (2)$$

为了更好的分析陀螺机械带宽以及设计带宽拓展控制器,对式(2)进行整理,可得到:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{\omega_x}{Q_x} \dot{x} + \omega_x^2 x = \frac{F_d(t)}{m} \\ \ddot{y} + \frac{\omega_y}{Q_y} \dot{y} + \omega_y^2 y = \frac{F_c(t)}{m} - 2\Omega_z \dot{x} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\omega_x = \sqrt{k_x/m}$, $\omega_y = \sqrt{k_y/m}$ 分别是两个模态的谐振角频率; $Q_x = m\omega_x/c_x$, $Q_y = m\omega_y/c_y$ 分别是两个模态的品质因数。

1.2 环形陀螺机械灵敏度

MEMS 陀螺仪的灵敏度是描述陀螺仪输入输出特性的性能参数,陀螺仪整机灵敏度(标度因数)定义为单位输入角速率的输出值。陀螺仪整机的灵敏度可以表示为:

$$S = S_m \times S_e \quad (4)$$

其中, S_m 为陀螺的机械灵敏度, S_e 为电路灵敏度。机械灵敏度表示陀螺仪结构对角速度的敏感程度,其定义为:在一定的激励条件下,单位输入角速度产生的结构输出位移,可以表示为:

$$S_m = \frac{A_y}{\Omega_z} \quad (5)$$

式中: A_y 为陀螺工作在检测回路开环状态下的检测模态振幅。

为了使陀螺稳定工作,一般需要保证驱动模态在结构固有频率下保持恒定幅值振动。若陀螺工作在检测回路开环状态下,则检测模态上没有反馈力($F_c(t) = 0$)。设驱动模态受到的激励信号为:

$$F_d(t) = A_d \sin(\omega_d t) \quad (6)$$

式中: A_d 为驱动信号的幅值, ω_d 为驱动信号的角频率,代入式(3)可得到下式:

$$\begin{cases} \ddot{x} + \frac{\omega_x}{Q_x} \dot{x} + \omega_x^2 x = \frac{A_d \sin(\omega_d t)}{m} \\ \ddot{y} + \frac{\omega_y}{Q_y} \dot{y} + \omega_y^2 y = -2\Omega_z \dot{x} \end{cases} \quad (7)$$

对上式进行求解,可得到驱动模态与检测模态的稳态响应为:

$$x(t) = \frac{A_d/m}{\sqrt{(\omega_x^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_x^2 \omega_d^2 / Q_x^2}} \sin(\omega_d t + \varphi_x) \quad (8)$$

$$y(t) = \frac{-2\Omega_z \omega_d A_d / m}{\sqrt{(\omega_x^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_x^2 \omega_d^2 / Q_x^2}} \times$$

$$\frac{\sin\left(\omega_d t + \varphi_x + \frac{\pi}{2} + \varphi_y\right)}{\sqrt{(\omega_y^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_y^2 \omega_d^2 / Q_y^2}} \quad (9)$$

其中, $\varphi_x = -\arctan(\omega_x \omega_d / (Q_x (\omega_x^2 - \omega_d^2)))$, $\varphi_y = -\arctan(\omega_y \omega_d / (Q_y (\omega_y^2 - \omega_d^2)))$ 。

由式(8)可以看出,当施加的激励信号频率与驱动

模态固有频率一致时,即 $\omega_d = \omega_x$, 分母达到最小值,驱动模态位移最大。对于本研究的环形陀螺,其具有较小的频差,其品质因数随封装的真空度变化,故 φ_y 介于 0° 与 90° 之间。将式(8)与(9)进行简化,可得到:

$$x(t) = \frac{A_d Q_x}{m \omega_d^2} \cos(\omega_d t) = A_x \cos(\omega_d t) \quad (10)$$

$$y(t) = \frac{-2\Omega_z A_d Q_x \sin(\omega_d t + \varphi_y)}{m \omega_d \sqrt{(\omega_y^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_y^2 \omega_d^2 / Q_y^2}} = A_y \sin(\omega_d t + \varphi_y) \quad (11)$$

式中: A_x 为驱动模态振动幅度; A_y 为检测模态振动幅度。由式(10)与(11)可得到陀螺机械灵敏度:

$$S_m = \frac{A_y}{\Omega_z} = \frac{-2A_d Q_x}{m \omega_d \sqrt{(\omega_y^2 - \omega_d^2)^2 + \omega_y^2 \omega_d^2 / Q_y^2}} \approx \frac{-2A_d Q_x}{m \omega_d (\omega_y + \omega_d)(\omega_y - \omega_d)} \approx -\frac{A_x}{\Delta \omega} \quad (12)$$

随着 MEMS 陀螺加工工艺逐渐发展,当前陀螺品质因数普遍较高,大都不低于 1 000,有 $1/Q_y^2 \ll 1$, 因此,可忽略式(12)中 $\omega_y^2 \omega_d^2 / Q_y^2$ 。对于环形陀螺仪,两模态的谐振频率通常较为接近,因此有 $\omega_y + \omega_d \approx 2\omega_d$ 。化简后得到式(12)的最终表达式,其中, $\Delta \omega$ 是两模态的谐振频率差值。由式(12)可知,陀螺的机械灵敏度与驱动模态位移的振幅成正比,与驱动模态与检测模态的频率差成反比。当陀螺品质因数较高时,其机械灵敏度也较高。

1.3 陀螺机械带宽

当陀螺处于检测模态开环状态时,根据陀螺动力学方程可得到检测模态开环的传递函数 $G_y(s)$ 为:

$$G_y(s) = \frac{1/m}{s^2 + \frac{\omega_y}{Q_y} s + \omega_y^2} \quad (13)$$

当有角速度输入时,陀螺检测模态受到科氏力影响,产生振动位移。根据检测模态开环动力学方程及科氏力的相敏调制方式,可以绘制出陀螺开环检测控制环路,如图 2 所示。

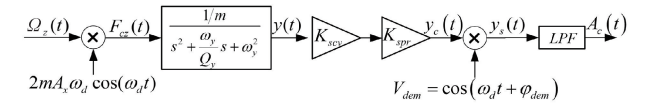


图 2 陀螺开环检测

Fig. 2 Block diagram of gyroscope open-loop mode

$\Omega_z(t)$ 为环形波动陀螺的输入角速率, K_{scr} 为电容至电压转换的增益系数, K_{spr} 为前置放大增益系数, LPF 为低通滤波器, V_{dem} 为解调参考信号。科氏惯性力信号 $F_{cz}(t)$ 经陀螺检测模态转化为检测模态敏感电极的电容信号,然后经过电容至电压转换、信号放大、相敏解调与低通滤波等环节,得到了与输入角速度信息成正比的

直流电压信号 $A_c(t)$ 。

设环形波动陀螺的输入角速率为 $\Omega_z(t) = \Omega_R(t) \cos(\omega_r t)$, 则检测模态所受科氏惯性力为:

$$F_{cz}(t) = 2m A_x \omega_d \Omega_z(t) \cos(\omega_d t) \quad (14)$$

对式 (14) 拉氏变换, 得到环形振动陀螺科氏惯性力的象函数为:

$$F_{cz}(s) = m \omega_d A_x \times [\Omega_z(s - j\omega_d) + \Omega_z(s + j\omega_d)] \quad (15)$$

因此, 在科氏力激励下, 环形振动陀螺检测模态位移响应函数为 $F_{cz}(s) G_y(s)$, 则环形振动陀螺检测电极输出的电压信号为:

$$y_c(s) = m \omega_d A_x K_{scv} K_{spr} G_y(s) \times [\Omega_z(s - j\omega_d) + \Omega_z(s + j\omega_d)] \quad (16)$$

设环形振动陀螺的开环检测解调函数为:

$$V_{dem}(t) = \cos(\omega_d t + \varphi_{dem}) = \frac{1}{2} (e^{j(\omega_d t + \varphi_{dem})} + e^{-j(\omega_d t + \varphi_{dem})}) \quad (17)$$

φ_{dem} 为相角解调误差。则环形振动陀螺的开环检测解调输出为:

$$y_s(s) = \frac{1}{2} m \omega_d K_{scv} K_{spr} A_1 e^{j\varphi_{dem}} G_y(s - j\omega_d) \times [\Omega_z(s - 2j\omega_d) + \Omega_z(s)] + \frac{1}{2} m \omega_d K_{scv} K_{spr} A_1 e^{-j\varphi_{dem}} G_y(s + j\omega_d) \times [\Omega_z(s) + \Omega_z(s + 2j\omega_d)] \quad (18)$$

其中, $\Omega_z(s)$ 变化频率通常较低, 有 $\omega_r \ll \omega_d$, 因此经过低通滤波器的检测开环输出信号为:

$$A_c(s) = \frac{1}{2} m \omega_d K_{scv} K_{spr} A_x e^{j\varphi_{dem}} \Omega_z(s) LPF(s) G_y(s - j\omega_d) + \frac{1}{2} m \omega_d K_{scv} K_{spr} A_x e^{-j\varphi_{dem}} \Omega_z(s) LPF(s) G_y(s + j\omega_d) \quad (19)$$

将式 (13) 代入式 (19), 并略去相角解调误差 φ_{dem} , 整理化简得到环形振动陀螺检测模态开环检测环路的输出函数为:

$$A_c(s) = \frac{1}{2} \omega_d K_{scv} K_{spr} A_x \Omega_z(s) \times LPF(s) G_c(s) \quad (20)$$

其中,

$$G_c(s) = \frac{s^2 + \frac{\omega_y}{Q_y} s + \omega_y^2 - \omega_d^2}{\left(s^2 + \frac{\omega_y}{Q_y} s + \omega_y^2 - \omega_d^2\right)^2 + \left(2\omega_d s + \frac{\omega_y \omega_d}{Q_y}\right)^2} \quad (21)$$

则环形振动陀螺检测模态开环检测环路的传递函数为:

$$\frac{A_c(s)}{\Omega_z(s)} = \frac{1}{2} \omega_d K_{scv} K_{spr} A_x LPF(s) G_c(s) \quad (22)$$

当不考虑 $LPF(s)$ 时, 系统传递函数的极点为:

$$p_{1,2} = -\frac{\omega_y}{2Q_y} \pm j \left(\omega_d + \omega_y \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_y^2}} \right) \quad (23)$$

$$p_{3,4} = -\frac{\omega_y}{2Q_y} \pm j \left(\omega_d - \omega_y \sqrt{1 - \frac{1}{4Q_y^2}} \right) \quad (24)$$

从极点表达式可看出, 所有极点的实部都为负值, 因此, 系统是稳定的。根据传递函数可以计算出陀螺的带宽, 对于环形振动陀螺的开环检测模式下带宽 ω_b , 因为陀螺品质因数较高, 通常存在增益超出直流点增益 3 dB 的点, 则其带宽限制条件有:

$$\left| \frac{A_c(\omega_b)}{\Omega_z(\omega_b)} \right| = \sqrt{2} \left| \frac{A_c(0)}{\Omega_z(0)} \right| \quad (25)$$

假设存在 $\omega_d > \omega_y$, 有:

$$\omega_b = \omega_d - \left(\left(\omega_y^2 - \frac{\omega_y^2}{2Q_y^2} \right) + \left(\frac{1}{2} (\omega_y^2 - \omega_d^2)^2 + \frac{\omega_y^4}{4Q_y^4} + \frac{1}{2} \omega_d^2 \frac{\omega_y^2}{Q_y^2} - \frac{\omega_y^4}{Q_y^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (26)$$

根据式 (26) 可以看出, 陀螺工作于开环检测模式下, 其带宽与两模态的固有频率及检测模态的品质因数均相关。

为了更加形象的看出带宽与陀螺两个模态的频率及品质因数的关系, 可以根据陀螺开环检测模式的系统传递函数绘制出伯德图。对于本研究的环形陀螺, 其伯德图通常如图 3 所示。通常情况下, 以系统的增益波动超过 0 Hz 增益 ± 3 dB 的点作为带宽点, 点 A 表示陀螺带宽。点 B 处的增益峰值由系统最靠近原点的一对共轭极点引起, 代表了陀螺驱动模态与检测模态的频差, 且在此频率时, 系统的相位发生反转。同时, 较高的品质因数也会导致该点的幅值更大, 该点附近的幅值、相位变化更加迅速。点 C 处的幅值变化由系统最靠近原点的一对共轭零点造成, 在此频率处, 系统的相位再次发生反转。点 D 处的幅值变化由系统的另外一对共轭极点造成, 表示陀螺驱动模态与检测模态的固有频率之和, 在此点处, 同样有系统相位的反转。

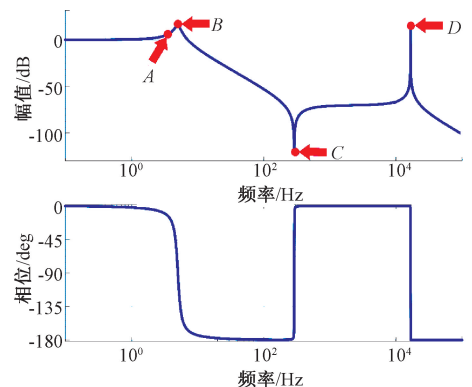


图3 环形陀螺开环检测

Fig. 3 Bode diagram of ring gyroscope with open-loop mode

由上述分析可以得出以下结论:陀螺的机械带宽与其两个模式的频率差成正相关,频差越小,其机械带宽越小;陀螺的机械带宽与其品质因数成负相关,当品质因数较高时,其机械带宽也会减小。而陀螺的机械灵敏度刚好与机械带宽相互矛盾,在结构确定后,需要设计合理的控制器,在保证陀螺机械灵敏度不变的情况下,提高系统带宽。

2 检测回路闭环控制器设计与仿真

陀螺的动力学方程可视为二阶振动系统,因此可以通过增加闭环反馈控制器的方法,拓展系统的带宽。同时闭环系统可以使得陀螺减少受到的外界影响,增强系统的稳定性,因此有必要进行陀螺检测回路闭环控制器的设计。

2.1 陀螺检测闭环回路分析

在对检测模式开环检测方法分析的基础上,可以设计检测模式闭环检测方案,其原理图如图 4 所示。其中 F_{fn} 为需要设计的闭环控制器, LPF_2 为闭环输出的前置低通滤波器, V_{bfc} 为反馈控制电压, K_{fly} 为反馈静电力系数。

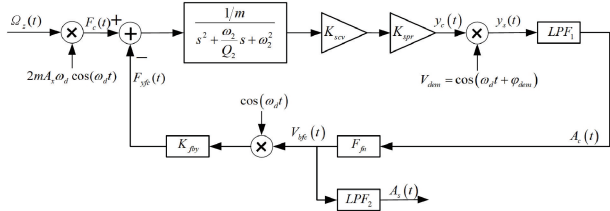


图 4 环形陀螺检测闭环系统

Fig. 4 Block diagram of the closed-loop system

由此,可以得到式(27)~(30)。

$$y_c(s) = (F_c(s) - F_{yfc}(s)) \times K_{scv} K_{spr} \left(\frac{\frac{1}{m}}{s^2 + \frac{\omega_2}{Q_2}s + \omega_2^2} \right) \quad (27)$$

$$V_{bfc}(t) = A_c(t) F_{fn} \quad (28)$$

$$F_{yfc}(t) = K_{fly} V_{bfc}(t) \cos(\omega_d t) \quad (29)$$

$$A_s = V_{bfc} LPF_2 \quad (30)$$

改变控制系统的解调相角,可以使得检测信号完整分离。忽略解调相角,将上述表达式转换到频域,经解调和滤波后可得:

$$A_c(s) = \frac{1}{2} K_{scv} K_{spr} LPF_1(s) G_c(s) \times \left(A_s \omega_d \Omega_z(s) - \frac{K_{fly} V_{bfc}(s)}{2m} \right) \quad (31)$$

将式(28)拉氏变换后代入式(31)可得到闭环系统

的标度因数:

$$\left| \frac{A_s(s)}{\Omega_z(s)} \right| = \left| \frac{2A_s \omega_d K_{scv} K_{spr} LPF_1(s) F_{fn}(s) G_c(s) LPF_2(s)}{4 + \frac{K_{fly}}{m} K_{scv} K_{spr} LPF_1(s) F_{fn}(s) G_c(s)} \right| \quad (32)$$

由图 4 及式(32)可以得到:对于 F_{fn} 控制器,其较小时,产生的反馈力较小,不能抑制检测模式位移,并不能发挥闭环回路的优势。当其较大时,有:

$$\frac{K_{fly}}{4m} K_{scv} K_{spr} LPF_1(s) F_{fn}(s) G_c(s) \gg 1 \quad (33)$$

代入式(32)可得到:

$$\left| \frac{A_s(s)}{\Omega_z(s)} \right| \approx \left| \frac{2m A_s \omega_d LPF_2(s)}{K_{fly}} \right| \quad (34)$$

从上式中可知,检测模式处于闭环工作模式时,系统灵敏度与驱动模式的位移幅度及谐振频率成正比,且带宽可以得到拓展。但是,过大的增益会造成闭环系统的不稳定,因此应当合理的设计控制器。

2.2 检测回路闭环控制器设计

通常环形陀螺因其具有的较高对称性,其两个模式之间的频差较小,具有较高的机械灵敏度和较小的机械带宽,而实际应用时,较小的带宽导致其响应特性较差。前文分析中,陀螺的机械带宽与其系统函数的零极点具有很高的相关性,因此,可以考虑从系统的零极点方面对陀螺带宽进行拓展。

在一个控制系统中,如果零点与极点之间的距离比它们本身的模值小一个数量级,则它们就构成了偶极子,且远离原点的偶极子对系统动态性能的影响可以忽略^[18]。由伯德图的分析可知,距离原点最近的极点决定了系统的带宽,因此可以通过改变闭环控制器的零极点,使得闭环系统的主导极点处产生一个零点,形成偶极子,以拓展系统带宽。陀螺检测模式的主导极点为式(24),因为陀螺通常使用真空封装,其品质因数较高,因此,其主导极点可简化为:

$$p_{3,4} = -\frac{\omega_y}{2Q_y} \pm \Delta\omega j \quad (35)$$

闭环控制器的零点应与陀螺开环检测模式的极点相对应。选取好闭环控制器的零点后,为了增强系统的稳定性,控制器的分母也应由二阶系统实现。为了抑制高频噪声对陀螺闭环回路的影响,可在控制器中增加低通滤波器,且低通滤波器截止频率可控制在带宽之外。同时,在系统的低频段部分可以增加比例积分(proportion-integration, PI)控制器,能够提高系统的稳态精度,并减小稳态误差。综合上述分析,可以设计出基于零极点补偿的比例积分控制器(pole-zero compensation proportional-integral controller, PZ-PIC),其系统函数为:

$$F_{Fn}(s) = A_{Fn} \frac{\left(s + \frac{\omega_y}{2Q_y} + \Delta\omega j\right) \left(s + \frac{\omega_y}{2Q_y} - \Delta\omega j\right)}{(s + \omega_{Fn}) s} \times \quad (36)$$

其中, A_{Fn} 为控制器的增益系数, k_i 为串联的 PI 控制器参数。从式 (36) 可以看出, 该控制器的参数较少, 且部分参数与陀螺自身参数一致。在控制器参数确定过程中, 可将低通滤波器参数与 PI 控制器参数设置为固定值, 仅需调整控制器增益系数。绘制 PZ-PIC 的伯德图, 如图 5 所示。

将图 3 与 5 对比可以看出, 在陀螺仪幅频响应曲线的最高点, 也就是陀螺两模态谐振频率差值处, 控制器的增益曲线有大幅度的衰减, 同时相位超前了 180° 进行补偿。之后提高增益进行增益补偿, 提升陀螺带宽。

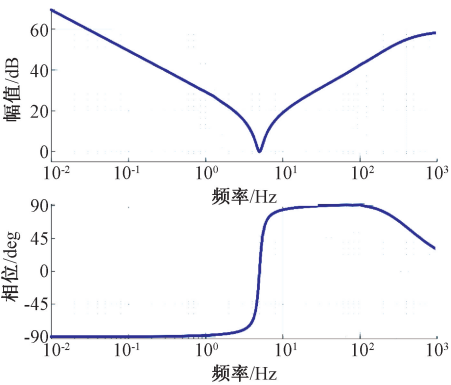


图 5 PZ-PIC 伯德图
Fig. 5 Bode diagram of PZ-PIC

2.3 PZ-PIC 仿真

在 Simulink 中搭建陀螺检测模态系统模型, 如图 6 所示, 为了进行仿真结果与实验结果对比, 将陀螺实际参数代入仿真模型中进行仿真, 并调整控制器参数。

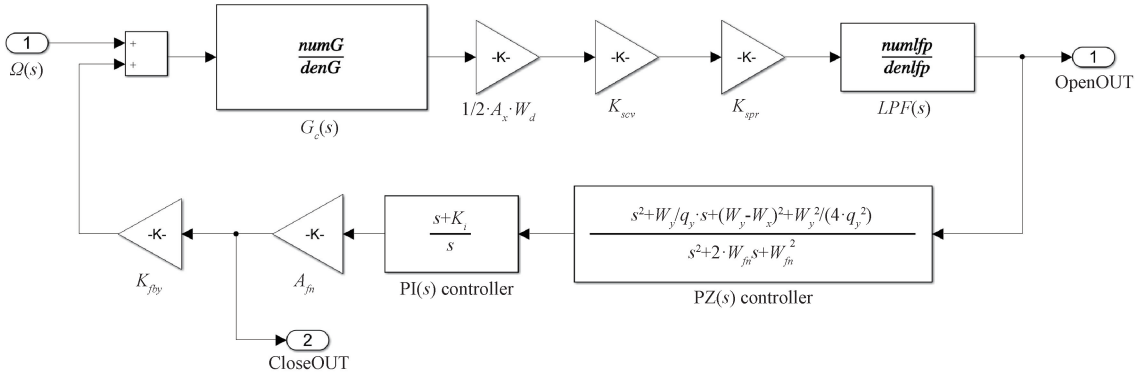


图 6 陀螺检测模态系统模型
Fig. 6 System model of the sense mode

由陀螺检测模态闭环控制模型可绘制闭环系统零极点图, 如图 7 所示。从图中可以看出, 距离原点最近的极点处出现了零点, 当零点与极点相距足够近时, 极点对系统的影响可以忽略, 系统的带宽受限于距离系统最近的

极点, 由此可得: 系统的带宽可以被拓展。
根据所测的陀螺参数, 代入 PZ-PIC 控制器 (36), 结合式 (32) 进行检测模态闭环传递函数稳定性分析, 通过绘制奈奎斯特曲线 (如图 8 所示) 可以看出, 图中曲线并未包含 $(-1, 0j)$ 点, 可以证明闭环系统是稳定的。

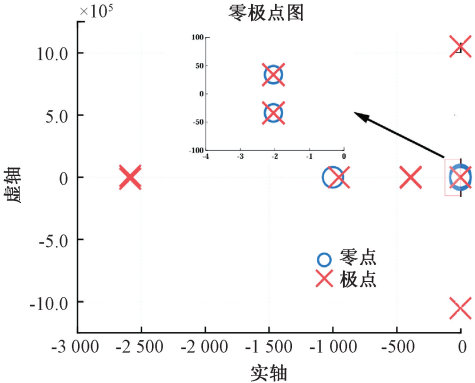


图 7 检测模态闭环系统零极点
Fig. 7 Pole-zero diagram of the closed-loop system

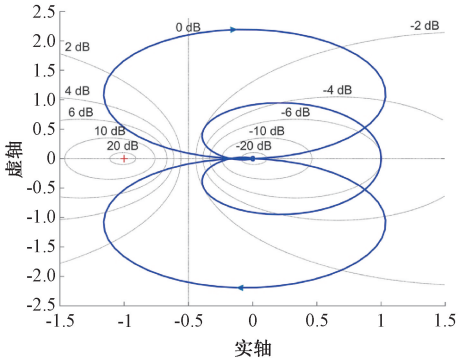


图 8 检测模态闭环系统
Fig. 8 Nyquist diagram of closed-loop system

绘制检测系统的闭环伯德图,如图 9 所示。在闭环系统的仿真伯德图中,带宽被拓展至 101 Hz,且通带内平坦度较高。仿真结果证明了本研究设计的 PZ-PIC 具有拓展陀螺带宽的能力。

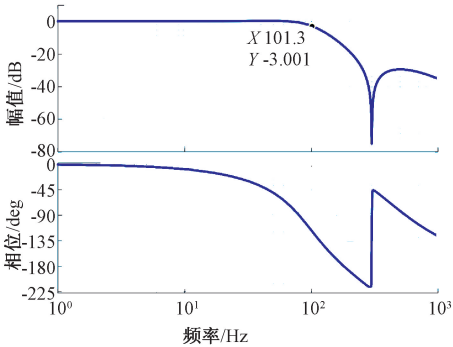


图 9 系统闭环

Fig. 9 Bode diagram of the close-loop system

3 带宽拓展实验

根据前文分析及仿真结果,可搭建环形陀螺闭环控制与检测系统,并将控制器在 FPGA 中实现。图 10 为陀螺测控系统示意图。陀螺电极输出信号经过电容至电压 (capacitor-to-voltage, C/V) 转换、仪表放大器放大,之后由模数转换器采集到 FPGA 中。FPGA 进行信号解调,将控制信号由数模转换器反馈到陀螺电极上,完成对陀螺的闭环控制。本研究设计的 PZ-PIC 位于检测回路中,其反馈信号与正交校正信号同时作用于陀螺电极上,实现检测回路的闭环控制。

为验证控制器的适用性,选取 3 只样机进行带宽拓展实验。3 只样机的测试参数如表 1 所示。3 只样机具有不同的谐振频率、频差及相差较大的品质因数,通过样机测试,验证所设计的 PZ-PIC 控制器的带宽拓展效果。

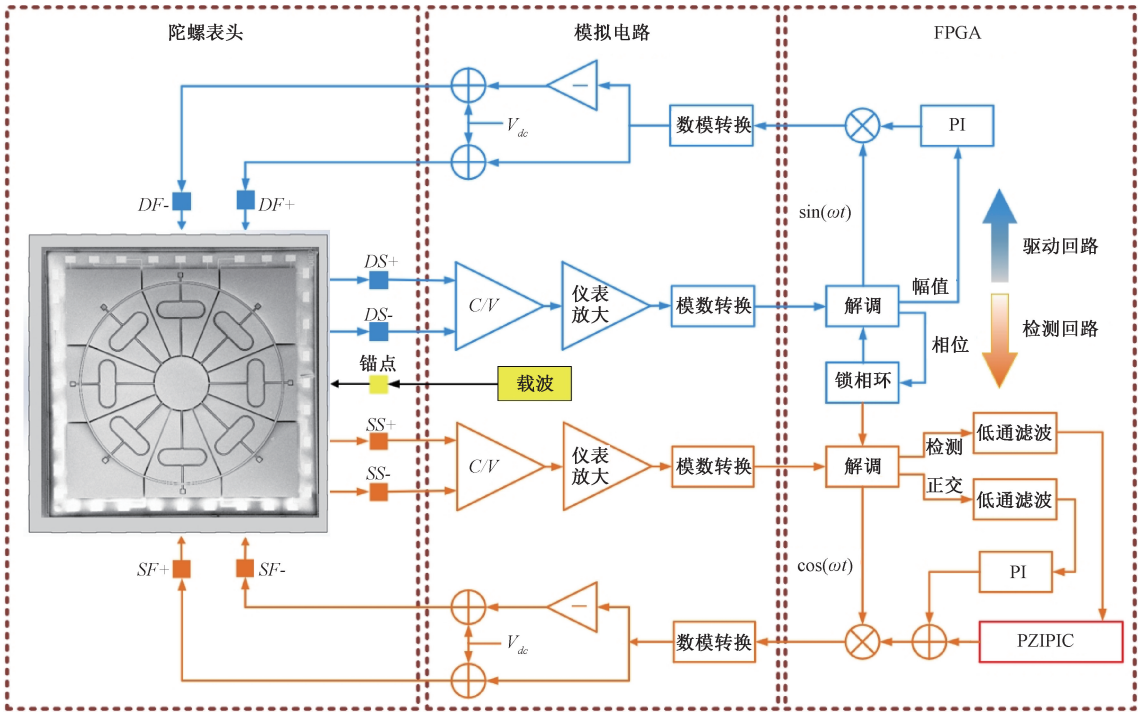


图 10 陀螺测控系统

Fig. 10 Diagram of gyro measurement and control system

表 1 测试样机参数

Table 1 Prototype parameters

样机编号	驱动模态谐振频率/Hz	检测模态谐振频率/Hz	检测模态品质因数
DU-C#03	8 405.3	8 411.7	15 000
DU-C#07	8 343.1	8 347.7	9 000
DU-C#08	8 365.9	8 371.3	13 000

分别将陀螺仪样机置于角振动台上,由控制台给定测试信号,陀螺仪输出信号由电脑端上位机进行采集,分别测试陀螺仪机械带宽与增加 PZ-PIC 控制器后的带宽。图 11 为陀螺带宽测试环境。

图 12 与 13 分别为陀螺样机增加 PZ-PIC 控制器前后的带宽测试结果。在增加控制器之前,幅频特性曲线在频差处增益最大,且品质因数越高,增益越大。陀螺机

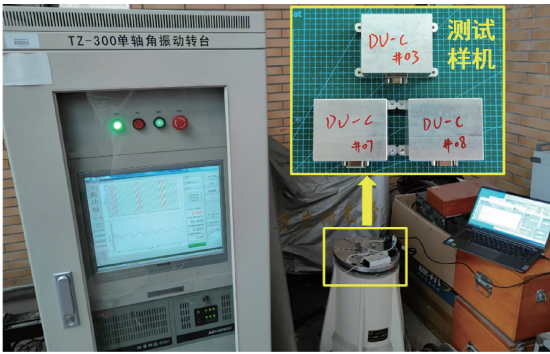


图 11 陀螺带宽测试环境

Fig. 11 Gyroscope bandwidth test environment

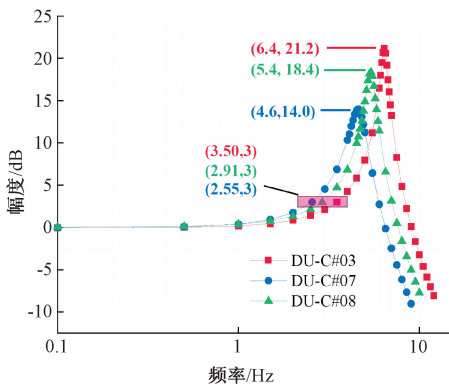


图 12 陀螺机械带宽测试

Fig. 12 Mechanical bandwidth test of gyroscope

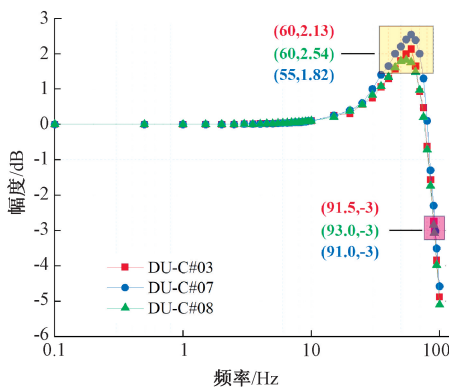


图 13 陀螺带宽拓展测试

Fig. 13 Gyroscope bandwidth expansion test

械带宽与陀螺频差相关性较高,频差越小,机械带宽越窄。增加控制器之后,各陀螺样机的带宽均被拓展至 90 Hz 以上,通带内最大增益未超过 3 dB。实验结果证明了设计的 PZ-PIC 控制器可以有效拓展陀螺的带宽,且具有一定通用性。

4 结 论

针对 MEMS 环形陀螺仪带宽与机械灵敏度相矛盾的问题展开了研究,设计了一种用于检测模态闭环回路的控制器,在不改变机械灵敏度的情况下拓展了陀螺带宽。且提出的新型控制器具有参数少,参数确定简单等优点,适用于 MEMS 陀螺仪的批量化生产。使用陀螺样机进行带宽拓展对比实验,3 只陀螺仪的带宽均由不足 4 Hz 被拓展至 90 Hz 以上。本研究设计的控制器具有一定通用性,可以推广至其他陀螺仪应用。

参考文献

- [1] PASSARO V M N, CUCCOVILLO A, VAIANI L, et al. Gyroscope technology and applications: A review in the industrial perspective [J]. *Sensors*, 2017, 17 (10): 2284.
- [2] GILL W A, HOWARD I, MAZHAR I, et al. A review of MEMS vibrating gyroscopes and their reliability issues in harsh environments[J]. *Sensors*, 2022, 22(19):7405.
- [3] HUANG W Y, YAN X, ZHANG S Y, et al. MEMS and MOEMS gyroscopes: A review [J]. *Photonic Sensors*, 2023, 13(4):230419.
- [4] XIA D ZH, YU CH, KONG L. The development of micromachined gyroscope structure and circuitry technology[J]. *Sensors*, 2014, 14(1):1394-1473.
- [5] 魏雯强,鲁征浩,陈方,等. 芯片级多轴集成微陀螺方案对比与发展趋势分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2023,31(9):932-939,954.
WEI W Q, LU ZH H, CHEN F, et al. Comparison and development trend analysis of chip level multi axis integrated MEMS gyroscope [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2023,31(9):932-939,954.
- [6] 杜江潮,胡终须,申燕超,等. 基于模态匹配和正交抑制的微机电陀螺闭环控制技术研究[J]. *导航定位与授时*,2023,10(3):117-124.
DU J CH, HU ZH X, SHEN Y CH, et al. Closed-loop control of a MEMS gyroscope with mode match and quadrature trimming[J]. *Navigation Positioning and Timing*, 2023,10(3):117-124.
- [7] 陈阳. 低成本 MEMS 陀螺频率特性测试方法[J]. *电子测量技术*,2020,43(13):138-142.
- [8] 张佳宁,李平华,庄须叶. 基于改进的 Sage-Husa 滤波

- MEMS 陀螺阵列降噪技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4):54-60.
- ZHANG J N, LI P H, ZHUANG X Y. Research on noise reduction technology based on improved Sage-Husa filtered MEMS gyroscope arrays[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4):54-60.
- [9] JIA J, DING X K, QIN ZH CH, et al. Overview and analysis of MEMS coriolis vibratory ring gyroscope[J]. Measurement, 2021, 182:109704.
- [10] 周同,余卓林. 基于刚度轴偏角预估机制的 MEMS 多环谐振陀螺全闭环控制方法[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1):46-54.
- ZHOU T, YU ZH L. Full-closed loop control method of MEMS disk resonant gyroscope based on the stiffness axis declination angle prediction mechanism[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1):46-54.
- [11] 曹慧亮,郭天琪,申冲. 抗过载环形 MEMS 固体波动陀螺设计加工与测试[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5):1-7.
- CAO H L, GUO T Q, SHEN CH. Design, fabrication and test of high overload resistance MEMS silicon-based ring wave gyroscope[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5):1-7.
- [12] 李青松,李微,张勇猛,等. 嵌套环 MEMS 陀螺研究综述[J]. 导航与控制, 2019, 18(4):11-18.
- LI Q S, LI W, ZHANG Y M, et al. Review of research on MEMS disk resonator gyroscope[J]. Navigation and Control, 2019, 18(4):11-18.
- [13] BU F, FAN B, XU D CH, et al. Bandwidth and noise analysis of high-Q MEMS gyroscope under force rebalance closed-loop control[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31(6):065002.
- [14] GU H Y, SU W, ZHAO B L, et al. A design methodology of digital control system for MEMS Gyroscope based on multi-objective parameter optimization[J]. Micromachines, 2020, 11(1):75.
- [15] LI CH, WEN H R, CHEN H, et al. A digital force-to-rebalance scheme for high-frequency bulk-acoustic-wave micro-gyroscopes[J]. Sensors and Actuators A Physical, 2020, 313(7):112181.
- [16] CAO H L, XUE R H, CAI Q, et al. Design and experiment for dual-mass MEMS gyroscope sensing closed-loop system[J]. IEEE Access, 2020, 8:48074-48087.
- [17] CAO H L, LIU Y, ZHANG Y J, et al. Design and experiment of dual-mass MEMS gyroscope sense closed system based on bipole compensation method[J]. IEEE Access, 2019, 7:49111-49124.
- [18] 曹慧亮,李宏生,申冲,等. 基于偶极子补偿法的硅微机械陀螺仪带宽拓展[J]. 仪器仪表学报, 2015, 36(11):2427-2434.
- CAO H L, LI H SH, SHEN CH, et al. Silicon MEMS gyroscope bandwidth expanding based on bipole compensation technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(11):2427-2434.
- [19] 刘宇鹏,崔让,郭潇林,等. 窄频差硅基环形陀螺检测闭环控制系统设计[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(3):125-138.
- LIU Y P, CUI R, GUO X L, et al. Design of closed-loop control system for detection of narrow-frequency difference silicon-based ring gyro[J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(3):125-138.
- [20] WAN Q, CHEN F, XU D CH, et al. Enhancing the closed-loop stability of a high-Q polysilicon micro-hemispherical resonating gyroscope[J]. Aip Advances, 2019, 9(2):025211.
- [21] IQBAL F, DIN H, LEE B. Single drive multi-axis gyroscope with high dynamic range, high linearity and wide bandwidth[J]. Micromachines, 2019, 10(6):410.
- [22] WANG S, LU L P, ZHANG K P, et al. Design, dynamics, and optimization of a 3-DoF nonlinear micro-gyroscope by considering the influence of the coriolis force[J]. Micromachines, 2022, 13(3):393.
- [23] ZHANG K P, WANG S, HAO SH Y, et al. Dynamical design and gain performance analysis of a 3-DoF micro-gyro with an anchored leverage mechanism[J]. Micromachines, 2022, 13(8):1201.
- [24] GADHAVI B, GOLNARAGHI F, BAHREYNI B. A robust angular rate sensor utilizing 2:1 auto-parametric resonance excitation[J]. Sensors, 2022, 22(20):7889.
- [25] 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.
- [26] 南方伯,郜中星,徐睿东,等. 全角半球谐振陀螺控制回路的动态特性研究[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10):42-49.
- NAN F B, GAO ZH X, XU R D, et al. Research on dynamic characteristics of whole-angle hemispherical

resonator gyroscope control circuit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10): 42-49.

- [27] LIU J, YANG Y H, GUO SH W, et al. A novel compensation method for eliminating precession angular-rate bias in MEMS rate-integrating gyroscopes[J]. IEEE Access, 2020, 8: 145611-145619.

- [28] 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.

作者简介



崔让, 2020 年于中北大学获得学士学位, 现为中北大学博士研究生, 主要研究方向为微机械环形陀螺仪、微机械单片三轴陀螺仪。

E-mail: cuirang@outlook.com

Cui Rang received his B. Sc. degree from the North University of China in 2020. He is currently pursuing the Ph. D. degree. His main research interest is MEMS gyroscope.



刘宇鹏, 2020 年于中北大学获得学士学位, 2023 年于中北大学获得硕士学位, 现为湖北三江航天红峰控制有限公司员工, 主要研究方向为惯性器件测控电路。

E-mail: Lyp1865@163.com

Liu Yupeng received his B. Sc. degree from North University of China in 2020, and received his M. Sc. degree from North University of China in 2023. He is currently an employee at Hubei Sanjiang Aerospace Hongfeng Control Co. Ltd. His main research interest is inertial device measurement circuits.



曹慧亮 (通信作者), 2014 年于东南大学获得博士学位, 现为中北大学的教授、博导, 主要研究方向为 MEMS 器件的抗干扰控制、误差控制和规定性能控制等。

E-mail: caohuiliang1986@126.com

Cao Huiliang (Corresponding author) received his Ph. D. degree from Southeast University in 2014. He is currently a professor and a Ph. D. advisor at North University of China. His main research interests include the anti-disturbance control, fault-tolerant control, and prescribed performance control for MEMS devices.