

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2024.02.002

MEMS 陀螺工作原理及其性能提升方法

王小旭¹, 陈圳南¹, 晏恺晨¹, 李睿¹,
张奥¹, 王玺全¹, 王宇鹏¹, 卢乾波^{2,3}

- 西北工业大学自动化学院, 西安 710072;
- 西北工业大学柔性电子研究院, 西安 710072;
- 西北工业大学宁波研究院, 浙江宁波 315103)

摘要: MEMS 陀螺是一种应用广泛的新型微惯性传感器, 可实现高精度、小体积、抗干扰性强的角速度测量, 被广泛应用于航空航天、平台钻井、自动驾驶、可穿戴设备以及手机中。近年来, 随着对 MEMS 陀螺研究的不断深入, 许多新型 MEMS 陀螺的工作原理被提出, 由于测量原理的不同, 其性能差异往往很大。本文旨在解决对 MEMS 陀螺的工作模式缺少系统性综述的问题, 根据陀螺最终的读出技术, 将 MEMS 陀螺的工作模式分为调幅、全角以及调频模式。在系统介绍其工作原理的基础上, 详细讨论了各种工作模式下 MEMS 陀螺的性能提升方法。最后还介绍了各类 MEMS 陀螺的发展趋势, 并结合各模式特性对 MEMS 陀螺的发展做出了展望。

关键词: MEMS 陀螺; 调幅模式; 全角模式; 调频模式; 误差补偿

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2024)02-0009-19

The working principle of MEMS gyroscope and its performance enhancement method

WANG Xiaoxu¹, CHEN Zhennan¹, YAN Kaichen¹, LI Rui¹, ZHANG Ao¹,
WANG Xiquan¹, WANG Yupeng¹, LU Qianbo^{2,3}

- School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
- Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
- Ningbo Institute of Northwestern Polytechnical University, Ningbo, Zhejiang 315103, China)

Abstract: The micro-electro-mechanical system (MEMS) gyroscope represents a new type of multi-functional micro-inertial sensor enabling angular velocity measurements with characteristics of high precision, small size and robustness to external interference, which finds extensive utilization across various domains, including aerospace, platform drilling, autonomous driving, wearable devices and smart phones. In recent years, with the continuous research on MEMS gyroscope, many new operation modes have been proposed, whereas their performance often varies greatly due to the different measurement principles. This paper aims to solve the problem of lack of systematic review of the operation modes of MEMS gyroscope. According to the readout technology, the operation modes of MEMS gyroscope are classified into amplitude modulated (AM), whole-angle

收稿日期: 2023-11-03; 修订日期: 2023-12-26

基金项目: 陕西省杰出青年科学基金项目(2022JC-49)

作者简介: 王小旭(1982—), 男, 博士, 教授, 主要从事高精度惯性器件方面的研究。

通信作者: 卢乾波(1991—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高精度惯性器件方面的研究。

(WA) and frequency modulated(FM) gyroscopes. Based on the systematic introduction of their working principles, the performance improvement methods of MEMS gyroscopes in various operating modes are discussed in detail. Finally, the development trend of various types of MEMS gyroscopes is also introduced to meet the growing demand for MEMS gyroscopes, and the development of MEMS gyroscopes with the combination of the characteristics of the modes is prospected.

Key words: MEMS gyroscope; Amplitude modulated mode; Whole angle mode; Frequency modulated mode; Error compensation

0 引言

陀螺是一种敏感角速度/角位移的传感器,是惯性测量单元的核心部件,广泛应用于航空、航天、航海、兵器、汽车、生物医学以及环境监控等领域。传统的陀螺仪体积大、结构复杂、制作成本高,制约了陀螺仪的应用。20世纪80年代中期,基于哥氏效应的微机电(micro-electro-mechanical systems, MEMS)陀螺迅速发展起来,以其体积小、成本低、构造简单及功耗低的特点拓展了陀螺的应用领域。在汽车应用中, MEMS陀螺仪常用于防侧翻系统、防滑控制和电子稳定性控制中。在电子消费品中, MEMS陀螺应用于相机稳定、手机稳定、虚拟现实(如头戴式显示器)、惯性鼠标和便携式电子设备导航中。在机器人中, MEMS陀螺用于姿态控制以及路径规划。此外, MEMS陀螺仪在导弹导航、航空航天以及稳定平台等军事领域也有着广泛的应用^[1-2]。

MEMS陀螺有许多种工作模式,在不同工作模式下所采用的控制方案、读出技术以及电路实现都会有所不同。在过去的几十年中,许多学者报道了大量不同种类的MEMS陀螺,然而,少有文章详细介绍MEMS哥氏振动陀螺的各类工作模式。Ren等^[3]详细介绍了调频陀螺的各类工作模式,但并未介绍其他工作模式。Langfelder等^[4]介绍了调幅和调频模式,但并未详细介绍调频陀螺的类型,同时对于高性能的全角陀螺仪也没有提及。Li等^[5]侧重于对结构的分析,而对陀螺的工作模式只进行了简要的介绍。

本文第1章简要介绍了陀螺的基础知识,包括陀螺动力学模型、性能指标以及谐振子类型;第2~4章介绍了MEMS陀螺主要的工作模式,包括调幅(amplitude modulated, AM)、全角(whole-angle, WA)以及调频(frequency modulated, FM)三种模式,更具体地说,调幅模式包括开环、力平衡(force to rebalance, FTR)、模态反转以及双模态等工作模

式;调频模式包括差分调频模式、正交调频(quadrature frequency modulated, QFM)模式、李萨如调频(Lissajous frequency modulated, LFM)模式以及全差分调频模式;第5章对MEMS陀螺发展趋势进行了展望。

1 陀螺基本原理

1.1 陀螺动力学模型

事实上,振动陀螺仪的动力学原理非常复杂,但可以近似地看作是一个二自由度动力学模型。如图1所示,该模型由1个质量块、1对弹簧以及1对阻尼器构成。由于制造上的缺陷,弹簧和阻尼器与 x -轴的偏差为 θ_x, θ_y ^[6]。在该模型中,质量块 m 在 x 轴和 y 轴的平面上运动。当沿 z 轴存在角速度输入时,由于科里奥利效应,质量块的运动将发生变化。动力学模型的数学表达式如式(1)所示^[7-8]。

$$\begin{aligned} m\ddot{x} + d_{xx}\dot{x} + d_{xy}\dot{y} + k_{xx}x + \\ k_{xy}y - 2m\alpha\Omega_z\dot{y} &= F_{xc} + F_{xs} \\ m\ddot{y} + d_{yx}\dot{x} + d_{yy}\dot{y} + k_{yx}x + \\ k_{yy}y + 2m\alpha\Omega_z\dot{x} &= F_{yc} + F_{ys} \end{aligned} \quad (1)$$

其中, d_{xx}, d_{yy} 分别代表 x 与 y 轴的阻尼; d_{xy} 代表 x 与 y 轴之间的阻尼耦合,它与 θ_x 相关; k_{xx}, k_{yy} 分别代表 x 与 y 轴的刚度; k_{xy}, k_{yx} 代表 x 与 y 轴之间的刚度耦合,它与 θ_y 相关; α 代表角增益, Ω_z 代表沿 z 轴输入的角速度; F_{ic}, F_{is} ($i=x, y$)分别代表施加在 x 与 y 轴上的控制力, F_{ic} 与位移同相,用于修改频率, F_{is} 与速度同相,用于修改谐振子振动幅度。

1.2 性能指标

本节主要介绍MEMS陀螺的5个核心性能指标。后文将根据这几个指标对各类工作模式的性能进行比较。

1)零偏不稳定性:表示当输入角速率为0时,陀螺仪输出围绕其偏置的分散度。

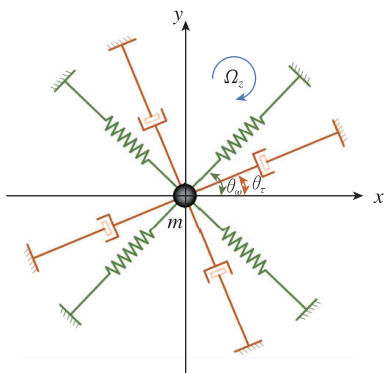


图 1 MEMS 陀螺动力学模型

Fig. 1 Equivalent dynamic model of MEMS gyroscope

2) 角度随机游走: 陀螺仪从零时刻开始累积的总角度增量, 反映了角速率信号中的白噪声特性。

3) 标度因子非线性度: 输出相对于最小二乘法拟合线的最大偏差值与最大输出的比值, 反映陀螺仪输出与拟合线之间的偏差程度。

4) 量程: 陀螺仪可以检测到的正反方向输入角速率的最大值, 表示陀螺仪的测量范围。

5) 带宽: 陀螺仪能够精确测量输入角速率的频率范围, 带宽越大, 陀螺仪的动态响应越好。

各个等级的陀螺仪对应的性能指标如表 1 所示^[1]。

表 1 各类等级陀螺性能指标

Tab. 1 Performance indicators of various grades of gyroscopes

指标	消费级	战术级	惯性级
角度随机游走/ [$(^\circ)/h^{1/2}$]	>0.5	$0.50 \sim 0.05$	<0.001
零偏不稳定性/ [$(^\circ)/h$]	$10 \sim 1\ 000$	$0.10 \sim 10$	<0.01
标度因子 非线性度/%	$0.1 \sim 1$	$0.01 \sim 0.10$	<0.001
量程/[$(^\circ)/s$]	$50 \sim 1\ 000$	>500	>400
带宽/Hz	>70	~ 100	~ 100

1.3 谐振子类型

不同工作模式的实现与谐振子结构密切相关^[9-10]。本节重点介绍各类谐振子的优缺点及其适用的工作模式。根据 IEEE STD 1431, MEMS 谐振子可分为两类, 即 I 类和 II 类谐振子^[11-12]。I 类谐振子的模式是非简并的, 典型的例子是音叉谐振子^[12]; 而 II 类谐振子的两个模式是简并的, 典型的例子是环形谐振子和微半球谐振子。

1.3.1 I 类谐振子

I 类谐振子结构较为简单, 其成本相对较低,

适合商业化应用。它允许频率裂解的存在, 使得陀螺对制造缺陷具有鲁棒性。I 类谐振子包括音叉谐振子与单质量块谐振子, 通常用于实现开环陀螺和 LFM 陀螺以及部分低精度力平衡陀螺。2018 年, Zega 等^[13-14]提出了一款同时工作于平面内外的音叉谐振子, 见图 2(a)。由于拥有 3 个自由度, 在该谐振子上首次实现了 3 轴 LFM 模式。2023 年, Buffoli 等^[15]推出了一款工作于开环模式的音叉陀螺, 其结构如图 2(b) 所示, 由于开环陀螺具有结构简单的优势, 该陀螺已达到 NEMS 水平。此外, 蝶形谐振子也是一种特殊的音叉谐振子, 其工作时像蝴蝶拍打翅膀^[3]。图 2(c) 所示为 Kuang 等^[16]于 2023 年提出的蝶形谐振子, 可以用于实现开环陀螺。单质量结构也是 I 类谐振子的一种, 它通常是一种解耦结构, 可以在两种正常模式下独立振动。它由一个单质量块和几个支撑梁组成, 具有结构简单和验证质量大的优点。图 2(d) 所示为由 Minotti 等^[17]于 2017 年提出的单质量块谐振子, 被用于实现 LFM 调频陀螺。

1.3.2 II 类谐振子

二类谐振子是高度对称的谐振子, 它拥有两个简并的模式, 故其频率裂解较小。通常来说, II 类谐振子的性能要优于 I 类谐振子。该类谐振子适用于实现陀螺的全角模式和力平衡模式, 同时该类谐振子也被广泛用于 QFM、往复调频(indexed frequency modulated, IFM) 和全差分调频等模式匹配的 FM 陀螺仪。以下是一些典型的 II 类谐振子结构。

首先是环形谐振子, 其结构简单, 对制造工艺的要求较低, 是最早实现微型化的谐振子之一。近年来, 学者们不断优化环形谐振子的结构和尺寸, 以提升抗冲击能力并降低频率裂解。例如, Yang 等报道了一种压电环形谐振子, 见图 2(e)。通过无源温度补偿, 该谐振子实现了超低的相对频率裂解(11.2×10^{-6})^[18]。盘式谐振子是在环形谐振子的基础上提出的。盘式谐振子主要包括两类, 一类是多层环式谐振子^[19], 见图 2(f), 与环形结构相比, 多环结构具有相对较大的验证质量和导电面积, 因为多环之间的间隙可以填充内部电极, 从而非常方便地利用静电力调节动态参数^[3]; 另一类是体声波(bulk acoustic wave, BAW)谐振子^[20], 见图 2(g), 其具有超高的谐振频率(MHz 级别)和较低的振幅, 因此能够抵御外部干扰。另外, 还存在其他高性能盘式结构, 例如蜂窝

状谐振子^[21]以及四叶形盘式谐振子^[22]。

微半球谐振子是近年来的热门话题,见图 2(h),它可用于实现高性能的力平衡和全角陀螺仪。与其他硅基的 II 类谐振子相比,由于使用了内部损耗较低的熔融石英材料,微半球谐振子的品质因数可达 5M 左右^[23]。图 2(h)所示的微半球结构由 Cho 等^[23]提出,该谐振子可用于实现达到惯性级的力平衡

陀螺仪。此外,还有一种集总质量的 II 类谐振子——四质量块谐振子,可用于实现力平衡、全角和 FM 操作^[24]。它继承了音叉谐振子模态质量大和角度增益高的优点。同时,由于其高度对称的结构,这种谐振子还具有很高的品质因数。如今,一些使用四质量块谐振子的 MEMS 陀螺仪的性能已接近惯性级,见图 2(i)^[25-26]。

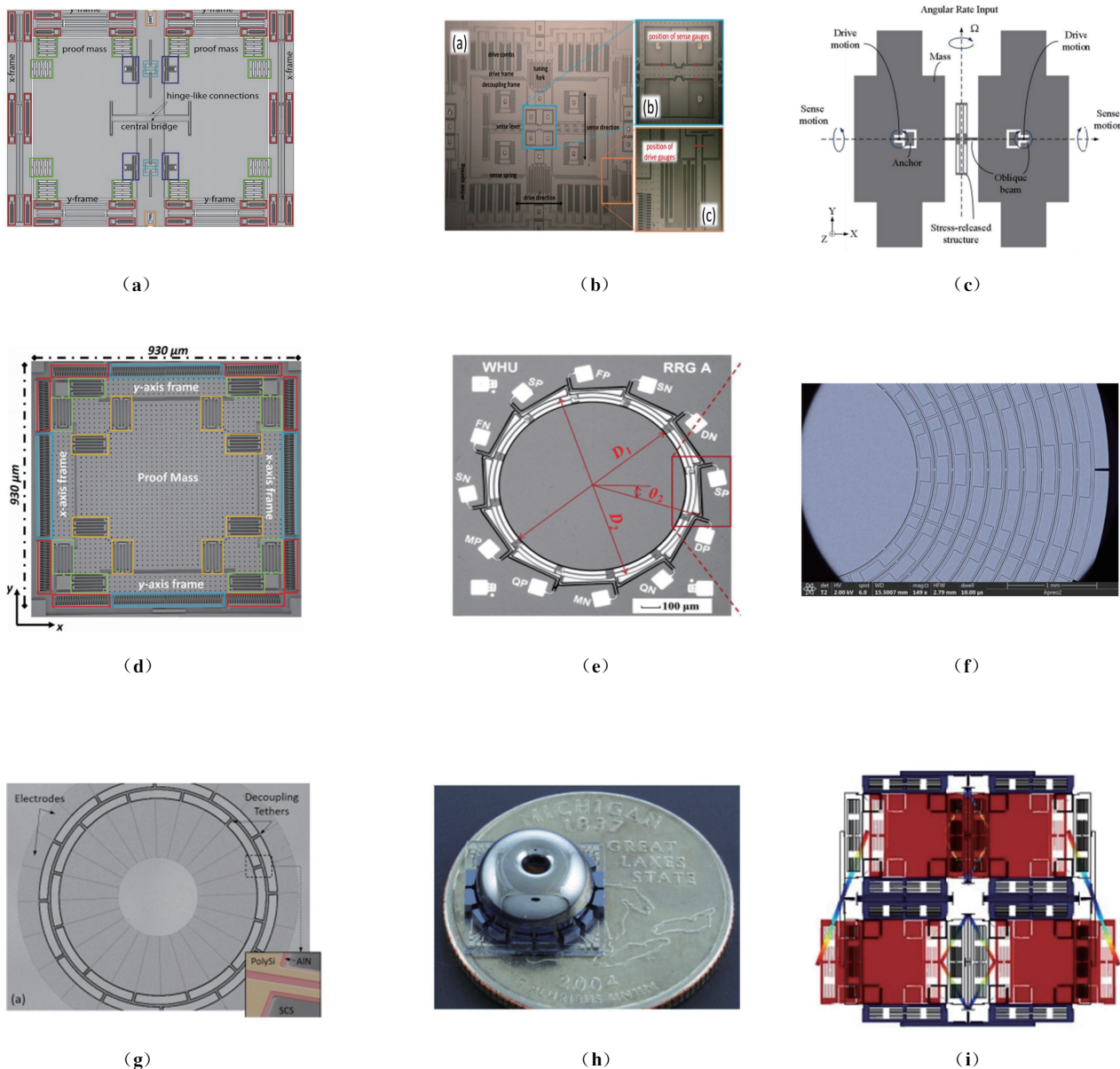


图 2 I 类谐振子(a-d)与 II 类谐振子(e-i)

Fig. 2 Class I (a-d) & Class II (e-i) resonators

2 调幅模式

调幅模式是 MEMS 陀螺仪应用最广泛的工作模式。本章将介绍各种调幅陀螺仪的工作原理及

其代表工作,如图 3 所示。其中,图 3(a)为 Shirazi 等^[27]提出的基于相位检测的正交误差抑制方法;图 3(b)为 Li 等^[28]提出的利用飞秒激光去除质量方法;图 3(c)为 Jin 等^[29]提出的改进双边带

(modified-double-sideband, MDSB) 解调方案; 图 3 (d) 为 Kuang 等^[30] 提出的一种基于扰动信号的闭环相位补偿控制方案; 图 3 (e) 为 Chen 等^[31] 提出的时序优化的模态反转方案, 其中 e1 为模态反转原理

图, e2 为模态反转时序配置原理示意图; 图 3 (f) 为 Shirazi 等^[7,32] 的工作, 其中 f1 为双模态陀螺工作原理图^[7,32], f2 为基于虚拟哥氏力的比例因子校准方案^[7]。

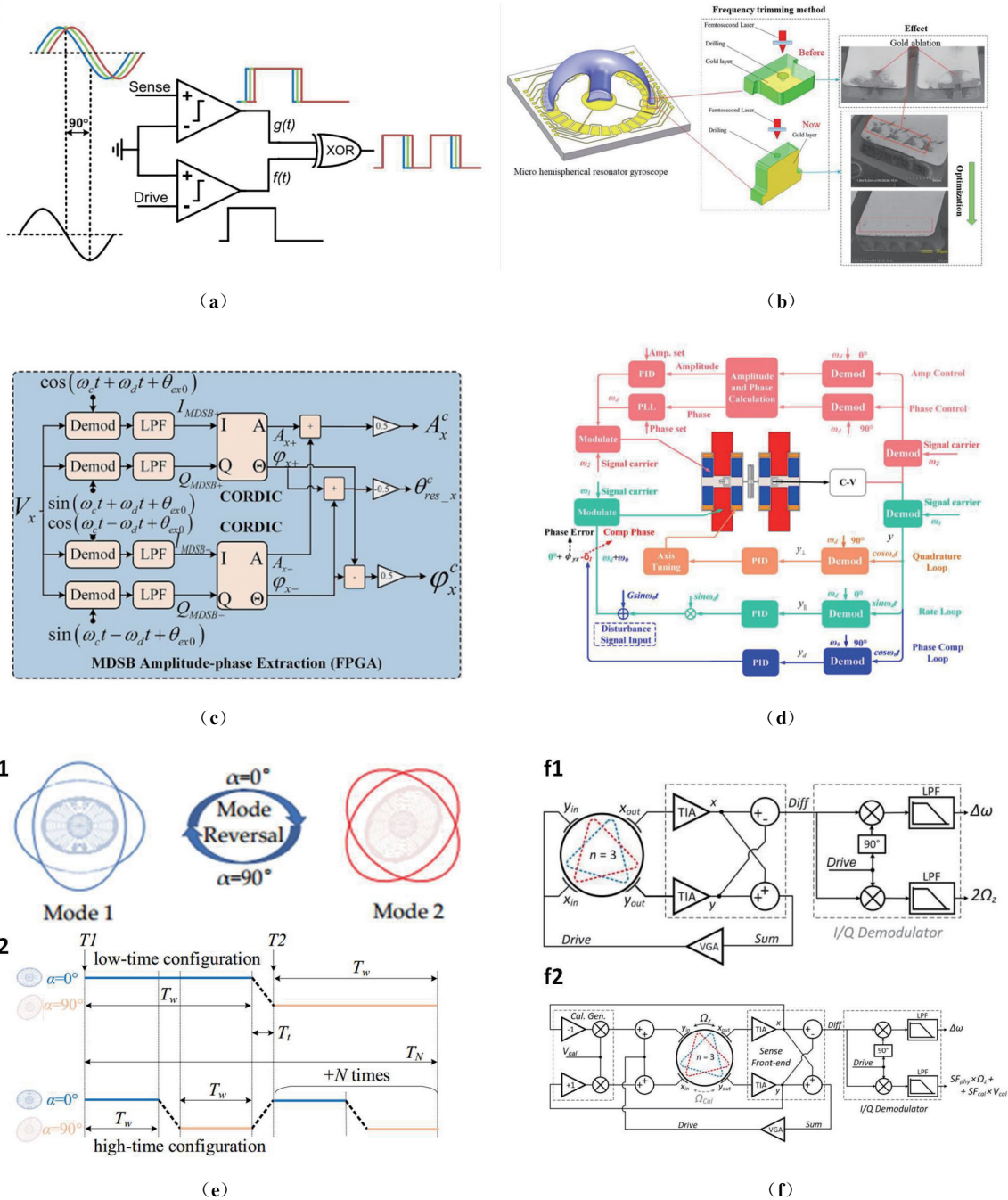


图 3 调幅陀螺相关工作

Fig. 3 Related researches on amplitude modulated (AM) gyroscope

2.1 传统调幅陀螺

传统调幅工作模式通常也称速率模式, 主要有两种情形, 其一是开环模式。在该模式下, 陀螺的

驱动模态被控制至恒定的幅值, 而检测模态不施加激励。当有角速度输入时, 陀螺的检测模态会产生相应的敏感位移。假设 x 轴振动形式为

$$x(t) = A \sin(\omega_o t) \tag{2}$$

结合式(1)与式(2),并通过 Lynch 慢变量法分析后,可得到如下输出表达式^[7-8,33]

$$y(t) = \frac{A}{\sqrt{(2\Delta\omega)^2 + (\omega_o/Q_y)^2}} \left(2\alpha\Omega_z \cos(\omega_o t + \varphi) + \underbrace{\Omega_{xy} \cos(\omega_o t + \varphi_o)}_{\text{非等阻尼}} + \underbrace{\frac{\omega_{xy}^2}{\omega_o} \sin(\omega_o t + \varphi_o)}_{\text{非等刚度}} \right)$$

$$\varphi \approx \tan^{-1} \frac{\omega_o/Q_y}{\Delta\omega}, \Delta\omega = \omega_{oy} - \omega_{ox}, \Omega_{xy} = d_{xy}/m, \omega_{xy} = \sqrt{k_{xy}/m}, \underbrace{BW}_{\text{带宽}} = \frac{2\pi\omega_o}{Q_y} \quad (3)$$

其中, A 代表 x 轴振幅; ω_o 代表 x 轴的工作频率(通常来说 $\omega_o = \omega_{ox}$); Q_y 代表 y 模态的品质因数; ω_{ox} , ω_{oy} 代表 x 和 y 轴的谐振频率。该模式原理简单,易于实现。然而,开环陀螺的标度因数受多个参数影响,故稳定性较低。若要提升标度因数,还会牺牲系统的带宽。谐振子的制造缺陷所导致的刚度失配与阻尼失配还会影响陀螺仪的零偏不稳定性。另外,相位误差的存在还会导致正交误差的泄露。

其二是力平衡模式也称闭环模式。力平衡模式最早由 Boser 等于 1995 年在加速度计上实现^[34]。与开环模式不同的是,力平衡陀螺通过对检测电极施加实时的力来平衡由角速度引起的位移。在该模式下,陀螺驱动轴的位移被控制到恒定值,检测轴的振幅被抑制到 0。故 x 与 y 模态振动形式为

$$\begin{aligned} x(t) &= A \sin(\omega_o t) \\ y(t) &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

结合式(1)和式(4)可得力平衡模式下陀螺输出

$$F_{ys} = 2m\alpha\Omega_z\omega_o A \cos(\omega_o t) + \underbrace{d_{xy}\omega_o A \cos(\omega_o t)}_{\text{非等阻尼}}$$

$$F_{yc} = \underbrace{k_{xy} \sin(\omega_o t)}_{\text{非等刚度}} \quad (5)$$

如式(5)所示,用于抵消 y 轴位移的力由两部分组成,一部分是 F_{yc} ,它与 x 轴位移同相,用于抵消由耦合刚度引起的位移;另一部分是 F_{ys} ,它与 x 轴振动速度同相,用于抵消由耦合阻尼和科里奥利效应引起的位移。与开环陀螺仪类似,相位误差也会导致正交误差泄露和角速度信号丢失,从而影响标度因数和偏置的稳定性。此外,由于在系统中引入了闭环控制,系统的零点和极点发生了变化,进而扩展了系统的带宽^[35]。

总之,开环陀螺仪和力平衡陀螺具有相同的误差源,例如耦合刚度误差、相位误差以及耦合阻尼误差等,这些误差源以类似的方式影响着两种陀螺仪的性能。为了解决这些问题,人们提出了多种方案,可分为以下几类。

2.1.1 正交误差抑制

非等刚度误差源于谐振子中不均匀的刚度分

布所带来的两轴之间的刚度耦合。非等刚度误差会产生比科里奥利信号振幅大得多的正交信号,即正交误差。正交误差是传统调幅陀螺仪的主要误差源。对于开环陀螺仪,可通过相位读出方案消除传感信号中的正交误差^[27],见图 3(a)。对于力平衡陀螺来说,通常在控制回路中设计正交控制/拟正交控制回路以消除正交误差的影响^[8,36]。此外,对于一些基于 II 类谐振子的陀螺来说,可以通过在硬件层面增设额外的调轴电极来实现正交误差的抑制。

2.1.2 模式匹配

除了刚度耦合的影响外,由刚度不匹配造成的频率裂解也对开环陀螺和力平衡陀螺的性能产生影响。频率裂解的消除可通过谐振子中的模式匹配实现,模式匹配是指对刚度耦合项 k_{yx} 和刚度不匹配($k_{xx} \neq k_{yy}$)的补偿。

模式匹配方法可归纳为两种主要方式。其一是机械修调,这种方法通常以调整高精度陀螺仪的小范围误差为目标,采用独特的加工方法改变谐振子的特定参数,直至实现模式匹配。机械修调通常包括微超声加工、研磨、抛光、蚀刻、离子束轰击和激光烧蚀等技术。近年来,激光修调因其操作简单、精度高而受到广泛关注,见图 3(b)^[28]。但总体而言,目前各种修调手段均存在一定局限性,0.1 Hz 内的高精度、高效率机械修调仍面临较大挑战^[37]。其二是静电调谐^[38],该方案通过调节谐振子电极上的直流控制电压来解耦两种工作模式,从而将频率裂解控制在可接受的范围内。如何精准地辨识模态不匹配是高精度静电调谐的关键。对于开环陀螺来说,一般通过陀螺的相频特性提取频率裂解信息。例如, Sonmezoglu 等^[39]通过驱动信号与检测位移信号实现自动的模式匹配。另外, Sharma 等^[40]通过残余的正交信号实现实时的模态匹配,这使得陀螺达到接近惯性级的性能。对于力平衡陀螺来说, Ding 等通过正交控制回路中上下边带的不匹配获取频率裂解信息,该方案实现了实时的模态匹配,并将频率

裂解降低至 0.28 Hz。Hu 等^[41]利用正交控制环路中带宽随频率裂解而降低这一特性,选择特定频率的角速度激发由频率裂解引起的实时反馈力,并通过静电调谐将其消除。另外,He 等^[42]通过设计一种模糊控制算法实现了自动的模式匹配。

2.1.3 相位误差抑制

控制电路中的延迟和谐振子的相频特性会产生相位误差,将会引起正交误差的泄漏和科里奥利信号损失,进而影响陀螺仪的标度因数和零偏。对于开环陀螺仪来说,采用直接相位测量和大正交输出与解调参考之间的在线补偿来补偿相位误差^[36,43]。对于力平衡陀螺仪,信号处理可用于抑制相位误差^[29,44]。图 3(c)为 Jin 等提出的改进双边带解调方案^[29]。该方案通过改进双边带解调获得两个因相位误差而产生相反相移的边带,两个边带的相位相加减可以消除并检测相位误差。Xu 等通过修改锁相环设定,将控制力的振幅调整到最小值,检测并补偿谐振子的相位误差^[45]。该方案使陀螺达到了 9.458(°)/h 的零偏不稳定性 and 2.25×10^{-4} 的标度因数非线性度。Liu 等通过向驱动轴注入非谐振参考信号实时地检测相位误差,然后通过调整解调信号的相位对其进行补偿^[36]。Kuang 等也提出了一种类似的补偿控制方案^[30],并在很宽的温度范围内显著降低了比例因子的非线性,见图 3(d)。此外,Liu 和 Su 等通过改进的电容跨阻放大器降低电路中的相位噪声^[46]。

2.2 模态反转 & 双模态

与力平衡操作类似,在模态反转的工作模式中,系统也通过平衡检测轴科里奥利信号的力实现角速度读数。不同之处在于,在这种运行模式下,需要进一步周期性地反转驱动和检测模式。此时,陀螺输出如下

$$\begin{cases} F_{x_s} = (-2m\alpha\Omega_z + d_{21})\omega_0 A \cos(\omega_0 t) \\ F_{y_s} = (2m\alpha\Omega_z + d_{21})\omega_0 A \cos(\omega_0 t) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} F_{y_s} - F_{x_s} = 4m\alpha\Omega_z\omega_0 A \cos(\omega_0 t) \\ F_{y_s} + F_{x_s} = 2d_{21}\omega_0 A \cos(\omega_0 t) \end{cases} \quad (6)$$

如式(6)所示,这种运行模式可以通过简单的和差运算实时检测角速度并消除耦合阻尼误差。目前,通过优化控制方案和时序配置,陀螺仪在模态反转下的性能得到了进一步提高。Wang 等提出了一种基于迭代学习控制的模态反转方案,与其他传统控制方案相比,该方案具有更好的响应速度和更小的超调量^[47],见图 3(e)。Chen 等提出了一种

模态反转的时序优化配置,以抑制温度变化产生的偏差漂移,见图 3(e1),(e2)。该团队通过不同的时序配置将陀螺仪从 30 °C 快速冷却到 10 °C,并验证了使零偏波动最小的最佳时序配置参数^[31]。

对于双模态来说,其工作原理如图 3(f1)所示。该模式利用两个相同的驱动力激励 x 和 y 轴两个模态,并从两轴的振动信号中获得和信号与差信号^[32]。

$$\begin{aligned} X_{\text{sum}}(j\omega_0) &\approx -\frac{F_0}{m\omega_0} \frac{2j\omega_0/Q_0}{(\Delta\omega)^2 + (\omega_0/Q)^2 + (2\alpha\Omega_z)^2} \\ X_{\text{diff}}(j\omega_0) &\approx -\frac{F_0}{m\omega_0} \frac{2\Delta\omega + 4j\alpha\Omega_z}{(\Delta\omega)^2 + (\omega_0/Q)^2 + (2\alpha\Omega_z)^2} \end{aligned} \quad (7)$$

对于式(7)中的和信号,由于 Ω_z 位于分母且远小于 ω_0/Q , 其对角速度变化不敏感。因此,该信号可提供稳定的激励与解调基准信号。差信号包含两部分,其一是角速度信号,其二是与前者正交的频率裂解信号。根据对差信号进行相干解调获得角速度信号以及频率裂解信息。由于采用差分操作,同相误差被消除,并且角速度的灵敏度提升了 2 倍。更重要的是,由于频率裂解信号与角速度无关,双模态陀螺可以实现运行中的模式匹配。

2015 年,Shirazi 等^[32]在工作于 $n=3$ 的 BAW 陀螺上实现双模态模式。通过双模操作,陀螺的角度随机游走和零偏不稳定性分别达到 0.7(°)/h^{1/2} 与 5(°)/h。同时 Shirazi 等进一步探讨了阻尼误差与刚度误差对双模态陀螺仪标度因数和零偏的影响,并提出了对应的补偿方案以及基于虚拟科里奥利的校准方案,见图 3(f1),(f2)^[7]。Li 等^[48]也开发了一款基于数字平台的双模态陀螺仪,其角度随机游走和零偏不稳定性分别达到 0.83(°)/h^{1/2} 与 9.3(°)/h。为了抑制频率裂解检测信号的非线性区域对双模运行的影响,该团队对陀螺仪进行了模态反转操作,以频率将频率裂解抑制到稳定区间内,从而实现后续的双模运行^[49]。

3 全角陀螺

1890 年,英国物理学家 G. H. Bryan 观察到振动的旋转酒杯的波节转速约为酒杯转速的 3/5^[50-51]。全角陀螺仪的诞生受到这一现象的启发。当 II 类谐振子受到周期性驱动力时,会产生驻波,如图 4(b)所示,其中 x 轴所在位置是振动的波腹,与 x 轴成 45° 角的 y 轴是波节所在位置。当存在角速度 Ω_z 时,波节点将相应地旋转。为了便于分析,图 4(a)

显示了图 4(b)中陀螺仪验证质量的等效运动轨迹,该轨迹为椭圆,其中 a 和 q 分别表示波腹轴和节点轴的振幅。 q 是由正交误差引起的。理想情况下,运动轨迹是一条直线。如式(8)所示,当存在角速度 Ω_z 时,轨迹产生载体的旋转角成正比进动角 φ ,这就是所谓的全角模式,通常也称速率积分模式。

$$\varphi = -\alpha \int \Omega_z dt \quad (8)$$

全角陀螺具有许多优势^[52],首先它可以直接测量角度,从而消除了速率陀螺偏置误差积分时所产生的航向误差。其次,全角陀螺的比例因子稳定,对环境变化不敏感,因此具有高度稳定性。此外,全角陀螺具有无限带宽的潜力^[5],相比速率陀螺具有更宽的动态范围^[52]。然而,全角陀螺对谐振子的工艺以及测控电路有很高的要求。目前,MEMS 全角陀螺受许多误差的影响,还未达到预期的性能。本章主要介绍全角陀螺针对各类误差的抑制方法及其最新研究进展。

3.1 模态匹配

对于全角陀螺来说,其输出也会受到频率裂解的影响,抑制频率裂解的相关方法^[53-54]有机械修调和传统的静电调谐方案。由于全角陀螺对耦合刚度误差较为敏感,利用这一特性,一些学者提出了高精度的调谐方案。Hu 等^[55]提出了一种粗调和细调两阶段组成的调谐方案,该方案将两轴频差降低至 10 mHz。Ruan 等^[56]提出了一种基于最小均方算法的全角陀螺在线模态匹配方案,见图 4(c)。随后,该方案通过最小均方算法辨识正交控制力中分别表征刚度轴偏角与频率裂解的两个分量。最终,通过静电调谐将这两个分量控制到 0,从而实现模态匹配,并将陀螺的频率裂解从 570.7 mHz 降低至 28.7 mHz。Yu 等也提出了类似的方案,不同的是刚度耦合与频率裂解的信息分别通过驻波被固定在 0° 和 45° 时的正交控制力获得^[57]。

3.2 耦合阻尼误差抑制

与调幅陀螺仪不同,耦合阻尼误差对全角陀螺的性能有着不可忽视的影响。即使在高品质因数的谐振子中,阻尼缺陷也会造成全角陀螺的角度依赖性漂移(angle dependent bias, ADB)和速率死区。克服阻尼误差的方法主要有速度反馈,即利用与速度同相的力抵消阻尼误差^[58],或基于电阻热损耗的阻尼修调^[59]。这些方法实现的前提是有效的阻尼辨识。通常来说,可以通过检测驻波在不同进动角处

的漂移速率辨识耦合阻尼误差。这是因为 ADB 的幅值与阻尼不匹配成正比,并且在最小阻尼轴处漂移为 0^[52,60]。Sun 等^[60]利用该原理实现阻尼误差的辨识与补偿,并将零偏不稳定性降低至 $0.049^\circ/\text{h}$ 。另外,Hu 等^[61-62]提出了基于扩展卡尔曼滤波的耦合阻尼误差补偿方案,见图 4(d),该方案通过系统慢变量模型建立状态方程与量测方程,实现了刚度缺陷和耦合阻尼误差的辨识。最终,通过速度反馈补偿陀螺的 ADB 降低至 $1^\circ/\text{s}$ 。Meng 等^[63]提出了一种基于高频注入的阻尼不匹配以及频率裂解在线辨识方案,如图 4(e)所示,该方案引入了高频虚拟旋转作为持续激励信号,并通过欧拉计算器获得高频的角度变化中的误差信息。

此外,可以通过施加虚拟旋转使陀螺工作于更高的“基准速率”以跳出死区并抑制 ADB。该方案由 Prikhodko 等于 2016 年首次提出^[64]。此后,Zhao 等^[65]通过该方案首次利用全角陀螺测得地球旋转角速度。另外,还可以通过模式切换的策略来跳出速率死区^[66]。

3.3 非线性误差抑制

与调幅陀螺相比,Duffing 非线性对全角陀螺的性能具有更大的影响^[67-68]。MEMS 陀螺的 Duffing 非线性由谐振子、检测电极和驱动电极 3 部分引起,前者引起刚度硬化效应,后者引起刚度软化效应,这两者会使得谐振频率随振动幅度发生改变。在全角模式中,由于驻波在实时发生进动,非线性的存在会引起两轴的频差产生与进动角相关的变化,这使得 ADB 中出现高次谐波分量。针对该问题,Horsley 等^[68-70]通过对陀螺施加与进动角相关的调谐电压,实时地抑制非线性带来的频率裂解,并将 ADB 降低至 $0.5^\circ/\text{s}$ 。在此基础之上,Hu 和 Gallacher 分析了由驱动力和电容式位移检测带来的刚度与阻尼非线性,并指出阻尼非线性也会产生 4θ 谐波。同时,该团队提出了在检测信号中消除三次项的检测电极非线性误差抑制方案,并成功降低 4θ 谐波误差^[67]。Sun 等^[71-72]利用检测电极中一次谐波的非线性误差是三次谐波幅值的 3 倍这一特性,得到了真实位移信号在一次谐波中的占比(即线性化系数)。最后通过实时校准,该方案消除了非线性误差,并将标度因数非线性降低至 0.79×10^{-6} (降低约 92.86%)。

3.4 电极误差抑制

受加工工艺限制,电极未对准和间隙不对称广泛存在于使用高度对称谐振子的全角陀螺中,因而

会产生电极误差。电极误差包括驱动与检测电极的增益不匹配和电极偏移角。该误差会使全角陀螺各个控制回路耦合并产生附加的角度漂移。针对驱动增益的不稳定, Senkal 等^[73]提出了微机电系统速率积分陀螺仪的参数驱动方案, 见图 4(g1)。该方案通过在盘式谐振子, 见图 4(g2), 其中心电极上, 见图 4(g3), 施加两倍频的参数激励信号在 x - y 平面内泵浦能量。由于参数泵浦效应, 即使驱动电极存在倾斜角与增益不匹配, 能量仍会传导至最大振幅处。Vatanparvar 等^[74]提出了一种驱动电极

增益失配的抑制方案, 该方案利用 x 与 y 轴的驱动力幅值与衰减时间的关系实现了增益失配的检测与抑制。此外, 由于电极误差通常难以直接测量, 但可以利用陀螺中某些信号对其进行表征。Sun 等^[75-76]通过附加角度漂移表征驱动电极增益和角度误差, 随后通过增加驱动补偿矩阵实现驱动电极误差的消除, 见图 4(h)。类似地, Sun 等通过角度估计误差的同相分量和正交分量表征检测电极误差, 并通过设计补偿矩阵消除检测电极误差^[77-78]。

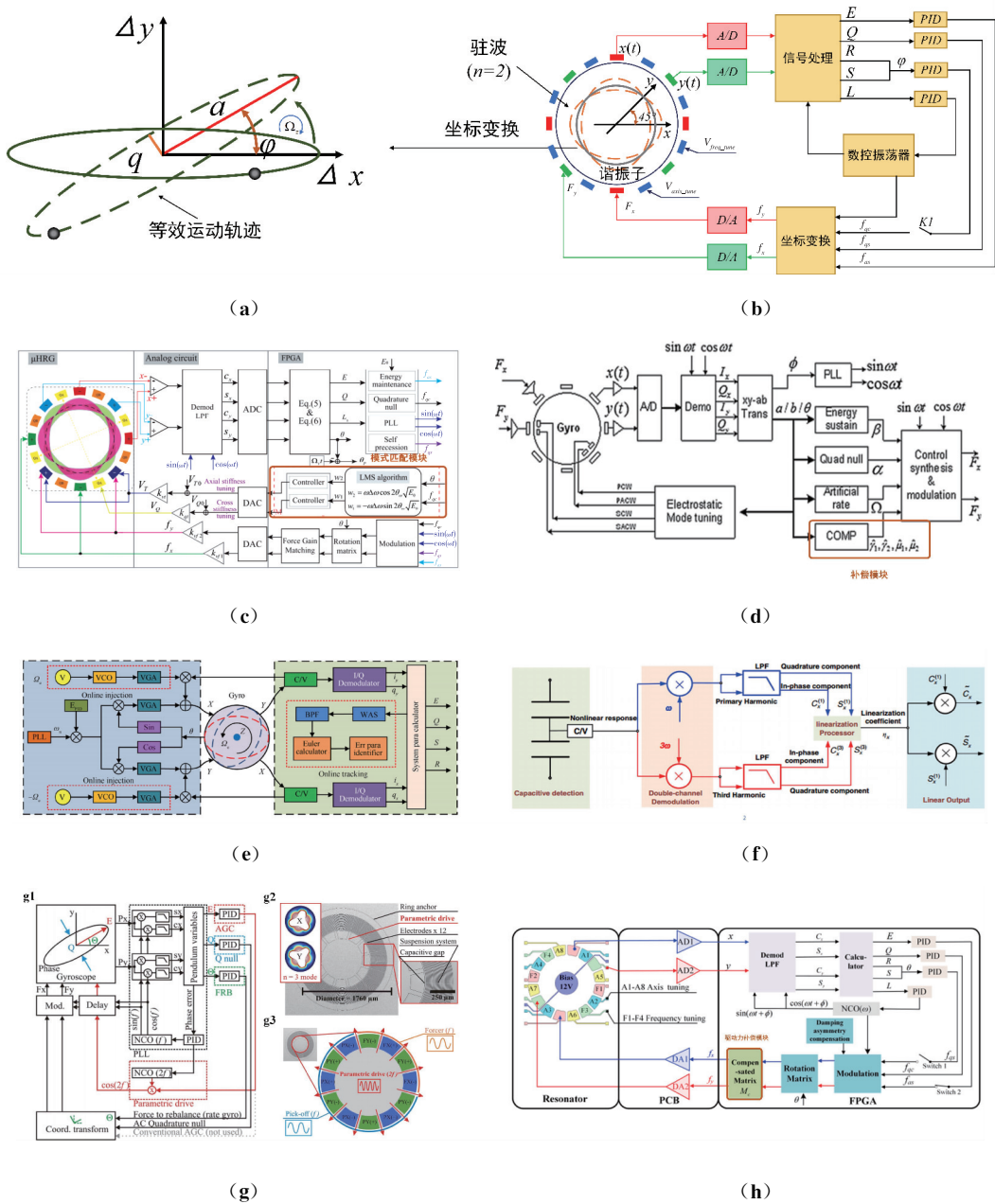


图 4 全角陀螺工作原理及其代表工作

Fig. 4 Working principle and representative work of whole angle (WA) gyroscope

4 调频陀螺

与调幅和全角陀螺不同,调频陀螺通过哥氏效应引起的频率变化实现角速度读出。2002年,Seshia等在MEMS双端音叉陀螺上首次实现了频率读出^[79]。此后,不同种类的调频陀螺被提出,这类陀螺大多都具有比例因子稳定性好、温度稳定性高以及带宽高等优点。因此,近年来调频陀螺受到了越来越多的关注。

4.1 差分调频陀螺

2006年,Moussa和Bourquin^[80]提出了一种基于平面内外振动频差读出的调频陀螺仪。此后,Zotov等首次将该原理应用至MEMS陀螺中,并提出差分调频MEMS陀螺。在该模式下,当陀螺没有外部的激励力时,角速度的输入会改变微分方程的特征根,并影响谐振子的本征频率,见图5(a)。以理想情况为例,当系统不存在阻尼以及刚度误差时, $\omega_o = \omega_{ox} = \omega_{oy}$,系统的特征根 λ_1, λ_2 如式(9)所示^[23]

$$\begin{cases} \lambda_1 = \omega_o + \Omega_z, \lambda_2 = \omega_o - \Omega_z \\ \lambda_1 - \lambda_2 = 2\Omega_z \end{cases} \quad (9)$$

该模式具有较好的标度因数非线性度^[81]、较高的动态范围和灵敏度。另外,由于输出采用差分操作,该模式对温度变化具有鲁棒性。

2011年,Zotov等首次提出了差分调频MEMS陀螺。该陀螺达到 $2\ 000(^{\circ})/s$ 的动态范围。然而,与全角陀螺类似,差分调频陀螺受频率裂解以及阻尼误差的影响,在低速率区间也存在着死区。针对该问题,Zotov等设计了AM+FM的混合读出方案克服死区^[82-84]。在此基础上,Ren等根据旋转波近似方法,探究了频率裂解和阻尼对该种工作模式的影响,并指出低频差高品质因数的谐振子更有利于提升差分调频陀螺的性能^[3]。Parajuli等^[21]基于四叶形盘式谐振子实现了差分调频操作。由于采用了高品质因数以及低频差的谐振子^[85],陀螺的角度随机游走与零偏不稳定性分别降低至 $0.917(^{\circ})/h^{1/2}$ 与 $6.7(^{\circ})/h$ 。另外,Zhang等^[86]研究了静电力非线性对差分调频微陀螺仪灵敏度的影响。

4.2 正交调频陀螺

为了克服传统开环陀螺带宽有限^[39,87]和标度因数稳定性差^[30,81]等缺陷,Kline等于2013年提出正交调频陀螺^[33,88]。在正交调频模式下,谐振子的振动幅度保持不变, x 与 y 轴的振动相位相差 90° ,故谐振子运动轨迹呈圆形。当有角速度输入时,圆形轨迹的旋转频率发生改变,见图5(b)。QFM的频率输出如下^[33]

$$\begin{aligned} \omega_x &= \omega_{ox} - \alpha\Omega_z + d_{xy}/2m \\ \omega_y &= \omega_{oy} - \alpha\Omega_z - d_{xy}/2m \end{aligned}$$

$$\Sigma\dot{\phi}' = \omega_x + \omega_y = \omega_{ox} + \omega_{oy} - 2\alpha\Omega_z \quad (10)$$

其中, ω_x 与 ω_y 为 x 与 y 轴的工作频率; $\Sigma\dot{\phi}'$ 为QFM陀螺输出,代表 ω_x 与 ω_y 之和。QFM陀螺拥有标度因数稳定性好^[89]、工作带宽极大及灵敏度较高等优点。但是由式可知, x 与 y 轴的固有谐振频率容易受温度的影响进而产生漂移,并影响陀螺长期稳定性^[33]。针对温度对陀螺输出的影响,Kline等^[33,88]提出了一种双陀螺正交调频方案,与单陀螺读出相比,偏置不稳定性降低了80%。在此基础上,Eminoglu等^[90]提出了IFM工作模式。该模式通过在较短周期内翻转 x 与 y 轴驱动力的相位差,使得陀螺轨迹发生连续正反转进而抵消温度的影响。该方案将陀螺的偏置不稳定性以及标度因数温度稳定性分别降低至 $10.29(^{\circ})/h$ 以及 $1.25 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ 。另外,Ren等^[91]提出了一种基于径向折叠(radially pleated, RP)圆盘谐振子的正交调频陀螺。利用正交调频模式,Ren等精准测得谐振子角度增益 α 。

4.3 李萨如调频陀螺

由于QFM模式对陀螺制造缺陷较为敏感,并且输出会受到由温度引起的频率漂移的影响。2013年,Kline等还提出了更具鲁棒性的李萨如调频模式^[92]。如图5(c)所示^[93],在LFM模式下, x 与 y 轴振荡频率差保持近似的恒定值,振动从 x 模态到 y 模态实现连续过渡,并且通过反馈控制力维持 x, y 模态振幅相等,最终谐振子的运动轨迹呈现为李萨如图形,见图5(c)。LFM输出表达式如式(11)所示^[33]

$$\begin{aligned} \Sigma\dot{\phi}' &= \underbrace{\omega_{ox} + \omega_{oy}}_{\text{接近常数}} - \underbrace{\Sigma r \alpha \Omega_z \sin(\Delta \omega t)}_{\text{角速率}} + \underbrace{2\Omega_k \cos(\Delta \omega t)}_{\text{非等刚度}} + \underbrace{\Delta r \Omega_c \sin(\Delta \omega t)}_{\text{非等阻尼}} \\ \Omega_k &\approx k_{xy}/(2m\omega_{ox,oy}), \Omega_c = d_{xy}/2m, \Sigma r = \frac{v_x}{v_y} + \frac{v_y}{v_x} \approx 2, \Delta r = \frac{v_y}{v_x} - \frac{v_x}{v_y} \approx 0 \end{aligned} \quad (11)$$

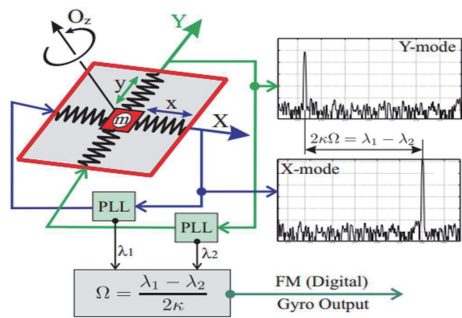
其中, v_x 与 v_y 分别代表 x 与 y 轴的振动速度。从式(11)可知, LFM 陀螺拥有稳定的标度因数, 并且不受耦合阻尼误差的影响。此外, 由于采用解调+滤波的读出方式, 由温度波动引起的缓慢变化的频率漂移得以抑制。

早期的 LFM 陀螺采用力读出方式^[92], 限制了陀螺的性能。为了实现高精度的频率读出, Izyumin 等^[94]设计了 $\Sigma\Delta$ 频率读出电路, 其拥有 $50 \mu\text{W}$ 的功耗以及 $41.1 \mu\text{Hz}$ 的分辨率。基于该高性能读出电路以及四质量块谐振子, LFM 陀螺的标度因数非线性度以及零偏不稳定性分别达到 7×10^{-6} 以及 $6(^{\circ})/\text{h}^{[95-96]}$ 。在此基础上, 该团队提出了基于 FM 信号与 AM 信号的混合读出方案。该方案消除了解调过程中的误差信号, 并将带宽提升了 760 倍。另外, 由于频率裂解的存在, LFM 中存在较大的角度随机游走。Eminoglu 等通过改变振动速度之比实现了 ARW 与速率随机游走的调节, 两者分别代表了短期稳定性与长期稳定性^[97]。

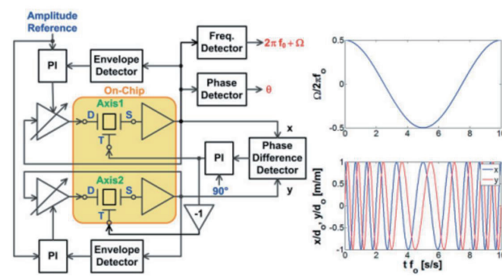
2017 年至今, 米兰理工大学的 Langfelder 团队致力在集成电路上实现低功耗与高性能的消费级 LFM 陀螺。Zega 等通过理论模型描述了三轴 LFM 陀螺仪的工作原理。在此基础上, Minotti 等提出了三轴结构的 LFM 陀螺仪, 其具备极低的功耗($160 \mu\text{A}$)和良好的标度因数稳定性 ($3.5 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)^[14, 98-100]。此后,

Leoncini 与 Bestetti 等设计了 LFM 陀螺的全数字读出的专用集成电路(application specific integrated circuit, ASIC), 并将其与先前的三轴结构进行集成^[99, 101-102]。在该电路中, 最为核心的两个部分为频数转换电路(frequency digitization circuit, FDC)与参考信号提取(reference-extraction, REX)模块。对于 FDC 来说, 其是基于 II 型锁相环实现的, 见图 5(d)。由于采用了额外的微分步骤, D 触发器引入的量化误差经历了整体三阶整形, 故 FDC 的噪声水平得到降低^[101]。截至目前, 该团队提出的 FDC 噪声水平达到了 $10 \mu\text{Hz}/\text{Hz}^{1/2}$ ^[100]。对于 REX 模块来说, 其通过使用混频器直接测量两个轴运动之间的相位差来提取参考信号, 见图 5(e)。为了便于信号处理, REX 最终输出的参考信号为方波。另外, Bestetti 等提出了一种双模可变增益放大器, 以抑制由正交误差引起的李萨如图形失真^[103]。

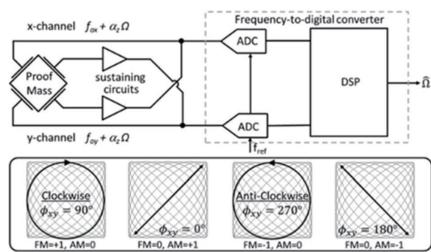
此外, 还有一些其他针对 LFM 陀螺有意义的研究。Wang 和 Zheng 为 LFM 陀螺设计了一种数字控制电路, 利用可读频率锁相环代替原本的频率提取电路, 并且利用高频载波调制和参量激励的方式消除了电路的主要相位误差^[104-105]。Zhang 等提出了一种 LFM 陀螺仪的系统级综合建模方法, 该方法可用于分析频率裂解与输出信号信噪比之间的关系^[106]。Ontronen 等^[107]提出了一款压电 LFM 陀



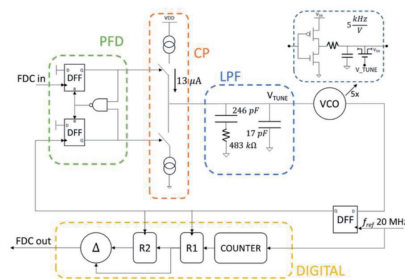
(a)



(b)



(c)



(d)

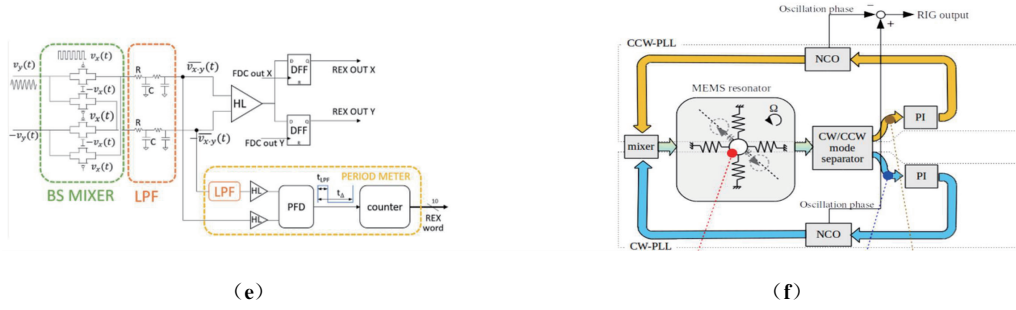


图 5 调频陀螺相关工作

Fig. 5 The research of frequency modulated (FM) gyroscopes

螺,这是迈向低噪声 LFM 陀螺的重要一步。Li 等^[108-109]提出了一种基于同向交流力的频差控制方法,并将 LFM 陀螺标度因数非线性度降低 5%。

4.4 全差分调频陀螺

2017 年, Tsukamoto 等^[110]提出了全差分调频陀螺,它能同时实现速率读出和角度读出。该模式通过正反转信号 (clockwise/counter clockwise, CW/CCW) 分离器替代全角陀螺中的控制回路,进而实现驻波随角速度进动,见图 5(f)。另外, CW/CCW 分离器将驻波的进动分解为顺逆时针运动的两个圆形轨迹,可以从两轨迹旋转频率之差中获得角速度。陀螺的输出如式(12)所示。由于采取差分操作,其对于温度产生的频率漂移具有鲁棒性。但与 IFM 不同,该模式无需反复变化运动模式,故该模式还具有更好的动态性能。陀螺输出如式(12)所示^[110]。其中, ω_{cw} 与 ω_{ccw} 分别代表正反转的频率; A_x 与 A_y 分别代表 x 轴与 y 轴振动信号的振幅。

$$\begin{aligned}\omega_{cw} &\approx \alpha \Omega_z + \omega_o \\ \omega_{ccw} &\approx -\alpha \Omega_z + \omega_o \\ \omega_{cw} - \omega_{ccw} &= 2\alpha \Omega_z, \varphi = \frac{1}{\alpha} \tan^{-1}(A_x/A_y) \quad (12)\end{aligned}$$

由于实际的谐振子都具有频率和品质因数的不匹配,导致 CW 与 CCW 信号中存在幅度与相位失配。针对该问题,该团队出了一种通过调整驱动信号的相位和幅度补偿频率和品质因数失配的方法^[111-112]。该方法能有效抑制耦合信号的 I, Q 分量,实现 CW/CCW 模式的解耦。在此基础上,该团队开发了一种自动检测和补偿频率和 Q 失配的方法^[113-114]。然而,上述方法无法消除 Q 失配引起的两轴的动态特性不匹配。该团队通过在幅度控制回路中引入补偿环节,修改各个轴的零极点,进而调节每个轴的动态特性^[115]。另外,与全角陀螺类

似,全差分调频陀螺也存在速率死区。该团队提出了仅通过修改锁相环设定值实现虚拟进动,进而克服速率死区的方案^[116]。针对频率裂解,该团队通过对悬架弹簧应用对称聚焦离子束^[117]修整,以抑制谐振子频差。此外, Yang 等针对全差分陀螺中存在的系统稳定较慢和顺逆时针模式相互耦合问题,提出了一种双相位和双幅度的改进闭环控制方案,该方案有效降低了角度检测阈值^[118]。

5 展望

5.1 谐振子层面

5.1.1 小型化

MEMS 陀螺广泛应用于航空航天和自动驾驶领域。为了提高上述系统的性能,必须增加系统中传感器的紧凑性和冗余度,因此 MEMS 谐振子的微型化是不可阻挡的趋势。对于微半球等高性能谐振子来说,它可以实现高精度的全角/力平衡操作,但其三维几何形状限制了其进一步应用,但这为新型集成和封装策略提供了机会^[119]。另一方面,由于平面结构更利于 MEMS 工艺加工,故音叉以及盘式等平面内谐振子更有可能突破 NEMS 工艺。最近 Buffoli 等提出了一种 NEMS 音叉陀螺,其拥有用于压阻传感的 250 nm 的 NEMS 层^[120]。

5.1.2 结构优化

对于工作在各种模式下的陀螺,其性能与谐振子本身的性能有很大联系。对谐振子的高要求使得谐振子结构愈加复杂。传统的 MEMS 设计方法依赖于设计人员经验的试错法^[121] (“构建和破坏”),既费时又昂贵。近年来,随着人工智能技术的兴起,各类智能优化算法有望替代传统的优化算法提升 MEMS 陀螺的设计效率。例如,基于粒子群优化和遗传算法^[122]等智能优化算法,可以制造低频差高品质因数的高对称谐振子,进而提升全角

和调幅陀螺的零偏稳定性。同时,也可以通过刻意地扩大频差来提升李萨如调频陀螺的带宽。

5.2 硬件电路层面

5.2.1 集成化

小型化与低功耗是 MEMS 陀螺的发展趋势,尤其对于控制电路简单的开环与 LFM 陀螺。集成电路允许针对电路元件特异性优化,并且可以实现功耗、大小、成本和性能之间的折衷。因此,ASIC 电路的应用将进一步推动 MEMS 陀螺的商业化。近年来,已经有多款集成的商用开环与 LFM 陀螺被报道^[101,120],其拥有低于 $40 \mu\text{W}$ 的功耗以及接近 1 mm^2 的尺寸。另外,也有集成的高能力平衡陀螺被报道,其拥有 $4.4 \text{ mm} \times 4.5 \text{ mm}$ 的尺寸以及 $50 \mu\text{W}$ 的功耗^[123]。

5.2.2 驱动机构的革新

传统 MEMS 陀螺通过电容实现谐振子的驱动与位移的检测。对于驱动机构来说,受拉入效应的影响,需要对驱动力和振动位移进行折衷,同时电容换能器也可能带来非线性,进而影响陀螺性能。压电驱动将是潜在的替代方案。压电材料允许增加位移幅度,而不会产生电容性非线性效应,这有助于提升 LFM 和开环陀螺的分辨率,或降低全角陀螺的 4θ 谐波^[18,26,107]。

5.3 软件算法层面

谐振子和硬件电路的升级能够提升 MEMS 陀螺的精度极限,而软件算法的加持则能够使 MEMS 陀螺充分发挥其性能潜力。因此,研究各种模式下 MEMS 陀螺的误差建模与补偿是有必要的。对于传统调幅陀螺来说,其误差补偿方法已经较为成熟,但现有的补偿方案大多只针对一种误差。因此,可以基于现有方法设计合理的误差补偿流程以消除陀螺中的多种误差源。例如,应该先考虑消除正交误差与相位误差以抑制正交分量的泄露,再通过校准进行耦合阻尼误差的辨识与补偿。另外,多误差补偿技术也是一个研究方向,例如文献^[124]中提出了同时消除三种误差影响的背景校准技术,将比例因子与偏置稳定性分别提高了 20 倍与 4 倍。

对于全角模式来说,谐振子缺陷引起的阻尼误差是主要的误差源,然而目前缺乏有效的控制阻尼的方案。最近提出的基于热阻效应的阻尼修调方案有希望广泛用于耦合阻尼误差的消除^[59,125-126]。另外,尽管许多补偿算法大幅提升了陀螺的性能,但是这些方法大多是离线的,缺乏实时性。因此,开发全角陀螺的在线补偿算法是很有必要的。

对于调频陀螺的误差建模和补偿技术的研究还处于起步阶段。目前可以优先考虑对广泛存在于陀螺中的耦合刚度与耦合阻尼误差设计补偿方案,例如通过速度反馈以及正交控制回路抑制消除差分调频陀螺的耦合阻尼误差和正交误差,还可以通过两轴的频差为特征量实现 QFM 陀螺的模式匹配^[3]。另外,还可以通过静电调谐消除刚度轴的倾斜角,进而消除 LFM 陀螺中的正交误差。

参考文献

- [1] LIU K, ZHANG W P, CHEN W Y, et al. The development of micro-gyroscope technology[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(11): 1-29.
- [2] 李永, 赵正平. MEMS 陀螺仪的研究现状与进展(续)[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(10): 851-859+934. LI Yong, ZHAO Zhengping. Research status and progress in MEMS gyroscopes (continued)[J]. Micronano-electronic Technology, 2021, 58(10): 851-859+934(in Chinese).
- [3] REN X J, ZHOU X, YU S, et al. Frequency-modulated MEMS gyroscopes: a review[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(23): 26426-26446.
- [4] LANGFELDER G, BESTETTI M, GADOLA M. Silicon MEMS inertial sensors evolution over a quarter century[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2021, 31(8): 084002.
- [5] JIA J, DING X, QIN Z, et al. Overview and analysis of MEMS Coriolis vibratory ring gyroscope [J]. Measurement, 2021, 182(10): 109704.
- [6] FRIEDLAND B, HUTTON M. Theory and error analysis of vibrating-member gyroscope[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1978, 23(4): 545-556.
- [7] NOROUZPOUR-SHIRAZI A, AYAZI F. A dual-mode actuation and sensing scheme for in-run calibration of bias and scale factor errors in axisymmetric resonant gyroscopes[J]. IEEE Sensors Journal, 2018, 18(5): 1993-2005.
- [8] LYNCH D D. Vibratory gyro analysis by the method of averaging [C]// Proceedings of 2nd Saint Petersburg Conference on Gyroscopic Technology and Navigation. St. Petersburg, Russia, 1995.
- [9] 周鑫. 嵌套环式 MEMS 振动陀螺的结构分析与优化 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2018. ZHOU Xin. Structural analysis and optimization of nested-rings MEMS vibratory gyroscope [D]. Changsha: National University of Defense Technology,

- 2018(in Chinese).
- [10] 李永, 赵正平. MEMS陀螺仪的研究现状与进展[J]. 微纳电子技术, 2021, 58(9): 757-768.
LI Yong, ZHAO Zhengping. Research status and progress in MEMS gyroscopes[J]. Micronanoelectronic Technology, 2021, 58(9): 757-768(in Chinese).
- [11] TRUSOV A, ROZELLE D, ATIKYAN G, et al. Non-axisymmetric coriolis vibratory gyroscope with whole angle, force rebalance, and self-calibration[C]// Proceedings of Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Workshop. Hilton Head Island, South Carolina, 2014: 419-422.
- [12] IEEE standard specification format guide and test procedure for Coriolis vibratory gyros[S]. IEEE Std 1431-2004, 2004: 1-78.
- [13] MINOTTI P, DELLEA S, MUSSI G, et al. High scale-factor stability frequency-modulated MEMS gyroscope: 3-axis sensor and integrated electronics design[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(6): 5040-5050.
- [14] ZEGA V, COMI C, MINOTTI P, et al. A new MEMS three-axial frequency-modulated (FM) gyroscope: a mechanical perspective[J]. European Journal of Mechanics-A/Solids, 2018, 70: 203-212.
- [15] BUFFOLI A, SEGALA P, GADOLA M, et al. Searching for the origin of zero-rate offset and scale-factor drift in NEMS-based nav-grade gyroscope[C]// Proceedings of 2023 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Lihue: IEEE, 2023: 1-4.
- [16] KUANG Y, HOU Z, JIAN D, et al. Reducing the sensitivity of fabrication error in the MEMS butterfly gyroscope by adopting an improved vibration beam [J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(6): 5609-5617.
- [17] MINOTTI P, MUSSI G, DELLEA S, et al. A 160 μA , 8 mdps/ $\sqrt{\text{Hz}}$ frequency-modulated MEMS yaw gyroscope[C]// Proceedings of 4th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Kauai: IEEE, 2017: 148-151.
- [18] YANG S, WU Z, JIA W, et al. Ultra-low relative frequency split piezoelectric ring resonator designed for high-performance mode-matching gyroscope[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2022, 31(1): 6-8.
- [19] WANG H, QUAN H, ZHOU J, et al. A wafer-level vacuum packaged MEMS disk resonator gyroscope with 0.42($^{\circ}$)/h bias instability within $\pm 300(^{\circ})/s$ full scale[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(5): 5304-5313.
- [20] LIU Z, DARUWALLA A, HAMELIN B, et al. A study of mode-matching and alignment in piezoelectric disk resonator gyros via femtosecond laser ablation[C]// Proceedings of 2021 IEEE 34th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Gainesville: IEEE, 2021: 342-345.
- [21] ZHANG Y, YU S, SUN J, et al. A rate-integrating honeycomb disk resonator gyroscope with 0.038($^{\circ}$)/h bias instability and $^{\circ}7000/s$ measurement range[J]. IEEE Electron Device Letters, 2021, 42(4): 581-584.
- [22] PARAJULI M, SOBREVIELA G, SESHIA A A, et al. Frequency modulated operation in a silicon MEMS gyroscope with quatrefoil suspension system [C]// Proceedings of 9th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (IEEE INERTIAL). Avignon: IEEE, 2022.
- [23] CHO J Y, SINGH S, WOO J K, et al. 0.00016 ($^{\circ}$)/ $\sqrt{\text{hr}}$ angle random walk (ARW) and 0.0014 deg/hr bias instability (BI) from a 5.2M-Q and 1-cm precision shell integrating (PSI) gyroscope[C]// Proceedings of 2020 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Hiroshima: IEEE, 2020: 1-4.
- [24] ZOTOV S A, PRIKHODKO I P, TRUSOV A A, et al. Frequency modulation based angular rate sensor[C]// Proceedings of 24th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Cancun: IEEE, 2011: 577-580.
- [25] ASKARI S, ASADIAN M, KAKAVAND K, et al. Near-navigation grade quad mass gyroscope with Q-factor limited by thermo-elastic damping[C]// Proceedings of Solid-State Sensors, Actuators, and Microsystems Workshop. Hilton Head, 2016.
- [26] ASADIAN M H, ASKARI S, SHKEL A M. An ultrahigh vacuum packaging process demonstrating over 2 million Q-factor in MEMS vibratory gyroscopes[J]. IEEE Sensors Letters, 2017, 1(6): 1-4.
- [27] NOROUZPOUR-SHIRAZI A, ZAMAN M F, AYAZI F. A digital phase demodulation technique for resonant MEMS gyroscopes[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 3260-3266.
- [28] LI B, XI X, LU K, et al. Study of electrode ablation for femtosecond laser trimming of micro hemispherical resonator gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2023, 23(3): 1933-1942.
- [29] 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 Microengineering*, 2021, 31(5): 15.
- [30] KUANG Y, HOU Z, LIU G, et al. Real-time phase compensation for scale factor nonlinearity improvement over temperature variations for MEMS gyroscope[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2023, 32(4): 1-9.
- [31] CHEN L, MIAO T, LI Q, et al. A time-series configuration method of mode reversal in MEMS gyroscopes under different temperature-varying conditions [C]// *Proceedings of 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Munich: IEEE, 2023: 849-852.
- [32] NOROUZPOUR-SHIRAZI A, SERRANO D E, ZAMAN M F, et al. A dual-mode gyroscope architecture with in-run mode-matching capability and inherent bias cancellation[C]// *Proceedings of 18th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS)*. Anchorage: IEEE, 2015: 23-26.
- [33] KLINE M. *Frequency modulated gyroscopes*[D]. Berkeley: UC Berkeley, 2013.
- [34] LU C, LEMKIN M, BOSER B E. A monolithic surface micromachined accelerometer with digital output [J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 1995, 30(12): 1367-1373.
- [35] DONG L. *Adaptive control system for a vibrational MEMS gyroscope with time-varying rotation rates*[D]. Ann Arbor: The University of Alabama, 2005: 118.
- [36] LIU X, QIN Z, LI H. Online compensation of phase delay error based on P-F characteristic for MEMS vibratory gyroscopes[J]. *Micromachines*, 2022, 13(5): 647.
- [37] 席翔, 吴学忠, 孙江坤, 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 Xiang, WU Xuezhong, SUN Jiangkun, et al. Research status and development trend of high-precision MEMS gyroscopes[J]. *Chinese Science: Technical Science*, 2023, 53(8): 1255-1271(in Chinese).
- [38] 杜江潮, 胡终须, 申燕超, 等. 基于模态匹配和正交抑制的微机陀螺闭环控制技术研究[J]. *导航定位与授时*, 2023, 10(3): 117-124.
- DU Jiangchao, HU Zhongxu, SHEN Yanchao, 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(in Chinese).
- se).
- [39] SONMEZOGLU S, ALPER S E, AKIN T. An automatically mode-matched MEMS gyroscope with wide and tunable bandwidth[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2014, 23(2): 284-297.
- [40] SHARMA A, ZAMAN M F, AYAZI F. A Sub-0.2°/hr bias drift micromechanical silicon gyroscope with automatic CMOS mode-matching[J]. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2009, 44(5): 1593-1608.
- [41] HU Z, GALLACHER B. A mode-matched force-rebalance control for a MEMS vibratory gyroscope [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2018, 273: 1-11.
- [42] HE C, ZHAO Q, HUANG Q, et al. A MEMS vibratory gyroscope with real-time mode-matching and robust control for the sense mode[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2015, 15(4): 2069-2077.
- [43] PAGANI L G, GUERINONI L, FALORNI L, et al. Direct phase measurement and compensation to enhance MEMS gyroscopes ZRO stability[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2021, 30(5): 703-711.
- [44] LIU D, HE C, ZHAO Q, et al. Digital signal processing for a micromachined vibratory gyroscope based on a three dimensional adaptive filter demodulator[J]. *Measurement*, 2014, 50: 198-202.
- [45] XU P F, WEI Z Y, GUO Z Y, et al. A real-time circuit phase delay correction system for MEMS vibratory gyroscopes[J]. *Micromachines*, 2021, 12(5): 506.
- [46] LIU M, 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.
- [47] WANG Y, HOU J, LI C, et al. Ultrafast mode reversal Coriolis gyroscopes[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(6): 5969-5980.
- [48] LI C, WEN H, 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.
- [49] XING C, WANG X, WANG Z, et al. Stability boundary and enhanced solution of dual-mode based micro gyroscope mode matching technology[J]. *Micromachines*, 2022, 13(8): 15.
- [50] BRYAN G H. *On the beats in the vibrations of a revolving cylinder or bell*[J]. *Cambridge Philosophical Society*, 1890, 7(3): 101-111.
- [51] ROZELLE D M. *The hemispherical resonator gyro: from wineglass to the planets*[C]// *Proceedings of*

- AAS/AIAA 19th Space Flight Mechanics Meeting. Georgia: AIAA, 2009: 1157-1178.
- [52] TAHERI-TEHRANI P, CHALLONER A D, HORSLEY D A. Micromechanical rate integrating gyroscope with angle-dependent bias compensation using a self-precession method[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(9): 3533-3543.
- [53] TAHERI-TEHRANI P, IZYUMIN O, IZYUMIN I, et al. Disk resonator gyroscope with whole-angle mode operation[C]// *Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS)*. Hapuna Beach: IEEE, 2015: 1-4.
- [54] SENKAL D, EFIMOVSKAYA A, SHKEL A M. Minimal realization of dynamically balanced lumped mass WA gyroscope: dual Foucault pendulum[C]// *Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (ISISS)*. Hapuna Beach: IEEE, 2015: 1-2.
- [55] HU Z, GALLACHER B J. Precision mode tuning towards a low angle drift MEMS rate integrating gyroscope[J]. *Mechatronics*, 2018, 56: 306-317.
- [56] RUAN Z, DING X, PU Y, et al. In-run automatic mode-matching of whole-angle micro-hemispherical resonator gyroscope based on standing wave self-precession[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022, 22(14): 13945-13957.
- [57] YU S, WU X, XI X, et al. A high-precision mode matching method for rate-integrating honeycomb disk resonator gyroscope[C]// *Proceedings of 2021 IEEE 16th International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (NEMS)*. Xiamen: IEEE, 2021: 1579-1582.
- [58] GREGORY J A, CHO J, NAJAFI K. Novel mismatch compensation methods for rate-integrating gyroscopes[C]// *Proceedings of 2012 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium*. Beach: IEEE, 2012: 252-258.
- [59] GANDO R, MAEDA S, MASUNISHI K, et al. A MEMS rate integrating gyroscope based on catch-and-release mechanism for low-noise continuous angle measurement[C]// *Proceedings of 2018 IEEE Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Belfast: IEEE, 2018: 944-947.
- [60] SUN J, ZHANG Y, YU S, et al. Identification and compensation of anisodamping for high Q factor resonator under whole-angle mode[C]// *Proceedings of 2021 IEEE Sensors*. Sydney: IEEE, 2021: 1-4.
- [61] HU Z, GALLACHER B. Control and damping imperfection compensation for a rate integrating MEMS gyroscope[C]// *Proceedings of 2015 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS)*. Karlsruhe: IEEE, 2015: 1-15.
- [62] HU Z, GALLACHER B. Extended Kalman filtering based parameter estimation and drift compensation for a MEMS rate integrating gyroscope[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 250: 96-105.
- [63] MENG X R, LI C, WANG Y C. Online asymmetry estimation for whole angle mode Coriolis vibratory gyroscopes by high frequency injection[J]. *Defence Technology*, 2023, 24: 314-325.
- [64] PRIKHODKO I P, GREGORY J A, BUGROV D I, et al. Overcoming limitations of rate integrating gyroscopes by virtual rotation[C]// *Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems*. Laguna Beach: IEEE, 2016: 5-8.
- [65] ZHAO W L, YANG H, LIU F C, et al. High sensitivity rate-integrating hemispherical resonator gyroscope with dead area compensation for damping asymmetry[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-12.
- [66] XUAN L, LU M, LIU J, et al. Automatic rate and rate-integrating mode-switchable axisymmetric gyroscope[J]. *Sensors*, 2022, 22(12): 12.
- [67] HU Z, GALLACHER B J. Effects of nonlinearity on the angular drift error of an electrostatic MEMS rate integrating gyroscope[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(22): 10271-10280.
- [68] NITZAN S H, TAHERI-TEHRANI P, DEFOORT M, et al. Countering the effects of nonlinearity in rate-integrating gyroscopes[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(10): 3556-3563.
- [69] TAHERI-TEHRANI P, DEFOORT M, HORSLEY D A. Operation of a high quality-factor gyroscope in electromechanical nonlinearities regime[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2017, 27(7): 075015.
- [70] TAHERI-TEHRANI P, KLINE M, IZYUMIN I, et al. Epitaxially-encapsulated quad mass gyroscope with nonlinearity compensation[C]// *Proceedings of 2016 IEEE 29th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS)*. Shanghai: IEEE, 2016: 966-969.
- [71] SUN J, YU S, ZHANG Y, et al. 0.79 ppm scale-factor nonlinearity whole-angle microshell gyroscope realized by real-time calibration of capacitive displacement detection[J]. *Microsystems & Nanoengineering*, 2021, 7(1): 79.
- [72] SUN J, LIU K, YU S, et al. Excellent scale factor performance for whole-angle micro-shell resonator gyroscope

- [C]// Proceedings of 2022 IEEE 35th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems(MEMS). Tokyo: IEEE, 2022: 750-753.
- [73] SENKAL D, NG E J, HONG V, et al. Parametric drive of a toroidal MEMS rate integrating gyroscope demonstrating <20 PPM scale factor stability[C]// Proceedings of 2015 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Estoril: IEEE, 2015: 29-32.
- [74] VATANPARVAR D, SHKEL A M. Identification of gain mismatches in control electronics of rate integrating CVGs[C]// Proceedings of 2021 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Kailua-Kona: IEEE, 2021: 1-4.
- [75] SUN J, YU S, XI X, et al. Investigation of angle drift induced by actuation electrode errors for whole-angle micro-shell resonator gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(4): 3105-3112.
- [76] 张勇猛, 孙江坤, 余升, 等. 速率积分陀螺驱动电极误差辨识方法、装置、系统和介质: CN114046804A [P]. 2022-02-15.
ZHANG Yongmeng, SUN Jiangkun, YU Sheng, et al. Rate-integrating gyroscope driving electrode error identification method, device, system, and medium: CN114046804A[P]. 2022-02-15(in Chinese).
- [77] SUN J, YU S, ZHANG Y, et al. Characterization and compensation of detection electrode errors for whole-angle micro-shell resonator gyroscope [J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2022, 31(1): 19-28.
- [78] 张勇猛, 孙江坤, 余升, 等. 速率积分陀螺检测电极误差辨识方法、装置、系统及介质: CN113447047B [P]. 2021-11-09.
ZHANG Yongmeng, SUN Jiangkun, YU Sheng, et al. Rate-integrating gyroscope detection electrode error identification method, device, system, and medium: CN113447047B[P]. 2021-11-09(in Chinese).
- [79] SESHIA A A, HOWE R T, MONTAGUE S, et al. An integrated microelectromechanical resonant output gyroscope[C]// Proceedings of 15th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2002). Las Vegas: IEEE, 2002: 722-726.
- [80] MOUSSA H, BOURQUIN R. Theory of direct frequency output vibrating gyroscopes[J]. IEEE Sensors Journal, 2006, 6(2): 310-315.
- [81] JIA J, DING X, QIN Z, et al. In-run scale factor compensation for MEMS gyroscope without calibration and fitting[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(6): 7316-7325.
- [82] ZOTOV S A, TRUSOV A A, SHKEL A M, et al. Demonstration of a wide dynamic range angular rate sensor based on frequency modulation[C]// Proceedings of 10th IEEE Conference on Sensors. Limerick: IEEE, 2011: 149-152.
- [83] ZOTOV S A, TRUSOV A A, SHKEL A M. High-range angular rate sensor based on mechanical frequency modulation[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2012, 21(2): 398-405.
- [84] ZOTOV S A, PRIKHODKO I P, SIMON B R, et al. Self-calibrated MEMS gyroscope with AM/FM operational modes, dynamic range of 180 dB and in-run bias stability of 0.1 deg/hr[C]// Proceedings of DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS). Karlsruhe: IEEE, 2014.
- [85] 涂述荣, 陈少春, 高溥泽, 等. 2022 年国外惯性技术发展及回顾[J]. 导航定位与授时, 2023, 10(4): 69-80.
GAN Shurong, CHEN Shaochun, GAO Puze, et al. Development and review of foreign inertial technology in 2022 [J]. Navigation Positioning and Timing, 2023, 10(4): 69-80(in Chinese).
- [86] ZHANG K, XIE J, HAO S, et al. Influence of electrostatic force nonlinearity on the sensitivity performance of a tapered beam micro-gyroscope based on frequency modulation [J]. Micromachines, 2023, 14(1): 28.
- [87] SAHIN K, SAHIN E, ALPER S E, et al. A wide-bandwidth and high-sensitivity robust microgyroscope[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2009, 19(7): 074004.
- [88] KLINE M H, YEH Y-C, EMINOGLU B, et al. Quadrature FM gyroscope[C]// Proceedings of 26th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Taipei: IEEE, 2013: 604-608.
- [89] EMINOGLU B. High performance FM gyroscopes [D]. Berkeley: UC Berkeley, 2017.
- [90] EMINOGLU B, YEH Y C, IZYUMIN I, et al. Comparison of long-term stability of AM versus FM gyroscopes[C]// Proceedings of 29th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Shanghai: IEEE, 2016: 954-957.
- [91] REN X, ZHOU X, TAO Y, et al. Radially pleated disk resonator for gyroscopic application[J]. Journal of Microelectromechanical Systems, 2021, 30(6): 825-835.
- [92] KLINE M, YEH Y-C, EMINOGLU B, et al. MEMS

- gyroscope bias drift cancellation using continuous-time mode reversal[C]// Proceedings of 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII). Barcelona: IEEE, 2013: 1855-1858.
- [93] EMINOGLU B, BOSER B E. Direct frequency-to-digital gyroscopes with low drift and high accuracy [M]// Low-Power Analog Techniques, Sensors for Mobile Devices, and Energy Efficient Amplifiers, Advances in Analog Circuit Design 2018. Cham: Springer International Publishing, 2019: 191-198.
- [94] IZYUMIN I, KLINE M H, YEH Y C, et al. A 7ppm, 6 (°)/hr frequency-output MEMS gyroscope[C]// Proceedings of 28th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Estoril: IEEE, 2015: 33-36.
- [95] IZYUMIN I, KLINE M, YEH Y C, et al. A 50 μ W, 2.1 mdeg/s/ $\sqrt{\text{Hz}}$ frequency-to-digital converter for frequency-output MEMS gyroscopes[C]// Proceedings of ESSCIRC 2014 - 40th European Solid State Circuits Conference (ESSCIRC). Venice Lido: IEEE, 2014: 399-402.
- [96] IZYUMIN I. Readout circuits for frequency-modulated gyroscopes[R]. University of California, 2015.
- [97] EMINOGLU B, BOSER B E. Chopped rate-to-digital FM gyroscope with 40ppm scale factor accuracy and 1.2dph bias[C]// Proceedings of 2018 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC). San Francisco: IEEE, 2018: 178-180.
- [98] ZEGA V, COMI C, FEDELI P, et al. A dual-mass frequency-modulated (FM) pitch gyroscope: mechanical design and modelling[C]// Proceedings of 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Lake Como: IEEE, 2018: 61-64.
- [99] BESTETTI M, BONFANTI A G, FALORNI L, et al. Full-digital output ASIC for Lissajous frequency modulated MEMS gyroscopes [C]// Proceedings of 2022 29th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems (ICECS). Glasgow: IEEE, 2022: 1-4.
- [100] PADOVANI C, BESTETTI M, VALZASINA C, et al. Sub-10 $\mu\text{Hz}/\sqrt{\text{Hz}}$ measurement instrumentation for 140-dB DR frequency-modulated MEMS sensors [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2023, 72: 1-8.
- [101] LEONCINI M, BESTETTI M, BONFANTI A, et al. Fully integrated, 406 μA , 5 (°)/hr, full digital output Lissajous frequency-modulated gyroscope[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(9): 7386-7396.
- [102] BESTETTI M, LEONCINI M, MINOTTI P, et al. Low-power frequency-to-digital-converter for a 6-axis MEMS frequency-modulated inertial measurement unit[C]// Proceedings of 2019 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Naples: IEEE, 2019: 1-4.
- [103] BESTETTI M, MUSSI G, PADOVANI C, et al. On amplitude-gain-control optimization for Lissajous frequency modulated MEMS gyroscopes[C]// Proceedings of 2021 IEEE Sensors. Sydney: IEEE, 2021: 1-4.
- [104] WANG X T, ZHENG X D, SHEN Y J, et al. A digital control structure for Lissajous frequency-modulated mode MEMS gyroscope[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(20): 19207-19219.
- [105] ZHENG X, WANG X, SHEN Y, et al. Identification and suppression of driving force misalignment angle for a MEMS gyroscope using parametric excitation[J]. Journal of Micromechanics and Microengineering, 2023, 33(5): 055002.
- [106] ZHANG Y, GU H, XING B, et al. A system-level synthetical modeling method for Lissajous frequency-modulated MEMS gyroscope [C]// Proceedings of 2022 29th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems (ICINS). Saint Petersburg: IEEE, 2022: 1-4.
- [107] ONTRONEN A, KAAJAKARI V, WJUGA K, et al. 71 kHz frequency modulated piezoMEMS gyroscope [C]// Proceedings of 2023 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Lihue: IEEE, 2023: 1-4.
- [108] 李睿, 晏恺晨, 王玺全, 等. 基于同向力的李萨如调频模式陀螺频差控制[C]// 中国惯性技术学会 2023 年科技工作者研讨会——新型惯性元件与先进导航技术, 2023: 6.
- LI Rui, YAN Kaichen, WANG Xiquan, et al. Isotropic force based control of frequency difference in LFM mode gyroscope[C]// Proceedings of Chinese Society of Inertial Technology Symposium for Science and Technology Workers 2023 - Novel Inertial Components and Advanced Navigation Technology, 2023: 6(in Chinese).
- [109] LI R, WANG X, YAN K, et al. Interactive errors analysis and scale factor nonlinearity reduction methods for Lissajous frequency modulated MEMS gyroscopes

- pe[J]. *Sensors*, 2023, 23(24): 9701.
- [110] TSUKAMOTO T, TANAKA S. Fully-differential single resonator FM/whole angle gyroscope using CW/CCW mode separator[C]// Proceedings of 2017 IEEE 30th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Las Vegas: IEEE, 2017: 1118-1121.
- [111] TSUKAMOTO T, TANAKA S. FM/rate integrating MEMS gyroscope using independently controlled CW/CCW mode oscillations on a single resonator[C]// Proceedings of 2017 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Kauai: IEEE, 2017: 1-4.
- [112] TSUKAMOTO T, TANAKA S. Fully differential single resonator FM gyroscope using CW/CCW mode separator[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2018, 27(6): 985-994.
- [113] TSUKAMOTO T, TANAKA S. Automated frequency and quality factor mismatch compensation method for MEMS rate integrating gyroscope[C]// Proceedings of 2019 20th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems & Eurosensors XXXIII (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXXIII). Berlin: IEEE, 2019: 1831-1834.
- [114] TSUKAMOTO T, TANAKA S. Rate integrating gyroscope using independently controlled CW and CCW modes on single resonator[J]. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 2020, 30(1): 15-23.
- [115] TSUKAMOTO T, TANAKA S. Real time Q-factor mismatch detection for rate integrating gyroscope using amplitude modulated driving signal[C]// Proceedings of 2022 IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Avignon: IEEE, 2022: 1-4.
- [116] TSUKAMOTO T, TANAKA S. Virtually rotated MEMS whole angle gyroscope using independently controlled CW/CCW oscillations[C]// Proceedings of 5th IEEE International Symposium on Inertial Sensors and Systems (INERTIAL). Lake Como: IEEE, 2018: 89-92.
- [117] CHEN J, TSUKAMOTO T, LANGFELDER G, et al. Rate integrating gyroscope tuned by focus ion beam trimming and independent CW/CCW modes control[C]// Proceedings of 2023 IEEE 36th International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS). Munich: IEEE, 2023: 873-876.
- [118] 杨颖慧. 硅微轴对称全角陀螺的调频控制技术研究[D]. 苏州: 苏州大学, 2023.
- YANG Yinghui. Frequency modulation control technology of whole-angle mode based on silicon micro-mechanical axisymmetric gyroscopes[D]. Suzhou: Soochow University, 2023(in Chinese).
- [119] DORUK S, ANDREI M S. Conclusions and future trends, whole-angle MEMS gyroscopes: challenges and opportunities[M]. Wiley, 2019: 133-136.
- [120] BUFFOLI A, GADOLA M, SANSA M, et al. 0.02 ($^{\circ}$)/h, 0.004 ($^{\circ}$)/ \sqrt{h} , 6.3-mA NEMS gyroscope with integrated circuit[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-8.
- [121] GIANNINI D, BRAGHIN F, AAGE N. Topology optimization of 2D in-plane single mass MEMS gyroscopes[J]. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 2020, 62(4): 2069-2089.
- [122] LIU J, LI P, ZHUANG X, et al. Design and optimization of hemispherical resonators based on PSO-BP and NSGA-II[J]. *Micromachines*, 2023, 14(5): 20.
- [123] ZHANG W, YIN L, WANG Y, et al. A low-noise interface ASIC for MEMS disk resonator gyroscope[J]. *Micromachines*, 2023, 14(6): 18.
- [124] EMINOGLU B, KLINE M H, IZYUMIN I, et al. Background calibrated MEMS gyroscope[C]// Proceedings of 2014 IEEE Sensors. Valencia: IEEE, 2014: 922-925.
- [125] CUI J, ZHAO Q. Thermal stabilization of quality factor for dual-axis MEMS gyroscope based on Joule effect in situ dynamic tuning[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2024, 71(1): 1060-1068.
- [126] 张勇猛, 郭裸琛, 孙江坤, 等. 全角模式半球谐振陀螺的阻尼误差修调与补偿技术研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(16): 145-152.
- ZHANG Yongmeng, GUO Kechen, SUN Jiangkun, et al. Research on damping error tuning and compensating technology of whole angle mode hemispherical resonator gyroscope[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(16): 145-152(in Chinese).

(编辑:孟彬)