

回转误差双目视觉同步测量方法

孙岩辉^{1,2}, 于欣萍¹, 赵强强³, 吕景祥¹, 张弛¹, 惠记庄¹, 李小虎³, 洪军³

(1. 长安大学道路施工技术与装备教育部重点实验室, 710064, 西安; 2. 秦川机床工具集团股份公司, 721008, 陕西宝鸡; 3. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对现有回转误差测量方法调试复杂、结果单一等问题, 提出基于双目视觉的绝对坐标测量方法, 实现了精密旋转轴系五自由度回转误差的精准同步测量。采用双目视觉系统, 捕捉靶标随轴系运动的图像信息, 通过亚像素级边缘检测、最小二乘中心拟合及三维坐标重建, 精准获取靶标球心在世界坐标系中的绝对坐标轨迹; 以靶标轴线平均线为参考, 构建评价坐标系, 提出面向绝对坐标轨迹的回转误差评价模型, 实现了对精密旋转轴系回转误差的量化评估。研究结果表明: 不同转速下, 所提方法测得的各项回转误差均能与对比方法良好吻合, 径向回转误差最大测量偏差为 $5.3\ \mu\text{m}$, 偏差百分比为 18.5%; 轴向回转误差最大测量偏差为 $1.5\ \mu\text{m}$, 偏差百分比为 11.8%; 倾斜回转误差最大测量偏差为 0.0041° , 偏差百分比为 8.1%。各项测量偏差均在估算的测量不确定度范围内, 这表明本文提出的双目视觉测量方法具有较高可靠性, 该研究为旋转轴系几何精度特性监测提供了一种解决方案。

关键词: 双目视觉; 绝对坐标轨迹; 五自由度回转误差; 回转误差评价模型; 同步测量

中图分类号: TH161+.21 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202608017 **文章编号:** 0253-987X(2026)08-0193-12

Binocular Vision-Based Synchronous Measurement Method for Rotational Errors

SUN Yanhui^{1,2}, YU Xinping¹, ZHAO Qiangqiang³, LÜ Jingxiang¹,
ZHANG Chi¹, HUI Jizhuang¹, LI Xiaohu³, HONG Jun³

(1. Key Laboratory of Road Construction Technology and Equipment of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Qinchuan Machine Tool & Tool Group Co., Baoji, Shaanxi 721008, China;
3. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To address the problems of complex adjustment and limited outcomes associated with existing rotational error measurement methods, an absolute coordinate measurement method based on binocular vision was proposed to enable accurate and synchronous measurement of the five-degree-of-freedom (5-DOF) rotational errors of precision rotary axes. A binocular vision system was adopted to capture the images of the target as it moves with the rotary axis. The absolute coordinate trajectories of the target spherical centers in the world coordinate system were accurately obtained through sub-pixel edge detection, least-squares center fitting, and three-dimensional coordinate reconstruction. An evaluation coordinate system was constructed with

收稿日期: 2025-11-05。 作者简介: 孙岩辉(1989—), 男, 讲师; 赵强强(通信作者), 男, 副教授, 硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金联合基金资助项目(U24B2062)。

网络出版时间: 2026-03-30

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/61.1069.t.20260327.1413.002>

reference to the average axis line of the target, and a rotational error evaluation model based on absolute coordinate trajectories was developed to quantify the rotational errors of the precision rotary axis. The results show that all rotational errors measured by the proposed method at different rotational speeds are in good agreement with those obtained by the comparison method: the maximum measurement deviation of radial rotational error is $5.3\ \mu\text{m}$, corresponding to a deviation percentage of 18.5%; the maximum measurement deviation of axial rotational error is $1.5\ \mu\text{m}$, corresponding to a deviation percentage of 11.8%; the maximum measurement deviation of tilt rotational error is 0.004° , corresponding to a deviation percentage of 8.1%. All measurement deviations lie within the estimated range of measurement uncertainty, indicating that the proposed binocular vision measurement method exhibits high reliability. This research provides a solution for the geometric accuracy assessment of rotary axes.

Keywords: binocular vision; absolute coordinate trajectory; five-degree-of-freedom rotational errors; rotational error evaluation model; synchronous measurement

精密旋转轴系作为测量仪器、半导体制造、精密加工等高端领域的核心基础部件,其回转精度直接决定了设备的加工精度和运行稳定性^[1]。例如,在半导体晶圆划片工艺中,轴系的径向回转误差可能导致划片深度不均,从而造成晶圆碎裂或切割不彻底;在惯性导航器件加工中,轴系的角度摆动误差会直接影响器件的姿态测量精度^[2]。因此,对精密旋转轴系回转误差的精准、高效测量,是保障高端制造装备性能的关键环节。

旋转轴系回转误差的测量本质是检测轴系回转过程中,瞬时轴线与理想轴线的偏差,其核心挑战在于如何从测量信号中分离轴系自身误差与外界干扰(如标准件形状误差、安装偏心等),并同步获取多自由度误差信息^[1,3]。早期研究中,基于位移传感器的多点法^[1]、反转法^[4]、多步法^[5]等技术通过传感器在时空域的协同测量实现误差分离。但这类方法^[6-7]要求精密装调传感器,且需要对检测数据进行误差分离^[8]。此外,这类方法存在的传感器性能不一致等问题^[9],还会影响测量结果的准确性。因此,如何有效布置传感器,实现误差的精准分离,是这类方法一直以来的研究重点。

随着光学技术的发展,激光干涉测量因其高精度、非接触的特性被越来越多地应用于回转误差测量。该方法通常以光干涉为核心测量手段,通过检测光的干涉现象实现微小位移或形貌的高精度感知^[6,9-13],进而测量出回转轴系的多自由度回转误差。关裕等^[14]设计了双频激光干涉多光路系统,通过坐标转换,实现了空间位置变化的测量,验证了光学方法在高精度测量中的潜力。Ma等^[15]提出的基于半导体激光的测量系统,实现了旋转轴六自由度

回转误差的测量。温洪泉等^[16]提出的六自由度误差同时测量方法,通过多光路协同,实现了旋转轴回转误差的测量。然而,由于光学系统调试复杂、对环境振动敏感、成本普遍偏高等原因,限制了此类方法在工业环境中的应用。

近年来,机器视觉技术因其非接触、动态响应快、可同时获取多维信息等优势,成为旋转轴系误差测量的新方向。金岸等^[2,17]提出了基于靶标轨迹追踪的测量方法,通过工业相机捕捉靶标运动轨迹,实现了高速轴系径向误差的测量。袁德亮等^[18]基于显微视觉技术,通过亚像素级特征提取,改善了误差测量的分辨率,实现了转子径向回转误差的测量。靶标轨迹追踪法^[8,15,19-21]是视觉测量中最常用的方法,该方法主要聚焦于径向误差测量,鲜见用于其他方向回转误差的测量。由此可见,现有视觉测量方法主要用于径向回转误差的测量,结果较为单一,限制了其对轴系回转精度的整体掌握。

针对上述问题,本文聚焦于精密旋转轴系的五自由度回转误差的同步测量,提出一种双目视觉的同步测量方法。该方法以双球靶标为特征载体,通过图像亚像素边缘检测、最小二乘中心拟合、三维坐标重建,捕捉其特征点(即靶标球心)运动的绝对坐标轨迹,最终结合以平均回转轴线为参考构建的误差评价模型,全面量化评估径向、轴向及倾斜回转误差。

1 五自由度回转误差双目视觉测量系统及原理

如图1所示, x 、 y 、 z 为世界坐标系的3个坐标轴,可通过测量系统等确定其位置与方向。轴系旋转

过程中,其回转轴线的误差运动包括径向误差运动、轴向误差运动以及倾斜误差运动^[22]。回转误差即对误差运动的定量评估,包括:径向运动误差 E_{CX} 和 E_{CY} 、轴向运动误差 E_{CZ} 以及倾斜运动误差 E_{CA} 和 E_{CB} 。

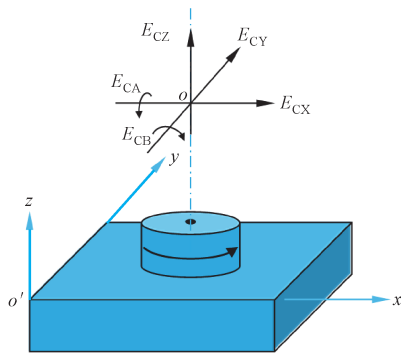


图 1 回转轴线的误差运动

Fig. 1 Error motions of the rotation axis

1.1 测量系统架构与原理

精密旋转轴系五自由度回转误差的双目视觉同步测量原理如图 2 所示,测量系统总体分为图像数据采集和数据处理 2 大模块。

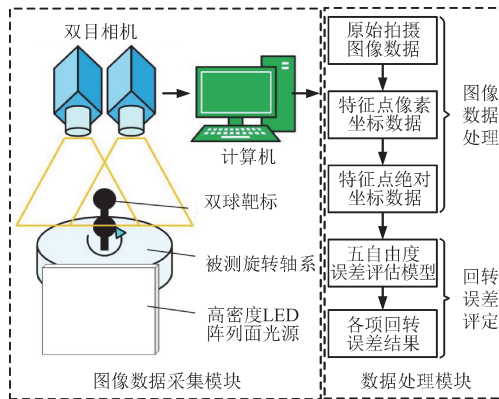


图 2 精密旋转轴系五自由度回转误差的双目视觉测量原理
Fig. 2 Binocular vision measurement principle for five-degree-of-freedom rotational errors of precision rotary axes

图像数据采集模块包括:双目相机、高精度双球靶标、高密度发光二极管(LED)阵列面光源以及被测精密旋转轴系。其中,双目相机呈水平平行布置,并通过调整其光学参数,确保靶标的完整清晰成像。发光面积显著大于靶标尺寸的高密度 LED 阵列面光源,作为背光源,既能避免靶标镜面反射的影响,又可确保获得清晰的边缘图像。

数据处理模块分为图像数据处理和回转误差评定两部分。图像数据处理部分是通过边缘提取、最

小二乘中心拟合等方法处理原始拍摄图像,从而得到靶标特征点的像素坐标,并通过三维坐标的重建,计算特征点在世界坐标系中的绝对坐标轨迹。回转误差评定部分是以靶标的平均回转轴线为参考,建立评价坐标系,从而构建五自由度回转误差评价模型,并通过对特征点绝对坐标轨迹的处理,实现各项回转误差的量化评估。

1.2 HALCON 双目标定

本文采用具备亚像素级特征提取能力的 HALCON 算子,以及与算子库完全兼容的标准圆点阵列标定板进行双目相机的标定,从而保障视觉系统的测量精度。

为避免图像过曝对标定板角点检测质量的影响,在执行标定算法前,须先检测每组标定图像的质量。具体检测流程如图 3 所示,因高精度测量需要,本文将移除过曝面积超 0.01% 的标定图像。实验所使用的相机,其分辨率为 1 440 像素×1 080 像素,过曝阈值为 155.52 像素,圆整后取 160 像素。

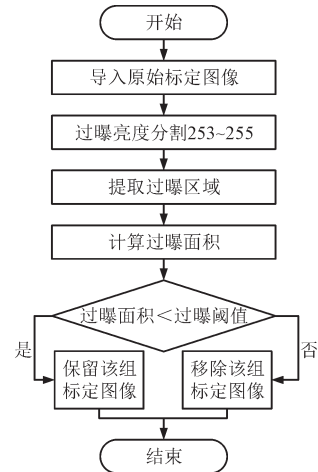


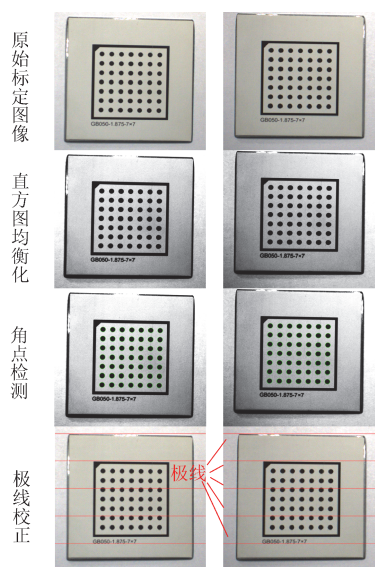
图 3 标定图像过曝检测流程

Fig. 3 Calibration image overexposure detection process

筛选后的标定图像处理过程如图 4 所示。由图可知,通过对原始标定图像进行直方图均衡化处理,从而有效提升图像全局对比度,改善图像质量;而后以 HALCON 算子完成角点检测,获得角点信息以及相机的内外参数;最终根据标定参数对图像进行极线校正,检查标定结果。

1.3 特征点绝对空间坐标的提取

靶标图像是左右相机在转台不同转动角度处所拍摄。若要提取图像中特征点的绝对空间坐标,需进行 3 个步骤:图像预处理、特征点像素坐标提取和特征点的三维坐标重建。



(a)左相机拍摄 (b)右相机拍摄

图 4 标定图像处理过程

Fig. 4 Calibration image processing process

1.3.1 图像的预处理

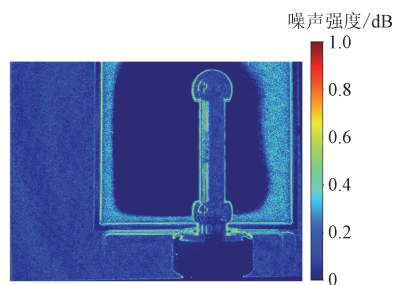
根据双目标定结果,对原始图像进行校正,并消除其中的畸变以及由相机内参、外参误差引发的几何变形,从而保证图像中,像素坐标与物理空间三维坐标映射关系的准确无误。而后,采用双边滤波对校正后的图像进行处理以提升图像质量。双边滤波可在去除噪声的同时保留边缘细节,去噪前后的对比如图 5 所示。由图可知,峰值信噪比为 45.92 dB,大于 30 dB,去噪效果良好,而且结构相似性为 0.98,在 0.95 以上,结构保留极好。



(a)校正结果



(b)双边滤波去噪结果



(c)噪声残留热力图

图 5 双边滤波去噪效果对比

Fig. 5 Comparison of bilateral filtering denoising effects

由于光线在球体表面的入射角与反射角存在差异,致使球体边缘区域产生镜面高光带,如图 6(a)所示。该区域与真实几何边缘灰度梯度的方向不一致,会导致检测到伪边缘点,从而影响测量结果准确性。为了简化信息,突出边缘特征,提高解算效率及精度,对去噪后的图像进行感兴趣区(ROI)处理:选择图像中靶标的圆轮廓区域为 ROI 区域,包括上圆轮廓 ROI 区域和下圆轮廓 ROI 区域。而后,以固定阈值法对 ROI 区域进行二值化处理,有效保留目标边缘,同时抑制背景噪声,固定阈值法的表达式为

$$I_{\text{dst}}(u, v) = \begin{cases} 255, & I_{\text{src}}(u, v) \geq T \\ 0, & I_{\text{src}}(u, v) < T \end{cases} \quad (1)$$

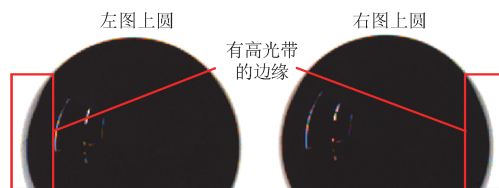
式中: (u, v) 为像素坐标; $I_{\text{dst}}(u, v)$ 和 $I_{\text{src}}(u, v)$ 分别为二值化图像和输入图像在 (u, v) 处的灰度值; T 为固定阈值,本文基于 ROI 区域镜面高光带与背景的灰度直方图,选定 $T = 245$ 。

为消除二值化产生的孔洞,采用形态学闭运算处理图像,表达式为

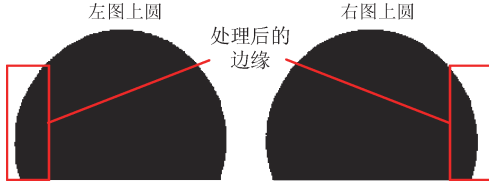
$$I_{\text{dst, closed}} = (I_{\text{dst}} \oplus \mathbf{B}) \ominus \mathbf{B} \quad (2)$$

式中: $I_{\text{dst, closed}}$ 为经形态学闭运算处理后的二值化图像; $\oplus$ 为形态学膨胀运算符; $\ominus$ 为形态学腐蚀运算符; $\mathbf{B}$ 为 3×3 的椭圆结构元素矩阵。

由图 6(b)可知,上球圆轮廓处理后的图像,其高光带被有效消除,且图像无孔洞。



(a)上圆轮廓镜面高光带



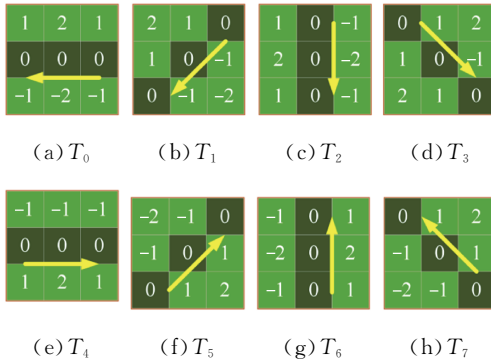
(b) 上圆轮廓 ROI 区域处理结果

图 6 上球圆轮廓的图像处理

Fig. 6 Image processing of the circular contour of the upper ball

1.3.2 特征点像素坐标的提取

采用基于多项式插值改进的亚像素细分算法^[23]对预处理后的图像进行边缘检测。为覆盖边缘梯度的全方向特性,在 Sobel 算子的基础上,利用 8 组方向模板对 ROI 区域进行梯度计算。图 7 中 $T_0 \sim T_7$ 分别表示角度为 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 的方向模板,箭头方向为提取的实际边缘方向,箭头方向顺时针转 90° 即为梯度方向。

图 7 图像边缘检测方向模板^[23]Fig. 7 Direction masks for image edge detection^[23]

通过方向模板设计与梯度方向插值实现亚像素级定位,获得的边缘检测效果如图 8 所示。随后,针对亚像素边缘轮廓,采用最小二乘法拟合其圆心坐标,即为特征点的像素坐标。

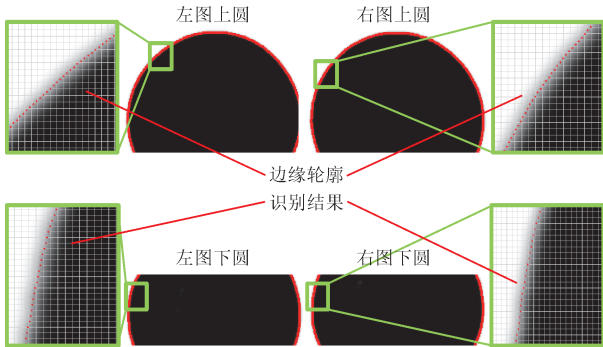


图 8 亚像素边缘检测效果

Fig. 8 Sub-pixel edge detection effect

1.3.3 特征点三维坐标的重建

根据特征点在左、右图中的像素坐标及双目相机的内外参数,采用三角测量原理计算对应特征点的三维坐标,其原理示意图如图 9 所示。其中,左图像中,特征点像素坐标 $(u_{m,i}^{\text{left}}, v_{m,i}^{\text{left}})$ 在左相机坐标系中的三维坐标 $(x_{m,i}^{\text{left}}, y_{m,i}^{\text{left}}, z_{m,i}^{\text{left}})$ 计算式为

$$\begin{cases} z_{m,i}^{\text{left}} = \frac{fb}{d_m s_x} \\ x_{m,i}^{\text{left}} = \frac{(u_{m,i}^{\text{left}} - c_x) s_x z_{m,i}^{\text{left}}}{f} \\ y_{m,i}^{\text{left}} = \frac{(v_{m,i}^{\text{left}} - c_y) s_y z_{m,i}^{\text{left}}}{f} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为相机焦距; b 为双目相机基线长度; 右下角标 m 为上、下球编号, 上球取 1, 下球取 2; d_m 为相机视差, $d_m = u_m^{\text{left}} - u_m^{\text{right}}$; 右下角标 i 为图像采集序号, $i = 1, 2, \dots, N$, N 为图像采集总数; 左上角标为参考相机, 左相机为 left, 右相机为 right; (c_x, c_y) 为相机主点的像素坐标; s_x, s_y 为相机单位像素尺寸。

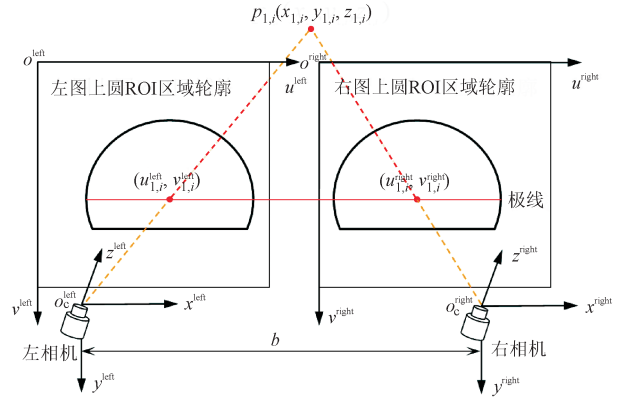


图 9 三维坐标重建示意图(以上球为例)

Fig. 9 Schematic diagram of three-dimensional coordinate reconstruction (taking the upper sphere for example)

同上述重建过程,可选择右图像中特征点坐标数据进行计算,但后续分析计算中选择的坐标系须保持一致。

由于实验中对系统进行了充分预热,且精密转台转速低、振动小,因此可认为相机坐标系在测量过程中是固定的,能够作为世界坐标系,则计算得到的坐标点 $p_{m,i}^{\text{left}}(x_{m,i}^{\text{left}}, y_{m,i}^{\text{left}}, z_{m,i}^{\text{left}})$ 与绝对坐标的特征点 $p_{m,i}(x_{m,i}, y_{m,i}, z_{m,i})$ 一致。通过以上方法处理不同转动角度处的图像,即可求解出靶标上、下球心的绝对坐标轨迹。

2 回转误差评价模型

为从靶标球心的绝对坐标轨迹中提取回转误差信息,需要针对性地建立评价坐标系,并通过 2 个球

心轨迹与各项误差的映射关系实现精准评定。

2.1 评价坐标系的建立

轴线运动误差是轴线相对于轴线平均线在不同方向上的偏离^[22],因此在轴线平均线上建立坐标系,有利于各项回转误差的准确评价。

靶标上、下球球心运动轨迹中心连线即为其轴线平均线。球心运动轨迹中心的求解以上球球心为例:首先,提取上球球心绝对坐标点 $p_{1,i}(x_{1,i}, y_{1,i}, z_{1,i})$ 的径向坐标 $(x_{1,i}, z_{1,i})$,并进行最小二乘圆拟合,从而求得该球心运动轨迹中心的径向坐标 $(x_{1,center}, z_{1,center})$;随后,对轴向坐标值 $y_{1,i}$ 取算术平均值,确定该中心的轴向坐标 $y_{1,center}$;最后,获取上球球心运动轨迹的中心坐标,并将该中心点表示为 $o_1(x_{1,center}, y_{1,center}, z_{1,center})$ 。同理,对下球球心绝对坐标点 $p_{2,i}(x_{2,i}, y_{2,i}, z_{2,i})$ 进行处理,获取其运动轨迹中心坐标,并将该中心点表示为 $o_2(x_{2,center}, y_{2,center}, z_{2,center})$ 。将两轨迹中心连线定义为 z^{eval} 轴,其正方向由 o_1 指向 o_2 ,并选取 o_1 作为原点 o^{eval} 。将世界坐标系的 x 轴投影到与 z^{eval} 轴垂直的平面,并通过右手法则确定 y^{eval} 轴,从而构建出适用于回转误差评价的坐标系,该坐标系如图 10 所示。

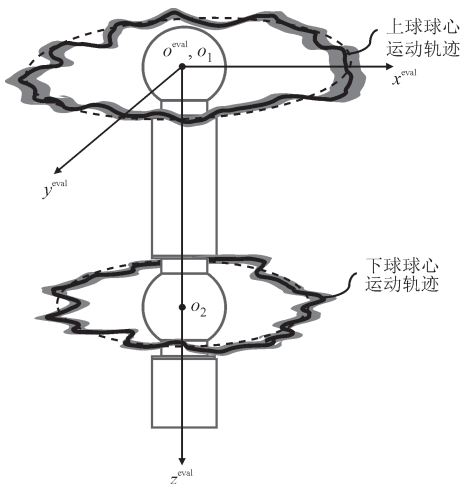


图 10 回转误差评价坐标系

Fig. 10 Evaluation coordinate system for rotational errors

构建完成评价坐标系后,需将轨迹上所有点的坐标转换至该坐标系下,以统一误差分析基准。转换过程以刚体变换理论为依据,通过旋转矩阵与平移向量,实现特征点在世界坐标系中坐标点 $p_{m,i}(x_{m,i}, y_{m,i}, z_{m,i})$ 到评价坐标系中坐标点 $p_{m,i}^{eval}(x_{m,i}^{eval}, y_{m,i}^{eval}, z_{m,i}^{eval})$ 的映射。

2.2 误差评定

坐标转换完成后,即可从径向、轴向及倾斜 3 个维度对回转误差进行系统性评定。

2.2.1 一次谐波分离

平台垂直度误差、靶标加工误差以及安装偏心导致的误差会随靶标的旋转周期性出现,表现为误差信号中的一次谐波成分^[20]。为消除这些影响,需要分离出径向原始数据中一次谐波成分。然而,由于轨迹坐标为绝对坐标,如对 2 个特征点的轨迹分别进行一次谐波分离会影响倾斜误差的评估。因此,本研究仅分离径向误差评估所选特征点轨迹的一次谐波,并以分离结果同时修正上、下球特征点坐标数据。

实验所测得的径向跳动原始信号与一次谐波波形的对比如图 11 所示。

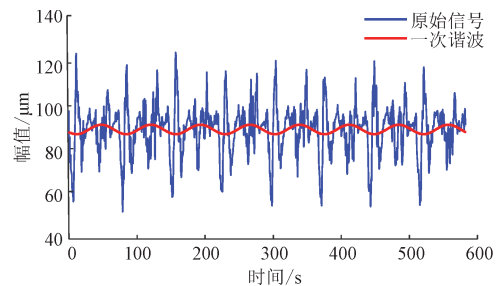


图 11 径向跳动原始信号与一次谐波波形对比

Fig. 11 Comparison between the original radial runout signal and its first-order harmonic waveform

采用频域分析法分离一次谐波分量,有如下具体步骤。

(1)计算信号实际基频。由于电器控制等原因,会导致转台实际转速与设置值存在差异,因而在理论基频邻域对实际峰值位置进行搜索,即可准确反推实际基频。

(2)分离一次谐波。使用有限脉冲响应(FIR)带通滤波器进行一次谐波的分离。同时,为消除滤波器引入的相位偏移,通过正向和反向的双通道处理,以实现零相位滤波,从而确保提取的一次谐波分量在时间上与原始信号对齐。

一次谐波成分分离后,残余信号如图 12 所示。

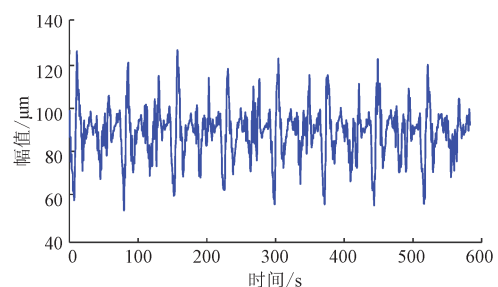


图 12 径向跳动分离一次谐波后的残余信号

Fig. 12 Residual signal of radial runout after separating the first-order harmonic

2.2.2 径向回转误差的分析与量化

径向回转误差是衡量轴系旋转过程中,径向跳动程度的关键指标,直观反映了轴系在旋转过程中的径向稳定性。将特征点在评价坐标系下修正后的三维运动轨迹 $(x'_{m,i}, y'_{m,i}, z'_{m,i})$ 投影至 $x^{eval} o^{eval} y^{eval}$ 平面,得到二维点集 $(x'^{eval}_{m,i}, y'^{eval}_{m,i})$ 。因为 z^{eval} 是轴线平均线,故以二维点集的最小二乘中心为原点,通过计算投影后特征点到原点的距离 $r_{m,i} = \sqrt{(x'^{eval}_{m,i})^2 + (y'^{eval}_{m,i})^2}$,即为对应球心的径向跳动幅值。

以旋转角度 θ 为极角,距离 $r_{m,i}$ 为极径绘制径向总误差运动极坐标图,求解其平均曲线,即为径向同步误差运动曲线。如图 13 所示,通过计算同步误差运动曲线包络圆^[24]的最大半径 $R_{m,rmax}$ 与最小半径 $R_{m,rmin}$ 的差值,即可得到径向回转误差 $\delta_{m,radial}$,表达式为

$$\delta_{m,radial} = R_{m,rmax} - R_{m,rmin} \quad (4)$$

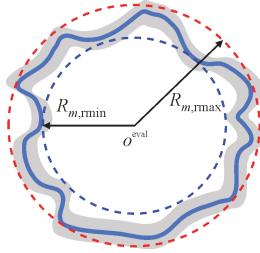


图 13 极坐标下的量化径向回转误差

Fig. 13 Quantified radial rotation error in polar coordinates

2.2.3 轴向回转误差的分析与量化

轴向回转误差主要表征轴系旋转时,沿轴线方向的窜动特性。提取特征点在 z^{eval} 轴方向的坐标 $z_{m,i}^{eval}$,并以坐标值的变化范围对轴向回转误差 $\delta_{m,axial}$ 进行量化评估,计算式为

$$\delta_{m,axial} = \max(z_{m,i}^{eval}) - \min(z_{m,i}^{eval}), i = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

2.2.4 倾斜回转误差的分析与量化

倾斜回转误差反映了轴系旋转过程中,姿态的变化情况。倾斜回转误差计算原理如图 14 所示,在回转误差评价坐标系中,取两坐标轨迹上对应点 $p_{1,i}^{eval}$ 和 $p_{2,i}^{eval}$,连线形成向量 T_i 。根据向量点积的几何定义,上下特征点连线与 z^{eval} 轴的实时夹角 φ_i 的计算式为

$$\varphi_i = \arccos\left(\frac{T_i \cdot z}{|T_i| |z|}\right) \quad (6)$$

式中: $z = (0, 0, 1)$, 为 z^{eval} 轴的单位向量。

以轴系转动角度 θ 为极角,夹角 φ_i 为极径,绘制极坐标曲线,可反映出轴系在各个角度的倾斜情况。同径向回转误差的处理方法为:求解其同步误差曲

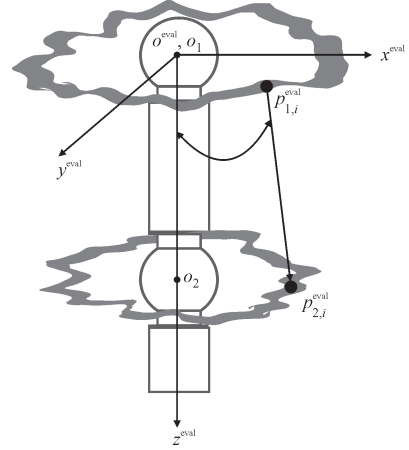


图 14 倾斜回转误差的计算原理

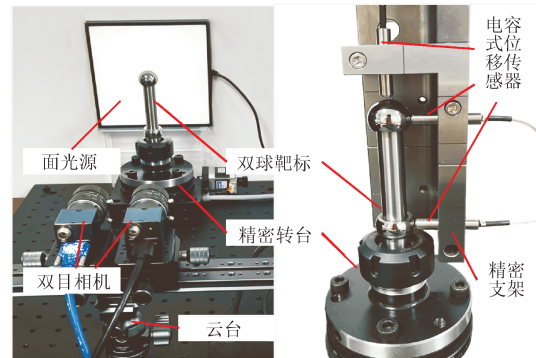
Fig. 14 Calculation principle of tilt motion error

线,获得曲线包络圆的最大半径 R_{tmax} 与最小半径 R_{tmin} ,并通过求解取得轴系的倾斜回转误差 δ_{tilt} ,计算式为

$$\delta_{tilt} = R_{tmax} - R_{tmin} \quad (7)$$

3 实验验证

为了验证本文方法的有效性,选择 Zolix 精密转台 TBR100 为被测对象,测量其回转误差。实验平台如图 15 所示,该平台主要由精密转台、双目相机、面光源、双球靶标、搭载有图像采集系统和转台控制系统的上位机组成。其中,精密转台的径向跳动小于等于 $30 \mu m$,轴向跳动小于等于 $40 \mu m$,最大速度为 $20(^{\circ}) \cdot s^{-1}$; 双目相机为大恒图像的 CMOS 工业相机 MER-160-227U3C-L,分辨率为 1440×1080 ,最大帧率为 $227 \text{ 帧} \cdot s^{-1}$,搭配 8 mm 焦距、200 万像素的定焦镜头,对焦距离大于 0.1 m; 双球靶标为 Lion Precision 主轴误差分析仪所带,通过法兰盘固定在



(a) 本文方法

(b) 对比方法

图 15 五自由度回转误差测量实验平台

Fig. 15 Five-degree-of-freedom rotary error measurement experimental platform

精密转台端面,其靶球直径为 25.4 mm,圆度误差小于 50 nm,两球心距离为 76.2 mm。

实验采用 GB050-1.875-7×7 标定板,该标定板为陶瓷材质,标识点圆心距离为 3.75 mm,精度为 ±150 nm,与 HALCON 生成的标定板描述文件中的参数相同。通过 HALCON 算子对两台相机进行

标定与极线校正。校正前后,相机的内参和外参,即相对位置的标定结果如表 1 和表 2 所示,双目标定的重投影误差为 0.073 像素,平均极线误差为 0.210 像素。表 1 中, k_1 、 k_2 、 k_3 分别为一、二、三阶径向畸变系数; q_1 、 q_2 分别为 x 、 y 方向基础薄棱镜畸变系数。

表 1 极线校正前后相机内参的标定结果

Table 1 Calibration results of camera intrinsic parameters before and after epipolar rectification

相机内参	极线校正前		极线校正后	
	左相机	右相机	左相机	右相机
f/mm	35.19	35.34	35.23	35.23
k_1	25.969 3	61.577 9	0	0
$k_2/10^5$	1.267 36	-5.648 60	0	0
$k_3/10^9$	-1.738 50	3.514 81	0	0
q_1	-0.062 672	-0.039 038	0	0
q_2	0.033 852	0.023 607	0	0
$s_x/\mu\text{m}$	14.8	14.8	14.8	14.8
$s_y/\mu\text{m}$	14.8	14.8	14.8	14.8
c_x	768.788	711.187	835.359	807.420
c_y	526.879	542.864	458.465	458.465

表 2 极线校正前后相机相对位置的标定结果

Table 2 Calibration results of relative position of the cameras before and after epipolar rectification

相机相对位置	极线校正前	极线校正后
x 轴平移距离/mm	51.86	51.88
y 轴平移距离/mm	0.63	0
z 轴平移距离/mm	-1.23	0
x 轴旋转角/(°)	359.389	0
y 轴旋转角/(°)	359.424	0
z 轴旋转角/(°)	0.133	0

根据标定结果,相机焦距为 35.23 mm,像素尺寸为 $14.8 \mu\text{m} \times 14.8 \mu\text{m}$,实验中镜头工作距离约为 280 mm。计算得到单个像素对应的物方尺寸约为 $118 \mu\text{m} \times 118 \mu\text{m}$,远大于转台的回转误差。对应的视场范围约为 $169 \text{ mm} \times 127 \text{ mm}$,可保证靶标双球的完整成像。

3.1 实验方案

利用所搭建的测量平台,测量精密转台的回转误差,有如下的实验流程。

(1)装调设备。将靶标固定于精密转台旋转轴的中心位置,以确保靶标处于双相机视场的重叠区域。拍摄转台静止状态下的靶标图像,检验图像清晰度、亮度和对比度,确保成像质量符合要求。

(2)采集数据。转台预热 15 min,待设备运行稳定后开始实验,按照表 3 依次进行不同转速下的数据采集(该方案是根据国家标准^[22]制定)。对于每个转速,重复测量次数为 3,以保证实验结果的可靠性。

(3)评估误差。依据所提出的方法对采集的数据进行处理,分别计算出各转速下,精密转台的径向误差、轴向误差和倾斜误差。

表 3 不同转速下的数据采集方案

Table 3 Data acquisition scheme at different rotational speeds

转速/(°·s ⁻¹)	正转圈数	反转圈数	采样间隔/ms
5	8	8	160
10	8	8	80
15	8	8	53
20	8	8	40

对比方法的过程如下:首先,将本文的视觉测量系统移除,并保持转台和靶标原有装配状态;其次,直接通过 Lion Precision 主轴误差分析仪,并参考文献^[25]中的方法进行对比实验;最后,以相对测量的方法实现 4 个转速下,转台回转误差的测量。

3.2 结果对比

本文方法以上球球心(即远端)运动轨迹评价径向、轴向回转误差,通过上、下球球心轨迹联立计算倾斜误差。图 16、17 分别为在极坐标下不同转速测得的径向和倾斜误差运动。

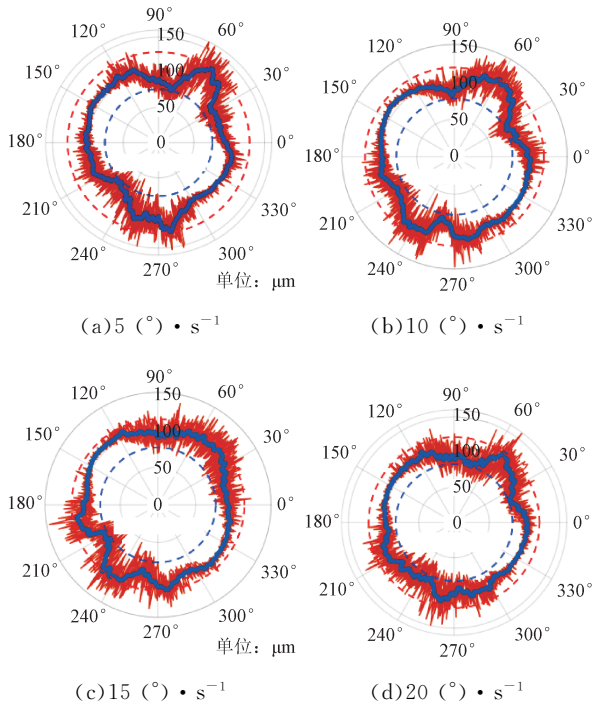


图 16 本文方法所测 4 种转速下的径向误差运动

Fig. 16 Radial errors motions measured by the proposed method at four rotational speeds

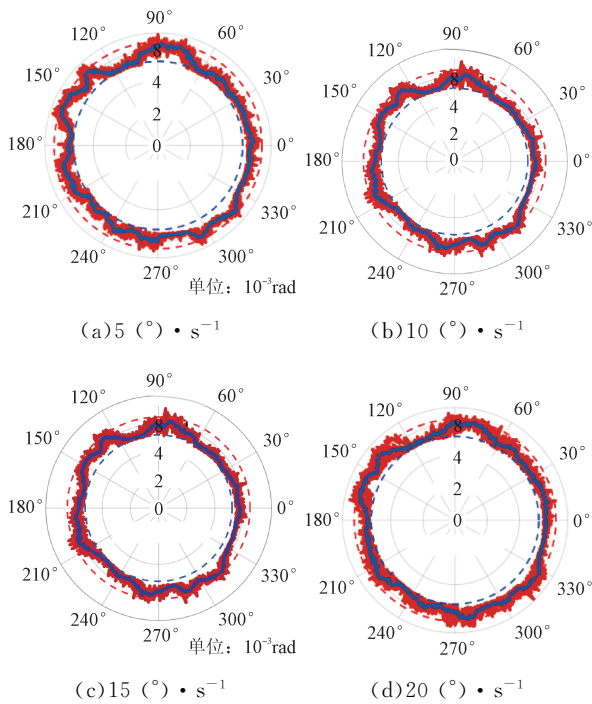
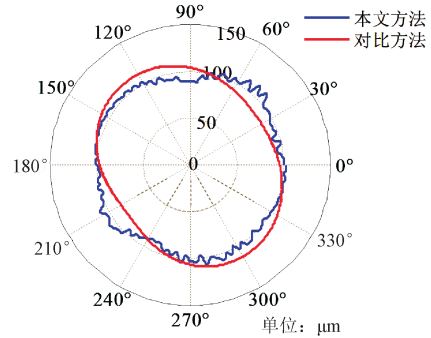


图 17 本文方法所测 4 种转速下的倾斜误差运动

Fig. 17 Tilt errors motions measured by the proposed method at four rotational speeds

图 18 为在极坐标下,转速为 $20\text{ }(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ 时的径向误差运动轨迹的对比。从图中两种方法的实测

结果可以看出:两种方法获得的径向运动轨迹的形状具有高度一致性,并且在各转动角度处的最大偏差不超过 $8\text{ }\mu\text{m}$,这有效验证了本文方法从不同角度上捕捉误差运动信息的准确性。

图 18 转速 $20\text{ }(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ 下径向误差运动轨迹的对比Fig. 18 Comparison of radial error motion trajectories at a rotational speed of $20\text{ }(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$

本文方法和对比方法测得的各项转速下,精密转台的径向、轴向和倾斜回转误差分别如表 4 和表 5 所示,对比曲线如图 19 所示。可以看出,在不同转速下,两种方法所测得各项误差均能良好吻合,径向误差在 $5\text{ }(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ 时出现最大差值 $5.3\text{ }\mu\text{m}$,偏差百分比为 18.5% ;轴向误差在 $20\text{ }(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ 时出现最大差值 $1.5\text{ }\mu\text{m}$,偏差百分比为 11.8% ;倾斜误差在 $20\text{ }(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$ 时出现最大差值 0.004 ° ,偏差百分比为 8.1% 。

表 4 本文方法径向、轴向和倾斜回转误差测量结果
Table 4 Measurement results of the radial, axial and tilt rotational errors of the proposed method

转速/ $(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$	径向回转 误差/ μm	轴向回转 误差/ μm	倾斜回转 误差/ $^{\circ}$
5	33.9	12.9	0.050 3
10	31.7	11.6	0.053 0
15	29.5	12.2	0.053 1
20	29.7	11.2	0.055 0

表 5 对比实验径向、轴向和倾斜回转误差测量结果
Table 5 Measurement results of the radial, axial and tilt rotational errors of the comparative experiment

转速/ $(^{\circ})\cdot\text{s}^{-1}$	径向回转 误差/ μm	轴向回转 误差/ μm	倾斜回转 误差/ $^{\circ}$
5	28.6	12.7	0.050 4
10	28.5	12.6	0.050 7
15	28.5	12.6	0.050 7
20	28.8	12.7	0.050 9

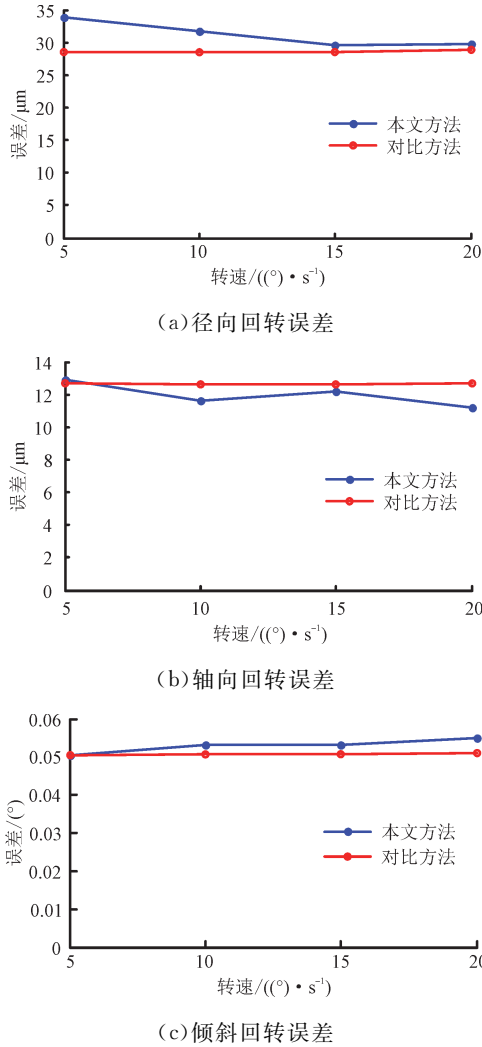


图19 两种方法所测结果对比

Fig. 19 Comparison of the measurement results of two methods

3.3 系统测量不确定度的评估

3.3.1 单相机图像圆心拟合精度

实验以最大圆度误差为 50 nm 的靶标为测量对象,其几何精度远高于所需的测量精度,故忽略其影响。在单相机图像中,本文以亚像素边缘检测方法提取圆轮廓,可将轮廓点定位精度 σ_{point} 提升至 $1/85.333$ 像素^[23],对应物方尺寸约 $1.4 \mu\text{m}$ 。

然后,针对边缘检测结果以最小二乘拟合获得圆心坐标。参考朱嘉等^[26]的研究,圆心拟合误差 σ_{center} 与轮廓采样点数 N 及单点测量误差 σ_{point} 密切相关,计算公式为

$$\sigma_{\text{center}} \approx 2 \frac{\sigma_{\text{point}}}{\sqrt{N}} \quad (8)$$

上、下球轮廓采样点数量分别约为 1 600 和 700。采样点数取 700 时,计算得到的圆心拟合误差

约为 0.000 88 像素,对应物方尺寸约为 $0.1 \mu\text{m}$ 。

可以看到,通过亚像素边缘提取以及最小二乘中心拟合,单相机图像的圆中心误差远小于单像素尺寸,实现了精度的提升。

3.3.2 双目三角测量精度

在平行双目三角测量中,标定误差对 z 方向测量精度 σ_z 有重要影响,计算式为

$$\sigma_z \approx \frac{Z^2}{fb} \sigma_d s_x \quad (9)$$

式中: Z 为镜头工作距离,取 280 mm; σ_d 为视差误差,取值为 0.073 像素; b 为基线长度,即双目相机的 x 方向偏移, $b = 51.88 \text{ mm}$ 。

此外,圆心拟合误差对 3 个方向上的测量精度 σ_z 、 σ_x 、 σ_y 均会产生相应影响,计算式为

$$\begin{cases} \sigma_z \approx \frac{Z^2}{fb} \sqrt{2} \sigma_{\text{center}} s_x \\ \sigma_x = \sigma_y \approx \frac{Z}{f} \sigma_{\text{center}} s_x \end{cases} \quad (10)$$

式中: $\sqrt{2} \sigma_{\text{center}}$ 为左右图像圆心拟合误差联合导致的视差误差。

计算得到的 z 方向(深度方向)测量精度受标定误差主导,约为 $46.35 \mu\text{m}$; x 、 y 方向测量精度约为 $1.04 \mu\text{m}$ 。

3.3.3 回转误差测量不确定度的评估

由于相机 z 方向和 x 方向对应转台的径向, y 方向对应转台的轴向,因此,评估球心径向与轴向位置测量误差 σ_{radial} 、 σ_{axial} 的计算式为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{radial}} = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_z^2} \approx 46.36 \mu\text{m} \\ \sigma_{\text{axial}} = \sigma_y = 1.04 \mu\text{m} \end{cases} \quad (11)$$

实验中,每个转速下测量 16 圈,平均后可获得 450 个周向均布的轨迹点云数据。而后,以最小二乘法评估径向回转误差,以数据变化范围评估轴向回转误差和倾斜回转误差。对应回转误差的标准测量误差计算式为

$$\begin{cases} \sigma_{\text{er}} \approx \pi \frac{\sigma_{\text{radial}}}{\sqrt{n_{\text{round}}}} / \sqrt{6 \ln n_{\text{point}}} = 5.96 \mu\text{m} \\ \sigma_{\text{ea}} = \sigma_y = 1.04 \mu\text{m} \\ \sigma_{\text{et}} = \frac{\sqrt{2} \sigma_{\text{radial}}}{\sqrt{n_{\text{round}}}} / L \sqrt{6 \ln n_{\text{point}}} = 0.006^\circ \end{cases} \quad (12)$$

式中: σ_{er} 、 σ_{ea} 、 σ_{et} 分别径向回转误差、轴向回转误差和倾斜回转误差; n_{round} 为测量圈数; n_{point} 为平均轨迹点数。

取包含因子 $k=2$,则径向、轴向、倾斜回转误差的扩展不确定度分别为 11.91 、 $2.08 \mu\text{m}$ 和 0.012° 。

根据实验,本文方法与对比方法所测的3项回转误差中,最大误差值分别为 5.3 、 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 0.004° ,均落在估算的测量不确定度范围之内,这表明本文提出的双目视觉测量方法具有较高的可靠性。

3.4 结果讨论

从回转误差极坐标对比图像上可以看出,本文所提方法能够对运动全过程中的回转误差进行精准捕捉。各项回转误差对比结果表明:本文方法所测得的结果与对比实验均能够良好吻合,偏差在 18.5% 以内,说明了本方法的可行性与精准度。

根据测量系统不确定度评价结果可知,对比实验最大偏差均落在估算范围内。这充分说明本文所构建的测量系统在实验配置下,其回转误差测量结果具有可信性。

本文以亚像素边缘检测与最小二乘拟合相结合的方法进行图像数据处理,有效突破了传统视觉检测回转误差的精度。该方法从原理上可均化形状误差的影响,对靶标加工精度要求更低,有利于降低成本。

此外,本文方法运用绝对坐标测量,避免了相对测量中各项跳动数据参考坐标系不一致的问题,无需精细繁琐的传感器装调过程,并且使用真实平均回转轴线作为评价参考,形成与标准完全吻合的评价方法。

4 结 论

本文针对多自由度回转误差同步测量的技术难题,提出了一种精密旋转轴系五自由度回转误差双目视觉测量方法。该方法以双球靶标作为空间特征载体,采用平行式双目相机的布局,简化立体匹配复杂度,结合亚像素边缘提取以及最小二乘中心拟合,以保障特征点的稳定识别与高精度的提取。基于绝对坐标轨迹,将准确求解的平均回转轴线作为评价参考,严格按照国家标准进行径向、轴向、倾斜等五自由度回转误差的评估计算。

对比实验表明:本文方法的径向回转误差最大测量偏差为 $5.3\ \mu\text{m}$,偏差百分比为 18.5% ;轴向回转误差的最大测量偏差为 $1.5\ \mu\text{m}$,偏差百分比为 11.8% ;倾斜回转误差最大测量偏差为 0.004° ,偏差百分比为 8.1% ,各项测量偏差均落在估算的测量不确定度范围之内。该方法成功的实现了五自由度回转误差的同步测量,且获得与高成本进口设备相当的测量结果,充分证明了该方法的有效性和精准性。同时,基于视觉的非接触绝对坐标测量特性,

具备更优的环境适应性与拓展潜力,对靶标加工精度和装调的要求进一步降低。该方法为精密旋转轴系回转精度评估提供了非接触、多自由度同步的全新技术手段。

参考文献:

- [1] 王率峰. 立式加工中心主轴回转误差形成机理及测试方法研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2024.
- [2] 金岸, 缪寅宵, 刘冬冬, 等. 主轴动态回转误差测量技术 [J]. 光学精密工程, 2020, 28(10): 2227-2243. Jin An, Miao Yinxiao, Liu Dongdong, et al. Research on spindle dynamic rotation-error-measurement technology [J]. Optics and Precision Engineering, 2020, 28(10): 2227-2243.
- [3] 邵宪磊. 精密转台五自由度运动误差分离及其不确定度分析 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [4] Lee J C, Gao Wei, Shimizu Y, et al. Spindle error motion measurement of a large precision roll lathe [J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012, 13(6): 861-867.
- [5] 马平, 李健洪, 欧建国, 等. 主轴回转精度多步误差分离研究 [J]. 机械科学与技术, 2018, 37(6): 884-890. Ma Ping, Li Jianhong, Ou Jianguo, et al. Study on multi-step error separation of spindle rotation precision [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2018, 37(6): 884-890.
- [6] Chen Ye, Zhao Xiangsong, Gao Weiguo, et al. A new method for measuring the rotational accuracy of rolling element bearings [J]. Review of Scientific Instruments, 2016, 87(12): 125102.
- [7] Cui Hailong, Lei Dajiang, Zhang Xinjiang, et al. Measurement and analysis of the radial motion error of aerostatic ultra-precision spindle [J]. Measurement, 2019, 137: 624-635.
- [8] 迟玉伦, 王国强. 基于多步误差分离法的主轴回转误差检测方法 [J]. 轻工机械, 2023, 41(2): 48-56. Chi Yulun, Wang Guoqiang. Research on spindle rotation error detection method based on multi-step error separation method [J]. Light Industry Machinery, 2023, 41(2): 48-56.
- [9] Kavitha C, Denis Ashok S. A new approach to spindle radial error evaluation using a machine vision system [J]. Metrology and Measurement Systems, 2017, 24(1): 201-219.
- [10] 张德伟. 基于动态干涉仪的主轴回转误差检测方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [11] 任博远. 基于干涉条纹特征分析的主轴回转精度检测

- 方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
- [12] Bao Chuanchen, Feng Qibo, Li Jiakun. Simultaneous measurement method and error analysis of the six degrees-of-freedom motion errors of a rotary axis [J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(11): 2232.
- [13] Guevel F, Viprey F, Euzenat C, et al. Development and performance evaluation of real-time geometric error compensation through position feedback modification in 5-axis machining [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, 137(11): 5565-5584.
- [14] 关裕. 双频激光干涉多光路系统主轴误差测量及其对比方法研究 [D]. 北京: 北方工业大学, 2024.
- [15] Ma Dong, Li Jiakun, Feng Qibo, et al. Method and system for simultaneously measuring six degrees of freedom motion errors of a rotary axis based on a semiconductor laser [J]. *Optics Express*, 2023, 31(15): 24127-24141.
- [16] 温洪泉, 杨文军, 张子龙, 等. 精密旋转轴六自由度误差同时测量方法 [J]. *激光与光电子学进展*, 2024, 61(17): 213-222.
- Wen Hongquan, Yang Wenjun, Zhang Zilong, et al. Simultaneous measurement method of six-degree-of-freedom error of precision rotating axis [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(17): 213-222.
- [17] 金岸. 基于靶标轨迹追踪的高速轴系径向回转误差测量方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2022.
- [18] 袁德亮, 赵转萍. 显微视觉主轴回转误差测量 [J]. *机械与电子*, 2010(1): 36-39.
- Yuan Deliang, Zhao Zhuanping. Spindle rotation error measurement based micro-vision [J]. *Machinery & Electronics*, 2010(1): 36-39.
- [19] 方威. 基于轨迹追踪的主轴多自由度回转误差测量研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2024.
- [20] Yang Jie, Meng Dingkun, Zhou Rongjing, et al. Interference-enhanced micro-vision-based single-shot imaging of five degrees-of-freedom error motions for ultra-precision rotary axes [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2024, 200: 104184.
- [21] 吕天硕. 基于旋转目标轨迹的主轴径向回转误差测量研究 [D]. 杭州: 杭州电子科技大学, 2023.
- [22] GB/T 17421.7—2016 机床检验通则 第7部分: 回转轴线的几何精度[S].
- [23] 李庆利, 张少军, 李忠富, 等. 一种基于多项式插值改进的亚像素细分算法 [J]. *北京科技大学学报*, 2003, 25(3): 280-283.
- Li Qingli, Zhang Shaojun, Li Zhongfu, et al. A improved subpixel edge detecting algorithm based on polynomial interpolation [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2003, 25(3): 280-283.
- [24] Kshaurad K, Kiran M B, Shanmuganatan S P. Minimum zone tolerance algorithm to detect roundness error for machined rods using vision system [J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46(Part 13): 5997-6003.
- [25] Shimizu S. Precision spindle metrology [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2008, 130(3): 036501.
- [26] 朱嘉. 基于视觉与触觉集成传感的多坐标组合测量系统的研究 [D]. 天津: 天津大学, 2010.

(编辑 刘懿莹)