

惯性传感器测试质量质心测量装置及方法研究

梁铭涛^{1,2}, 张晟^{1,2}, 刘磊³, 王智^{1,3}

¹中国科学院大学杭州高等研究院基础物理与数学科学学院; ²中国科学院大学;

³中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

摘要: 惯性传感器是空间引力波探测的核心载荷,惯性传感器内的测试质量是惯性和测量基准。测试质量质心、形心偏移会产生杂散力噪声,空间引力波探测对测试质量质心、形心偏移的技术指标要求小于 $3.75\mu\text{m}$ 。由于需要获得测试质量精确的质心位置,并且商用质心测量装置无法满足测试质量质心测量精度需求,因此设计了一种基于五线摆的新型质心测量装置,根据测得的五线摆自由振动频率得到测试质量质心位置。实验结果表明,质心测量精度优于 $\pm 1\mu\text{m}$,满足空间引力波探测惯性传感器测试质量质心测量的精度需求。

关键词: 惯性传感器;测试质量;质心位置;五线摆

中图分类号: TG803;TH124

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2024.03.022

Research on Measuring Device and Method of Mass Center of Test Mass of Inertial Sensor

Liang Mingtao, Zhang Sheng, Liu Lei, Wang Zhi

Abstract: Inertial sensor is the key loads of space gravitational wave detection. The test mass (TM) in the inertial sensor is the inertial and measurement benchmark. The mass center offset from the geometric center of the TM generates stray force noise. Space gravitational wave detection requires less than $3.75\mu\text{m}$ for the mass center offset of the TM. Due to the need to obtain the precise the mass center of the TM, and commercial devices of measuring the mass center cannot meet the measurement accuracy of the mass center of the TM. In this paper, a novel mass center measuring device of a five-wire pendulum is designed, and the position of the mass center of the TM is obtained by measuring the free vibration frequency of the five-wire pendulum. Experimental results show that the measurement accuracy of the mass center of test mass is better than $\pm 1\mu\text{m}$, which satisfies requirements of the measurement accuracy of the mass center of the TM for space gravitational wave detection.

Keywords: inertial sensor; test mass; mass center; five-wire torsion pendulum

1 引言

2015年9月,美国的地面引力波天文台(LIGO)观测到瞬态引力波信号^[1],这是历史上第一次直接探测到引力波。地面引力波探测频段均在10Hz以上的高频段^[2],而在空间中探测中低频段(0.1mHz~1Hz)引力波有更深刻的宇宙学和天文学意义^[3,4]。国内外的空间引力波探测计划主要是美国NASA和欧洲ESA合作的LISA计划^[5]以及中国的太极计划^[6]和天琴计划^[7],均已验证部分关键技术^[8-10]。

太极计划预计发射三颗卫星在太空中组成距离(臂长) $3\times 10^6\text{km}$ 的正三角形编队^[11],每颗卫星携带两个立方体测试质量(Test Mass, TM),三个卫星中的TM两两建立激光链路(见图1)。立方体TM

提供用于反射激光的平坦表面,代替地面引力波探测器的反射镜^[12]。空间引力波探测采用超高精度激光干涉测量系统,以皮米级精度测量两个TM之间的距离变化,从而获取引力波信号。作为惯性和测量基准,惯性传感器是空间引力波探测的核心载荷,主要功能是将TM自由释放到空间中,实现无拖曳控制。同时根据电容位移传感器检测TM在非保守力作用下的加速度扰动,采用静电力控制保证TM沿测地线的平衡。也就是说,施加到TM的噪声要尽可能小,残余加速度噪声必须低于 $3\times 10^{-15}\text{m}/(\text{s}^2\cdot\text{Hz}^{1/2})$ 才能实现空间引力波的探测^[3]。静电力作用于TM质心,电容位移传感检测TM形心。TM质心、形心偏移会产生对TM的杂散力噪声,TM质心、形心偏移的技术指标要求低于 $3.75\mu\text{m}$ 。因此,准确了解TM的质心、形心偏移对空间引力波探测至关重要。

基金项目: 国家重点研发计划(2020YFC2200600)

收稿日期: 2023年1月

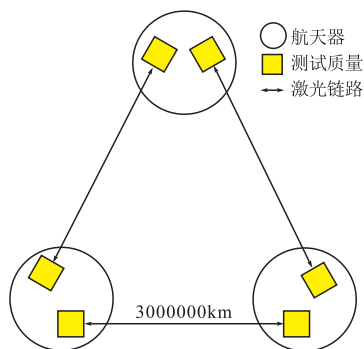


图1 太极计划

目前国内外针对惯性传感器中 TM 质心测量的研究主要采用斯坦福大学开发的两种测量方法。一是 Conklin J. W. 等^[13]开发的专用于确定立方体质量的静态五线摆,精度能达到微米级。静态五线摆通过五根线的位置和方向约束除横向平移外的所有自由度,三角形摆平台有一个边缘带六个标准球体的三角形孔,用于限制立方体 TM。使用激光干涉仪测量摆的平衡位置,可以得到摆平台和立方体 TM 的综合质心位置,立方体在摆台上共有 24 种可能的朝向,每次改变立方体的方向进行测量,可以确定立方体 TM 的空间质心,该方法的数据处理算法以及误差分析过于复杂。二是 Sun K. X. 等^[14]提出的一种测量球体 TM 质心的速度调制技术,精度达到亚微米。在速度调制技术中,球体沿一组平行的轨道滚动,将质心偏移信息转移到滚动速率频谱,通过记录球体穿过五个光门的时间测量球体轨迹。该方法仅针对球形 TM 质心测量,且高度依赖高精度的轨道,同时球体多次滚动测量,由于每次初始位置不同不可避免地会引入较大误差。

目前国内没有专门的惯性传感器 TM 质心测量方面的研究,而商用质心测量方法主要有多点称重法^[15]、不平衡力矩法^[16]和转动惯量法^[17]。多点称重法采用 3 个(或多个)称重传感器共同支撑测量台,质心通过支反力与重力相对基准位置的力矩平衡关系计算得到,王梅宝等^[18]提出了质心测量方法,其测量精度能达到 0.1mm。由于每个传感器要承载约 1/3 的重量,所需量程较大,但分辨率也相应较大,质心测量达到一定精度后难以继续提高。不平衡力矩法是将待测物体安装在由刀口支点支撑的测量台上,物体质心与通过刀口支点的垂直轴线有偏移,会产生一个以物体重力乘偏移量的力矩,该力矩通过力矩传感器测量,可得出待测物质质心位置。李楠等^[19]所设计的质心测量系统最高能达到轴向 0.05mm 的测量精度。由于受力矩测量传感器测量

精度与定位精度的影响,无法满足高精度需求。转动惯量法是将被测物体安装在扭摆(单线摆或三线摆)上测量物体的转动惯量,物体放置在扭摆台面的位置不同,其转动惯量也不同,扭摆转动惯量最小时扭摆的中心轴通过物体质心。温晶晶等^[17]所述三线摆测量质心最大绝对误差为 -0.2mm,但是三线摆无法抑制摆动和平移模式,会产生较大误差。

本文在转动惯量法的基础上,提出一种可以抑制纯扭转外的五线摆旋转测试质量质心的新方法,该方法汲取静态五线摆和动态三线摆两种方法的优点,并利用平行轴定理降低质心测量难度,形成新的测量机构与方法,可以显著提高质心测量精度。

2 质心测量原理及测量装置

2.1 测量原理

以三线摆为例,受约束绕垂直轴纯旋转的扭摆示例如图 2 所示。根据扭摆动力学,扭矩为

$$\tau = I \ddot{\theta} \quad (1)$$

式中, I 为扭摆绕旋转轴的瞬时惯性矩; θ 为旋转角度。

悬丝对扭摆的恢复力为 $-mg\sin\phi$, 其中, m 为扭摆总质量, g 为引力常数。因此,假设 ϕ 为小角度,则 $\sin\phi \approx \phi$, 恢复扭矩为

$$\tau = -mg\phi r \quad (2)$$

式中, r 为从旋转中心到悬丝连接点的距离; ϕ 为悬丝角度变化。

将式(2)与式(1)相结合,可得

$$I \ddot{\theta} = -mg\phi r \quad (3)$$

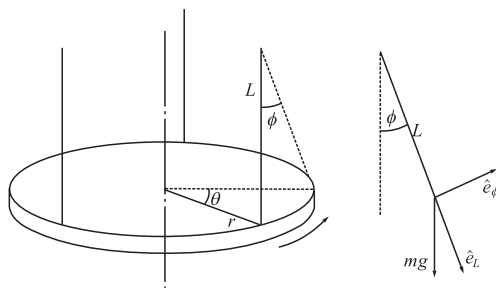


图2 扭摆旋转示例

由弧长相等可知, $r\theta = L\phi$, 其中, L 为扭摆悬丝长度(见图 2)。代入式(3)得到以扭摆旋转角 θ 表示的扭摆运动常微分方程为

$$\ddot{\theta} + \frac{m}{I} \times \frac{g r^2}{L} \theta = 0 \quad (4)$$

因此,运动方程是一个简谐振动方程,其中振荡的固有频率为

$$\omega^2 = \frac{m}{I} \times \frac{gr^2}{L} \quad (5)$$

由于物理系统存在阻尼,系统响应存在阻尼响应。阻尼固有频率 ω_d 与阻尼比 ζ 的关系为

$$\omega_d = \omega \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (6)$$

因此,小阻尼摆的固有频率与系统阻尼的关系不大,摆转动惯量 I 和质量 m 与振荡频率 ω 之间的关系为

$$\frac{I}{m} = \frac{k}{\omega^2} \quad (7)$$

式中, k 为扭转刚度系数, $k = gr^2/L$ 。

用扭摆平台关于旋转轴的转动惯量 I_p 以及测量对象关于旋转轴的转动惯量 I_{TM} 替换式(7)中扭摆关于旋转轴的总转动惯量 I 。根据平行轴定理,将测量对象关于旋转轴的转动惯量 I_{TM} 替换为关于物体质心的转动惯量 I_o 和物体质量 m_o 乘以旋转轴到质心距离平方 d^2 的平行轴分量。总质量 m 用物体的质量 m_o 和摆台的质量 m_p 代替,则有

$$\frac{I}{m} = \frac{I_p + I_{TM}}{m_p + m_o} = \frac{I_p + (I_o + m_o d^2)}{m_p + m_o} = \frac{k}{\omega^2} \quad (8)$$

将式(8)中 ω 对 d 求导,有

$$\omega' = -\frac{m_o k^{\frac{1}{2}} (m_p + m_o)^{\frac{1}{2}}}{[I_p + (I_o + m_o d^2)]^{\frac{3}{2}}} d \quad (9)$$

由式(9)可知,扭摆的固有频率变化量随着质心到旋转轴的距离增加而更加敏感。如图3所示,当测量对象质心形心偏移 δ 的情况下,测量对象到旋转轴的距离 d 随质心绕形心旋转角度 φ 的变化而变化,导致扭摆的固有频率发生变化。

根据余弦定理,式(8)可简化为

$$\frac{I}{m} = \frac{I_p + (I_o + m_o d^2)}{m_p + m_o} = \frac{I_p + I_o + m_o (R^2 + \delta^2 - 2R\delta \cos \varphi)}{m_p + m_o} = \frac{k}{\omega^2} \quad (10)$$

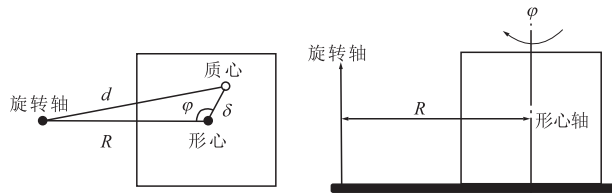


图3 质心测量扭摆配置

如图4所示,从初始位置 φ 开始,逐次将物体绕形心顺时针旋转 $\pi/2$ 以改变旋转角度 φ_i ,可以得到4个不同的扭摆固有频率 ω_i 。

将 φ_i 和 ω_i 分别代入式(10),消去扭摆平台关于旋转轴的转动惯量 I_p 和测量对象关于质心的转动惯量 I_o ,可以得到

$$4R\delta \sin \varphi = \frac{k(m_p + m_o)}{m_o} \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_4^2} \right) \quad (11)$$

$$4R\delta \cos \varphi = \frac{k(m_p + m_o)}{m_o} \left(\frac{1}{\omega_3^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \quad (12)$$

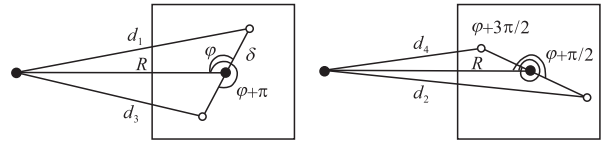


图4 质心测量原理

式(11)与式(12)相除得到

$$\tan \varphi = \left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_4^2} \right) / \left(\frac{1}{\omega_3^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \quad (13)$$

将 φ 值代入式(13)得到

$$\delta = \frac{k(m_p + m_o)}{4Rm_o} \times \frac{\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_4^2}}{\sin \left\{ \arctan \left[\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_4^2} \right) / \left(\frac{1}{\omega_3^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \right] \right\}} \quad (14)$$

因此,只需要测量出扭摆绕旋转轴纯旋转的固有频率 ω 就可以求出质心偏移 δ 。需要注意的是,为了确定三维空间内的未知质心位置,需要重复测量,即单个平面内的测量配置条件不变,然后在其他平面上重复测量。

2.2 扭摆基频及质心测量所需频率测量分辨率

由于实验室地面振动噪声在 3Hz 以上的频段 (10Hz 和 30Hz), 为了避开地面噪声对扭摆的影响, 设计扭摆固有频率应低于 3Hz, 考虑过低的固有频率会导致悬丝长度过大, 使得装置加工装配困难且增加不稳定性。最终确定五线摆的固有频率 $f = 2.5\text{Hz}$ 。

由于悬丝长度越短, 摆刚度随悬丝直径的增大而增大, 固有频率增大, 因此悬丝的直径应尽可能小, 由式(5)可以得到

$$f = \frac{r}{2\pi} \sqrt{\frac{mg}{IL}} \quad (15)$$

测试质量样件为体积 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 、质量 $m_o = 0.351\text{kg}$ 的立方体铝块, 基于此设计合适大小且质量尽可能轻的扭摆平台参数 (见表1)。根据式(15)可以得到扭摆悬丝长度为 180mm。

表1 扭摆平台参数

参数	数值
质量 m_p	0.661kg
半径 r	160mm
转动惯量 I_p	4873kg·mm ²
物体形心与旋转轴距离 R	75mm

对于所需的频率分辨率范围, 考虑质心位于 $\varphi_1 = 0$ 和 $\varphi_2 = \pi$ 的两个极端情况。将其代入公式

(10) 作商,可以得到

$$\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right)^2 = \frac{I_p + I_o + m_o(R^2 + \delta^2 - 2R\delta\cos\varphi_1)}{I_p + I_o + m_o(R^2 + \delta^2 - 2R\delta\cos\varphi_2)} \quad (16)$$

化简后有

$$\frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_1} = \frac{\Delta\omega}{\omega_1} = \left(\frac{I_p + I_o + m_o(R^2 + \delta^2 - 2R\delta\cos\varphi_1)}{I_p + I_o + m_o(R^2 + \delta^2 - 2R\delta\cos\varphi_2)}\right)^{\frac{1}{2}} - 1 \quad (17)$$

将扭摆平台及测试质量参数代入式(17)可知,测量 $1\mu\text{m}$ 的质心偏移需要大约 10^{-5} 的频率分辨率(见图 5)。

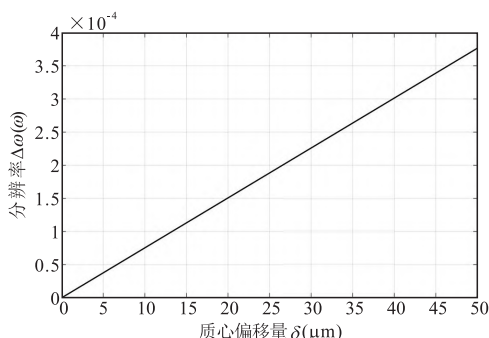
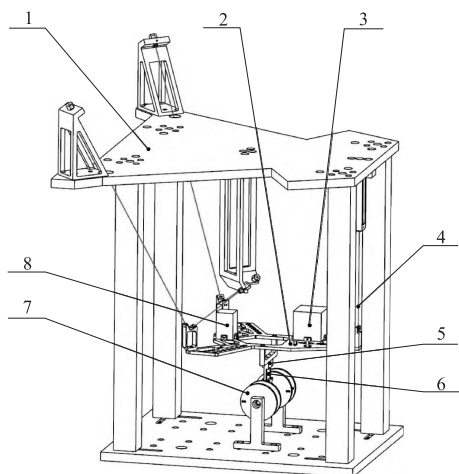


图 5 质心测量所需频率分辨率

2.3 质心测量装置

测试质量质心测量的关键在于设计一个产生绕固定轴纯旋转的扭摆,该扭摆提供了测量质心位置的能力。三线摆不限制摆动和横向平移,为了提高标准三线摆的精度,需要限制横向摆模式。本文提出的五线摆测量质心的新装置(见图 6)可以限制摆动或横向平移,产生一个围绕固定旋转中心单自由度的纯旋转。



1. 基座框架 2. 五线摆平台 3. 测试质量 4. 钨丝
5. 磁铁及反射镜安装架 6. 反射镜 7. 激励线圈 8. 配重

图 6 五线摆质心测量装置结构

五根线足以约束除一个纯旋转自由度以外的所有自由度。在五线摆中,按图 7 所示额外布置两条

线,以最大程度限制摆动和横向平移,减少由摆动(倾斜)和水平平移自由度引起的误差。

扭摆平台上的三个连接点与旋转中心等距,其中一个连接点使用一根垂直悬丝连接,另外两个连接点各由两根悬丝组成,五根悬丝组成的几何结构关于通过垂直悬丝和旋转中心的平面对称。每个连接点展开的悬丝水平分量提供水平刚度,以防止扭摆平台摆动,即两处双线连接点的连接位置在摆平台平面内相隔 90° ,单个双线连接点处的两条线以 90° 展开。连接悬丝确保每个悬丝连接点的曲率恒定,迫使摆平台绕特定的垂直轴旋转,因此,平台的旋转中心由悬丝的几何形状决定,消除了摩擦引起的不确定性。

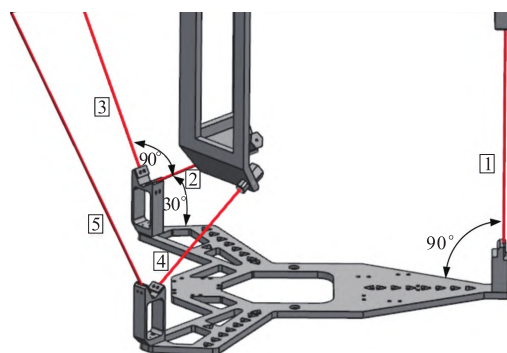
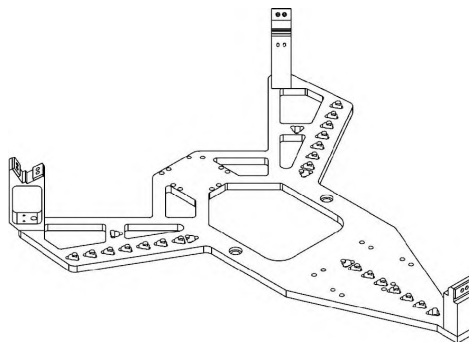
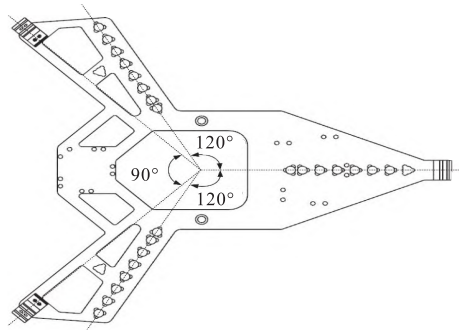


图 7 五线摆悬丝几何结构

五线摆平台是五线扭摆的关键部件,以一种特定方式连接五根悬丝,从而实现绕固定轴纯旋转运动,并为固定测量对象、校准平台提供基础。摆平台需要确保对称的几何形状,图 8 为其 UG 模型,为了帮助平台产生纯粹的旋转,整个摆平台的质心与所需旋转中心重合,从 UG 设计模型来看,系统的设计质心与预期旋转中心的误差在 0.02mm 范围内。球体通过许多校准孔可在平台上重复定位,每组三个校准孔与扭摆旋转中心等距,校准孔位置沿从平台质心发出的 120° 径向线以对称方式定位,确保质心不会因校准球位置的变化而移动。



(a) 等轴侧视图



(b) 俯视图

图8 五线摆 UG 模型

弹性模量和热膨胀系数决定了悬丝的静态长度,悬丝需要较高的弹性模量,以减少悬丝在负载下的拉伸,而较低的热膨胀系数使温度波动对悬丝长度变化的影响较小,因此可以降低扭摆固有频率对温度的依赖性。不同材料的弹性模量 E 和热膨胀系数 α 见表2,钨的弹性模量和热膨胀系数值更符合要求,因此选择钨丝作为扭摆悬丝。

表2 各种材料性能

材料	弹性模量 E (GPa)	298K 的热膨胀系数 α ($10^{-6}/K$)
纯钨	345	4.5
弹簧钢 1085	210	14.7
黄铜 C260	117	19

对于五线摆,需要匹配每根悬丝的拉伸,使平台负载的变化仅导致位置的垂直变化,确保平台负载和空载之间旋转轴的恒定。

根据材料力学理论可知,施加的载荷 F 和悬丝伸长量 ΔL 之间的关系为

$$F_i = \frac{E_i A_i}{L_i} \Delta L_i \quad (18)$$

式中, A_i , E_i , L_i 分别为悬丝横截面积、弹性模量、长度 ($i = 1, 2, 3$, 分别指短线、垂直线、长线)。

由于需要保证负载下每种悬丝伸长量的垂直分量相等(见图9),因此悬丝长度伸长量 ΔL_i 之间的关系为

$$\Delta L_1 = \frac{1}{2} \Delta L_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \Delta L_3 \quad (19)$$

三种悬丝均采用钨丝,弹性模量 $E_1 = E_2 = E_3$,则由式(16)和式(17)可得

$$\frac{F_1 L_1}{A_1} = \frac{F_2 L_2}{2A_2} = \frac{F_3 L_3}{\sqrt{3}A_3} \quad (20)$$

式中, F_i 为悬丝上的拉力, $i = 1, 2, 3$ 。

根据静力学原理,可以得到对每根悬丝施加 1kg 负载而产生的张力为 $F_1 = 1.5N$, $F_2 = 4.1N$, $F_3 = 2.5N$ 。

三种悬丝的尺寸参数见表3。对五线摆质心测

量装置进行有限元仿真(见图10),仿真结果显示,五线摆一阶模态频率为 2.54Hz,绕固定轴纯旋转振动,与理论设计基本一致。

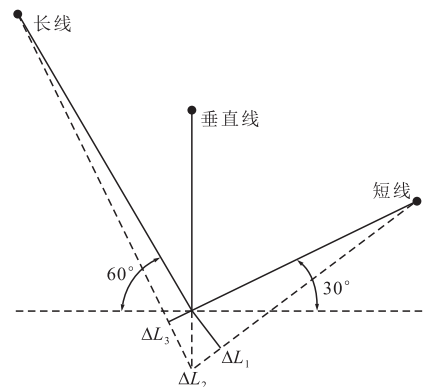


图9 三种悬丝伸长量几何关系

表3 三种悬丝尺寸参数 (mm)

悬丝种类	长度	直径
短线	120	0.13
垂直线	180	0.19
长线	480	0.26

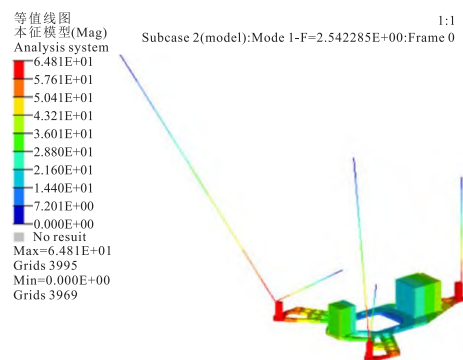


图10 五线摆有限元仿真

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

实验平台包括五线摆质心测量装置、自准直仪和光学精密隔振平台。在光学精密隔振平台上安装五线摆质心测量装置和自准直仪,使自准直仪对准固定在五线摆旋转轴上的反射镜。在反射镜下方固定一个永磁体,磁铁由两个线圈包围,线圈通电时产生磁场,从而在平台上产生扭矩,线圈断电时迫使五线摆产生自由扭转振动。通过自准直仪实时测量反射镜的振幅,将测得数据进行拟合得出五线摆的扭转振动曲线。

3.2 五线摆振动曲线

根据自准直仪采集的角度数据绘制五线摆振动曲线(见图11),进行时域数据非线性曲线拟合,并

提取出扭摆振动频率。

已知扭摆的响应为阻尼简谐运动方程为

$$\theta(t) = A_0 e^{-\zeta \omega_n t} \cos(\omega_d t + \phi) + dc \tag{21}$$

式中, A_0 为振荡的初始振幅; ζ 为阻尼系数; ω_d 为阻尼固有频率; ω_n 为固有频率; ϕ 为相位; dc 为初始自准直仪角度相对于零的偏移量。

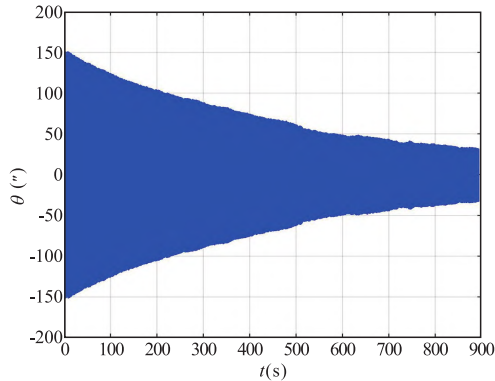


图 11 五线摆扭转振动曲线

3.3 实验结果

根据前文所述测量原理, 分别在 $\varphi_i (\varphi, \varphi + \pi/2, \varphi + \pi, \varphi + 3\pi/2)$ 的四个方向测量 10 次五线摆振动频率并求平均值, 测量结果如图 12 所示。

根据所测得 4 组的频率求出各组的频率平均值和标准差 (见表 4), 将频率平均值代入式 (14) 得出的质心偏移 $\delta = 13.58 \mu\text{m}$ 。

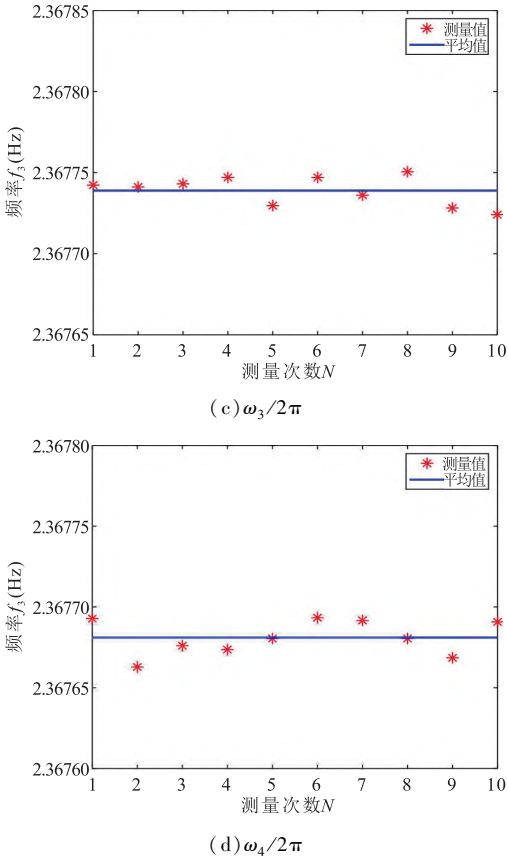
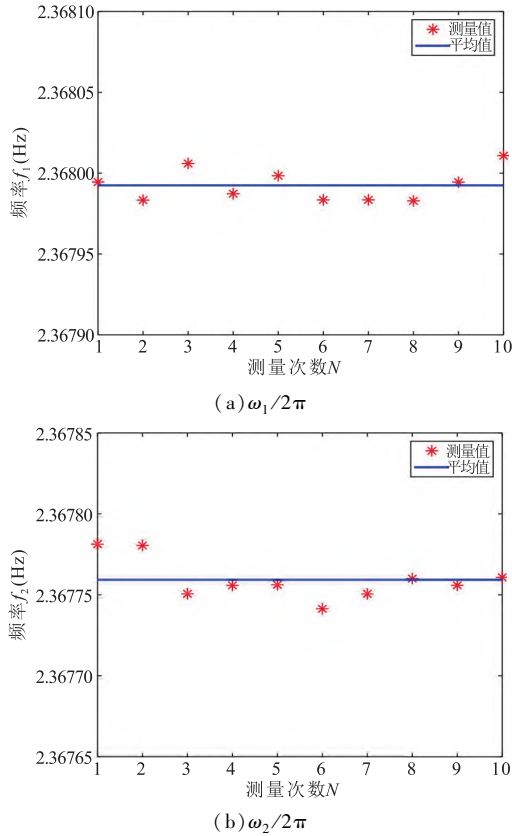


图 12 四组测量频率及平均值

表 4 四组测量频率平均值及标准差

组次	$\omega_1/2\pi$	$\omega_2/2\pi$	$\omega_3/2\pi$	$\omega_4/2\pi$
平均值 f_i (Hz)	2.367992	2.367759	2.367739	2.367681
标准差 σ_i (Hz)	1.0×10^{-5}	1.3×10^{-5}	0.9×10^{-5}	1.1×10^{-5}

整理四组频率测量结果, 根据式 (14) 求出对应的质心偏移 (见表 5)。10 次测量的质心偏移平均值 $\bar{\delta} = 13.61 \mu\text{m}$, 标准差 $\sigma = 0.86 \mu\text{m}$ 。

表 5 四组 10 次质心偏移测量结果

次序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\delta_i (\mu\text{m})$	13.68	13.78	13.98	12.99	14.29	12.35	13.01	12.62	14.34	15.10

3.4 质心测量误差分析

根据质心的测量原理可知, 固有频率测量精度、旋转中心到测试质量形心距离 R 测量精度、测试质量和扭摆平台的质量测量精度是误差的主要来源。

根据质心求解式 (14), 可以令

$$\delta = \frac{k}{4} \times \frac{1}{R} \times \frac{m}{m_0} \times \frac{\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_4^2}}{\sin \left\{ \arctan \left[\left(\frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_4^2} \right) / \left(\frac{1}{\omega_3^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \right] \right\}}$$
$$= \frac{k}{4} r(R) M(m, m_0) \Omega(\omega_i) \tag{22}$$

频率测量最大误差对质心测量产生的最大误差为 Δ_1 , 由于五线摆频率测量的标准差为 σ_i , 取置信

概率为 0.95,五线摆频率的置信区间为 $(f_i - 2\sigma_i, f_i + 2\sigma_i)$, 因此有

$$\Delta_1 = \frac{k}{4}r(R) \times M(m, m_0) \times \{\Omega[(f_i \pm \sigma_i) \times 2\pi] - \Omega(\omega_i)\} \\ = \frac{k}{4}r(R)M(m, m_0)\Delta\Omega = \pm 0.657\mu\text{m} \quad (23)$$

五线摆旋转轴与测试质量形心的距离 R 的测量误差为 ΔR , 对质心测量产生的最大误差为 Δ_2 , 由于三坐标测量机的测量精度为 0.01mm, 有

$$\Delta_2 = \frac{k}{4}[r(R \pm \Delta R) - r(R)] \times M(m, m_0) \times \Omega(\omega_i) \\ = \frac{k}{4}M(m, m_0)\Omega(\omega_i)\Delta R = \pm 1.7 \times 10^{-3}\mu\text{m} \quad (24)$$

测试质量和扭摆平台的质量测量误差 Δm_0 和 Δm 对质心测量产生的最大误差 Δ_3 , 由于质量测量仪器的精度为 0.001kg, 有

$$\Delta_3 = \frac{k}{4}r(R)[M(m \pm \Delta m, m_0 \pm \Delta m_0) - M(m, m_0)]\Omega(\omega_i) \\ = \frac{k}{4}r(R)\Omega(\omega_i)\Delta M = \pm 0.049\mu\text{m} \quad (25)$$

综上, 最大质心误差 Δ 为

$$\Delta = \frac{k}{4}[r(R \pm \Delta R)M(m \pm \Delta m, m_0 \pm \Delta m_0) \\ \Omega[(f_i \pm \sigma_i) \times 2\pi] - r(R)M(m, m_0)\Omega(\omega_i)] \quad (26)$$

$$\Delta = \sum_{i=1}^3 \Delta_i + \Delta_1 \frac{\Delta M}{M} + \Delta_2 \frac{\Delta \Omega}{\Omega} + \Delta_3 \frac{\Delta r}{r} + \Delta_1 \frac{\Delta M \Delta r}{M r} \leq 1\mu\text{m} \quad (27)$$

最大质心误差 0.95 的概率不超过 $\pm 1\mu\text{m}$, 与实验结果具有高度一致。

4 结语

本文基于转动惯量法提出一种新型的五线摆质心测量装置及方法, 并描述了主体机构和测量原理, 其目的是产生围绕固定轴的纯旋转。将测试质量放置在五线摆平台远离旋转轴的位置, 改变相对于五线摆旋转轴具有固定位置的测试质量的方向, 由于平行轴定理会放大测试质量质心偏移导致的五线摆整体固有频率变化, 根据自准直仪测得的五线摆自由振动频率, 得出测试质量的质心形心偏移。本文所述方法兼具静态五线摆和动态三线摆两种方法的优点, 并利用平行轴定理降低了质心测量难度。采用样件进行测量实验, 其结果具有良好的一致性, 测量精度优于 $\pm 1\mu\text{m}$ 。

参考文献

[1] Abbott B P, Abbott R, Abbott T D, et al. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116(6): 061102.

[2] 王登峰, 姚鑫, 焦仲科, 等. 面向天基引力波探测的时间延迟干涉技术[J]. 中国光学, 2021, 14(2): 275-288.

[3] Wang Yukun, Qi Keqi, Wang Shaoxin, et al. Capacitive sensing and electrostatic control system design and analysis with a torsion pendulum[J]. IEEE Access, 2020, 8: 1021-1030.

[4] 刘志国, 朴云松, 乔从丰. 多波段引力波宇宙研究和空间太极计划[J]. 现代物理知识, 2016, 28(5): 28-33.

[5] Pitkin M, Reid S, Rowan S, et al. Gravitational wave detection by interferometry (ground and space)[J]. Living Reviews in Relativity, 2011, 14(5): 1-75.

[6] 罗子人, 张敏, 靳刚, 等. 中国空间引力波探测“太极计划”及“太极 1 号”在轨测试[J]. 深空探测学报, 2020, 7(1): 3-10.

[7] Milyukov V K. TianQin space-based gravitational wave detector: key technologies and current state of implementation[J]. Astronomy Reports, 2020, 64(12): 1067-1077.

[8] Bachman B, Vine G D, Dickson J, et al. Flight phasemeter on the laser ranging interferometer on the GRACE follow-on mission[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2017, 840(1): 012011.

[9] Wang Zhi, Lei J G. Development and on orbit test of Taiji-1 inertial reference[J]. International Journal of Modern Physics A, 2021, 36: 2140008.

[10] Luo J, Bai Y Z, Cai L, et al. The first round result from the TianQin-1 satellite[J]. Classical and Quantum Gravity, 2020, 37(18): 185013.

[11] Li H D, Wang Z, Taiji scientific collaboration. Implementation of high-precision inertial reference for Taiji-1 satellite and its ground evaluation based on torsion pendulum system[J]. International Journal of Modern Physics A, 2021, 36(11n12): 2140010.

[12] 王智, 马军, 李静秋. 空间引力波探测计划 - LISA 系统设计要点[J]. 中国光学, 2015, 8(6): 980-987.

[13] Conklin J W, Swank A, Sun K X, et al. Mass properties measurement for drag-free test masses[J]. Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing, 2009, 154(1): 012019.

[14] Sun K X, Buchman S, Byer R, et al. Modular gravitational reference sensor development[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2009, 154: 012026.

[15] 王佳昌, 于海莲, 余纬, 等. 小角度翻转法质量质心测量及误差分析[J]. 工具技术, 2020, 54(2): 82-87.

[16] 丛培田, 佟林, 韩辉. 新型质心测量系统及测量方法研究[J]. 工具技术, 2015, 49(2): 86-89.

[17] 温晶晶, 邓聃, 汤海亮, 等. 动力总成惯性参数快速一体化测试系统研究[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(2): 351-360.

基于机器视觉的铆接孔几何参数测量

郝博^{1,2}, 徐新岩¹, 闫俊伟¹

¹ 东北大学航空动力装备振动及控制教育部重点实验室; ² 东北大学秦皇岛分校控制工程学院

摘要: 为解决传统方法测量铆接孔几何参数效率低、准确性差等问题,提出基于机器视觉的铆接孔几何参数测量方法。该方法使用 CCD 相机采集孔的特征信息,通过灰度处理、双边滤波及直方图均衡化,降低颜色、噪声对图像的影响,使用粒子群算法优化 Otsu 双阈值分割提取感兴趣区域。使用 Zernike 矩亚像素边缘检测代替传统边缘检测算法,提高边缘检测精度,再通过形态学处理弥补像素损失。采用改进随机 Hough 变换(Improved Randomized Hough Transform, IRHT)提取特征,实现孔的中心坐标和半径测量,利用像素当量标定,将像素测量值转化为物理尺寸。经实验验证,该方法测量两孔间距误差小于 2%,测量半径为 2mm 的铆接孔误差小于 4%,优于质心法、圆拟合等传统测量方法。

关键词: 机器视觉;图像处理;亚像素边缘检测;改进随机 Hough 变换

中图分类号: TG806;TH131.1

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2024.03.023

Measurement of Rivet Hole Geometric Parameters Based on Machine Vision

Hao Bo, Xu Xinyan, Yan Junwei

Abstract: In order to solve the problems of low efficiency and poor accuracy of the traditional rivet hole geometric parameter measurement method, a method based on machine vision is proposed. The hole characteristic information is captured by CCD industrial camera. Gray processing, bilateral filter and histogram equalization are used to reduce the influence of color and noise on the image. Particle swarm optimization Otsu dual-threshold segmentation is used to extract the region of interest. Zernike moment subpixel edge detection is used to improve the edge detection accuracy instead of the traditional edge detection algorithm. The previous pixel loss is compensated by morphological processing. Improved Randomized Hough Transform (IRHT) is used to measure the center coordinate and radius of the hole by extracting the features of the hole. Finally, pixel equivalent calibration is used to convert the measured pixel values into physical dimensions. The experimental results show that the error of hole spacing measured by this method is less than 2%, and the error of the rivet hole with 2mm radius is less than 4%, which is better than the traditional detection methods such as centroid algorithm and circle fitting.

Keywords: machine vision; image processing; sub-pixel edge detection; improved randomized Hough transform

1 引言

随着机器视觉技术的不断发展,其在产品尺寸检测领域的应用逐渐受到重视^[1]。在尺寸测量领域,机器视觉技术具有显著优势^[2]。基于机器视觉的尺寸测量属于非接触式测量^[3],可以测量零件的尺寸、圆度、同心度、平面度等几何参数^[4]。数字图

像处理和模式识别等技术的逐步完善也极大促进了机器视觉在尺寸测量中的应用^[5]。

飞机制造过程中大量应用螺栓连接和铆接^[6],因此对孔的尺寸精度要求较高。利用千分尺、塞规等测量工具对孔的几何参数进行测量,存在工人操作因素影响大、可靠性差、效率低等问题^[7],无法满足大量高精度尺寸测量需要。因此机器视觉参数测量方法开始逐步取代传统人工测量^[8]。

近年来,国内外学者对孔的几何参数测量进行了大量研究。石循磊等^[9]利用激光传感器输出铈

基金项目: 装备预先研究领域基金(61409230125)
收稿日期: 2022 年 12 月

[18] 王梅宝, 张晓琳, 陈莉, 等. 多点称重法测量质心误差修正[J]. 计量学报, 2022, 43(8): 1058-1063.

[19] 李楠, 骆旭, 王丽, 等. 高精度质心测量系统设计与分析[J]. 计测技术, 2021, 41(4): 44-48.

第一作者: 梁铭涛, 硕士研究生, 中国科学院大学杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 310024 杭州市

First Author: Liang Mingtao, Postgraduate, School of Funda-

mental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China

通信作者: 王智, 研究员, 中国科学院大学杭州高等研究院基础物理与数学科学学院, 310024 杭州市

Corresponding Author: Wang Zhi, Researcher, School of Fundamental Physics and Mathematical Sciences, Hangzhou Institute for Advanced Study, UCAS, Hangzhou 310024, China