

DOI: 10.13382/j.jemi.B2609091

大型矿山销轴安装过程销轴孔位姿态测量研究^{*}

谢春雪¹ 陈祥钰² 刘治翔^{2,3}

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学机械与工程学院 阜新 123000;
3. 辽宁工程技术大学矿产资源开发利用技术及装备研究院 阜新 123000)

摘 要:针对大型矿山设备销轴安装时双孔对齐难、调整不直观的痛点,精确定量双孔相对位姿偏差,为装配机器人提供直观对接控制参数。提出基于3D拟合与欧拉角分解的位姿测量方法。利用可旋转激光测距装置采集多深度周向数据,经最小二乘法拟合圆心序列提取轴线几何参数;基于Z-Y-X顺序欧拉角分解,将空间偏差转化为机械臂坐标系下可执行的三轴平移与旋转补偿量。以220 t矿卡销轴孔进行实测,并与高精度测量仪对比验证。实验表明同轴度相对误差在4%~7%之间。参数分析显示,计算误差随测量层数 m 与周向点数 n 增加而减小,在 $n \geq 36$ 且 $m > 2$ 时精度饱和,最优采样点数选为36;初始角度偏差 α 对精度的影响呈非线性递增,大倾角会导致截面投影畸变为椭圆并放大轴线分解误差。该方法无需视觉硬件,抗粉尘与遮挡鲁棒性强,系统计算精度满足大型矿山机械装配的指标要求,且输出的位姿补偿量可直接与重型机械臂调整指令无缝对接,显著提升了传动部件的装配效率,为大型装备自动化运维提供了新的技术路径。

关键词:销轴安装;销轴孔位姿测量;3D拟合;位姿测量;同轴度计算

中图分类号: TN206 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.4030

Research on the measurement method of pin hole position and attitude during the installation process of large mining equipment pin shaft

Xie Chunxue¹ Chen Xiangyu² Liu Zhixiang^{2,3}

(1. School of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 2. School of Mechanical and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China; 3. Institute of Mineral Resources Development Technology and Equipment, Liaoning Technical University, Liaoning 123000, China)

Abstract:To address the challenges of aligning dual holes during installation of large mining equipment pins—such as difficulty in alignment and non-intuitive adjustment—this solution precisely quantifies the relative positional deviation between the two holes, providing intuitive control parameters for assembly robots. A pose measurement method based on 3D fitting and Euler angle decomposition is proposed. A rotatable laser ranging device is used to collect multi-depth circumferential data, and the geometric parameters of the axis are extracted by fitting a sequence of circle centers using the least squares method. Based on Z-Y-X order Euler angle decomposition, spatial deviations are converted into executable three-axis translation and rotation compensation values in the robotic arm coordinate system. The method was experimentally validated on a 220-ton mining truck pin hole, with results compared against those from a high-precision measuring instrument. Experimental results show that the relative coaxiality error ranges between 4% and 7%. Parameter analysis indicates that computational error decreases as the number of measurement layers (m) and circumferential points (n) increases; accuracy saturates when $n \geq 36$ and $m > 2$, making 36 the optimal number of sampling points. The influence of initial angular deviation α on accuracy increases nonlinearly, and large inclination angles cause cross-sectional projection distortion into ellipses, thereby amplifying axis decomposition errors. This method requires no visual hardware and demonstrates strong robustness against dust and occlusion. Its system accuracy meets the requirements for assembly of large-scale mining machinery, and the output pose compensation values can be seamlessly integrated with control commands for heavy-duty robotic arms, significantly improving the

收稿日期: 2026-01-24 Received Date: 2026-01-24

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金(52304134)项目资助

assembly efficiency of transmission components and providing a new technical pathway for automated operation and maintenance of large equipment.

Keywords: pin installation; pin hole pose measurement; 3D fitting; pose measurement; coaxiality calculation

0 引言

销轴是大型矿山机械传动与连接的核心部件。大型矿山机械的销轴重量大、安装过程对孔难度大,造成销轴的安装时间占据大型矿山机械设备维修的大部分时间。销轴安装除了要有良好的抓举销轴工具外,还需要有能够对销轴安装孔位位姿测量的高精度仪器,测量孔位对齐程度,才能辅助销轴高效安装。

国内外专家学者针对销轴孔位位姿测量方法进行了深度研究:针对矿山场景中孔位遮挡、低分辨率、多圆孔匹配难题,国内学者提出多项创新方法。马睿豪^[1]在 2023 年提出基于椭圆轮廓点筛选的双目测量方案,通过构建极线束与视锥母线相交约束,结合算术优化算法筛选有效轮廓点,解决了传统方法对椭圆拟合精度依赖过高的问题,在低分辨率图像下仍保持 0.5% 以内的测量误差,成功应用于液压泵端盖多圆孔位姿测量。

刘佳^[2] 2015 年基于 ETH/EIH 手眼视觉系统,改进 SIFT 立体匹配算法,融入小波多分辨率分析与“回”形窗口邻域划分技术,将销轴孔位姿测量的点距相对误差降至 1.15%,夹角相对误差 0.55%,为机器人自主装配提供了精准位姿引导。

针对矿山机械维修中销轴孔易被零部件遮挡的问题,研究人员通过深度学习与滤波算法融合提升鲁棒性。最新研究提出 SHUK-SVSF 算法,将 SEAM 模块嵌入 YOLOv8 模型颈部以增强遮挡区域特征响应,结合 Sage-Husa 自适应无迹卡尔曼滤波动态调整噪声协方差矩阵,在机械臂轴孔装配实验中,实现了遮挡率 30% 情况下的位姿估计精度提升 40%,满足矿山设备维修的实时性要求^[3]。

面向批量检测需求,李瑞生等^[4]基于相似三角形原理与形位公差传递规律,提出油缸活塞杆销轴孔垂直度批量检测方法,推导专用计算公式,无需高精度仪器即可实现现场快速判定,检测误差 $\leq 0.02 \text{ mm/m}$,已应用于广西柳工工程机械油缸生产线。

针对矿山设备销轴孔装配时的动态偏差补偿需求,文献^[5]提出机械臂与二维云台联动的位姿测量-调整一体化方案。该方法通过机械臂搭载相机拍摄销轴孔端面,采用 RANSAC 算法剔除图像误差点,基于椭圆特征提取孔位法向量,精准计算俯仰角与水平角偏差,再通过二维云台实时补偿角度偏差,实现压装前的轴孔位姿预校准。相比传统静态测量,该技术将装配成功率从 82%

提升至 97%,已应用于重型机械轴孔压装生产线,解决了装夹偏差导致的装配失效问题。

现有矿山机械销轴孔位姿测量研究虽在特定场景取得突破,但仍存在明显局限:多数方法聚焦单一孔位静态测量,未充分考虑销轴安装时双孔同轴对齐的核心需求,难以直接提供孔位间相对姿态偏差的工程化调整依据;依赖双目视觉或深度学习的方案对硬件算力、图像质量要求较高,在矿山维修现场粉尘、遮挡复杂环境下鲁棒性受限;部分批量检测方法精度不足,动态偏差补偿方案未实现与重型机械臂的直接指令对接,调整效率偏低。与此同时,通用机械装配领域的位姿参数估计技术已取得显著进展,基于多视角点云配准的位姿解算方法可实现复杂空间特征的高精度匹配,而面向精密轴孔装配的模糊位姿估计与导纳控制融合技术则为机械臂动态调整提供了新的控制范式,这些技术思路为矿山重型装备销轴孔位姿测量的工程化应用提供了重要参考^[6]。

因此,针对销轴安装时同轴对齐难、调整不直观的问题,本文提出基于 3D 拟合与欧拉角分解的双孔相对位姿测量方法,无需复杂视觉硬件,通过多深度圆周数据精准提取双孔轴线参数,将空间偏差分解为机械臂可直接执行的三轴平移和三轴旋转补偿量,兼顾现场适应性、测量精度与工程实用性。

1 销轴孔位姿测量系统

1.1 大型设备销轴安装工况分析

大型矿山设备销轴重量大、销轴孔部件姿态调整难度大,造成销轴安装难度大、耗时耗力。以 220 t 矿卡转向节销轴安装为例,其安装工况如图 1 所示。

车架为固定不动部件,红色部件为转向节,上面均有销轴孔,转向节为活动部件。转向节姿态调整难度极大,极难令转向节销轴孔和车架销轴孔完全对齐。只有转向节的两个孔和车架的销轴孔完全对齐,形成三孔同心,才能将销轴自上而下插入转向节和车架的销轴孔内,将转向节固定到车架,具体如图 2 所示。

1.2 销轴孔姿态测量装置

本文基于一种销轴安装机器人,该机器人上设置有销轴孔测量装置。安装销轴之前,先使用销轴孔姿态测量装置对转向节和车架内孔姿态进行测量,得到转向节相对于车架的位置和姿态偏差,然后控制转向节姿态调整装置对转向节进行位姿调整,从而便于销轴的顺利安

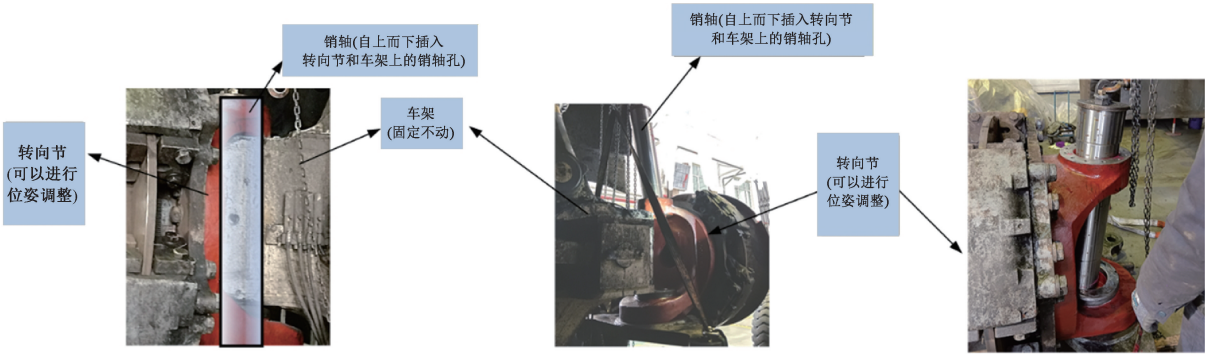


图 1 大型矿山设备销轴安装工况
Fig. 1 Pin installation conditions of large mining equipment

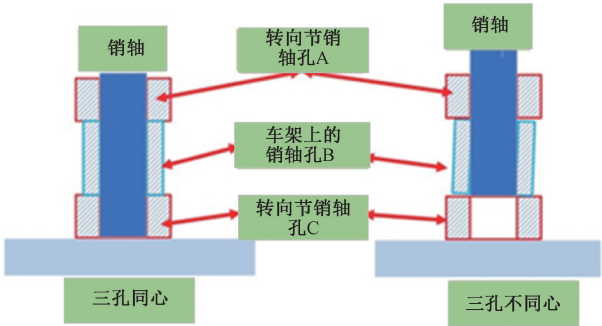
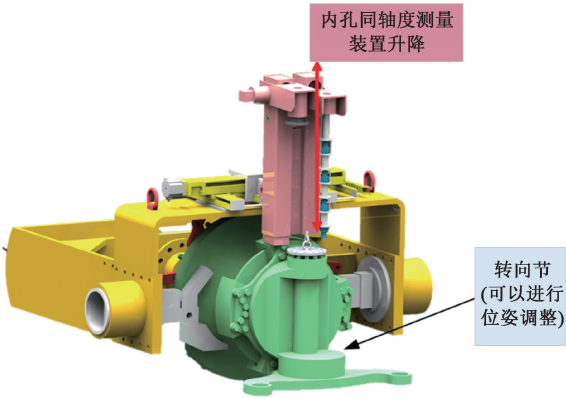
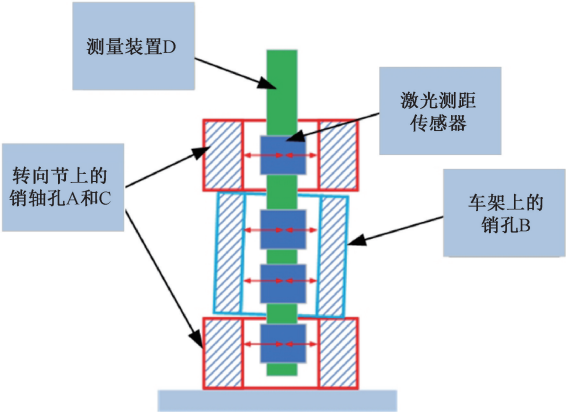


图 2 销轴安装过程三孔同心示意图
Fig. 2 Schematic diagram of three-hole concentricity during pin installation



(a) 销轴孔姿态测量装置安装位置
(a) Installation position of pinhole attitude measurement device



(b) 测量装置组成
(b) Measurement device composition

图 3 销轴孔姿态测量装置结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the structure of the pinhole attitude measurement device

装。销轴孔姿态测量装置如图 3 所示。

测量装置主要由一根可旋转的杆件以及 3~4 个激光测距传感器组成。杆件旋转带动激光测距传感器旋转,从而测量出各部件内孔尺寸,可根据测得的内孔尺寸推算出转向节和车架之间的位姿关系,从而为转向节位姿调整提供依据。

1.3 销轴孔姿态测量原理

激光位移传感器对套筒内壁的圆周测量数据,包含轴向深度、旋转角度、径向位移等信息。基于最小二乘算法实现圆心和轴线拟合,然后采用欧拉角分解计算两个部件销轴孔的空间姿态偏差^[7]。通过得到的两个部件销轴孔的空间姿态偏差,反向补偿偏差来计算活动部件的平移和旋转补偿量,从而为活动部件的姿态调整提供运动参数。该方法通过离散采样点的几何特征重构空间轴线,本质上属于位姿参数估计的范畴,其核心是通过多截面几何约束消除单截面测量的不确定性;而采用 Z-Y-X 顺序欧拉角分解的方式,可将复杂的空间旋转偏差解耦为机械臂可直接执行的独立控制量,避免了姿态耦合导致的调整误差,这与精密销孔装配中广泛采用的解耦式位姿控制思路一致^[8]。

2 销轴孔相对位姿测量方法

2.1 销轴孔相对姿态计算方法

以图 2 为例,测量车架上的销轴孔 B 相对于转向节

销轴孔 A 和 C 的空间姿态关系,可利用传感器 D 的旋转与位移测量功能。即通过传感器的旋转测量数据来拟合销轴孔的圆环圆心,然后通过传感器 D 轴向位移,测得多个销轴孔的圆环圆心^[9-10],通过多个圆环圆心确定轴线方向,具体步骤如下:

步骤 1) 先将转向节 A 和车架 B 销轴孔的姿态调整到相对一致,明确测量原理与坐标系,传感器 D 可绕自身轴线旋转,并测量径向位移。需先建立系统坐标系,用于统一描述 A、B、C 的空间位置和姿态,如图 4 所示。

步骤 2) 测量转向节销轴孔 A 或 C 的空间姿态。由于 A 和 C 为转向节上一次成型的销轴孔,因此 A 和 C 的姿态相同。

将传感器 D 伸入销轴孔 A,记录传感器探测深度,然后令测量装置绕 Z 轴旋转 360°,记录不同旋转角度下的位移值。

由于 A 的内部是圆形套筒,位移值的变化会形成一个圆。通过这些位移数据,可拟合出 A 内部圆环相对于 D 坐标系的圆心坐标,以及圆环平面的法向方向。

对销轴孔 C 的位姿测量可以重复上述操作。因 A 和 C 为同一零件,因此测量姿态理论上相同。可以对销轴孔 C 进行位姿测量,用以提高测量精度。

在测量转向节 A 位姿时,令传感器 D 沿着轴线 Z_0 方向测量 m 个深度,每个深度均测量 360° 中 l 个角度 θ_i 对应的径向距离 $r(\theta_i)$ 。每个测点在传感器 D 初始坐标系下的直角坐标为:

$$(x_i, y_i, z_0) = (r(\theta_i) \cos \theta_i, r(\theta_i) \sin \theta_i, z_0) \quad (1)$$

式中: θ_i 为测量旋转的角度; $r(\theta_i)$ 为每个深度均测量 360° 中 l 个角度 θ_i 对应的径向距离,单位为 m。

对于每个轴向深度的周向测量数据,采用最小二乘圆拟合方法求解该深度下测得的圆心坐标 (x_0, y_0) 和半径 R_0 。圆的一般方程为:

$$x^2 + y^2 + ax + by + c = 0 \quad (2)$$

式中: R_0 为最小二乘圆拟合方法求解该深度下测得的半径。

转化为线性方程组为:

$$\mathbf{A} \times [a, b, c]^T = \mathbf{B} \quad (3)$$

其中:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 \end{bmatrix}, \mathbf{B} = \begin{bmatrix} -(x_1^2 + y_1^2) \\ -(x_2^2 + y_2^2) \\ \vdots \\ -(x_n^2 + y_n^2) \end{bmatrix}。$$

通过最小二乘法求解方程组,可以得到该深度下测得的圆心坐标 (x_0, y_0) 和半径 R_0 为:

$$x_0 = -\frac{a}{2}, y_0 = -\frac{b}{2}, R = (x_0^2 + y_0^2 - c)^{-\frac{1}{2}} \quad (4)$$

在多个轴向深度 $z_1, z_2, \dots, z_m$ 处测量,得到圆心序列:

$O_1(x_{01}, y_{01}, z_1), O_2(x_{02}, y_{02}, z_2), \dots, O_m(x_{0m}, y_{0m}, z_m)$, 则轴向的方向向量为:

$$\vec{u} = (x_{02} - x_{01}, y_{02} - y_{01}, z_2 - z_1) \quad (5)$$

令 $|\vec{u}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}$, 则单位化后得轴线方向为:

$$\hat{u} = \left(\frac{u_x}{|\vec{u}|}, \frac{u_y}{|\vec{u}|}, \frac{u_z}{|\vec{u}|} \right) \quad (6)$$

上述测量转向节销轴孔 A 的姿态示意图如图 4 所示。

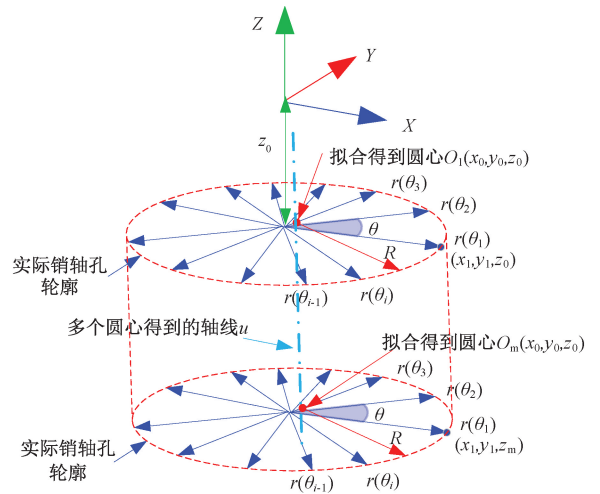


图 4 测量销轴孔的姿态示意

Fig. 4 Schematic diagram of pinhole attitude measurement

步骤 3) 测量套筒 B 的空间姿态,与步骤 2) 相似,将传感器 D 伸入销轴孔 B 中,然后测量并拟合出 B 内部圆环相对于 D 坐标系的圆心坐标,以及圆环平面的法向方向。

步骤 4) 计算空间姿态关系,根据步骤 2) 和 3) 测得的销轴孔 A 和 B 的圆心坐标和轴线方向确定销轴孔 A 和 B 的空间位姿关系。空间位姿关系如下:

(1) 位置偏移,计算销轴孔 B 的圆心相对于销轴孔 A 的平移向量。

以转向节销轴孔 A 的中间深度圆心为参考点,计算目标销轴孔 B 的中间深度圆心相对于 A 的平移偏差为:

$$\text{trans}_{B2A} = [\Delta X, \Delta Y, \Delta Z] = O_{B, \text{mid}} - O_{A, \text{mid}} \quad (7)$$

式中: $O_{A, \text{mid}}, O_{B, \text{mid}}$ 分别为销轴孔 A 和 B 中间深度的圆心坐标。

(2) 角度偏差,计算销轴孔 B 的轴线相对于销轴孔 A 的轴线的夹角以及绕轴线的旋转方向偏差。

本文采用 Z-Y-X 顺序欧拉角分解,将轴线方向偏差

转化为绕 X 、 Y 、 Z 轴的 3 轴角度偏差^[11]。

首先构建参考轴,本文选取转向节销轴孔 A 的轴线 u_A 到目标轴,即车架销轴孔 B 的轴线 u_B 的旋转矩阵为:

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} + \text{skew}(\mathbf{v}) + \text{skew}(\mathbf{v})^2 \times \frac{1 - u_A \times u_B}{\|\mathbf{v}\|^2} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为两个轴向的叉乘向量,即 $\mathbf{v} = u_A \times u_B$; $\text{skew}(\mathbf{v})$ 为叉乘反对称矩阵。

基于旋转矩阵分解欧拉角为:

$$\begin{cases} \text{pitch} = \arcsin(R_{3,1}) \\ \text{roll} = \arctan2(R_{3,2}, R_{3,3}) \\ \text{yaw} = \arctan2(R_{2,1}, R_{1,1}) \end{cases} \quad (9)$$

上述计算两个销轴孔相对姿态过程示意图如图 5 所示。

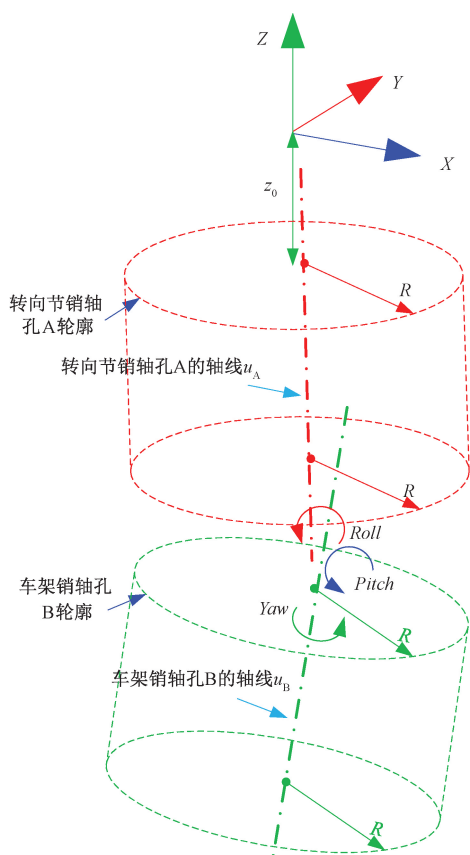


图 5 计算两个销轴孔相对姿态过程示意

Fig. 5 Schematic diagram of the process for calculating the relative attitude of two pinholes

步骤 5) 机械臂调整参数计算,通过计算得到的销轴孔 A 和 B 的空间位姿关系为机械装置调整转向节角度提供动作参数,从而让销轴更容易装配入转向节 A 和车架 B 内。

机械臂调整的目标是使 B 套筒的姿态与 A 套筒完

全一致,调整参数为测量偏差的反向补偿量。

(1) 平移补偿参数,抵消 B 相对于 A 的平移偏差,即:

$$[X_{\text{COMP}}, Y_{\text{COMP}}, Z_{\text{COMP}}] = [-\Delta X, -\Delta Y, -\Delta Z] \quad (10)$$

(2) 姿态补偿参数,抵消 B 相对于 A 的角度偏差,旋转顺序与欧拉角分解一致,即按照 Z-Y-X 顺序进行变化,则有:

$$[\text{roll}_{\text{COMP}}, \text{pitch}_{\text{COMP}}, \text{yaw}_{\text{COMP}}] = [-\text{roll}, -\text{pitch}, -\text{yaw}] \quad (11)$$

调整后车架销轴孔 B 的目标状态为:轴线方向与 A 一致,即 $u_{B_target} = u_A$,圆心坐标与 A 一致即 $O_{B_target} = O_A$ 。

2.2 销轴孔同轴度计算方法

2.1 节计算的销轴孔相对姿态测量方法主要用于描述两个销轴孔之间的位姿偏差,并为机械臂抓取某一个零件及调整位姿参数提供参考。本节给出两个销轴孔的同轴度计算方法,用于评价本文提出方法测量的准确性。

GB/T 1184-1996 标准中对同轴度给出了定义:同轴度是指被测要素 (B 的轴线) 相对于基准要素 (A 的轴线) 的重合程度,核心是量化被测轴线偏离基准轴线的空间径向偏差。在几何上,同轴度误差的理论定义为:以基准轴线为中心,包含被测轴线的最小圆柱的直径 (即被测轴线各点到基准轴线最大径向偏差的 2 倍)^[12-15]。

根据 GB/T 1184-1996 标准中对同轴度给出的定义对本文研究的两个零件的销轴孔之间的同轴度进行计算。

首先设定转向节销轴孔 A 的轴线为空间直线,其参数方程为:

$$L_A: \vec{P}_A(t) = \vec{O}_{A0} + t \times \vec{u}_A \quad (12)$$

式中: $\vec{O}_{A0}$ 为转向节销轴孔 A 轴线的基准点; $\vec{u}_A$ 为转向节销轴孔 A 轴线的单位方向向量; t 为轴线参数。

设定车架销轴孔 B 的轴线为空间直线,其参数方程为:

$$L_B: \vec{P}_B(t) = \vec{O}_{B0} + s \times \vec{u}_B \quad (13)$$

式中: $\vec{O}_{B0}$ 为车架销轴孔 B 轴线的基准点; $\vec{u}_B$ 为车架销轴孔 B 轴线的单位方向向量; s 为轴线参数。

两个销轴孔轴线单位向量的夹角 $\theta = \arccos(\vec{u}_A \times \vec{u}_B)$ 。车架销轴孔 B 轴线的基准点 $\vec{O}_{B0}$ 到转向节销轴孔 A 轴线 L_A 的径向距离为 d_0 。

基于轴线偏差的同轴度分步计算过程示意如图 6 所示。

基于轴线偏差的同轴度分步计算步骤如下:

步骤 1) 计算 B 轴线任意点到 A 轴线的径向距离。

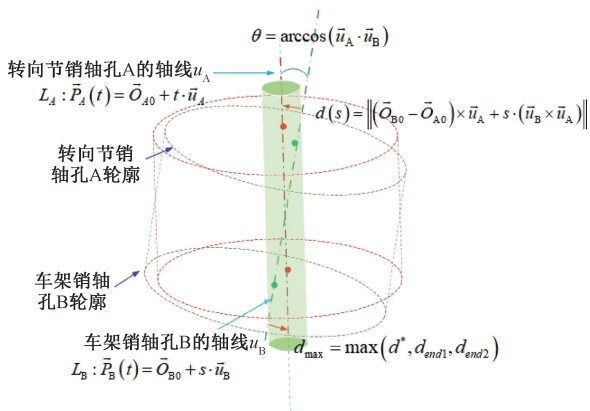


图 6 基于轴线偏差的同轴度分步计算

Fig. 6 Step by step calculation of coaxiality based on axis deviation

对于 B 轴线上任意一点到 A 轴线的径向距离(垂直距离)为:

$$d(s) = \frac{\|(\vec{P}_B(t) - \vec{O}_{A0}) \times \vec{u}_A\|}{\|\vec{u}_A\|} \quad (14)$$

将 $L_B: \vec{P}_B(t) = \vec{O}_{B0} + s \times \vec{u}_B$ 代入式(14)可得:

$$d(s) = \frac{\|(\vec{O}_{B0} - \vec{O}_{A0}) \times \vec{u}_A + s \times (\vec{u}_B \times \vec{u}_A)\|}{\|\vec{u}_A\|} \quad (15)$$

步骤 2) 求解最大径向偏差。

同轴度的核心是找到 B 轴线上到 A 轴线的最大径向偏差,需对上面求得的 $d(s)$ 求极值。

情况(1)若销轴孔 A 和销轴孔 B 轴线平行则有:

$$\begin{aligned} \therefore \vec{u}_B \times \vec{u}_A &= \vec{0} \\ \therefore d(s) &= \frac{\|(\vec{O}_{B0} - \vec{O}_{A0}) \times \vec{u}_A\|}{\|\vec{u}_A\|} = d_0 \end{aligned} \quad (16)$$

$$\therefore d_{\max} = d_0$$

情况(2)若销轴孔 A 和销轴孔 B 轴线不平行:

此时 $d(s)$ 是关于 s 的一元二次函数,求导并令导数为 0,得极值点为:

$$s^* = - \frac{[(\vec{O}_{B0} - \vec{O}_{A0}) \times \vec{u}_A] \times (\vec{u}_B \times \vec{u}_A)}{\|\vec{u}_B \times \vec{u}_A\|^2} \quad (17)$$

将 s^* 代入 $d(s)$,得到极值距离 d^* ;同时需验证销轴孔 B 轴线的轴向端点的径向距离 d_{end1} 、 d_{end2} ,最终得到:

$$d_{\max} = \max(d^*, d_{\text{end1}}, d_{\text{end2}}) \quad (18)$$

步骤 3) 计算同轴度误差。

根据 GB/T 1184-1996,同轴度误差 C 为最大径向偏差的 2 倍,即:

$$C = 2d_{\max} \quad (19)$$

3 销轴孔相对位姿测量方法可行性实验验证

3.1 实验验证装置

本文以 220 t 矿卡转向节和车架销轴孔实际尺寸搭建实验验证装置。在六轴机器人末端安装销轴孔姿态测量装置,由六轴机器人控制销轴孔姿态测量装置在实验验证的销轴孔内上下移动和旋转,从而模拟销轴孔姿态测量装置实际工作的状态。实验验证装置如图 7 所示。

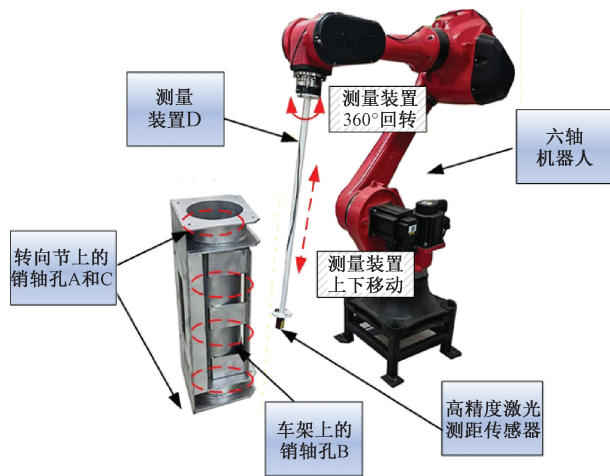


图 7 实验验证装置

Fig. 7 Experimental verification device

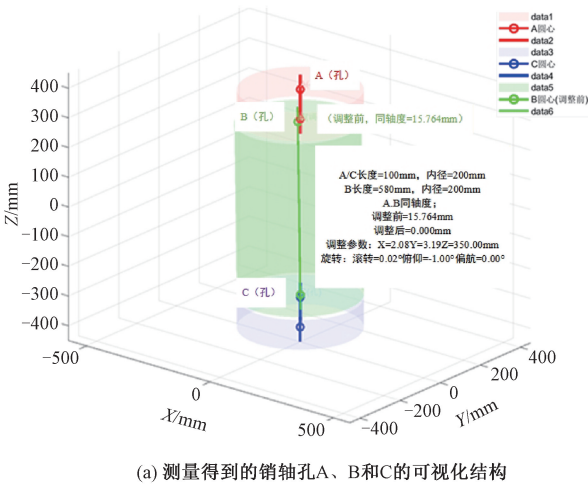
六轴机器人型号为 BRTIRUS1510A,其移动定位误差为 ± 0.05 mm。激光测距传感器型号为松下 HG-C1400 型激光位移传感器,测距误差为 $\pm 0.2\%$ FS。

转向节销轴孔 A 和 C 深度均为 100 mm,直径为 200 mm。车架销轴孔 B 深度为 580 mm,直径为 200 mm。

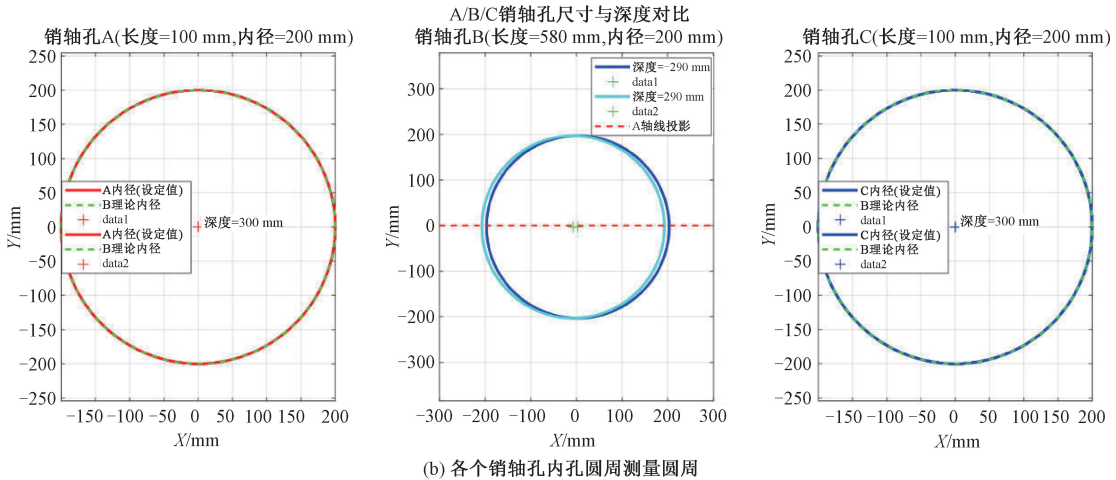
3.2 实验结果分析

令机器人带动测量装置 360°回转同时上下移动,一个圆周内测量 36 个点位,上下移动时测量 2 个深度的圆周尺寸,使用第 2 节中方法,得到转向节和车架销轴孔存在角度偏差和无角度偏差时的相对位姿关系如图 8 和 9 所示。

结果表明,虽然人为设定 A 和 B 姿态上无角度偏差,但是实际调整过程依然会存在一定偏差。实验测得销轴孔 A、B、C 均可以通过测量 2 个深度的圆周尺寸,然后得到其轴线向量。此次实验中 B 相对于 A 的平移偏差分别为 $\Delta X = 2.08$ mm、 $\Delta Y = 3.19$ mm。欧拉角分解结果显示,B 相对于 A 的 $pitch = 0.14^\circ$,B 相对于 A 的 $roll = 0.02^\circ$,B 相对于 A 的 $yaw = -1.02^\circ$ 。销轴孔 A 和 B 的同轴度误差 = 15.764 mm。



(a) 测量得到的销轴孔A、B和C的可视化结构
(a) The visual structure of pon holes A,B, and C obtained through measurement



(b) 各个销轴孔内孔圆周测量圆周
(b) Measure the circumference of the inner hole in each pin hole

图 8 A 和 B 无角度偏差实验结果
Fig. 8 Experimental results of no angular deviation between A and B

本次实验中 B 相对于 A 的姿态偏差较大。两者平移偏差分别为 $\Delta X=14.32\text{ mm}$ 、 $\Delta Y=-18.22\text{ mm}$ 。欧拉角分解结果显示,B 相对于 A 的俯仰角 $=9.59^\circ$,B 相对于 A 的横滚角 $=0.12^\circ$,B 相对于 A 的偏航角 $=0.01^\circ$ 。销轴孔 A 和 B 的同轴度误差达到了 133.648 mm 。

3.3 实验结果验证

为了验证上述方法得到的 B 与 A 之间的姿态关系的准确性,使用基恩士高精度 3D 轮廓测量仪对 A 和 B 的相对位姿关系进行测量,如图 10 所示。

A 和 B 的同轴度测试结果如表 1 所示。
由于转向节和车架是两个独立零件,因此转向节销轴孔 A 和车架销轴孔 B 的同轴度偏差较大,多次试验得到本文研究方法的 A 和 B 同轴度如表 1 第 2 列。使用图 10 中仪器测得 A 和 B 真实同轴度如表 1 第 3 列所示。本文研究方法和真实结果的同轴度误差在 $4\% \sim 7\%$ 之间,由于本文研究的对象为大型矿山机械装备的销轴孔,

因此上述计算误差基本满足使用要求。

表 1 A 和 B 的同轴度测试
Table 1 Coaxiality test of A and B

实验序号	本文方法/mm	基恩士仪器测试结果/mm	相对误差/%
1	152.08	144.67	4.87
2	206.3	219.68	6.49
3	187.6	199.91	6.56
4	226.8	217.81	3.96

机器人加激光位移传感器的方法,其双孔相对位姿测量的误差会显著高于基恩士高精度 3D 轮廓测量仪。主要原因在于数据获取环节的精度差距太大:前者的数据来源受机器人绝对误差和单点激光传感器的大误差影响;后者是专业高精度 3D 扫描设备,点云质量高,且无机器人运动误差。

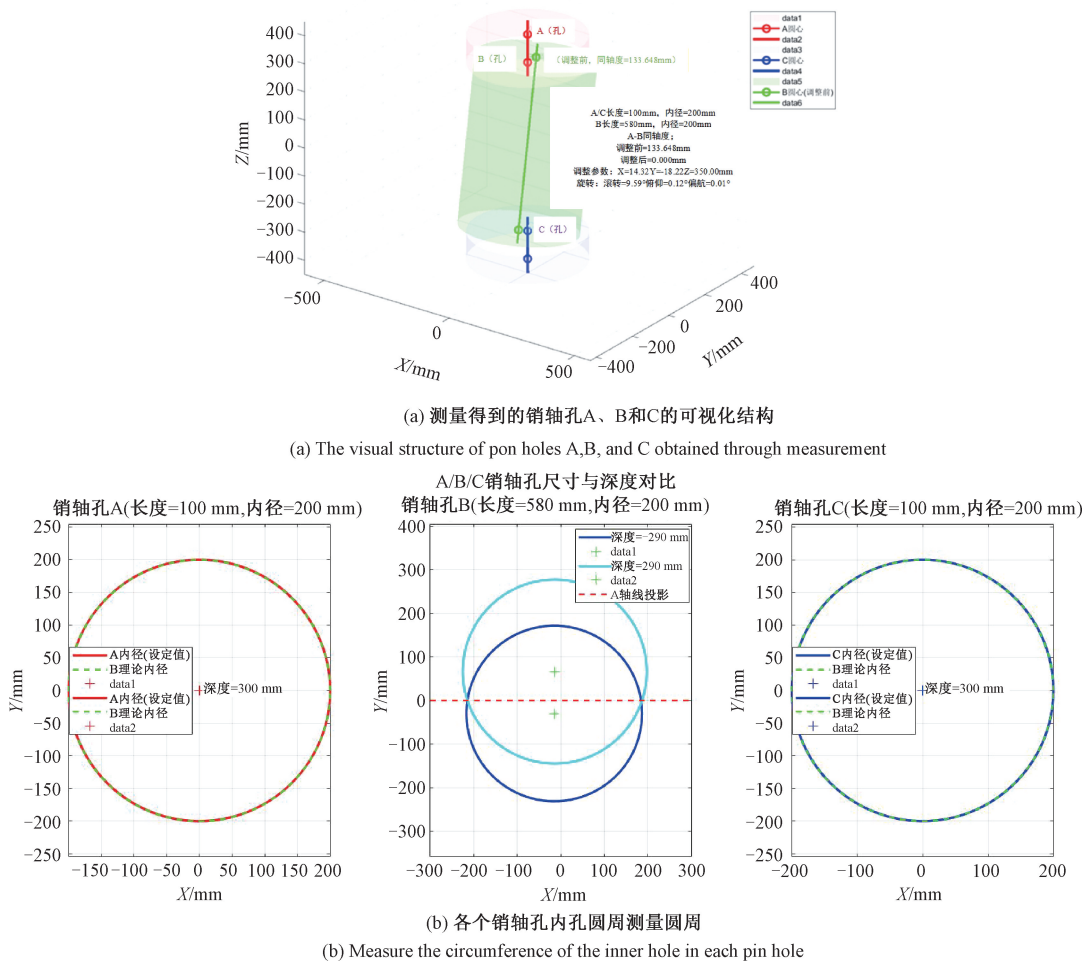


图 9 A 和 B 存在角度偏差实验结果

Fig. 9 Experimental results of angular deviation between A and B

4 不同因素对销轴孔相对位姿测量精度影响分析

研究不同的参数对于本文研究的销轴孔位姿测量方法测量精度的影响规律。主要研究不同轴线测量层数 m 、不同圆周测量点数 n 、不同的销轴孔初始角度偏差对于测量结果的影响规律。

4.1 不同轴线测量层数

销轴孔轴向测量层数,反映轴向采样密度,选取 $m = 2, 3, 4, 5, 6$ 。多次测量后得到的平均值与使用基恩士仪器测量结果进行对比,得到同轴度误差如图 11 所示。

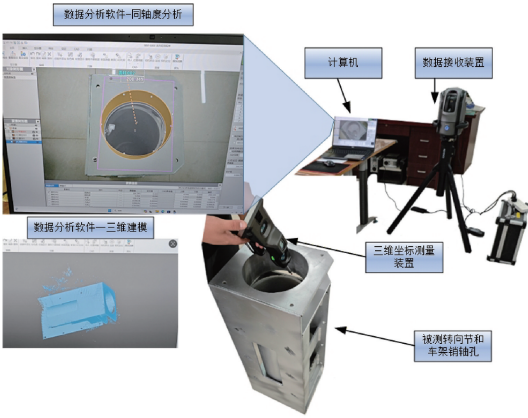
由图 11 可知,轴线测量层数 m 对同轴度误差的影响呈现误差随着轴线测量层数增加而下降的趋势。当 $m = 2$ 时,同轴度误差最大,这是因为仅 2 层轴向采样点缺乏足够的空间约束,难以精准拟合销轴孔的真实轴线,导致姿态测量的线性度不足;随着 m 从 3 增至 5,同轴度误差虽然呈下降趋势,但是变化较小。因此在实际应用时,设

定轴线测量层数 > 2 即可,过多的测量层数会增加测量时间,降低测量效率,而不会增加太多的测量精度。

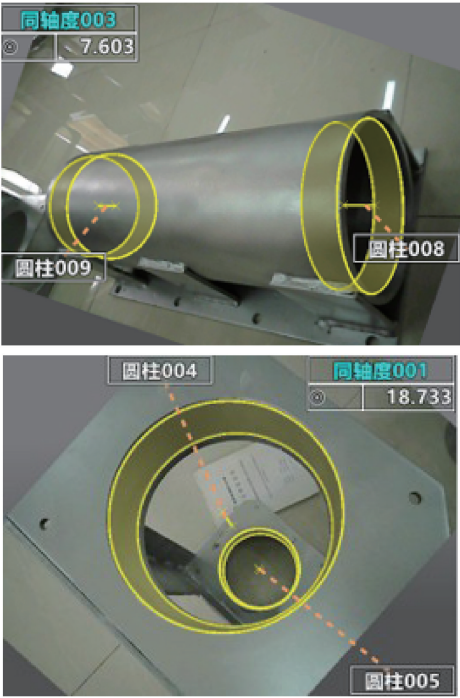
4.2 不同圆周测量点数

圆周测量点数 n 为每层周向采样点数,反映圆周采样密度,选取 $n = 8, 16, 24, 36, 48, 60$ 。多次测量后得到的平均值与使用基恩士仪器测量结果进行对比,得到同轴度误差如图 12 所示。

由图 12 可知,圆周测量点数 n 对同轴度误差的影响呈现误差随着轴线测量层数增加而下降的趋势。当 $n = 8$ 时,同轴度误差最大,这是由于周向采样点稀疏,难以完整描述销轴孔的圆周轮廓,圆拟合过程中易受离散点干扰,导致圆心定位偏差较大;随着 n 从 16 增至 60,同轴度误差虽然呈下降趋势,但是变化较小。因为 $n = 36$ 个周向点已能满足圆拟合的最小冗余要求,可精准构建销轴孔的圆周轮廓,充分抵消单个测量点的噪声干扰。而超过 36 点后,周向采样密度已达到拟合算法的精度饱和阈值,新增点数无法进一步降低拟合误差。综合精度与效



(a) 实验装置
(a) Experimental facility



(b) 实验结果
(b) The experimental results

图 10 A 和 B 的相对位姿关系测量实验
Fig. 10 Measurement experiment of the relative attitude relationship between A and B

率,建议实际应用时选取 $n=36$ 作为最优圆周测量点数。

4.3 不同销轴孔初始角度偏差

销轴孔初始角度偏差为 B 轴线相对于 A 轴线的初始倾斜角度,反映被测件姿态复杂度,选取 $\alpha=8^\circ, 16^\circ, 24^\circ, 36^\circ, 48^\circ, 60^\circ$ 。多次测量后得到的平均值与使用基恩士仪器测量结果进行对比,得到同轴度误差如图 13 所示。

由图 13 可知,销轴孔初始角度偏差 α 对同轴度误差的影响呈非线性递增特征。也就是销轴孔越倾斜越不利于精确测量。核心原因在于小角度倾斜时,销轴孔的周

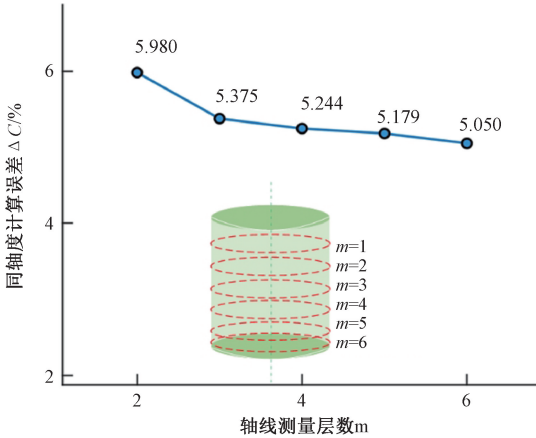


图 11 不同轴线测量层数对测量精度影响

Fig. 11 Influence of different axial measurement layers on measurement accuracy

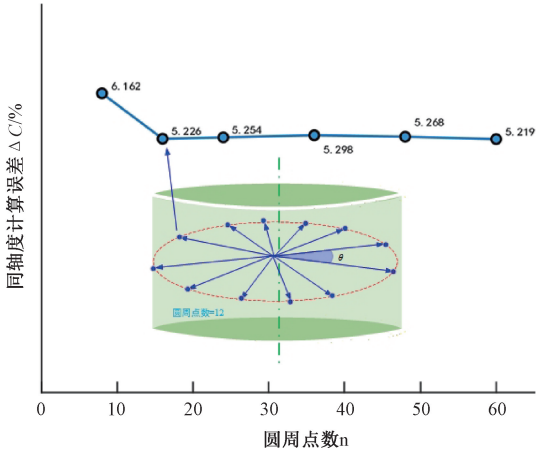


图 12 不同圆周测量点数对测量精度影响

Fig. 12 Influence of different circumferential measurement points on measurement accuracy

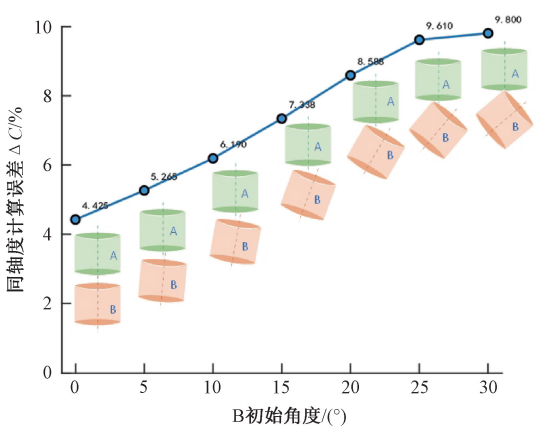


图 13 不同销轴孔初始角度偏差对测量精度影响

Fig. 13 Influence of different initial angular deviations of pinholes on measurement accuracy

向投影仍接近圆形,拟合算法可有效修正姿态偏差;而当

倾斜角度增大,周向投影逐渐变为椭圆,且椭圆离心率随角度增大而增加,导致圆心定位偏差和轴线方向分解误差被显著放大,进而推高同轴度测量误差。

因此在实际应用中,尽量先将转向节 A 和车架 B 销轴孔的姿态调整到相对一致的情况再使用本文提出的销轴孔姿态测量装置和方法。

5 结 论

本文提出的基于 3D 拟合与欧拉角分解的双孔相对位姿测量方法,实现了销轴孔间相对姿态偏差的精准量化,解决了传统方法聚焦单一孔位测量、难以提供工程化调整依据的局限,测量相对误差在 4%~7% 范围内,满足大型矿山设备销轴安装的精度需求。不同轴线测量层数 m 、不同圆周测量点数 n 、不同的销轴孔初始角度偏差对于测量结果的影响规律,给出了最优的测量参数组合。本文提出的测量装置结构简单、操作便捷,在矿山维修现场复杂环境下适应性强,且输出的平移与旋转补偿量可直接对接机械臂调整系统,有效提升了销轴安装效率,为大型矿山机械传动部件装配提供了新的技术路径。

参考文献

- [1] 马睿豪. 面向机器人抓取精准定位的含圆孔零件位姿双目视觉测量技术研究[D]. 浙江:浙江大学,2023.
Ma Ruihao. Research on dual-view vision measurement technology for pose of parts with circular holes for precise positioning in robot grasping [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2023.
- [2] 刘佳. 基于 ETH/EIH 机器视觉系统的轴、孔位姿测量 [D]. 西安:西安理工大学,2015.
Liu Jia. Axis and hole positioning measurement based on ETH/EIH machine vision system [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2015.
- [3] 黄开启,邹秀梅,刘正超. 基于 SHUK-SVSF 算法的轴孔装配孔位姿估计[J]. 现代制造工程,2025(7): 105-112,128.
Huang Kaiqi, Zou Xiumei, Liu Zhengchao. Estimation of hole position and orientation in shaft hole assembly based on SHUK-SVSF algorithm [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2025(7): 105-112,128.
- [4] 李瑞生,沈杰,王素燕. 油缸活塞杆销轴孔垂直度批量检测方法研究与应用 [J]. 液压气动与密封,2023, 43(6): 122-125.
Li Ruisheng, Shen Jie, Wang Suyan. Research and application of batch detection method for the verticality of cylinder piston rod pin shaft hole [J]. Hydraulic Pneumatic & Sealing, 2023, 43(6): 122-125.
- [5] 一种基于机器视觉的轴孔类零件位姿调整和定位方法[P]. 中国专利,202410481959. 2, 2024-11-29.
A method for adjusting and positioning the position and orientation of shaft-hole type parts based on machine vision[P]. Chinese Patent, 202410481959. 2, 2024-11-29.
- [6] 龚国强,田演,夏鑫宇. 基于位姿参数估计的多视角点云配准方法[J]. 电子测量与仪器学报,2024, 38(6): 241-252.
Gong Guoqiang, Tian Yan, Xia Xinyu. A multi-view point cloud registration method based on pose parameter estimation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6): 241-252.
- [7] 张宏,李伟,王浩. 大型薄壁箱体同轴度测量方法研究 [J]. 机械工程学报,2023, 59(12): 189-198.
Zhang Hong, Li Wei, Wang Hao. Research on the measurement method of coaxiality for large thin-walled enclosures [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59(12): 189-198.
- [8] 宁睿,刘志晨,刘毅,等. 强化学习引导变导纳控制的机械臂精密轴孔装配模糊位姿估计与精确调整[J]. 仪器仪表学报,2024, 45(11): 170-177.
Ning Rui, Liu Zhichen, Liu Yi, et al. Fuzzy pose estimation and precise adjustment for precise shaft hole assembly of manipulator guided by reinforcement learning and variable reactance control [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2024, 45(11): 170-177.
- [9] 李明,陈晓,张丽. 孔位姿态估计的多深度圆周测量坐标转换模型 [J]. 制造技术与机床, 2022(8): 156-162.
Li Ming, Chen Xiao, Zhang Li. A multi-depth circular measurement coordinate conversion model for hole position orientation estimation [J]. Manufacturing Technology and Machine Tools, 2022(8): 156-162.
- [10] 王晨,刘振,杨帅. 矿山环境下最小二乘圆拟合的异常点剔除策略[J]. 矿业研究与开发,2024, 44(3): 178-184.
Wang Chen, Liu Zhen, Yang Shuai. Anomaly point elimination strategy for least squares circle fitting in mining environment [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(3): 178-184.
- [11] Chen G, Zhao J, Sun D, et al. Error analysis of euler angle decomposition order in heavy machinery shaft-hole assembly pose calculation[J]. Mechanism and Machine Theory, 2021, 165: 104432.
- [12] 张丹,李长安,逯海滨,等. 基于轴线局部搜索的曲轴轴径视觉测量方法[J]. 机电工程, 2023, 40(5): 797-802.
Zhang Dan, Li Changan, Lu Haibin, et al. Visual measurement method for crankshaft bore based on local

- search along the axis [J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2023, 40(5): 797-802.
- [13] 董雪仪,李宏玉,李佳成,等. 多重抗干扰策略的销轴圆孔视觉测量方法[J]. 中国测试, 2025, 51(11): 74-83.
- Dong Xueyi, Li Hongyu, Li Jiacheng, et al. Visual measurement method for pin and circular hole based on multi-interference suppression strategy [J]. China Testing, 2025, 51(11): 74-83.
- [14] 梁龙龙. 三坐标测量机的同轴度测量评定[J]. 现代制造技术与装备, 2017(7): 108-109.
- Liang Longlong. Evaluation of parallelism measurement in coordinate measuring machines [J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2017(7): 108-109.
- [15] 李兵,傅卫平,王雯,等. 基于准线-母线的空间孔位姿重建[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(7): 1653-1659.
- Li Bing, Fu Weiping, Wang Wen, et al. Spatial hole pose reconstruction based on quasi-line-midline [J]. Chinese Journal of Science Instrument, 2017, 38(7): 1653-1659.

作者简介



谢春雪(通信作者), 2011 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2013 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2017 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学讲师、硕士生导师, 主要研究方向为机械电子工程。

E-mail: xcxlntu@126.com

Xie Chunxue(Corresponding author) received her B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all degree from Liaoning Technical University in 2011, 2013 and 2017. Now she is a lecturer and M. Sc. supervisor at Liaoning Technical University. Her main research interests include specializing in mechanical engineering.



陈祥钰, 2025 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 现为辽宁工程技术大学研究生, 主要研究方向为机械电子工程。

E-mail: chenxiangyu0430@163.com

Chen Xiangyu received his B. Sc. degree from Liaoning University of Technology in 2025. he is currently a M. Sc. candidate at Liaoning University of Technology. His main research interests mechanical and electronic engineering.



刘治翔, 2011 年于辽宁工程技术大学获得学士学位, 2013 年于辽宁工程技术大学获得硕士学位, 2017 年于辽宁工程技术大学获得博士学位, 现为辽宁工程技术大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为机械电子工程。

E-mail: lzxcndl@yeah.net

Liu Zhixiang received his B. Sc., M. Sc. and Ph. D. all degree from Liaoning Technical University in 2011, 2013 and 2017. Currently, he is an associate professor and doctoral supervisor at Liaoning Technical University. His main research interests include specializing in mechanical and electronic engineering.