

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514192

基于光纤多普勒效应的微半球谐振子测振方法研究*

夏雨,赵威,曾凯,吴宇列,席翔

(国防科技大学智能科学学院 长沙 410073)

摘要:熔融石英微半球谐振子是微半球陀螺核心结构,其中未镀膜透明谐振子的振动测试对陀螺工艺优化与性能保障至关重要。传统测振技术存在局限:电容检测法受限于表面镀膜工艺要求,无法适用透明谐振子;商用台式激光测振仪虽能实现非接触检测,但体积大、成本高,难以满足集成需求。在此背景下依托光纤多普勒效应提出测振新方法,构建了微型化光纤测振系统。1 550 nm 单模光纤激光器作为系统光源,其输出光束经光纤耦合器分为本振光与信号光。信号光定向传输至振动谐振子表面,反射后与声光移频器调制的本振光合束产生外差信号。信号处理模块通过光电探测器把外差光信号转成电信号,再用反正切算法解调,提取谐振子振动参数。系统采用六自由度夹具实现光纤与谐振子的空间对准。实验在 70~80 Pa 真空环境中开展,结果表明谐振子响应振幅与激励电压成正比,其测量相对误差<1%。测振系统在 0~9 000 Hz 范围可精准辨识前三阶模态,与商用 Polytec MSA-600 测振仪结果一致,且能检测出工作模态 3.9 Hz 的频率裂解和四波腹振型分布。该光纤测振系统实现了亚纳米级测量,适配未镀膜谐振子,兼具体积紧凑和成本低的优势,为微半球陀螺谐振子检测及工艺优化提供可靠方案。

关键词:测振方法;微半球陀螺;谐振子;光纤多普勒

中图分类号: TH703 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on the vibration measurement method of micro-hemispherical resonator based on fiber optic Doppler effect

Xia Yu, Zhao Wei, Zeng Kai, Wu Yulie, Xi Xiang

(College of Intelligent Science and Technology, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The fused silica micro hemispherical resonator is the core structure of the micro hemispherical gyroscope, and the vibration testing of the uncoated transparent resonator is crucial for optimizing the gyroscope process and ensuring its performance. The traditional vibration measurement technology has limitations. The capacitance detection method is restricted by the requirements of surface coating processes and cannot be applied to transparent resonators. Although commercial benchtop laser vibrometers are capable of non-contact measurements, their large volume, high cost, and limited suitability for integration make them challenging to meet the demands of compact system designs. Therefore, this article proposes a new method of vibration measurement based on the fiber Doppler effect and constructs a miniaturized fiber vibration measurement system. The 1 550 nm single-mode fiber laser is employed as the system light source, with its output beam split into local oscillator and signal light via a fiber coupler. The signal light is directed onto the surface of the vibrational resonator, where it is reflected and then combined with the local oscillator beam, which has been frequency-shifted by an acousto-optic modulator, to generate a heterodyne signal. The signal processing module converts the heterodyne optical signal into an electrical signal using a photodetector and then demodulates it using an arctangent algorithm to extract the resonator's vibration parameters. The system utilizes a six-degree-of-freedom fixture to ensure spatial alignment between the optical fiber and the resonator. The experiments are conducted in a vacuum environment of 70~80 Pa, and the results show that the resonator's response amplitude is directly proportional to the excitation voltage, with a relative measurement error of less than 1%. The vibrometry system is capable of accurately identifying the first three modal frequencies within the range of 0~9 000 Hz, yielding results consistent with those obtained

from the commercial Polytec MSA-600 vibrometer. Additionally, the system is able to detect frequency splitting at the operational mode of 3.9 Hz and the distribution of the four-wave vibration pattern. This fiber optic vibrometry system achieves sub-nanometer level measurements. It is compatible with uncoated resonators, which offers the advantages of compact size and low cost. It provides a reliable solution for micro-hemisphere gyroscope resonator testing and process optimization.

Keywords: vibration measurement methods; micro-hemisphere gyro; harmonic oscillator; fiber optic Doppler

0 引言

惯性技术被广泛应用于监测和控制物体的各类动态参数,它涵盖了惯性导航与引导、惯性仪表、惯性测量技术以及惯性系统等多个层面^[1-2]。作为惯性导航系统的核心部件,陀螺仪的性能优劣直接关系到整个导航系统的精确度、稳定性和可靠性^[3]。

微半球谐振陀螺(micro-hemispherical resonator gyroscope, mHRG)是一种高精度、长寿命、高可靠、低成本、小体积且天然抗辐射的新型固态振动陀螺仪。它利用半球壳唇缘的径向振动驻波进动效应来感测基座旋转,消除了传统机械陀螺的摩擦问题^[4]。因其显著的优势,微半球谐振陀螺在多种装备姿态测控和自主导航等中高精度应用领域展现出广泛的应用前景^[5-8]。微半球谐振子是微半球陀螺的核心振动结构,由熔融石英材料软化制作成形。理想的半球谐振子应具有完美对称性,但由于工艺误差和材料缺陷的存在,谐振子的对称性受到破坏,导致其两个匹配工作模态的谐振频率出现差异,即频率裂解^[9]。频率裂解会引起正交信号误差,对陀螺性能造成直接影响。因此在谐振子制造过程中,精准辨识其频率裂解的幅值与刚度轴方位至关重要,而该类关键信息需通过测试谐振子的微幅振动信号,并对信号进行解算方可获取。因此,微半球谐振子的振动特性测试对优化陀螺的设计和制造工艺至关重要。

目前,微半球谐振陀螺的测振技术主要采用两种方式:电容检测和光学检测。电容检测需要将谐振子镀上一层金属薄膜,通过谐振子镀膜层和基底电极之间的电容变化进行位移测量。这种方法利用导电物体与基底构成电容,使得微小的振动位移可以被转化为电信号进行采集,能够实现非接触式测量,振幅测量范围达纳米级^[10]。但这种方法只适用于导电材料,容易受到温度、湿度等环境因素的影响^[11],对于未镀膜状态的熔融石英谐振子,难以采用电容检测方法。光学检测则利用激光照射谐振子表面,测量反射光的变化来评估振动,无需对谐振子进行镀膜等预处理。激光信号具有频带宽、空间分辨率高的特点,结合激光的小尺寸光斑半径,可以实现高精度的探测,且抗电磁干扰能力强^[12-13]。但目前常采用的台式激光测振仪价格昂贵且体积较大,不利于系统集成和推广应用。

因此,针对未镀膜熔融石英微半球谐振子振动测量的技术难题,可采用基于全光纤的振动测量新方法,其在保障精度、可靠性和稳定性前提下,能显著缩减测振系统体积与成本,为微结构振动测量及新型谐振式传感器开发测试提供新的技术方向。

1 微半球陀螺结构及工作原理

1.1 熔融石英微半球谐振子结构

微半球谐振子的几何参数如图1所示,主要由变壁厚的薄壁半球壳(直径11.6 mm、高度4.2 mm)、圆柱形锚点和48个用于放大振动的齿形单元组成。这种微半球谐振子结构具有较大的唇缘面积,能放大振动、便于测试,实现较高的测量灵敏度。

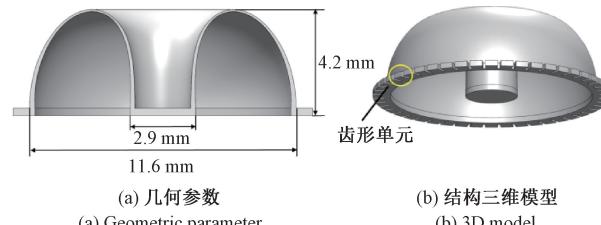


图1 几何参数及三维模型

Fig. 1 Diagram of the geometric parameter and 3D model

1.2 微半球陀螺模态仿真

微半球陀螺利用哥氏效应实现角速度测量,当陀螺的微机械谐振结构(半球谐振子)在驱动模态下高频振动时,若外界存在旋转角速度,哥氏力会使振动方向发生45°偏移,形成检测模态的位移或电容变化。通过检测该信号并解算,即可精确输出角速度信息^[14]。

为明确微半球谐振子的振动特性以支撑后续测振系统设计与验证,首先对其工作模态开展仿真分析。仿真中几何参数按图1中参数,熔融石英材料参数如表1所示,采用Comsol软件对谐振子的模态振型与工作频率进行数值解算,网格划分环节选用扫掠方式手动生成六面体网格,该网格具备良好对称性,可有效提升计算结果准确度,划分后的网格模型如图2所示,单元总数约为8万个。

表1 石英材料主要参数

Table 1 Main parameters of quartz material

杨氏模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
70	0.156	2 220

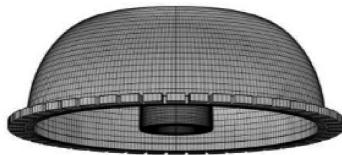


图2 网格划分

Fig. 2 Division of the grid

对模型的被夹持部分(即圆柱形锚点)添加固定约束,仿真得到的工作模态振型如图3所示,分别为半球谐振子的驱动模态与检测模态,产生的是环向波数N=2的四波腹振型,谐振频率在6 730.4 Hz左右。

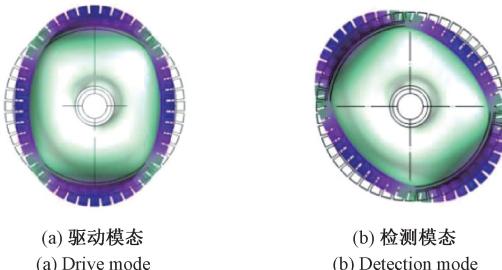


图3 陀螺工作模态

Fig. 3 Gyroscopic operating mode

2 光纤测振基本原理与测振系统设计

光纤测振系统的核心工作原理是光学领域的多普勒效应,通过该效应实现对微半球谐振子振动信号的高精度检测。当一束光照射到振动物体表面时,运动物体对入射光产生动态调制,导致反射光波的频率相对于入射光发生改变,即产生多普勒频移^[15]。通过对这一频移量的测量与计算,可反推出目标振动的位移、速度等信息。

2.1 光纤测振原理概述

波源相对于观察参考系发生任意方向的相对运动时,观察位置所接收到的表观观测频率^[16]与波源的真实频率不同,即产生多普勒效应。当波源和观察者都在运动时,观察者观察到的表观观测频率f'为:

$$f' = \frac{1 + V_p \cos\theta_p / V}{1 + V_s \cos\theta_s / V} V \quad (1)$$

其中,V是波源在给定可传播介质的实际波速,波源以速度V_s运动,其运动方向与观测点P和波源连线(即观测视线)之间的夹角为θ_s,观测点P以速度V_p运动,其运动方向与观测视线之间的夹角为θ_p。

对于电磁波或光波来说,波源在真空下的传播速度c是常数,在空气或真空介质中传播时,速度可近似按真空速度计算。光学多普勒效应原理如图4所示。

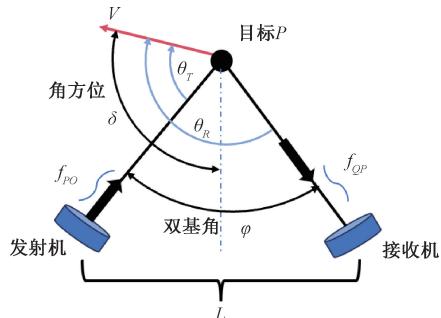


图4 多普勒效应示意图

Fig. 4 Diagram of the fiber Doppler effect

其中,接收机探测到的由目标P散射的回波表观观测频率f_{QP}为:

$$f_{QP} = \frac{\gamma}{1 - \frac{v}{c} \cos\theta_R} f_{PO} = \frac{\left(1 + \frac{v}{c} \cos\theta_T\right)}{\left(1 - \frac{v}{c} \cos\theta_R\right)} f \quad (2)$$

忽略式(2)中的高阶小项并近似成一次项,光纤多普勒探测系统探测到的多普勒频移可表示为探测系统接收机的观察频率与发射信号实际频率之差,整理可得:

$$\Delta f = f_{QP} - f = \frac{v}{c} (\cos\theta_T + \cos\theta_R) f = \frac{2fv}{c} \cos \frac{\theta_R + \theta_T}{2} \cos \frac{\theta_R - \theta_T}{2} = \frac{2fv}{c} \cos\delta \cos \frac{\varphi}{2} \quad (3)$$

其中,θ_R-θ_T=φ,θ_R+θ_T=2δ,φ是光纤多普勒探测系统双基角,δ是目标方位角^[16]。由式(3)可以看出,通过分析接收机和发射机的频率之差,可以获取物体运动速度和位移。当φ和δ为0时,接收机和发射机的频率之差仅与目标振动速度有关。为了提高测量准确性,实验过程中采用收发一体式的光学结构(即φ为0),同时使光纤测量方向与谐振子振动方向一致(即δ为0),减少误差的可能来源。

2.2 光纤多普勒测振系统光学结构设计

光纤多普勒测振系统利用激光的多普勒效应和相干探测技术进行高精度测量。该系统主要使用1 550 nm波长的激光,该波长的激光频率可达THz量级,而现有的光学探测器无法直接响应如此高的频率,因此通常采用相干测量技术间接捕捉回波中的多普勒频移^[16]。

根据光纤测振基本原理,设计的光学系统结构如图5所示,由1 550 nm单模光纤光源发出的激光光束经过光纤耦合器分为本振光和信号光,在本振光路上放置声光移频器对本振光进行调制。声光移频器的作用是为

本振光附加一个固定频移,此配置为外差相干探测。通过外差配置,可将高频多普勒频移信号下变频至与中频频率相关的低频段,既便于光电探测器采集,又能利用多普勒频移与中频频率的相位关系分辨物体振动方向^[16]。信号光经过环形器后,透过光纤端面照射在运动目标的表面上。由于物体的运动,目标表面上反射的信号光会被调制从而产生额外的多普勒频移。当光纤接收到携带目标运动信息的反射光后,信号光与本振光在光纤耦合器内完成相干合束,并经由光电探测器转化为电信号。

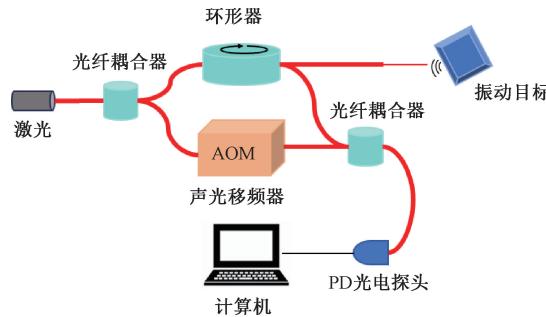


图 5 光纤激光多普勒测振系统

Fig. 5 Fiber laser Doppler vibration measurement system

这种收发一体式的激光多普勒系统结构减少了仪器数量,相比于台式激光测振仪,该激光多普勒测振系统体积小、结构简单、易于搭建且能保证一定的高精度。此外,该系统利用光纤环形器隔离发射信号光和带有目标多普勒信息的回波,避免了发射信号光直接与本振光相干耦合产生的信号串扰^[16]。

3 实验装置及搭建

整体实验装置包括光纤-谐振子夹具和测量平台,光纤-谐振子夹具用于调整光纤和谐振子的位置以及固定;测量平台包括光路部分和电路部分,其中光路部分用于收集谐振子的反射光(即信号光),该光信号包含谐振子的振动信息,电路部分包括光源、示波器及信号发生器,用于光-电转换和信号采集。

实验室常用的台式测振仪采用透镜聚焦增强反射光强度,以保证系统测量性能,但透镜组结构使得系统复杂、体积较大。光纤测振系统通过对裸光纤端面进行倾角处理,在保证反射光信号强度的基础上省去端面透镜配置,能够有效适配小尺寸微半球谐振子的测量需求。考虑到裸光纤易损,为提高其强度,光纤前端用0.8 mm 陶瓷插芯保护。由于光纤需要精确调整位置,使大部分反射光耦合回光纤中,因此设计了多自由度的高精密光纤-谐振子夹具平台。

光纤-谐振子夹具设计如图6所示,整体尺寸约为

150 mm×150 mm×180 mm,由标准光学精密位移台组成,定位精度约为3 μm,包括光纤夹持部分和谐振子位移平台,其中光纤夹持部分用于粗调,谐振子位移平台用于细调。整体平台具有6个自由度,调试时大体按照如下步骤进行:调节1、4、6,对准待测齿;调节2、3、5,使监测得到的反射信号光最强。

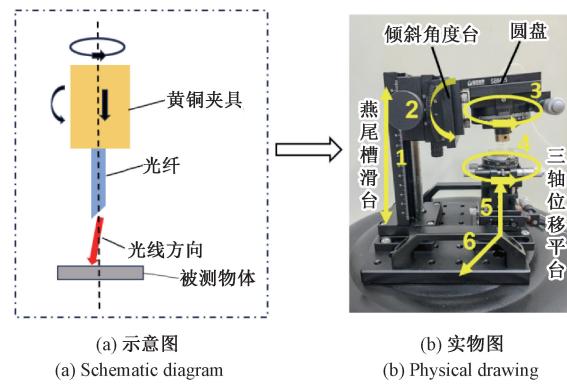


图 6 夹具设计

Fig. 6 Design of fixture

光纤夹持部分包括偏摆、旋转和竖直位移3个自由度,谐振子平台为三轴精密旋转位移台,通过调整两部分的自由度使反射得到的光信号最强,按照先粗调后细调的原则寻找最佳相对位置,使反射信号的电压幅值最大。调试完毕后光纤与谐振子的相对位置如图7所示,光纤端面与谐振子齿形平面距离约为200 μm。

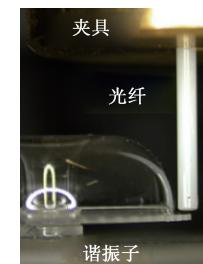


图 7 光纤测振局部图

Fig. 7 Local map of optical fiber vibration measurement

将夹具放入真空腔,抽取空气至真空度达70~80 Pa左右,整体装置搭建如图8所示,其中粗实线表示电信号、细实线表示光信号。

信号发生器用于产生正弦信号,经压电片转换为机械振动激励谐振子。同步工作的光源输出1550 nm的红外激光,通过光纤耦合器分为本振光路与信号光路,其中,信号光路接入光纤-谐振子夹具耦合获取谐振子的振动调制信息,并与移频后的本振光混合。混合光信号输入光电探测模块,其输出电信号实时显示于示波器界面。后续通过示波器内置数据采集模块完成信号采样,并基于反正切算法进行振幅解算。

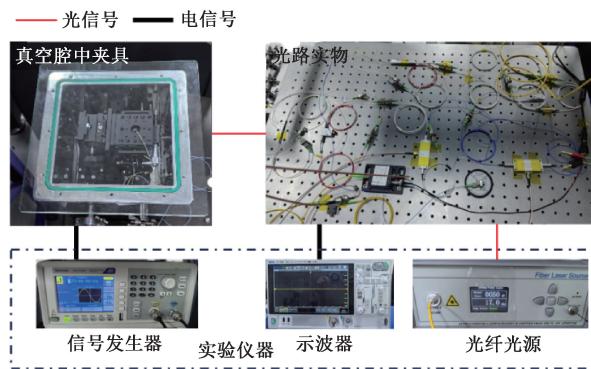


图 8 整体实验装置

Fig. 8 Overall experimental setup

4 测试结果及分析

实验前首先通过测量已知振幅的谐振子对系统进行标定,完成整体系统的调整和矫正。为了验证光纤测振系统能够准确捕捉微半球谐振子的真实振动而非背景环境的大气扰动,利用信号发生器给压电片施加不同大小的正弦激励信号,改变谐振子振动幅度,测试谐振结构边缘位置的振动。由于光纤测振系统采用了外差探测方式,多普勒频移引起的相位变化被搬移高频段,且该高频成分的频率与声光移频器的调制频率一致。因此,信号解调流程首先需将交流信号与一组正交本振信号相乘,通过混频操作将相位变化信息迁移至低频段及二倍频分量中,随后通过低通滤波器滤除二倍频分量,最终获得两路包含原始多普勒频移信息的正交信号。进一步对这两路正交信号进行反正切运算,完成多普勒频移的换算,即可获取谐振子边缘振幅随时间变化的动态特性^[16]。最终通过傅里叶变换计算得到振动幅值,由此分析得到如图9所示的振幅-激励电压关系图。

由图9可以得到随着激励电压的增大,测得的振幅呈现线性增长趋势,且线性度较高,证明测得的信号为谐振子的真实振动信号。每组信号重复测量3次,重复测量得到的误差范围在1%左右,误差波动较小,因此该方法具有较高的精度和可靠性。

在真空状态下进一步验证光纤测振系统对谐振子模态振动响应的测试能力。首先采用锁相放大器进行扫频,即提供频率变化的正弦激励信号,然后利用示波器记录波形数据并计算不同激励频率下的振子振幅信息,最终获得0~9 000 Hz范围的振动特性数据,同时对比真空中商用激光测振仪(Polytech MSA-600)的数据,结果如图10所示(其中粗实线为光纤测量结果,细实线为商用激光测振仪测量结果)。

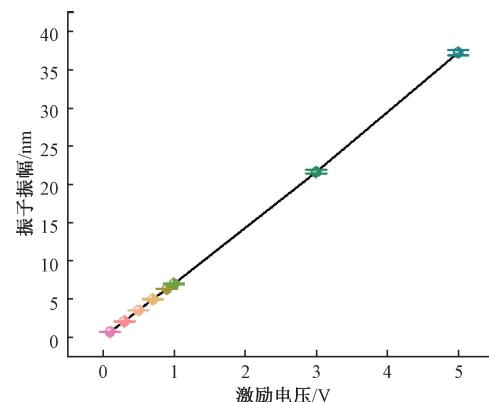


图 9 振动幅值-激励电压误差棒图

Fig. 9 Vibration amplitude-excitation voltage error bar plot

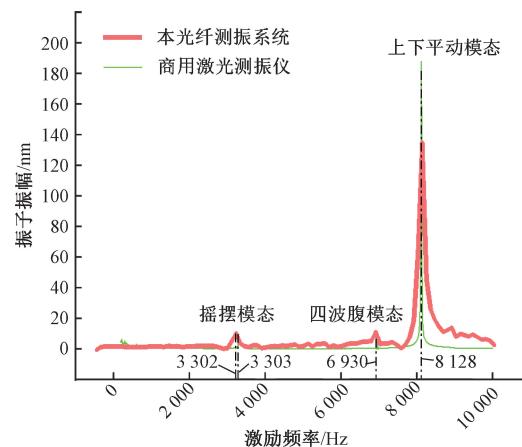


图 10 振子振幅-激励频率关系对比

Fig. 10 Comparison of oscillator amplitude-excitation frequency relationship

在光纤测振结果中,谐振子在3 302、6 930和8 128 Hz这个3个频率点产生谐振峰,其中3 302 Hz为谐振子揆摆模态,8 128 Hz为上下平动运动模态,6 930 Hz为陀螺N=2模态振型,也是谐振子的工作模态;该结果与Polytech MSA-600激光测振仪的结果基本一致(3 303、6 930和8 128 Hz)。两次实验使用了不同的真空腔和真空气计,导致真空气度存在差别,而真空气度会导致谐振子工作频率产生偏移^[17],因此谐振子揆摆模态产生了1 Hz的偏差。此外,仿真得出的谐振子工作模态为6 730.4 Hz,结合实际扫频结果,可以判断6 930 Hz为谐振子的工作模态即四波腹振型,由于谐振子在不同环境下力学性能变化以及加工过程中存在工艺误差,仿真和实际测量得到的工作模态频率有一定差异。

由于材料缺陷和工艺误差的存在,实际的微半球谐振子并非理想的对称结构,体现在刚度轴分布不均匀,产生两个主刚度轴方向,谐振子工作模态出现频率裂解^[18-22]。本次实验采用频率裂解较小的谐振子,测量得

到该谐振子的工作模态为 6 590 Hz, 在 6 585~6 600 Hz 范围进行扫频, 经测试得到谐振子的频率裂解如图 11 所示。

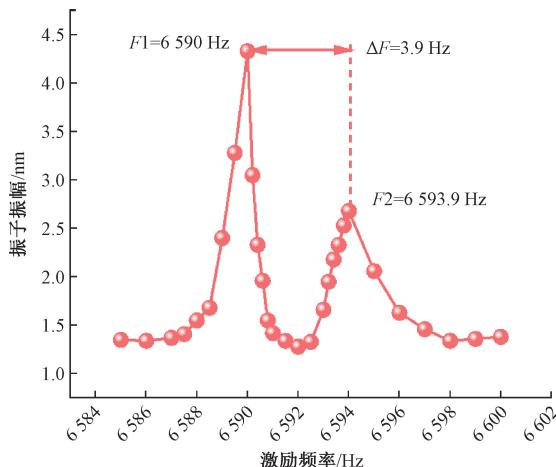


图 11 频率裂解测试

Fig. 11 Frequency split test

通过读取扫频曲线谐振峰对应的频率值能快速计算出微半球谐振子的频率裂解为 3.9 Hz, 因此该全光纤测振系统能有效分辨频率裂解较小的谐振子。

为了验证该光纤测振系统能正确测得微半球陀螺的酒杯状模态振型(即四波腹振型、工作模态), 测试过程中改变测振方位, 记录不同方向上齿的振幅大小, 从而得到谐振子各齿振动的幅值分布图。采用商用激光测振仪可测得大气下该谐振子的酒杯状模态频率为 6 911 Hz, 因此设定信号发生器输出频率为 6 911 Hz、幅值为 10 V 的正弦信号进行激励, 共测得 48 个齿的幅值随角度变化分布图如图 12 所示。

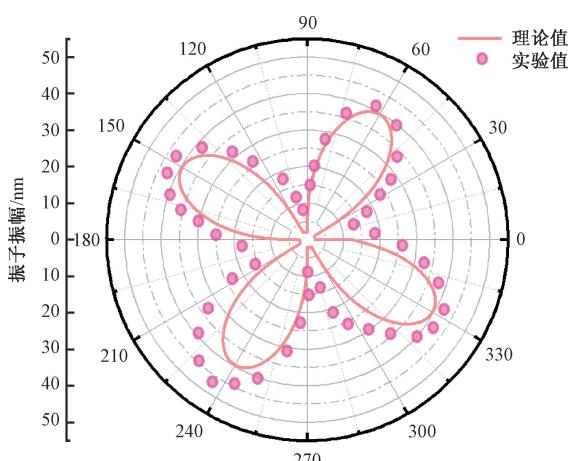


图 12 酒杯状振型幅值分布

Fig. 12 Amplitude distribution of wine cup mode

可以看到, 振幅随齿位置变化分布大致呈四波腹状, 每隔 45° 达到波节或波腹, 受环境干扰的影响, 波节处的幅值不为 0, 符合实际情况。振幅最大处(即刚度轴)在 60° 和 150° 方位, 与仿真得到的酒杯状工作模态振型类似。

依据测试得到的频率裂解大小和刚度轴(即振幅最大处)方位, 即可获得谐振子的频率裂解参数, 从而指导后续修调、工艺优化等工作。

5 结论

微半球谐振子光纤测振方法通过光纤直接耦合未镀膜谐振子表面的反射光实现振动测量, 该方法解决了传统台式多普勒测振仪对透明谐振子进行测振时光线聚焦困难的问题, 从而避免了测量点位模糊导致的结果不准确。实验搭建了透明谐振子的光纤测振系统, 实现了谐振子振动的精确测量。通过对实验结果分析获得的结论为:

- 1) 光纤测振方式精度和灵敏度高, 可靠性强, 多次测量的波动范围在 0.5 nm 以内, 相对误差仅为 1%。
- 2) 光纤测振方式能进行 0~9 000 Hz 宽频扫频, 精准辨识谐振子的前三阶模态, 且测试结果与商用 Polytec MSA-600 测振仪一致。
- 3) 光纤测振方式能分辨出陀螺的频率裂解和四波腹振型, 并能通过多光纤同步布置实现分布式测振, 为陀螺谐振子的修调工艺提供精准数据支撑。

基于光纤多普勒效应的微半球谐振子振动测量系统具有低成本、高性能、易集成等优势特点。未来, 将进一步优化光纤测振系统的设计和性能, 实现更高精度、灵敏度和可靠性。同时, 通过系统集成和与其他传感器相结合, 有望为微半球谐振陀螺等复杂动力学系统的测量和分析提供更加理想的解决方案。

参考文献

- [1] 路永乐, 苏胜, 罗毅, 等. 足端惯性信息辅助的四足机器人惯性导航算法[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12): 169-178.
LU Y L, SU SH, LUO Y, et al. Inertial navigation algorithm for quadruped robot assisted by foot-end inertial information[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12): 169-178.
- [2] 奔粤阳, 王健成, 龚胜, 等. 水下惯性导航系统的快速综合校正[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(11): 42-51.
BEN Y Y, WANG J CH, GONG SH, et al. Rapid comprehensive calibration for the underwater inertial navigation system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(11): 42-51.

- [3] 郑超,张林,肖茵静,等. 基于加工误差仿真的半球谐振子优化设计[J]. 导航定位与授时,2024,11(3): 136-147.
- ZHENG CH, ZHANG L, XIAO Y J, et al. Optimal design of hemispherical harmonic oscillator based on machining error simulation [J]. Navigation Positioning and Timing, 2024, 11(3) : 136-147.
- [4] 张林,李荣冰,徐菁,等. 微半球陀螺交直流混合电压切换驱动方法研究[J]. 电子测量技术,2024,47(1): 55-62.
- ZHANG L, LI R B, XU J, et al. Research on hybrid AC/DC voltage switching driving method for micro-hemisphere gyro [J]. Electronic Measurement Technology, 2024, 47(1) : 55-62.
- [5] 梅松,杨峰,文路,等. 高结构对称性微半球陀螺设计与制造[J]. 压电与声光,2023,45(2): 220-225.
- MEI S, YANG F, WEN L, et al. Design and fabrication of high structure symmetrical micro-hemispherical gyroscope[J]. Piezo-electrics & Acoustooptics, 2023, 45(2) : 220-225.
- [6] 姚宇熠,王亚波,程瑞昭,等. 微半球陀螺谐振子制造工艺研究现状[J]. 导航与控制,2025,24(1): 12-24.
- YAO Y Y, WANG Y B, CHENG R ZH, et al. Research status of manufacturing technology of micro-hemisphere gyroscope harmonic oscillator[J]. Navigation and Control, 2025, 24(1) : 12-24.
- [7] CHEN W Y, GE X, DING AN L, et al. Characterization and compensation of phase delay and modulation pattern angle error for rate-integrating micro-hemispherical resonator gyroscope [J]. IEEE Sensors Journal, 2025, 25(7) : 10820-10830.
- [8] 梅思龙,王亚龙,苏晓龙,等. 微半球陀螺频率裂解的测试与修调研究[J]. 传感器与微系统,2025,44(9): 21-24,28.
- MEI S L, WANG Y L, SU X L, et al. Study on frequency splitting test and correction of gyroscope in micro-hemisphere[J]. Sensor and Microsystem, 2025, 44(9) : 21-24, 28.
- [9] 高忠峰,李平华,乔琦,等. 基于 NSGA-III 的半球谐振陀螺的频率裂解补偿[J]. 仪器仪表学报,2025,46(3): 296-306.
- GAO ZH F, LI P H, QIAO Q, et al. Frequency splitting compensation of hemispherical resonator gyro based on NSGA-III[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(3) : 296-306.
- [10] YAN T T, ZHANG ZH H, SHOU J W. Development of a capacitive sensor for spray deposition and drift measurements [J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 12: 101164.
- [11] JIN X H, LI H G, HONG W, et al. Stray potential measurement based on capacitive sensing for inertial sensors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2025, 74: 1-9.
- [12] 段志鹏. 基于激光测振的光声缺陷检测技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2023.
- DUAN ZH P. Research on photoacoustic defect detection technology based on laser vibration measurement [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2023.
- [13] 严伟,杨韬,吴志祥,等. 激光雷达稀疏图像的残差通道注意力机制复原重建方法研究[J]. 电子测量与仪器学报,2024,38(12): 35-42.
- YAN W, YANG T, WU ZH X, et al. Research on the restoration and reconstruction method of sparse images from lidar using the residual channel attention mechanism[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(12) : 35-42.
- [14] 王璠. 熔融石英微半球谐振子的品质因数影响机制研究[D]. 长沙:中南大学,2023.
- WANG Y. Research on the mechanism of quality factor influence of molten quartz micro-semi-spherical resonator [D]. Changsha: Central South University, 2023.
- [15] 刘方,翟涛涛,侯超强,等. 基于多普勒调制时移 Laplace 小波的列车轴承故障声信号瞬态成分快速提取方法[J]. 仪器仪表学报,2022,43(3): 40-48.
- LIU F, ZHAI T T, HOU CH Q, et al. A fast transient component extraction method of train bearing fault acoustic signal based on Doppler modulated time-shifting Laplace wavelet[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3) : 40-48.
- [16] 陈鸿凯. 激光多普勒微振动信号处理技术研究及硬件实现[D]. 长春:中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所),2020.
- CHEN H K. Research and hardware implementation of laser Doppler micro-vibration signal processing technology[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, University of Chinese Academy of Sciences, 2020.
- [17] 祝正原,刘洪,谢帅. 全金属固态振动陀螺振子品质因数特性研究[J]. 传感器世界,2023,29(3): 8-14.
- ZHU ZH Y, LIU H, XIE SH. Research on the quality factor characteristics of all-metal solid-state vibration gyroscope oscillator[J]. Sensor World, 2023, 29 (3) : 8-14.
- [18] 黄文逸. 基于腔光力系统的微半球谐振陀螺仪设计与特性研究[D]. 成都:电子科技大学,2024.

- HUANG W Y. Design and characterization study of micro-spherical resonant gyroscope based on cavity light force system[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2024.
- [19] 李斌,席翔,卢坤,等. 基于质量-刚度解耦的微半球谐振陀螺频差高精度修调方法[J]. 中国科学:技术科学,2023,53(8):1400-1410.
- LI B, XI X, LU K, et al. High-precision frequency difference correction method based on mass-stiffness decoupling for micro-hemisphere resonator gyroscope[J]. Science China: Technical Science, 2023, 53(8):1400-1410.
- [20] 徐睿东. 两件套全角半球谐振陀螺误差产生机理及抑制方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2024.
- XU R D. Research on error mechanism and suppression method of two-piece full-angle hemispheric resonator gyroscope [D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024.
- [21] 高阳,丁徐锴,张含,等. 微半球壳谐振子高温吹制工艺仿真及形貌影响机理研究[J]. 测试技术学报,2023,37(1): 5-10,17.
- GAO Y, DINH X K, ZHANG H, et al. Simulation of high-temperature blow molding process of micro-spherical shell resonator and study on the mechanism of morphology influence [J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2023, 37(1): 5-10, 17.
- [22] 胡鑫. 基于电容检测的微半球谐振陀螺间隙修调实验研究[D]. 大连:大连理工大学,2024.

HU X. Experimental research on gap adjustment of micro-semi-spherical resonant gyroscope based on capacitance detection[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2024.

作者简介



夏雨,现为国防科技大学在读本科生,主要研究方向为微光机电系统及微纳传感。

E-mail: xiayu22a@nudt.edu.cn

Xia Yu is currently an undergraduate student at National University of Defense Technology. Her main research interests include optical microelectromechanical systems and micro-nano sensors.



曾凯(通信作者),2016年于昆明理工大学获得学士学位,2019年于中南大学获得硕士学位,2024年于国防科技大学获得博士学位,现为国防科技大学智能科学学院博士后,主要研究方向为微光机电系统及微纳传感。

E-mail: zengkai19@nudt.edu.cn

Zeng Kai (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Kunming University of Science and Technology in 2016, M. Sc. degree from Central South University in 2019, and Ph. D. degree from National University of Defense Technology in 2024. He is currently a postdoctoral in the College of Intelligent Science at National University of Defense Technology. His main research interests include optical microelectromechanical systems and micro-nano sensors.