

半球谐振陀螺高精度质量平衡研究

王 鹏,车驰骋,曲天良,刘天怡,张 熙

(华中光电技术研究所武汉光电国家研究中心 武汉 430223)

摘要:质量不平衡是半球谐振子制造及组件装配过程中产生的非对称性缺陷,由材料各向异性、加工误差及装配偏差等工艺环节引入的非对称特性会引发谐振子非理想振动模式,导致四波腹驻波畸变,加剧哥氏效应耦合误差,进而恶化半球谐振陀螺的输出特性,影响其导航精度。针对这一制约高精度半球谐振陀螺发展及批量化生产的关键技术,提出了基于谐振子驻波虚拟旋转状态参数解调与支撑杆振动检测相结合的辨识方法,通过激光测振仪精确捕捉谐振子振动特征,实现了不平衡质量的辨识。系统分析了谐振子精密成型、金属化镀膜及精密装调等工艺环节对谐振子质量分布的差异化影响,揭示了不同工艺误差与振动模态耦合的关联规律,据此制定了阶梯式质量平衡策略。基于上述理论分析,研制了集成了谐振子驻波控制、振动测量与微去除技术的自动化平衡装置,在此基础上完成了谐振子的质量平衡。谐振子质量平衡后结果表明:对于4次谐波,实现了频率裂解为0.056 mHz的平衡精度;对于1~3次谐波,4次谐波振幅为0.15 μm 时,1~3次谐波引起的耦合振动<0.03 nm,得到了良好的结果,验证了平衡方法及工艺的正确性,为研制及批产化高精度半球谐振陀螺仪提供了有力工艺支撑。

关键词:半球谐振子;质量平衡;平衡策略;频率裂解;耦合振动

中图分类号: TH89 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.4

Research on high-precision mass balance of hemispherical resonant gyroscope

Wang Peng, Che Chicheng, Qu Tianliang, Liu Tianyi, Zhang Xi

(Huazhong Institute of Electro-Optics Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Wuhan 430223, China)

Abstract: Mass imbalance in hemispherical resonators—caused by asymmetric defects introduced during manufacturing and assembly processes such as material anisotropy, machining inaccuracies, and assembly misalignments—leads to non-ideal vibration modes. These imperfections result in quadrant-wave standing wave distortion, intensify Coriolis effect coupling errors, and ultimately degrade the output performance and navigation accuracy of hemispherical resonator gyroscopes (HRGs). To tackle this key challenge limiting the development and large-scale production of high-precision HRGs, this study introduces an identification method that combines virtual rotation state parameter demodulation of standing waves with support-beam vibration detection. Laser vibrometry is employed to precisely capture the resonator's vibration characteristics, enabling quantitative characterization of mass imbalance. A systematic investigation reveals how precision forming, metallization coating, and high-accuracy assembly each impact the mass distribution, highlighting the correlation between process-induced errors and vibration mode coupling. Based on these insights, a hierarchical balancing strategy is proposed. To implement it, an automated balancing system is developed, integrating standing wave control, vibration measurement, and micro-material removal technologies. Experimental validation shows that after balancing, the 4th harmonic frequency split is reduced to 0.056 mHz, and the coupling vibration amplitudes of the 1st-3rd harmonics are kept below 0.03 nm, given a 4th harmonic amplitude of 0.15 μm . These results verify the effectiveness and precision of the proposed balancing method, offering strong technical support for the advancement and mass production of high-precision HRGs.

Keywords: hemispherical resonator; mass balance; balancing strategy; frequency splitting; coupled vibration

0 引言

半球谐振陀螺仪(hemispherical resonator gyroscopes, HRG)是一种基于哥式效应的固体波动陀螺,由于精度高、结构简单,极具体积、质量、工艺链简洁、可靠性高等综合优势,被誉为最具潜力的哥氏振动陀螺^[1-3]。随着半球谐振陀螺设计及制造工艺水平的提高,其性能亦向着规模化应用方向发展,在军事、船舶、航空航天及民用等领域发挥重要作用。半球谐振子作为半球谐振陀螺的核心器件之一,其利用半球壳的振动特性及振动驻波进动效应来感测基座旋转的。半球谐振子通常是由低内摩擦和高各向同性的熔融石英制造的,由于材料缺陷、加工工艺及总成工艺的局限性,造成谐振子的非均匀缺陷。材料缺陷引起的密度、刚度等结构特性的不均匀;加工工艺方法、刀具磨损等工艺要素形成谐振子的应力分布不均、表面缺陷、形位误差^[4-7];总成装配误差引起谐振子组件结构特征及静电力的不均匀。这些误差最终导致半球谐振子工作状态的轴向特征的非均匀性,主要包括阻尼不均匀、刚度不均匀及质量的不平衡等^[8-9]。半球谐振子的质量的分布特性直接影响半球谐振陀螺的输出特性,由于这些缺陷存在,特别半球谐振陀螺工作在全角模式时,零偏特性表现出对振型的角度依赖性,严重恶化半球谐振陀螺仪的性能,制约着半球谐振陀螺向高精度方向的发展^[10-18]。

为了保证 HRG 完美的输出特性,需要对半球谐振子进行高精度的质量平衡,达到理想的振动形式,实现导航级的精度。因此质量分布特性引起的振动特性的表征测量及质量平衡是实现 HRG 高精度的关键技术之一^[19-20]。目前,国内外对谐振子质量不平衡与陀螺性能之间的关系研究较多,形成了相关理论,国外主要有美国 Northrop Grumman 公司采用激光对谐振子唇沿的锯齿结构特征进行平衡、法国 Sagem 公司采用六自由方案对谐振子进行了平衡,但未见详细的技术报道;俄罗斯 Medicon 公司采用“脉动法”及压电测振的方式对 1~4 次谐波误差进行了测量。国内相关文献主要集中在 4 次谐波质量缺陷的辨识及调平效果^[21-24]。但是,对于 4 次谐波缺乏不同状态下(如裸谐振子、装调组装)统一的辨识方法,面对更高精度半球谐振陀螺仪需求,需要更高的平衡精度;对于 1~3 次谐波,高精度辨识和修调更加困难,亦未见详细工程化的报道。

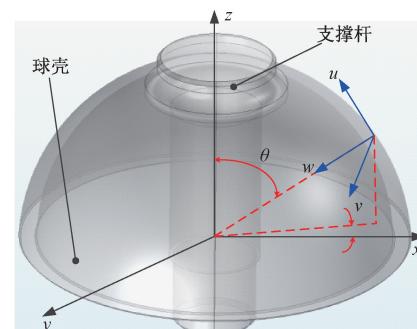
针对上述问题,为实现对半球谐振子在零件状态、引入静电力组件状态下的半球谐振组件的不平衡质量进行表征及调平,提出了相应完整的平衡方法及流程。

首先,基于控制参数的解调,实现半球谐振子 4 次谐波辨识表征;其次,基于扫描激光测振仪对谐振子支撑杆的振动特性的测量,实现了 1 次、2 次、3 次谐波残余振动的表征;最后,采用离子束刻蚀对不平衡质量进行高精度去除,实现了半球谐振子不同状态下 1~4 次谐波不平衡质量的调平,得到了良好的结果,验证了平衡方法及工艺的正确性,为高精度半球谐振陀螺仪的研制提供有效工艺支撑。

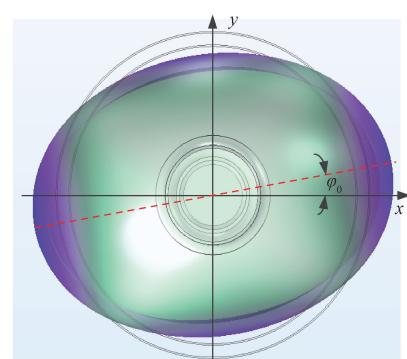
1 半球谐振子不平衡质量表征方法

1.1 半球谐振子结构特征

半球谐振子为高度轴对称结构,主要由球壳及支撑杆组成,球壳部分用于产出陀螺效应,支撑杆为锚接部位。半球谐振陀螺要求谐振子工作在 $n=2$ (环向波数) 时的振型,其特征是球壳做四波腹四波节弹性振动,支撑杆保持相对静止,呈现一个驻波的状态,其结构特征及工作振型如图 1 所示。



(a) 半球谐振子结构特征及坐标定义
(a) Structural characteristics and coordinate definition of a hemispherical resonator



(b) 谐振子四波腹振型
(b) Four-antinode vibration mode of a resonator

图 1 半球谐振子结构及振动特征

Fig. 1 Structure and vibration characteristics of hemispherical resonator

将谐振子的质量分布误差按各次谐波分量展开,如式(1)所示,可以得到谐振子的几种分布类型,根据文献[25]分析,对半球谐振陀螺仪造成影响的为前4次谐波误差。但在实际工程应用中,由于不易对不平衡质量本身进行直接观测测量,而是对其引起的振动特性进行间接测量,以此来表征描述谐振子的1~4次谐波引起的不平衡质量。

$$\rho(\varphi, \alpha) = \rho_0 \left\{ 1 + \sum_{i=1} \delta \rho_i \cos[i(\varphi - \varphi_i)] \right\} \quad (1)$$

式中: ρ_0 为平均密度; i 为谐波的级次, $i = 1, 2, 3, 4 \dots$; $\delta \rho_i$ 为第*i*次谐波的相对分量; $\rho_0 \delta \rho_i$ 为第*i*次谐波分量的真实幅度; φ 为谐振子的方位角; φ_i 为第*i*次谐波分量方位角。

1.2 4次谐波的表征方法

完美对称的谐振子两个简并的模态($n=2$)谐振频率相同,频率裂解为0。对于环向质量分布不均匀的谐振子,四波腹振型频率响应函数中会出现两个相近的峰值频率 f_1, f_2 ,这便是频率裂解现象,频率差为频率裂解值,表达式如式(2)所示,示意图如图2所示。

$$\Delta f = f_2 - f_1 \quad (2)$$

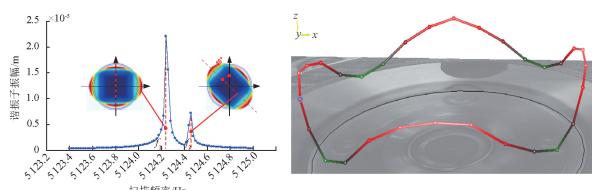


图2 谐振子频率裂解示意图

Fig. 2 Schematic diagram of resonant frequency splitting

1.3 1~3次谐波误差的表征方法

由于谐振子质量不平衡的影响,当谐振子以4波腹振型工作时,在笛卡尔坐标系中,谐振子支撑杆受到3个方向的作用力^[26],如式(3)~(5)所示。由式中可以看出,支撑杆的受力与谐振子的前3次谐波剩余质量相关,由于在工程应用中力以及由力引起的振动特性比剩余质量更容易辨识与测量,因此以谐振子支撑杆的振动特性来表征谐振子1~3次谐波误差。

$$F_x(\varphi_0) = \frac{A\omega^2}{4} [3M_1 \cos(2\varphi_0 - \varphi_1) + M_3 \cos(2\varphi_0 - 3\varphi_3)] \cos\omega(t - t_0) \quad (3)$$

$$F_y(\varphi_0) = \frac{A\omega^2}{4} [3M_1 \sin(2\varphi_0 - \varphi_1) - M_3 \sin(2\varphi_0 - 3\varphi_3)] \cos\omega(t - t_0) \quad (4)$$

$$F_z(\varphi_0) = \frac{A\omega^2}{2} M_2 \cos(2\varphi_0 - 2\varphi_2) \cos\omega(t - t_0) \quad (5)$$

各参数定义如表1所示。

表1 谐振子相关参数定义

Table 1 Definition of relevant parameters of resonator

符号	定义	符号	定义
$F_x(\varphi_0)$	支撑杆在x方向受力	φ_1	1次谐波缺陷方位
$F_y(\varphi_0)$	支撑杆在y方向受力	φ_2	2次谐波缺陷方位
$F_z(\varphi_0)$	支撑杆在z方向受力	φ_3	3次谐波缺陷方位
M_1	1次谐波缺陷剩余质量	φ_0	谐振子四波腹振型方位
M_2	2次谐波缺陷剩余质量	A	谐振子四波腹振型幅值
M_3	3次谐波缺陷剩余质量	ω	谐振子四波腹振型圆频率

2 影响半球谐振子的质量不平衡的因素及平衡策略

2.1 影响半球谐振子的质量不平衡因素分析

如图3所示,半球谐振子主要经历了精加工成型、化学腐蚀、镀膜及谐振子组件装调等工艺过程,由于工艺的不完善,每个工艺阶段都会引入周向非对称误差,造成半球谐振子的质量不平衡。

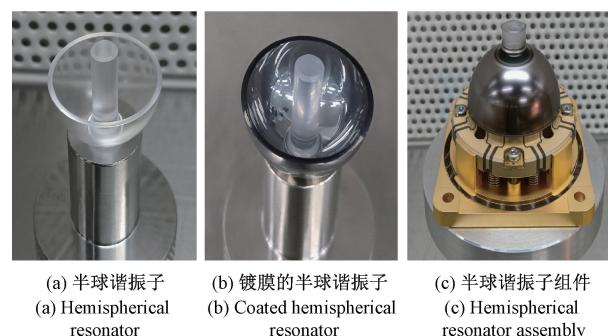


图3 半球谐振子经历的阶段

Fig. 3 Several stages experienced by a hemispherical resonator

在加工成型阶段,加工工艺方法及参数是影响谐振子周向对称性的主要因素,依据高精度的圆度仪的形位检测结果可以明显的体现这种特征,球面相对于基准其轮廓不是一个标准的理想圆,唇沿也不是一个理想的平面,检测结果如图4所示。如果将其按傅里叶级数展开,将得到形状误差在圆周方向1~4次的分布,可以看出,加工带来的形位缺陷是谐振子周向非对称误差主要来源之一。同时由于半球谐振陀螺仪是利用其振动特性来工作的,振动特性的还耦合了材料特性、表面瑕疵等特性,这些也共同影响着谐振子的质量分布。

在谐振子镀膜阶段,由于膜层厚度及界面应力的不均匀,造成谐振子质量及刚度的重新分布,引入了1~4次谐波误差,因此在这一阶段,有必要进行有效的不平衡质量辨识及平衡。

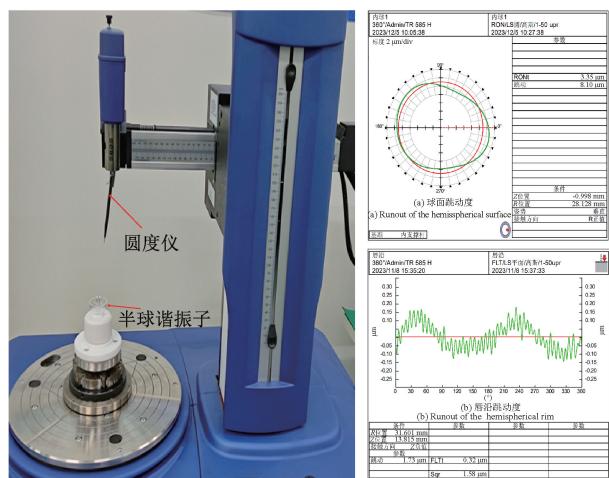


图4 圆度仪表征半球谐振子的形位

Fig.4 Shape and positional characterization of the hemispherical resonator using a roundness instrument

在谐振子装配阶段,谐振子与电极座形成一个整体作为工作组件,此时由于装配误差的影响,造成间隙的不均匀,如图5所示。

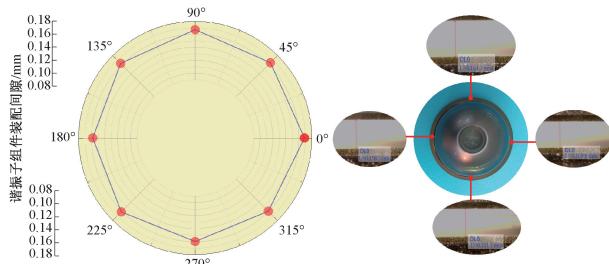


图5 谐振子组件周向装配间隙分布

Fig.5 Circumferential assembly clearance distribution of resonator components

当谐振子组件工作时,由于工作电压的存在,电极间隙的不均匀会引入电刚度会的不均匀性,如式(6)、(7)所示,由于静电力的吸引作用,谐振子的谐振频率发生了变化,其中 k_e 与装配间隙 d 有关,当装配间隙 d 存在不均匀时, d 的4次谐波分量等效在谐振子上耦合了4次谐波误差。

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_d(t) \quad (6)$$

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + \left(k - \frac{\varepsilon S U^2(t)}{d^3} \right) x = \varepsilon S U^2(t) \left[1 + 3 \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \dots \right] \quad (7)$$

$$\text{令 } k_e = \frac{\varepsilon S U^2(t)}{d^3}, F(t) = \frac{\varepsilon S U^2(t)}{2d^2} \left[1 + 3 \left(\frac{x}{d} \right)^2 + \dots \right], \text{ 则} \quad (8)$$

式(7)变为:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + (k - k_e)x = F(t) \quad (8)$$

其中, m 为谐振子等效质量, c 为等效阻尼系数, k 为谐振子机械刚度, $F_d(t)$ 为静电力。

对所装配的某一批次半球谐振子组件进行了统计,如图6所示,装配后谐振子组件的频率裂解较装配前均有不同程度的恶化,因此需在谐振子组件装调后进行4次谐波的平衡。

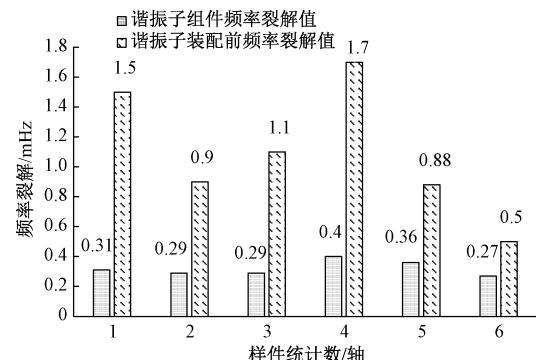


图6 装配间隙不均匀引入的频率裂解

Fig.6 Frequency splitting caused by uneven assembly clearance

2.2 影响半球谐振子的质量平衡策略

由于各个阶段会引入不同类型的平衡误差,其中加工阶段及镀膜均会引入1~4次谐波误差;装配后主要引入电刚度的均匀分布,等效于质量的4次谐波误差,因此半球谐振子质量平衡的策略是:加工、镀膜完成后分别进行1~4次谐波的质量平衡,组件装调完成后进行4次谐波的质量平衡。

3 半球谐振子质量不平衡辨识方法

3.1 基于相位状态方程解算的4次谐波辨识方法

谐振子工作时可以等效为一个二维质点模型,如图7所示,谐振子组件调平时基于Linch状态方程式(9)和(10)进行刚性轴的解调与频率裂解 Δf 的测量的,把谐振频率作为解调参数;依据方程式(9),通过控制 F_{qs} ,施加驱动驻波进动的力,主动改变振型角 θ 的大小;当谐振子存在4次谐波缺陷时,谐振子的谐振频率会随着阵型角的变化,呈现周期性的调制,依据方程式(10)可以得到谐振频率 $f(\theta)$ 随振型角 θ 的变化关系,其中包含 $\Delta\omega$ 与 θ_ω 的关系,即频率裂解与刚性轴方位的关系。出现极大极小值,极大、极小的差值即为频率裂解值,如式(11)所示。

$$\dot{\theta} = -k_{WA}\Omega + \frac{1}{2}\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\sin 2(\theta - \theta_\tau) + \frac{1}{2}\Delta\omega\cos 2(\theta - \theta_\omega) \frac{Q}{E} - \frac{f_{qs}}{2\omega\sqrt{E}} \quad (9)$$

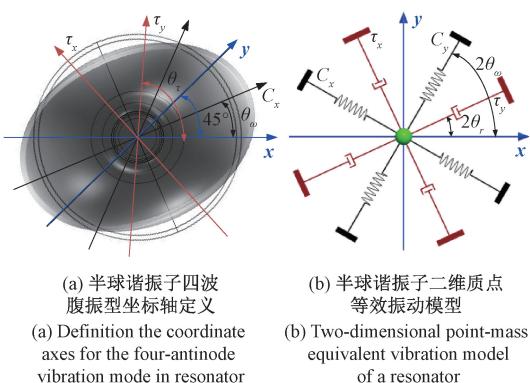


图 7 谐振子二维质点模型及物理空间示意图

Fig. 7 Two-dimensional particle model and physical space diagram of resonator

$$\delta\dot{\phi} = \dot{\phi} + \frac{1}{2}\Delta\omega\cos 2(\theta - \theta_\omega) + \frac{1}{2}\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)\sin 2(\theta - \theta_\tau) \frac{Q}{E} + \frac{f_{ac}}{2\omega\sqrt{E}} \quad (10)$$

式(9)~(10)中各主要参数含义如表2所示。

表2 参数定义说明

Table 2 Definition of parameters

符号	定义	符号	定义
E	谐振子振动能量	θ_ω	刚性轴位置
Q	正交控制的参数	Ω	陀螺旋转的角速度
τ	谐振子的阻尼系数	k_{WA}	全角模式标度因数
$\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)$	阻尼不均匀系数	θ	四波腹振型角
θ_τ	阻尼轴位置	ϕ	谐振子振动初相位
$\Delta\omega$	谐振子频率裂解	f_{qs}	驻波控制力

以 $f_0 = 5000$ Hz, $\Delta f = 0.005$ Hz, $\theta_\omega = 12^\circ$ 为例, 阵型角 $0^\circ \sim 360^\circ$ 变化时, 通过仿真分析, 谐振子谐振频率的调制图像如图8所示, 解算表达式如式(11)所示。

$$\Delta f = f_{\max} - f_{\min} \quad (11)$$

根据状态方程式(9)、(10)解调出的各振型角 θ 对应的谐振频率 $f(\theta)$, 然后采用最小二乘法进行拟合, 其峰谷值为谐振子组件工作状态的频率裂解值, 对应的振型角度位置即为重轴或轻轴的位置。

3.2 基于激光测振的1~3次谐波辨识方法

由式(3)~(5)可知, 支撑杆受到与四波腹振型同频的简谐力, 且与振型角相关, 其振动特性满足二阶振动方程, 如(12)式所示, 支撑杆的振幅 r 与其所受的力 F 成正比。质量不平衡引起支撑杆 xyz 面内振型如图9所示, 支撑杆各振动参数如式(13)~(18)所示。

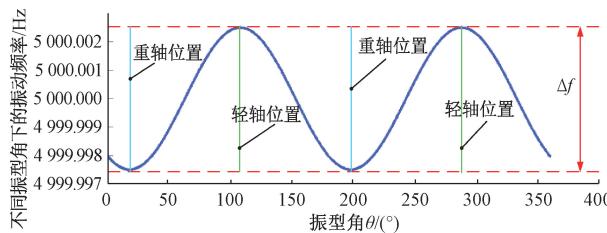


图8 基于相位控制方程的频率裂解及刚性轴辨识特征

Fig. 8 Characteristics of frequency splitting and rigid axis identification based on phase control equation

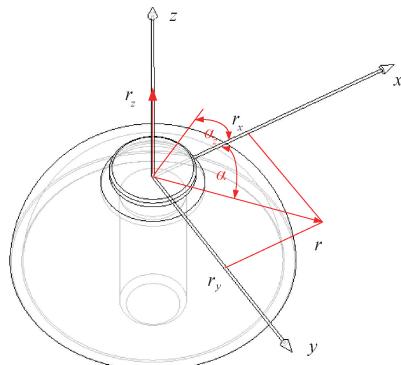
图9 质量不平衡引起支撑杆 xyz 面内振型示意图

Fig. 9 Schematic diagram of support rod vibration modes in the xyz plane caused by mass unbalance

$$\ddot{r} + 2\delta r(\dot{\theta}) + \omega_0^2 r = F/m \quad (12)$$

$$r(\theta) = \frac{F}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}} \cos \omega(t - t_0) \quad (13)$$

$$r_x = r \sin \alpha \quad (14)$$

$$r_y = r \cos \alpha \quad (15)$$

$$r_z(\theta) = \frac{F_z}{m\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\delta^2\omega^2}} \cos \omega(t - t_0) \quad (16)$$

$$r(\theta) = \sqrt{r_x^2 + r_y^2} \quad (17)$$

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (18)$$

其中, r 为支撑杆在 xy 平面上的合振幅; F 为支撑杆在 xy 平面上受到的合力; r_x 为支撑杆在 x 向的振幅; r_y 为支撑杆在 y 向的振幅; F_z 为支撑在 z 向上的受力; r_z 为支撑杆在 z 向的振幅; α 支撑杆在 xy 平面上的振动方位角, m 为谐振子支撑杆振动部分等效质量。

同时由(3)~(5)可分析出, 由质量不平衡带来支撑杆的耦合振动只与质量1~3次谐波误差相关, 与4次谐波无关。因此可以把支撑杆的耦合振动作为质量不平衡中的1~3谐波误差的评价指标。如下图所示, 利用振动传感器对半球谐振子支撑杆自由端的振动信息进行检测, 得到四波腹振动状态耦合在支撑杆上3个方向上的振动信息, 如图10所示。

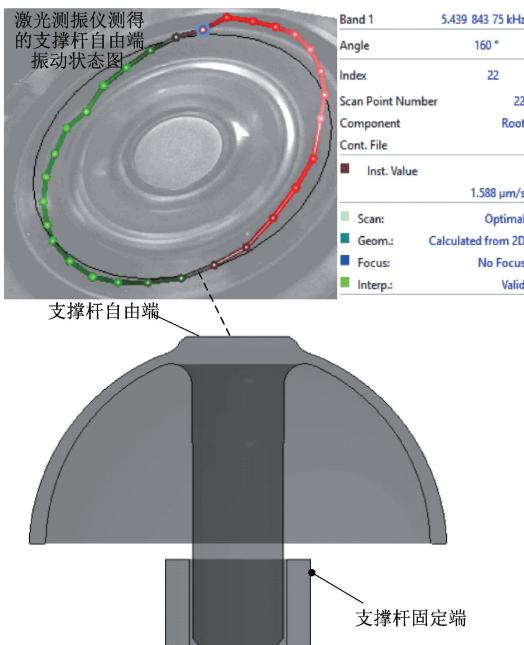


图 10 半球谐振子支撑杆振动状态

Fig. 10 Vibration state diagram of hemispherical resonator support rod

采用振动传感器多普勒激光测振仪对谐振子支撑杆的柱面及端面进行测量及振动状态的分析,测试不同振型角 θ 下的支撑杆的振动特性 $r(\theta)$ 、 $r_z(\theta)$,然后采用最小二乘法对数据 $[\theta, r(\theta)]$ 、 $[\theta, r_z(\theta)]$ 进行拟合,可以得到 M_1 、 M_2 、 M_3 、 φ_1 、 φ_2 、 φ_3 的信息,完成谐振子 1~3 次谐波不平衡质量的辨识。

4 谐振质量平衡系统设计及平衡结果

4.1 半球谐振子质量平衡设备的设计

半球谐振子质量平衡系统主要由真空腔室、谐振子夹具、电极座、转台、扫描式激光测振仪、振动信号处理单元、离子源、控制板及上位机控制软件等组成,如图 11、12 所示,在此平台上完成谐振子高精度不平衡质量的辨识及定量定向质量去除,达到质量平衡的目的。

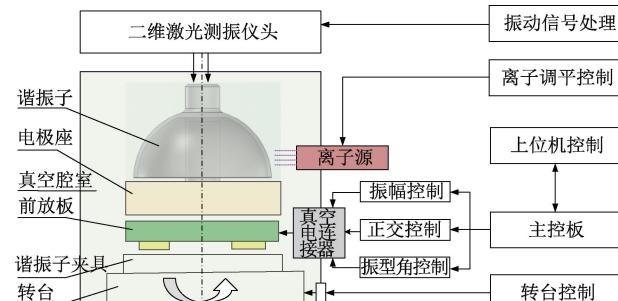


图 11 谐振子质量平衡系统设计

Fig. 11 Design diagram of resonant mass balancing system

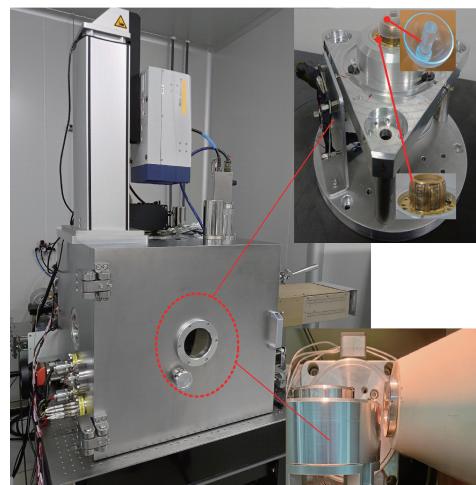


图 12 半球谐振陀螺质量平衡系统

Fig. 12 Hemisphere resonant gyroscope mass balancing system

4.2 1~4 次谐波平衡结果

1) 4 次谐波平衡结果

采用离子束刻蚀进行刻蚀,对 4 次谐波引起的平衡质量进行去除,如图 13、14 所示,由初始值 Δf 为 4 mHz 调平至 0.1 mHz,共经历了 7 次平衡,花费时间 128 min,平衡效率为 0.03 mHz/min。

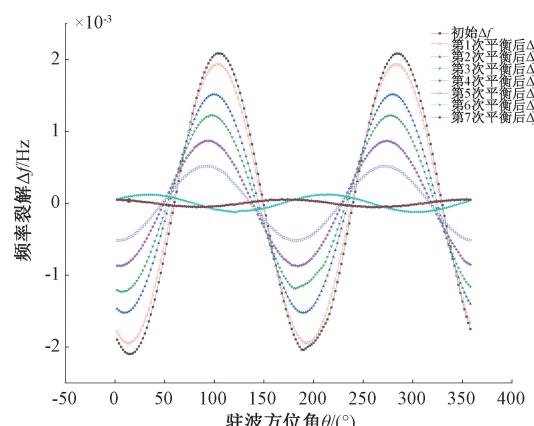


图 13 4 次谐波平衡过程

Fig. 13 4th harmonic balancing process

2) 1~3 次谐波平衡结果

采用离子束刻蚀进行刻蚀,对 1~3 次谐波引起的平衡质量进行去除,如图 15、16 所示,1 次谐波相对变化量由 57 mV 平衡至 9.8 mV,2 次谐波由 25 mV 平衡至 5 mV,3 次谐波由 9.5 mV 平衡至 4 mV,如图 15、16 所示。谐振子支撑杆的耦合振动进行了标定,在 4 波腹的振幅为 0.148 μm 的情况下,支撑杆的振动由 0.15 nm 降低至 0.029 nm,如图 17~19 所示。

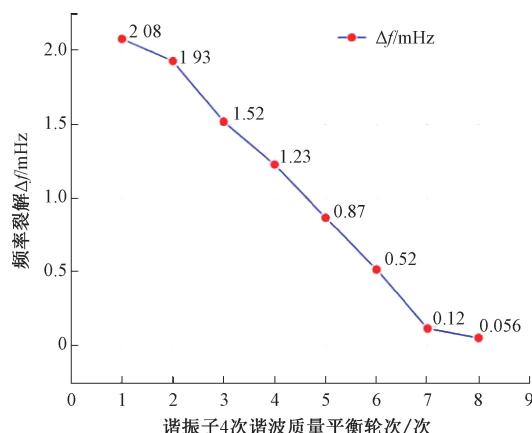


图 14 4 次谐波平衡结果

Fig. 14 4th harmonic balancing result

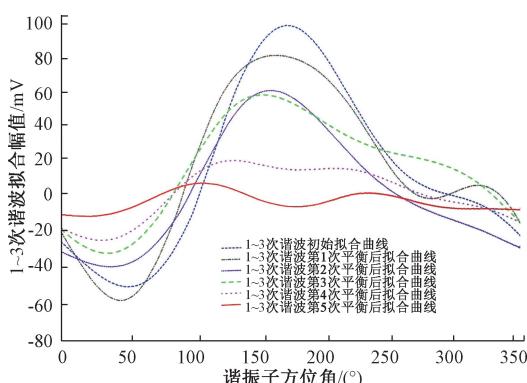


图 15 1~3 次谐波平衡过程

Fig. 15 1~3 harmonic balancing process

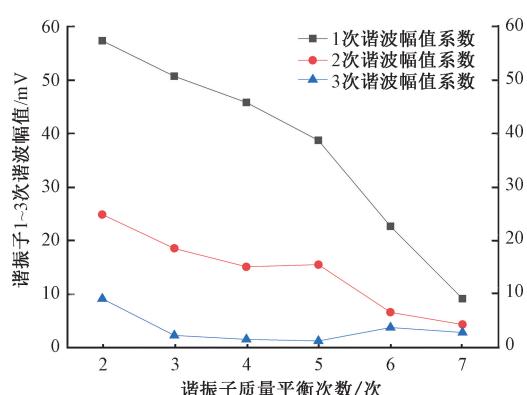


图 16 1~3 次谐波平衡结果

Fig. 16 1~3 harmonic balancing results

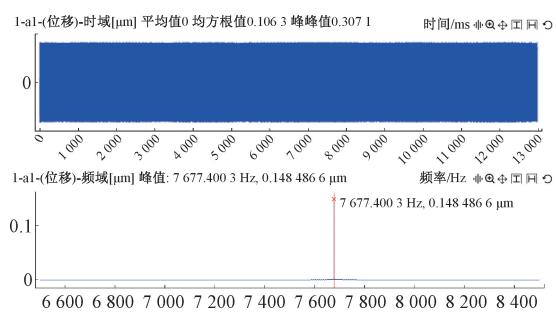
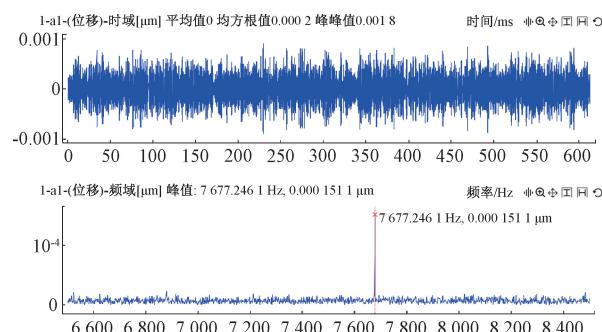
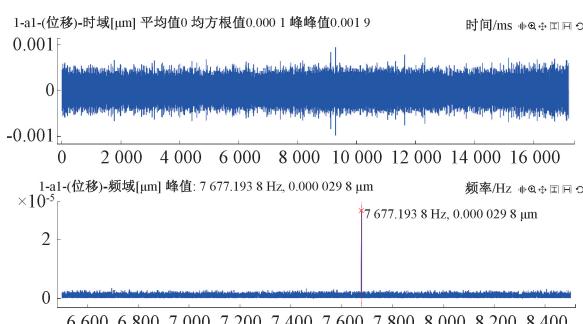
图 17 四波腹振动
Fig. 17 Four wave belly vibration图 18 1~3 次质量平衡前支撑杆的振动
Fig. 18 Vibration of support rod before 1~3 mass balancing cycles

图 19 1~3 次质量平衡后支撑杆的振动

Fig. 19 Vibration of support rod after 1~3 mass balancing cycles

5 结 论

高度完美周向对称性是半球谐振子成形工艺孜孜追求的目标之一,也是改善半球谐振陀螺仪的输出特性、提高半球谐振陀螺的导航精度的关键因素。在完成谐振子高精密机械加工、抛光、化学腐蚀以及谐振子装配后,如何对各个工艺环节的下半球谐振子的不平衡质量进行辨识及质量平衡,保证谐振子的完美的振动特性。基于此,就 4 个方面开展了研究:1)梳理了各工艺环节影响谐振子质量不平衡的因素,并制定了质量平衡策略;2)对于质量不平衡中的 4 次谐波,基于 Lnych 状态方程的,采用驻

波旋转的方式,对其中状态参数进行了解调,实现4次谐波的辨识;3)对于质量不平衡中的1~3次谐波,基于激光测振仪对谐振子支撑杆的振动进行非接触测量,实现了1~3次的辨识;4)设计了半球谐振子质量平衡系统,采用该系统对半球谐振子1~4次谐波误差进行了平衡。平衡结果表明,对半球谐振子实现了频率裂解由2~0.056 mHz的4次谐波的平衡;0.15 m的4次谐波振幅下,实现了耦合振动振幅由0.15~0.029 nm的1~3次谐波平衡。极大地改善了谐振子周向对称性及振动特性,验证了平衡方法及工艺的正确性,为高精度半球谐振陀螺仪的研制提供了有力支撑。

参考文献

- [1] 曲天良. 半球谐振陀螺研究现状、关键技术和发展趋势[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(2):1-16.
- QU T L. Review on the current advances, key technology and future trends of hemispherical resonator gyroscope[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(2):1-16.
- [2] ROZELLE D M. The hemispherical resonator gyro: From wineglass to the planets[J]. Advances in the Astronautical Sciences, 2013, 134(1): 1157-1178.
- [3] 方针, 刘书海, 余波. 半球谐振陀螺的基础理论研究[J]. 导航定位与授时, 2017, 4(2):72-78.
- FANG ZH, LIU SH H, YU B. Study of basic theories of hemispherical resonator gyro[J]. Navigation Positioning & Timing, 2017, 4(2):72-78.
- [4] 刘军汉, 熊长新, 曲天良, 等. 半球谐振子外球面加工原理误差分析及实验研究[J]. 光学技术, 2022, 48(3):295-300.
- LIU J H, XIONG CH X, QU T L, et al. External sphere grining principle error analysis and experimental study of hemispherical resonator[J]. Optical Technique, 2022, 48(3):295-300.
- [5] 刘赫男, 秦彪, 王庭章, 等. 半球谐振子曲面加工干涉分析及其超精密磨削工艺[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2022, 42(1):10-17.
- LIU H N, QIN B, WANG T ZH, et al. Interference analysis and ultra-precision grinding technology of hemispherical resonator curved surface machining[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2022, 42(1):10-17.
- [6] 刘俊峰, 刘科显, 赵羽乾, 等. 形位误差对半球谐振子频率裂解的影响[J]. 中国科学, 2023, 53(8): 1385-1399.
- LIU J F, LIU K X, ZHAO Y Q, et al. Effect of shape error on the frequency cracking of hemispherical resonators [J]. Scientia Sinica Technologica, 2023, 53(8):1385-1399.
- [7] 訾进锋, 宋丽君, 李绍良, 等. 高精度石英半球裸振子微应力制造[J]. 飞控与探测, 2021, 4(1):81-91.
- ZI J F, SONG L J, LI SH L, et al. Micro-stress manufacturing of high precision quartz hemispherical bare-resonator[J]. Flight Control & Detection, 2021, 4(1):81-91.
- [8] 刘奎, 于鑫海, 段杰, 等. 不平衡质量引起的半球谐振陀螺锚固损失理论分析[J]. 中国惯性技术学报, 2023, 31(7):683-687.
- LIU K, YU X H, DUAN J, et al. Theoretical analysis for anchoring loss of hemispherical resonant gyro caused by unbalanced mass [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2023, 31(7):683-687.
- [9] 林珂, 贺海平, 李陟, 等. 半球谐振陀螺质量缺陷误差振动研究[J]. 压电与声光, 2015, 37(3):497-499.
- LING K, HE H P, LI ZH, et al. Study on mass defect error vibration of hemispherical resonator gyroscope[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2015, 37(3):497-499.
- [10] 曹慧亮, 郭天琪, 申冲. 抗过载环形MEMS固体波动陀螺设计加工与测试[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(5):1-7.
- CAO H L, GUO T Q, SHEN CH. Design, fabrication and rest of high overload resistance MEMS silicon-based ring wave gyroscope [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(5): 1-7.
- [11] 樊尚春, 刘广玉. 半球谐振陀螺振子耦合振动的有限元分析[J]. 仪器仪表学报, 1995(3):281-287.
- FAN SH CH, LIU G Y. Finite element analysis of coupling vibration of oscillator for HRG [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1995(3):281-287.
- [12] 张传忠, 徐海刚, 范文良, 等. 全角半球陀螺谐振子结构设计研究[J]. 导航与定位授时, 2024, 11(3):128-135.
- ZHANG CH ZH, XU H G, FAN W L, et al. Research on the structured design of the full-angle hemispherical resonant gyroscope harmonic oscillator [J]. Navigation Positioning & Timing, 2024, 11(3):128-135.
- [13] 谭品恒, 方针, 方仲祺, 等. 基于工程应用的半球谐振陀螺结构设计研究[J]. 压电与声光, 2021, 43(2): 265-269.
- TAN P H, FANG ZH, FANG ZH Q, et al. Research on structured design of hemispherical resonator gyro based on engineering applications[J]. Piezoelectrics & Acoustooptics, 2021, 43(2):265-269.
- [14] 张熙, 刘天怡. 载体运动条件下半球谐振陀螺的运动方程[C]. 惯性技术发展动态发展方向研讨会论文集-惯性传感器技术与应用, 2020:216-221.
- ZHANG X, LIU T Y. Motion equation of hemispherical

- resonant gyroscope under carrier motion conditions [C]. Proceedings of the Symposium on the Development Trends and Directions of Inertial Technology-Inertial Sensor Technology and Applications, 2020:216-221.
- [15] 周同,余卓林. 基于刚度轴偏角预估机制的 MEMS 多环谐振陀螺全闭环控制方法 [J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(1):46-54.
- ZHOU T, YU ZH L. Full-closed loop control method of MEMS disk resonant gyroscope based on the stiffness axis declination angle prediction mechanism [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(1):46-54.
- [16] HUO Y, REN SH Q, YI G X, et al. Motion equations of hemispherical resonator and analysis of frequency split caused by slight mass non-uniformity [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(10):2660-2669.
- [17] 黄子军,卞雷祥,李辉,等. 高 Q 值超低功耗谐振式磁传感器的设计与实现 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(5):1-7.
- HUANG Z J, BIAN L X, LI H, et al. Design and fabrication of a resonant magnetic field sensor with high quality factor and low power consumption [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(5):1-7.
- [18] 陈阳. 低成本 MEMS 陀螺频率特性测试方法 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(13):138-142.
- CHEN Y. Test method for frequency characteristics of low cost MEMS gyro [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(13):138-142.
- [19] 郑超,张林,章光建,等. 半球谐振陀螺质量不均匀性调平技术研究综述 [J]. 导航与控制, 2023, 22(4):17-25, 73.
- ZHENG CH, ZHANG L, ZHANG G J, et al. Survey of the research on mass non-uniformity leveling technology of hemispherical resonator gyroscope [J]. Navigation and Control, 2023, 22(4):17-25, 73.
- [20] 刘俊峰,王瑜,杜春阳,等. 半球谐振子超精密修调方法研究 [J]. 精密成形工程, 2024, 16(1):158-166.
- LIU J F, WANG Y, DU CH Y, et al. Method of ultra-precision modification and levelling of hemispherical harmonic resonators [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(1):158-166.
- [21] 王旭. 半球谐振陀螺误差建模补偿与力平衡控制方法研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- WANG X. Error modeling compensation and forces to rebalance control methods study for hemispherical resonator gyro [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [22] 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-precise trimming method for micro hemispherical resonator gyroscopes based on mass-stiffness decoupling [J]. Scientia Sinica (Technologica), 2023, 53(8):1400-1410.
- [23] 赵小明,于得川,姜澜. 基于超快激光技术的半球谐振陀螺点式修调方法 [J]. 中国惯性技术学报, 2019, 27(6): 782-786.
- ZHAO X M, YU D CH, JIANG L, et al. Point-trimming method of hemispherical resonator gyroscope based on ultrafast laser technology [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2019, 27(6): 782-786.
- [24] 南方伯,郜中星,徐睿东,等. 全角半球谐振陀螺控制回路的动态特性研究 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(10):42-49.
- NAN F B, GAO ZH X, XU R D, et al. Research on dynamic characteristics of whole-angle hemispherical resonator gyroscope control circuit [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(10):42-49.
- [25] BASARAB M A, LUNIN B S, MATVEEV V A, et al. Balancing of hemispherical resonator gyros by chemical etching [J]. Gyroscopy and Navigation, 2015, 6(3): 218-223.
- [26] 马特维耶夫(俄罗斯). 固体波动陀螺: 译文集 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- MATVEYEV (Russia). Solid State Wave Gyroscope: Translation Collection [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.

作者简介



王鹏(通信作者), 2004 年于长春理工大学获得学士学位, 2007 年于长春理工大学获得硕士学位, 现为华中光电技术研究所高级工程师, 主要研究方向为半球谐振陀螺技术。

E-mail: wangpeng133@126.com

Wang Peng (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2004, received his M. Sc. degree from Changchun University of Science and Technology in 2007. Now he is a senior engineer in Huazhong Institute of Electro-Optics. His main research interest is hemispherical resonant gyro technology.