

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2210651

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^{*}

周 同^{1,2}, 余卓林^{1,2}

(1. 南京理工大学机械工程学院 南京 210096; 2. 南京理工大学江苏省复杂运动体智能导航
与控制研究中心 南京 210096)

摘 要:针对微机电系统多环谐振陀螺正交闭环回路存在控制误差问题,提出一种基于刚度轴偏角预估机制的多环陀螺全闭环控制方法。该方法通过对微机电系统多环谐振陀螺刚度轴偏角预估,实现正交闭环回路参数自动优化调整。同时,提出了基于刚度轴偏角预估机制的全数字化闭环控制方法,实现微机电系统多环谐振陀螺的驱动、检测、正交、模态匹配环路的全闭环控制。该方法可提升正交闭环回路信噪比,增强陀螺正交漂移的抑制能力,降低陀螺零偏输出,改善陀螺的零偏不稳定性。实验结果表明,采用本文提出的基于刚度轴偏角预估机制的全闭环控制方法后,微机电系统多环谐振陀螺的零偏输出由 $0.201^{\circ}/s$ 降低为 $0.0213^{\circ}/s$,零偏不稳定性由 $39.42^{\circ}/h$ 降低为 $1.237^{\circ}/h$,分别降低了 9.44 倍和 31.86 倍,验证了该方法对提升微机电系统多环谐振陀螺仪性能的有效性。

关键词: 微机电系统多环谐振陀螺;刚度轴偏角预估;全闭环控制

中图分类号: TH824 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4030

Full-closed loop control method of MEMS disk resonant gyroscope based on the stiffness axis declination angle prediction mechanism

Zhou Tong^{1,2}, Yu Zhuolin^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210096, China;
2. Jiangsu Research Center for Intelligent Navigation and Control of Complex Motion, Nanjing
University of Science and Technology, Nanjing 210096, China)

Abstract: To reduce the control error in a quadrature closed-loop circuit of micro electro mechanical system (MEMS) disk resonant gyroscope, a full-closed loop control method of MEMS disk resonant gyroscope based on the stiffness axis declination angle prediction mechanism is proposed. The parameters of the quadrature closed-loop circuit are automatically optimized and adjusted by predicting the stiffness axis declination angle of MEMS disk resonant gyroscope. In addition, a digital full-closed loop control method based on the stiffness axis declination angle prediction mechanism is proposed to realize the digital full-closed loop control of the driving, detection, quadrature suppression, and mode matching. This method can improve the signal-to-noise ratio of quadrature suppression circuit, and enhance the gyroscope capability in the field of quadrature drift, zero output and bias instability suppression. Experimental results show that, after adopting the full-closed loop control method based on the stiffness axis declination angle prediction mechanism, the zero output of the MEMS disk resonant gyroscope is decreased from $0.201^{\circ}/s$ to $0.0213^{\circ}/s$ and the bias instability is decreased from $39.42^{\circ}/h$ to $1.237^{\circ}/h$, by 9.44 times and 31.86 times, respectively, which evaluate the effectiveness of this method for improving the performance of the MEMS disk resonant gyroscope.

Keywords: MEMS disk resonant gyroscope; stiffness axis declination angle prediction; full-closed loop control

0 引言

微机电系统(micro electro mechanical system, MEMS)多环谐振陀螺是一种同时能兼顾固体波动陀螺和 MEMS 陀螺两类陀螺仪优良特性的新型微陀螺,其采用硅基材料,由微机械加工工艺制作而成,具有体积小、可靠性高、成本低等优点^[1]。受限于 MEMS 工艺水平, MEMS 多环谐振陀螺在实际加工过程中会出现不可避免的轴向不对称性误差^[2-3],使得 MEMS 多环谐振陀螺出现刚度轴偏角的现象,即 MEMS 多环谐振陀螺实际的驱动模式方向与检测模式方向不完全正交,引起正交耦合^[4],导致检测模式在无角速率输入的情况下输出正交误差信号^[5]。在实际应用中,刚度轴偏角会引起较大的等效输入角速率误差,严重影响到 MEMS 多环谐振陀螺稳定性和精度等性能^[6]。因此,对 MEMS 多环谐振陀螺刚度轴偏角进行校正具有重要意义。针对刚度轴偏角问题,2009 年,美国乔治亚理工学院报道了一个开环系统^[7],在使用相位敏感解调分离哥氏信号和误差信号后,对误差进行了片外分析和补偿。该方法是补偿正交误差的最简单方法,但需要以更高的功耗为代价。2016 年,美国 Bosch 公司通过在正交通道中注入测试信号^[8],使其在相同频率下不受哥氏速率信号的影响,陀螺零偏不稳定性达到 $1.2^{\circ}/\text{h}$ 。2019 年,英国纽卡斯尔大学提出一种非线性校正方法^[9],该方法在正交闭环控制下,对陀螺正交漂移进一步抑制,漂移误差小于 $0.2^{\circ}/\text{s}$ 。2021 年,中北大学通过正交力校正法^[10]抑制刚度轴偏角,将零偏不稳定性从 $15.89^{\circ}/\text{h}$ 降低到 $1.37^{\circ}/\text{h}$,但是该方法需要对正交解调信号进一步进行调制,相位角误差和噪声误差容易产生二次影响,影响补偿效果。同年苏州大学采用正交耦合刚度校正法^[11]抑制正交误差,将零偏不稳定性从 $4.05^{\circ}/\text{h}$ 降低到 $0.96^{\circ}/\text{h}$,该方法的优点在于不需要进行相位控制,实现简单,控制容易。2022 年,伊朗阿米尔卡比尔理工大学提出了在接口电路的输入端进行正交误差信号补偿^[12],该方法具有良好的鲁棒性,可适应于多种陀螺的结构。

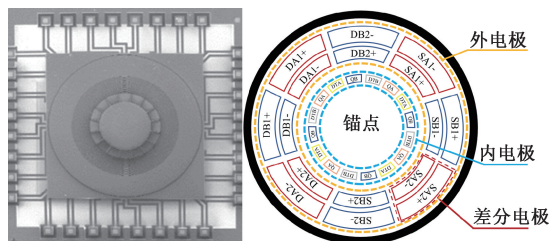
为了进一步提高 MEMS 多环谐振陀螺正交闭环回路对正交漂移抑制的能力,本文提出一种基于刚度轴偏角预估机制的 MEMS 多环谐振陀螺全闭环控制方法。该方法可实现对陀螺仪刚度轴偏角的精确测量,并根据不同的刚度轴偏角值实现对正交闭环回路参数的精确调控,以提升 MEMS 多环谐振陀螺性能。

1 MEMS 多环谐振陀螺正交误差机理

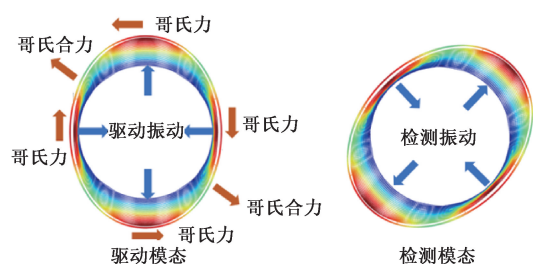
1.1 MEMS 多环谐振陀螺结构

本文针对实验室自主研制的外锚点支撑的 MEMS 多环谐振陀螺进行研究,谐振器由 31 个同心圆环组

成,同心圆环通过外框支撑,最外环半径为 2.2 mm ,厚度为 $100\text{ }\mu\text{m}$,环宽为 $5.576\text{ }\mu\text{m}$,这些同心圆环通过分布的辐条相互连接,并最终连接到中心固体圆盘。图 1 所示为 MEMS 多环谐振陀螺基本结构和工作原理示意图。



(a) MEMS多环谐振陀螺结构示意图和显微镜扫描图
(a) Diagram and microscope image of the MEMS disk resonant gyroscope



(b) MEMS多环谐振陀螺工作原理
(b) Working principle of the MEMS disk resonant gyroscope

图1 MEMS 多环谐振陀螺基本结构和工作原理
Fig.1 Diagram of MEMS disk resonant gyroscope's structure and working principle

该陀螺仪采用体硅(silicon on insulator, SOI)加工工艺进行制备,具有应力小、工艺流程简单、可控制性强、易于实现批量生产等优点。SOI 工艺采用材料 111 硅制作硅片,硅片引脚通过金丝打线到陶瓷管壳上^[13]。采用晶圆级封装后,陀螺的品质因数约为 20 000,谐振频率为 $8\text{ }000\text{ Hz}$ 左右。该陀螺仪具有两个工作模式,两者在结构上的夹角为 45° ,在物理意义上相差 90° ,即两工作模式是互相垂直的,测得的角增益 G 为 0.398。

该陀螺仪具有 32 个平行板电容电极,电极间距为 $5.924\text{ }\mu\text{m}$,每一个工作模式具有 12 个电极。在驱动模式下,4 个外电极 DB1+和 DB1-、DB2+和 DB2-用于双端差分驱动,4 个外电极 SB1+和 SB1-、SB2+和 SB2-用于双差分检测,内电极 DTA 用于驱动模式频率调谐;而在检测模式下,4 个外电极 DA1+和 DA1-、DA2+和 DA2-用于双端差分驱动,4 个外电极 SA1+和 SA1-、SA2+和 SA2-用于双差分检测,内电极 DTA 用于检测模式频率调谐。其余 8 个内电极 QA 和 QB 分为两组,作为正交抑制电极,根据刚度轴偏角的方向,每次只选择其中一组正交电极进行抑制。

1.2 MEMS 多环谐振陀螺正交误差分析

图1(a)所示的 MEMS 多环谐振陀螺驱动模态和检测模态的电极均匀分布在 0° 、 45° 、 90° 等 8 个方向上,这样的结构能使驱动模态和检测模态的运动互不影响,减少对 MEMS 多环谐振陀螺性能的影响。而在实际的陀螺仪结构加工过程中,受工艺水平的限制,不可避免地会出现轴向不对称性误差,使得多环陀螺仪驱动模态和检测模态的刚度轴出现偏差,驱动模态的输出耦合到检测模态,从而影响 MEMS 多环谐振陀螺的性能^[14]。正交误差产生原理如图2所示。 $\{x, y\}$ 为驱动读出电极方向, $\{x', y'\}$ 为模态主轴方向, θ_ω 为刚度轴偏角。

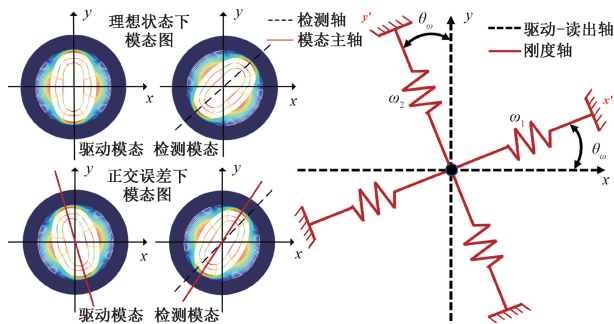


图2 存在正交误差下振动模态示意图

Fig. 2 Diagram of vibration mode with quadrature error

从模态主轴的方向进行观测,两个本征模态的运动是相互独立的;从驱动读出轴观测,谐振子的运动存在耦合, x 和 y 方向是并非独立的, x 、 y 轴间耦合误差通常就称为正交误差,驱动轴和检测轴与弹性主轴之间的夹角称为刚度轴偏角。正交误差将导致力平衡系统中检测模态不再维持零位,进而引入偏值误差,恶化 MEMS 多环谐振陀螺的性能。

将轴向不对称性误差考虑在内,陀螺的动力学方程如式(1)所示。

$$\begin{cases} m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + c_{xy} \dot{y}(t) + k_x x(t) + k_{xy} y(t) = F_d \sin(\omega_x t) \\ m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + c_{yx} \dot{x}(t) + k_y y(t) + k_{yx} x(t) = -2m_y \Omega(t) \dot{x}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: m_x 、 m_y 为陀螺驱动模态和检测模态的等效质量; $x(t)$ 、 $y(t)$ 分别为驱动模态振动位移和检测模态振动位移; c_x 、 c_y 为阻尼系数; k_x 、 k_y 为刚度系数; c_{xy} 、 c_{yx} 为阻尼耦合系数; k_{xy} 、 k_{yx} 为刚度耦合系数。 F_d 为驱动静电力幅度, ω_x 为驱动模态谐振频率, $\Omega(t)$ 为输入角速率。本文使用的 MEMS 多环谐振陀螺刚度系数 $k_x = 188.8 \text{ N/m}$, 阻尼系数 $c_x = 1.39 \times 10^{-7} \text{ N/m/s}$, 阻尼系数远小于刚度系数,由阻尼不对称造成的阻尼耦合可以忽略不计,式(1)可进一步化简为:

$$m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t) + k_{xy} y(t) = F_d \sin(\omega_x t) \quad (2)$$

$$m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_{yx} x(t) + k_y y(t) = -2m_y \Omega(t) \dot{x}(t) \quad (3)$$

求解检测模态运动方程式(3)可以得到由驱动正交耦合误差引起的检测质量块沿检测方向的稳态正交位移 y_q :

$$y_q = \frac{-\frac{k_{yx} x}{m_y}}{\sqrt{(\omega_y^2 - \omega_x^2)^2 + \left(\frac{\omega_x \omega_y}{Q_y}\right)^2}} \quad (4)$$

式中: Q_y 为检测模态品质因数。当系统存在正交误差时,即便检测轴向没有角速率输入,但由于正交位移 y_q 的存在, MEMS 多环谐振陀螺检测轴也会有信号输出。结合图2,当驱动模态偏离 x 轴很小角度 θ_ω 时,哥氏力加速度 a_c 和输出轴方向上的误差加速度 a_e 比值如式(5)所示。

$$\left| \frac{a_c}{a_e} \right| = \left| \frac{2\Omega(t) A_x \omega_x \sin(\omega_x t) \cos(\theta_\omega)}{A_x \omega_x^2 \cos(\omega_x t) \sin(\theta_\omega)} \right| \approx \left| \frac{2\Omega(t) \sin(\omega_x t)}{\theta_\omega \omega_x \cos(\omega_x t)} \right| \quad (5)$$

本文采用的 MEMS 多环谐振陀螺谐振频率 ω_x 为 8 000 Hz, 输入角速率 $\Omega(t)$ 通常在几十至几百 $^\circ/\text{s}$ 。当检测轴向有角速率输入时,输出轴方向上的误差加速度 a_e 远大于哥氏力加速度 a_c , 即使是很小的刚度轴偏角引起的正交误差都能等效为较大的输入角速率^[15]。因此如何有效抑制刚度轴偏角引起的正交误差是提升 MEMS 多环谐振陀螺输出性能的关键问题。

2 MEMS 多环谐振陀螺正交误差抑制机理

正交误差补偿通常有 3 种方法:电荷注入法、正交力校正法和正交耦合刚度校正法。前两种方法需要对正交解调信号进一步进行调制,相位角误差和噪声误差容易产生二次影响,影响补偿效果。本文采用正交耦合刚度校正法,该方法具有实现简单,补偿效果好,控制容易等优点。

当 MEMS 多环谐振陀螺工作于 $N=2$ 模态时,可得到位于 ψ 处且角度为 ϕ 的单个电极的静电刚度矩阵^[16]:

$$\mathbf{K} = \frac{1}{2} K_e \times \begin{bmatrix} 1 + \text{sinc}(2\phi) \cos(4\psi) & \frac{1}{2} \text{sinc}(2\phi) \sin(4\psi) \\ \frac{1}{2} \text{sinc}(2\phi) \sin(4\psi) & 1 - \text{sinc}(2\phi) \cos(4\psi) \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, K_e 是静电刚度,其表达式为:

$$K_e = -\frac{\varepsilon_0 r \phi h}{d_0^3} V_T^2 \quad (7)$$

其中, ε_0 是真空介电常数, r 是 MEMS 多环谐振陀螺谐振器半径, ϕ 是电极所对应的角度, h 是电极的高度, d_0 是电容间隙, V_r 是电极与谐振器之间的电势差。因此进行 MEMS 多环谐振陀螺正交抑制时, 可选择位于 $\psi = (4n + 1) \times \frac{\pi}{8}$ ($n = 0, 1, 2, 3$) 的 QB 电极进行正交抑制:

$$K = \frac{1}{2}K_e \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2}\text{sinc}(2\phi) \\ \frac{1}{2}\text{sinc}(2\phi) & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

或选择位于 $\psi = (4n + 3) \times \frac{\pi}{8}$ 的 QA 电极进行正交抑制:

$$K = \frac{1}{2}K_e \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2}\text{sinc}(2\phi) \\ -\frac{1}{2}\text{sinc}(2\phi) & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

由此可见, 正交刚度耦合校正法的本质就是给正交校正电极施加直流电压, 使 4 个正交校正电极产生的刚度之和与 MEMS 多环谐振陀螺的刚度耦合项抵消。

在实际正交抑制过程中, 为了提高校正效率, 只需对 QA 和 QB 中一组电极进行抑制即可。如图 3(a) 所示, 若模态主轴落在 $0^\circ \sim 45^\circ$ 之间, 可令 QA 电极组接地, 当 QB 电极组电压 V_{dc} 逐渐增大时, 模态主轴的刚度轴偏角 θ_ω 会慢慢减小, 逐渐靠近 0° 电极轴方向, 当 $V_{dc} = 2V_r$ 时, 即 4 个正交电极 QB 产生的校正刚度之和能与 MEMS 多环谐振陀螺的刚度耦合项完全抵消, 模态主轴与电极轴正好对准, 如图 3(b) 所示。若模态主轴落在 $0^\circ \sim -45^\circ$ 之间, 则令 QB 电极组接地, 并给 QA 电极组施加直流电压, 即可实现正交抑制。

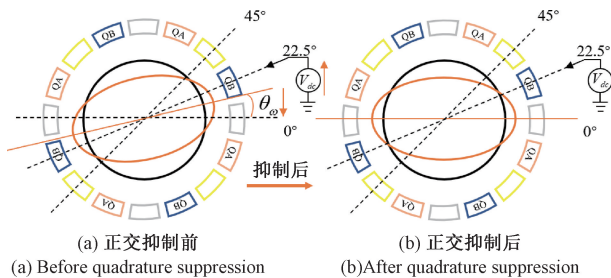


图3 MEMS 多环谐振陀螺正交耦合误差校正机理

Fig. 3 Quadrature error correction mechanism of the MEMS disk resonant gyroscope

3 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

基于正交刚度耦合校正机理分析, 可以得知, 采用正交刚度耦合校正法, 需要知道模态主轴的偏转方向以及

刚度轴偏角值, 而在陀螺评估中, 陀螺刚度轴偏角的存在往往会被忽略, 正交电极组的选择以及正交抑制电压大小通常是在开环情况下手动获取, 这不仅增加了评估工作的难度, 同时未知刚度轴偏角进行正交闭环控制会引入控制误差。因此, 本文创新提出一种基于刚度轴偏角预估机制的全闭环控制方法, 通过刚度轴偏角预估算法实现正交闭环回路参数的精准调控, 同时减少环路控制误差, 提升环路信噪比。刚度轴偏角的预估可以通过扫频响应测量方法^[17]实现, 由式(1)可推导得到 x 轴向传递函数如式(10)所示。

$$H_{xx}(s) = \frac{s^2 + \frac{c_y}{m_y}s + \omega_y^2}{\left(s^2 + \frac{c_x}{m_x}s + \omega_x^2\right) \left(s^2 + \frac{c_y}{m_y}s + \omega_y^2\right) - \omega_{xy}^4} \quad (10)$$

从式(10)可知 x 轴向传递函数存在 2 个极点与 1 个零点, 零极点与刚度偏转角 θ_ω 的关系如式(11)所示。

$$\theta_\omega = \frac{1}{4} \arccos \left(\frac{2|z|^2 - |s_1|^2 - |s_2|^2}{|s_2|^2 - |s_1|^2} \right) \quad (11)$$

其中, s_1 、 s_2 以及 z 分别对应力-位移扫频响应曲线的谐振频率点和零点, 根据式(11)可知, 由力-位移扫频曲线的谐振频率点和零点即可算出刚度轴偏角 θ_ω 。

图 4 为 x 轴扫频示意图, 对 x 轴驱动, 由于刚度轴偏角的存在, 驱动力在 y 轴方向出现了正交分力, 故 x 轴力-位移扫频曲线会出现两个峰, 幅值高的为 x 轴谐振峰, 幅值低的为 y 轴谐振峰, 也称为正交峰。

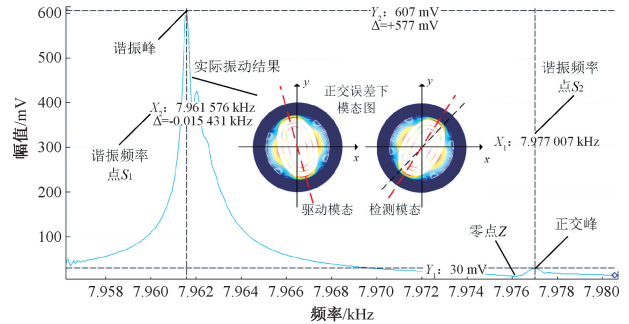


图4 x 轴扫频示意图

Fig. 4 Diagram of x -axis sweep

图 5 是基于刚度轴偏角预估机制优化后的正交闭环回路, 先对 MEMS 多环谐振陀螺 x 轴扫频, 扫频数据在现场可编程门阵列 (field programmable gate array, FPGA) 内部根据并行比较算法分别得到谐振频率点 S_1 、零点 Z 和谐振频率点 S_2 , 并由式(11) 计算刚度轴偏角值, 刚度轴偏角值的计算结果反馈到正交电极组选择开关, 实现正交电极组的自动选择, 降低陀螺评估工作的难度。刚度轴偏角 θ_ω 结合式(6)和(7)可以得到理论正交抑制电

压,并反馈到驱动电路端,改变驱动电路的增益,提高数模转换器(digital to analog converter, DAC)输出信噪比^[18],改善传统模式下 DAC 输出正交电压小、信噪比低的问题,减少正交闭环控制误差,增强对 MEMS 多环谐振陀螺正交漂移的抑制能力,降低陀螺零偏不稳定性。完成正交回路参数精准调控后,驱动 MEMS 多环谐振陀螺工作在力平衡模式下, MEMS 多环谐振陀螺检测模态输出经过前端电容转电压(capacitor to voltage, C/V)电路,由 24 位模数转换

器(analog to digital converter, ADC)进入 FPGA 内部进行乘法解调,解调结果经过低通滤波器滤掉高频分量并输出有效信号,有效信号与参考信号相减得到误差信号,比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制根据误差信号产生误差控制信号,误差控制信号经过 16 位数模转换器 DAC 输出正交抑制电压到驱动电路,驱动电路将正交抑制电压施加在自动选择后的正交电极组,实现对 MEMS 多环谐振陀螺的正交刚度耦合校正。

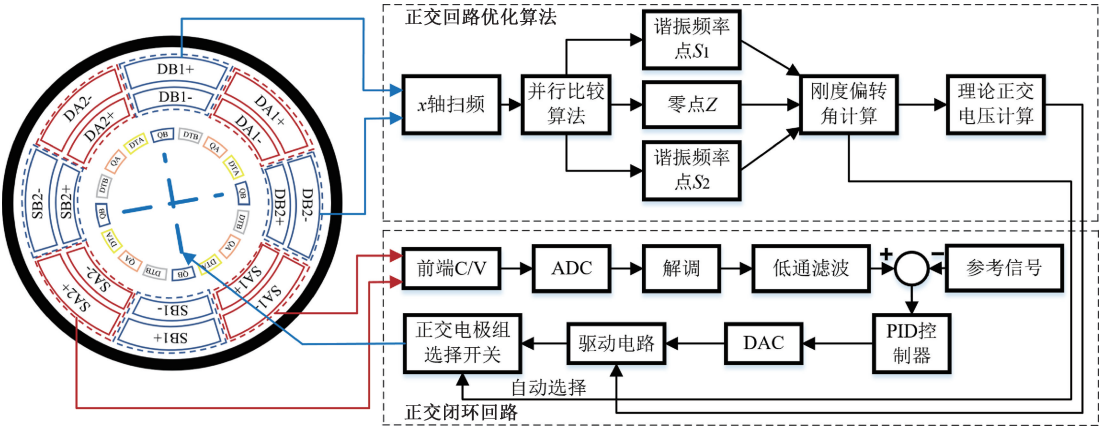


图5 基于刚度轴偏角预估机制的正交闭环回路

Fig. 5 Quadrature closed-loop circuit based on stiffness axis declination angle prediction mechanism

MEMS 多环谐振陀螺在力平衡模式下的全闭环控制框图如图 6 所示,刚度轴偏角预估模块用于对陀螺的刚度轴偏角大小、方向及抑制该刚度轴偏角所需正交电压进行计算并将计算结果反馈到正交闭环回路,实现正交回路的参数优化,提升正交回路信噪比,提高正交回路抑制陀螺正交漂移的能力。锁相环在陀螺系

统中的主要作用是快速跟踪谐振信号的频率及相位,并提供两路相位正交的解调、调制参考信号。考虑到谐振子振动过程中的阻尼作用,谐振子的振幅最终会衰减到 0,为了补充振动过程中能量的损耗,需要驱动闭环来维持驱动振幅恒定。理想情况下, MEMS 多环谐振陀螺的驱动模态和检测模态谐振频率一致,以保证

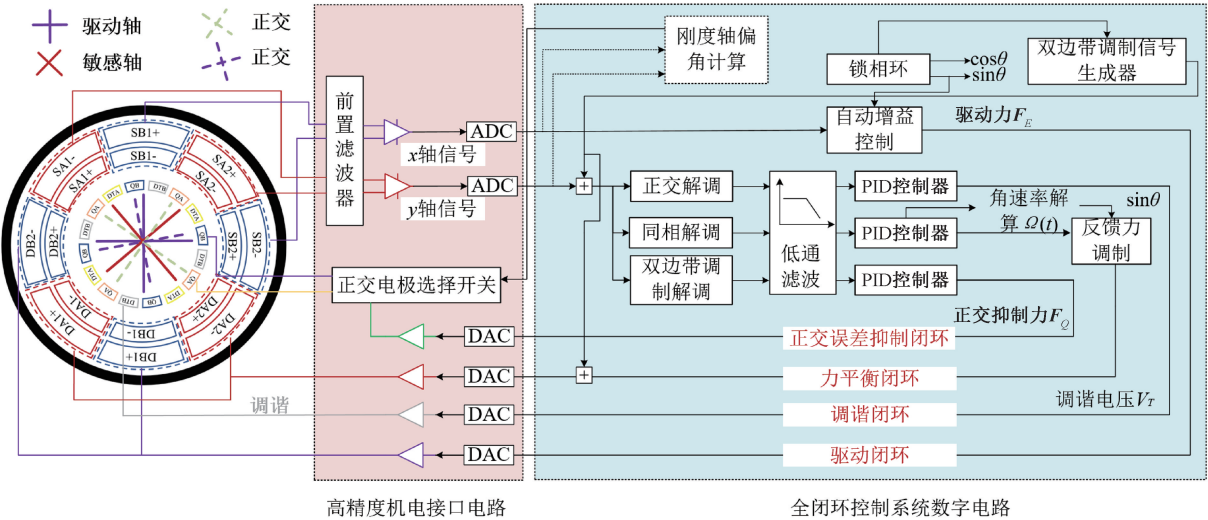


图6 力平衡下 MEMS 多环谐振陀螺信号处理框图

Fig. 6 Block diagram of MEMS disk resonant gyroscope signal processing under force balance

最大化陀螺的机械灵敏度和信噪比。但是由于加工工艺误差,实际的 MEMS 多环谐振陀螺存在频率裂解的问题,导致了机械灵敏度和信噪比的降低,因此需要调谐闭环实现 2 个模态频率的匹配^[19-20]。力平衡闭环用于通过反馈力使陀螺检测模态的振动位移为 0,使得谐振子振动在一个固定的位置上,利用测量反馈力的幅值大小来获得陀螺的旋转角速率,该附加力信号的大小正比于输入角速率^[21],因此可从该附加力信号中解调出来。通过力平衡闭环可提升 MEMS 多环谐振陀螺的带宽,降低其非线性误差。

表 1 MEMS 多环谐振陀螺扫频测试结果
Table 1 MEMS disk resonant gyroscope sweep test results

陀螺编号	S_1/Hz	Z/Hz	S_2/Hz	偏转角/ $^\circ$	理论正交电压/V	实际正交电压/V
NG-01	7 883. 19	7 901. 14	7 904. 33	11. 44	7. 3	7. 24
NG-02	8 076. 96	8 087. 09	8 088. 07	8. 66	4. 39	4. 45
NG-03	8 166. 13	8 181. 55	8 188. 28	16. 73	11. 5	11. 64

根据表 1 的理论正交电压和实际正交电压对比来看,两者相对误差保持在 10^{-2} 量级,验证了扫频响应法对 MEMS 多环谐振陀螺进行刚度轴偏角预估的有效性。

为了验证基于刚度轴偏角预估机制的多环陀螺全闭环控制方法的有效性,选择表 1 中的 NG-02 号陀螺进行测试,并设计了基于 FPGA 的全闭环测控电路(图 7)。该电路主要包括高精度机电接口电路、24 位模数转换器 ADC 和 16 位的数模转换器 DAC、FPGA 和闪存(Flash)、电源供电和数据传输接口等。

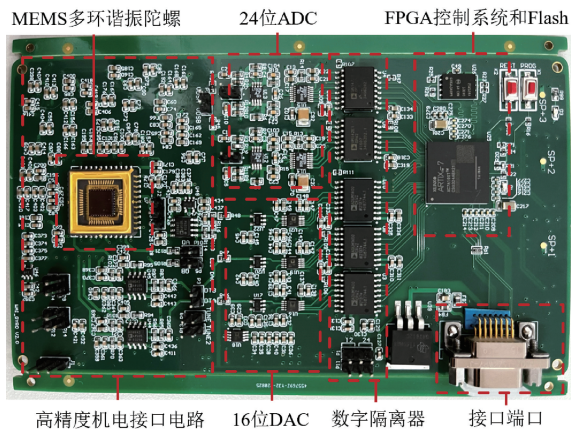


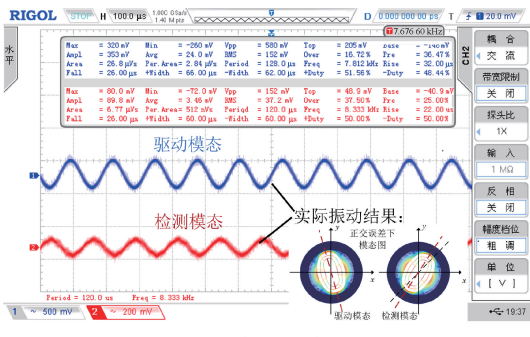
图 7 基于 FPGA 的陀螺测控电路验证平台

Fig. 7 FPGA-based gyroscope measurement and control circuit verification platform

在室温条件下对 MEMS 多环谐振陀螺进行正交校正前后陀螺仪的输出信号测试。图 8 所示为 MEMS 多环谐振陀螺驱动模式输出信号和检测模式输出信号。理想状态下,在没有外界角速率输入时,陀螺检测模式的输出信

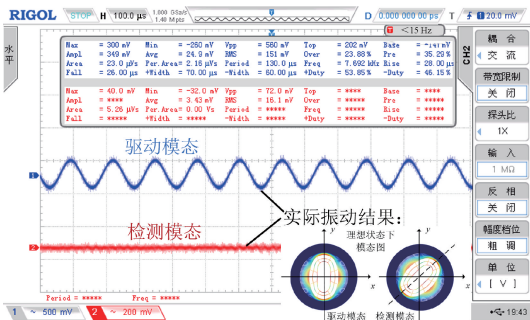
4 实验验证

本文通过扫频响应测量法,对 MEMS 多环谐振陀螺进行力-位移扫频测试,通过扫频曲线可得到陀螺谐振频率点和零点,由谐振频率点和零点预估 MEMS 多环谐振陀螺的刚度轴偏角,并根据单个正交电极产生的校正刚度计算出理论正交抑制电压,通过对比理论正交电压和实际正交电压来评估刚度轴偏角预估机制的有效性。表 1 是 MEMS 多环谐振陀螺扫频测试结果。



(a) 检测模式无正交抑制

(a) Detection of modes without quadrature suppression



(b) 检测模式有正交抑制

(b) Detection of modes with quadrature suppression

图 8 MEMS 多环谐振陀螺驱动模式态和检测模式态实测波形

Fig. 8 Measurement waveforms of MEMS disk resonant gyroscope drive mode and detection mode

号应该为 0。图 8(a) 为检测模式无正交抑制的情况,驱动模式输出信号与检测模式输出信号相位差为 180° ,检测模式输出的信号主要为正交误差产生的等效力信号;图 8(b) 为检测模式加入了正交误差补偿电路后的情况,

可以明显看到,检测模态信号趋于平坦,正交误差得到了极大抑制,验证了正交误差补偿电路的有效性。

为了验证本文所提供方法的实施效果,分别和数字开环控制、全闭环控制两种方法进行对比实验。3 种方法区别如表 2 所示。数字开环方法中,驱动闭环、正交开环、模态匹配闭环、力平衡开环、正交回路无优化算法;全闭环方法中,驱动闭环、正交闭环、模态匹配闭环、力平衡闭环、正交回路无优化算法;本文方法是在全闭环控制的基础上,增加对正交控制回路的优化算法。

表 2 3 种方法的区别

Table 2 Difference among three methods

实验方法	驱动	正交	模态匹配	检测	优化算法
数字开环 ^[22]	闭环	开环	闭环	开环	无
全闭环 ^[23]	闭环	闭环	闭环	闭环	无
本文方法	闭环	闭环	闭环	闭环	有

给陀螺仪供电,陀螺仪正常工作后,分别采用上述 3 种方法采集陀螺仪 1 h 静态零位数据,实验环境如图 9(a)所示。

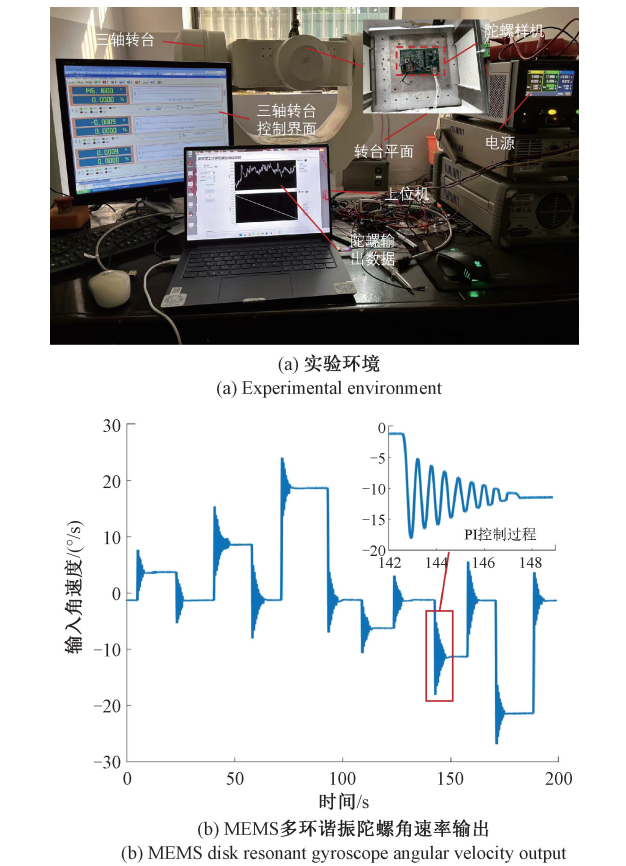


图 9 实验环境和 MEMS 多环谐振陀螺角速率输出响应

Fig. 9 Experimental environment and MEMS disk resonant gyroscope angular velocity response output

1 h 陀螺仪静态零位数据采集结束后,对 MEMS 多环谐振陀螺进行标度因数实验测试。将陀螺仪测试电路放在三轴速率转台上,陀螺仪正常工作后,控制三轴速率转台以不同速率进行转动,通过上位机接受各速率陀螺仪输出数据,图 9(b)为陀螺仪在外界输入角速率为 0、 ± 5 、 ± 10 、 $\pm 20^{\circ}/\text{s}$ 时的输出。

根据数字开环控制、全闭环控制和本文方法测试得到的多环谐振陀螺 1 h 静态零位数据绘制了阿伦(Allan)方差曲线,如图 10 所示。最终得到 3 种控制方式下 MEMS 多环谐振陀螺性能参数如表 3 所示。

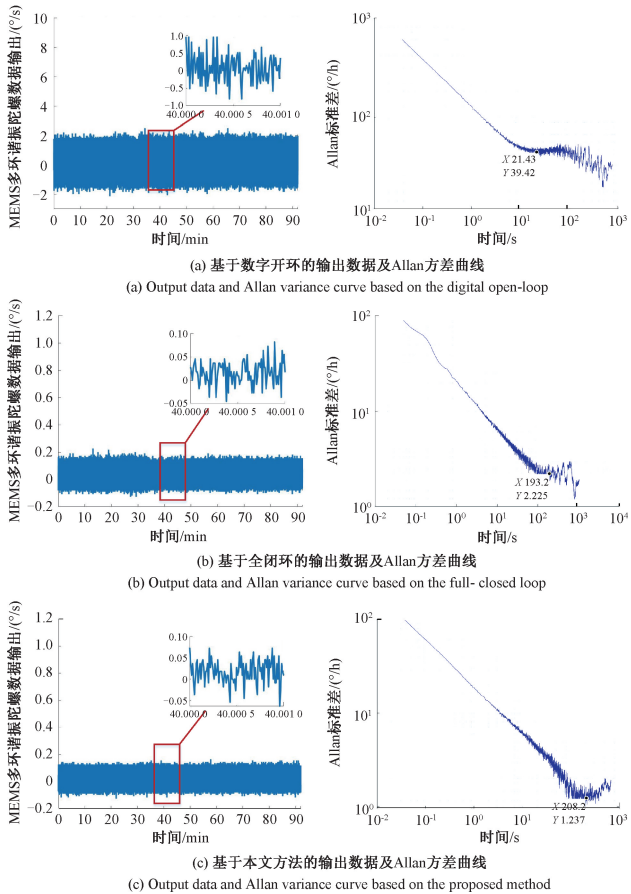


图 10 MEMS 多环谐振陀螺输出数据及 Allan 方差曲线

Fig. 10 MEMS disk resonant gyroscope output data and Allan variance curve

结合图 10 和表 3 中的性能参数,加入刚度轴预估机制后,MEMS 多环谐振陀螺的性能得到了提升。数字开环时标度因子为 $13.57 \text{ LSB}/^{\circ}/\text{s}$,全闭环时为 $111.82 \text{ LSB}/^{\circ}/\text{s}$,本文方法下为 $110.47 \text{ LSB}/^{\circ}/\text{s}$,标度因子的提升是因为检测闭环时陀螺仪不再受检测带宽限制,可以通过调节环路增益来改变标度因子。MEMS 多环谐振陀螺零偏输出范围由 $\pm 2^{\circ}/\text{s}$ 降低到 $\pm 0.15^{\circ}/\text{s}$ 左右,零偏由 $0.201^{\circ}/\text{s}$ 提高到 $0.0213^{\circ}/\text{s}$,提升了 9.44 倍。采用数字开环控制时 Allan 方差最低点在 21.43 s 出现,

表 3 正交闭环控制优化前后性能参数

Table 3 The comparison of performance parameters with and without quadrature closed-loop control

指标	量纲	数字开环	全闭环	本文方法
标度因子	LSB/°/s	13. 57	111. 82	110. 47
启动时间	s	1	1	1
零偏	°/s	0. 201 0	0. 034 7	0. 021 3
零偏不稳定性	°/h	39. 420	2. 225	1. 237
分辨率	°/s	0. 10	0. 02	0. 02
角度随机游走	°/√h	3. 02	0. 58	0. 53
驱动稳定性	10 ⁻⁶	0. 141	0. 142	0. 139

零偏不稳定性为 39. 42°/h,角度随机游走为 3. 02°/√h;采用全闭环控制时 Allan 方差最低点在 193. 2 s 出现,零偏不稳定性为 2. 225°/h,角度随机游走为 0. 58°/√h;采用本文方法控制时 Allan 方差最低点在 208. 2 s 出现,零偏不稳定性为 1. 237°/h,角度随机游走为 0. 53°/√h,陀螺仪零偏不稳定性从 39. 42°/h 提高到 1. 237°/h,提升了 31. 86 倍。这是由于正交闭环控制回路精度得到了提升,更有效的抑制了检测模态输出中耦合的正交误差信号,使正交误差产生的不确定因素进一步减小。测试结果符合理论分析,验证了本文方法能够进一步提升 MEMS 多环谐振陀螺正交闭环回路的控制精度,大幅度提升陀螺仪性能。

5 结 论

本文以外锚点支撑的 MEMS 多环谐振陀螺为研究对象,分析了正交误差机理,提出了一种基于刚度轴偏角预估机制的全闭环控制方法,并分别在数字开环控制、全闭环控制和本文方法下对陀螺仪进行实验测试。实测结果显示:加入刚度轴偏角预估机制后,陀螺仪的零偏和零偏不稳定性得到大幅度提升,零偏由 0. 201°/s 提高到 0. 021 3°/s,零偏不稳定性从 39. 42°/h 提高到 1. 237°/h。实测结果表明,基于刚度轴偏角预估机制的全闭环方法可以显著改善陀螺性能。

参考文献

[1] JIA J, DING X, QIN Z, et al. Overview and analysis of MEMS coriolis vibratory ring gyroscope [J]. Measurement, 2021, 182(10): 109704.

[2] ZHOU X, ZHAO C, XIAO D, et al. Dynamic modulation of modal coupling in microelectromechanical gyroscopic ring resonators[J]. Nature Communications, 2019, 10(1): 4980.

[3] ZHANG H, ZHANG C, CHEN J, et al. A review of symmetric silicon mems gyroscope mode-matching technologies[J]. Micromachines, 2022, 13(8): 1255.

[4] KEHRBERG S, DORWARTH M, HEITZ M, et al. Advanced methods for calculating quadrature errors of MEMS gyroscopes [C]. IEEE Sensor Baltimore MD, 2013:1-4.

[5] BU F, GUO S, FAN B, et al. Effect of quadrature control mode on ZRO drift of mems gyroscope and online compensation method [J]. Micromachines, 2022, 13(3): 419.

[6] WU H, ZHENG X, WANG X, et al. A 0.09°/h bias-instability mems gyroscope working with a fixed resonance frequency [J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21: 23787-23798.

[7] SHARMA A, ZAMAN M F, AYAZI F. A sub-0. 2hr bias drift micromechanical silicon gyroscope with automatic CMOS mode-matching[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2009, 44(5): 1593-1608.

[8] GANESH K B, VLADIMIR P P, THOMAS M, et al. A 3-axis gyroscope for electronic stability control with continuous self-test [J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 2016, 51(1): 177-186.

[9] HU Z X, BARRY J G. Effects of nonlinearity on the angular drift error of an electrostatic MEMS rate integrating gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(22): 10271-10280.

[10] 薛日辉, 张英杰, 曹慧亮, 等. MEMS 环形陀螺仪正交误差补偿系统设计[J]. 中国惯性技术学报, 2021, 29(6): 782-787.

XUE R H, ZHANG Y J, CAO H L, et al. Design of quadrature error compensation system for MEMS ring gyroscope[J]. Chinese Journal of Inertial Technology, 2021, 29(6): 782-787.

[11] 朱晓磊, 郭述文, 徐大诚, 等. 力平衡模式下 MEMS 陀螺正交误差实时校正系统设计[J]. 传感器与微系统, 2021, 40(9): 74-77.

ZHU X L, GUO SH W, XU D CH, et al. Design of real-time correction system for MEMS gyro quadrature error in force balance mode [J]. Sensors and Microsystems, 2021, 40(9): 74-77.

[12] SIAMAK Z, MOHSEN M. A new readout circuit with robust quadrature error compensation for MEMS vibratory gyroscopes[J]. Circuits Systems and Signal Processing, 2022, 41(12): 3050-3065.

[13] ZHOU Y, FAN Q, LIU M, et al. Design of force-to-

- rebalanced system with adaptive Fuzzy-PID controller for $N=3$ MEMS disk gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(12): 13384-13393.
- [14] MOHAMMADI Z, SALARIEH H. Investigating the effects of quadrature error in parametrically and harmonically excited MEMS rate gyroscopes[J]. Measurement, 2016, 87: 152-175.
- [15] 许宜申, 王寿荣, 吉训生, 等. 微机械振动陀螺仪正交误差分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 105-107.
- XU Y SH, WANG SH R, JI X SH, et al. Analysis of quadrature errors in micromechanical vibration gyroscopes[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(6): 105-107.
- [16] BARRY J G, JOHN H, JAMES S B, et al. Electrostatic correction of structural imperfections present in a microring gyroscope [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2005, 14(2): 221-234.
- [17] CHU J, LIU X, LIU C, et al. Investigation of dynamic characteristics of fused silica hemispherical resonator with shock and harmonic excitation[J]. Measurement, 2022, 204: 112030.
- [18] SMOLYANINOV N N, TKACHENKO A Y, LOBACH I A, et al. A module for processing optical signals from devices based on a self-sweeping fiber laser [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2021, 64(2): 241-247.
- [19] LI CH, WEN H R, WISHER S, et al. An FPGA-based interface system for high-frequency bulk-acoustic-wave microgyroscopes with in-run automatic mode-matching[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(4): 1783-1793.
- [20] ZHENG X, WU H, LIN Y, et al. Linear parametric amplification/attenuation for MEMS vibratory gyroscopes based on triangular area-varying capacitors [J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2020, 30(4): 757-760.
- [21] LI CH, WEN H, 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.
- [22] NITZAN S, AHN C H, SU T H, et al. Epitaxially-encapsulated polysilicon disk resonator gyroscope [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on MicroElectro Mechanical Systems, 2013: 625-628.
- [23] ZHOU Y, REN J B, LIU M, et al. An in-run automatic mode-matching method for $N=3$ MEMS disk resonator gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(24): 27601-27611.

作者简介



周同(通信作者), 分别在2007年和2010年于苏州大学获得学士和硕士学位, 2016年于南京理工大学获得博士学位, 现为南京理工大学副教授、主要研究方向为MEMS传感器、集成电路设计等。

E-mail: zhoutong@njust.edu.cn

Zhou Tong (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Soochow University in 2007 and 2010, and received his Ph. D. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2016. He is currently an associate professor at Nanjing University of Science and Technology. His main research interests include MEMS sensor, integrated circuits design, etc.



余卓林, 2021年于南京理工大学获得学士学位, 现为南京理工大学硕士研究生, 主要研究方向为MEMS陀螺仪测控电路设计。

E-mail: yuzhuolin1@njust.edu.cn

Yu Zhuolin received his B. Sc. degree from Nanjing University of Science and Technology in 2021. He is currently a master student at Nanjing University of Science and Technology. His main research interest is MEMS gyroscope measurement and control circuit design.