

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514633

面向导轨轮廓测量的多源误差建模与补偿方法研究*

王海同¹, 马紫瑞^{1,2,3}, 李金峰^{2,3}, 张泽阳^{1,2}

(1. 北京交通大学机械与电子控制工程学院 北京 100044; 2. 雁栖湖基础制造技术研究院(北京)有限公司 北京 100044; 3. 国家市场监督管理总局重点实验室(工业母机功能部件性能测试与评价) 北京 100044)

摘要:针对超精密加工中滚动直线导轨全行程、多参数复合测量的精度需求,研究了融合线结构光传感技术的导轨轮廓几何误差补偿方法。针对进给轴直线度误差与传感器安装误差的耦合导致测量数据畸变的问题,基于多体系统理论构建了包含三维位置误差、姿态误差及传感器三轴安装偏角误差的统一数学模型,将进给轴视为“运动体”、传感器视为“末端执行体”,明确各类误差的非线性耦合机制。设计了基于四象限探测器与线激光传感器的误差辨识方法,通过二次多项式拟合分离进给轴位置误差与姿态误差,基于几何投影关系实现传感器安装偏角的提取,并构建联合补偿矩阵对测量坐标系进行修正补偿。搭建了导轨几何轮廓仪实验平台,在 800 mm 行程内进行了直线度误差辨识验证,在 0.5°~2.0° 偏角范围内进行了传感器安装误差辨识验证,两种方法辨识误差均小于 3.5%,验证了辨识方法在导轨轮廓测量中的准确性;对比无补偿、单误差补偿及联合补偿 4 种实验方案,结果表明,联合补偿后导轨轮廓测量偏差均值从 6.229 μm 降至 2.301 μm,偏差平均降低 36.9%,标准差降低 22.8%,最大偏差降低 20.8%,全行程测量精度显著提升,验证了多体系统误差模型及联合补偿矩阵的有效性,为超精密加工装备的高精度检测提供了理论与技术支撑。

关键词: 导轨轮廓; 直线度误差; 安装误差; 线结构光测量

中图分类号: TH161+.24 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.99

Research on multi-source error modeling and compensation method for guide rail profile measurement

Wang Haitong¹, Ma Zirui^{1,2,3}, Li Jinfeng^{2,3}, Zhang Zeyang^{1,2}

(1. College of Mechanical and Electronic Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Yanqi Lake Institute of Basic Manufacturing Technology Research Co., Ltd., Beijing 100044, China; 3. Key Laboratory of Machine Tool Functional Parts Performance Test and Evaluation, State Administration for Market Regulation, Beijing 100044, China)

Abstract: To meet the precision requirements for full-stroke, multi-parameter composite measurement of rolling linear guides in ultra-precision machining, this paper investigates a geometric error compensation method for guide rail contours based on fused line-structured light sensing technology. To address the distortion in measurement data caused by the coupling of feed-axis straightness errors and sensor installation deviations, a unified mathematical model incorporating three-dimensional position error, attitude error, and sensor three-axis installation deviation is established based on multi-body system theory. The feed axis is treated as the "moving body" and the sensor as the "end effector," and the nonlinear coupling mechanism of various errors is clarified. An error identification method using a quadrant detector and a linear laser sensor is designed. Feed-axis position and attitude errors are separated through quadratic polynomial fitting, and sensor installation deviation angles are extracted based on geometric projection relationships. A joint compensation matrix is then constructed to correct and compensate the measurement coordinate system. An experimental platform for the guide rail geometric contour instrument is established. Straightness error identification is verified over an 800 mm stroke, and sensor installation deviation is validated within a 0.5°~2.0° deflection range. Identification errors for both methods are below 3.5%, confirming the accuracy of the proposed method for guide rail contour measurement. Comparative experiments under no compensation, single-error compensation, and joint

收稿日期: 2025-10-29 Received Date: 2025-10-29

* 基金项目: 中国机械总院技术发展基金(J242202Y)、国家自然科学基金(52475507)、北京交通大学基础研究基金(2024JBMC017)项目资助

compensation scenarios demonstrate that, after joint compensation, the average deviation of guide rail profile measurement decreases from 6.229 μm to 2.301 μm , with the mean deviation reduced by 36.9%, the standard deviation by 22.8%, and the maximum deviation by 20.8%. Full-stroke measurement accuracy is significantly improved, verifying the effectiveness of the multi-body system error model and the joint compensation matrix. The proposed method provides a theoretical and technical foundation for high-precision inspection of ultra-precision machining equipment.

Keywords: guide rail profile; straightness error; installation error; line structured light measurement

0 引言

以滚珠丝杠副、滚动直线导轨副为代表的滚动功能部件,是数控机床系统刚性维持和加工精度保持的核心承载单元,其服役性能直接决定了军民领域高端装备的定位精度与动态响应特性^[1-4]。随着超精密加工技术向纳米级精度迈进,导轨表面形貌的全行程高精度测量面临严峻挑战。当前主流测量方法中,白光干涉仪虽可实现纳米级纵向分辨率,但受限于毫米级测量行程^[5-6];激光跟踪仪虽具备大范围测量能力,却难以捕捉微米级表面特征^[7-8]。针对滚动直线导轨全行程、多参数复合测量的工程需求,提出一种融合线结构光传感技术的几何轮廓仪测量方法^[9-10],以高刚性气浮平台作为测量基体,集成线激光位移传感器与光栅定位系统,配合自主研发的形貌重构算法,实现导轨工作面跨尺度形貌特征的自动检测。

融合线结构光传感技术的轮廓仪虽兼具量程与分辨率优势,但其测量精度受多源误差耦合影响显著,尤其是进给轴直线度误差与传感器安装误差的交互作用,导致长行程测量时轮廓数据出现畸变与偏差。现有研究中,进给轴直线度误差的辨识多依赖光敏探测器或激光准直仪,通过分离运动轨迹偏差实现补偿^[11-13],冯文龙等^[14]利用数控系统外部机械原点偏移功能,基于B样条曲线方法建立空间直线度误差数学模型,实现对大型龙门数控机床的空间直线度误差补偿;张伟等^[15]基于最小区域法的大变异双切点交叉遗传算法评定工件轴线的直线度误差,设计小型轴类零件直线度误差测量平台,完成轴类零件轴线直线度快速测量;匡萃方等^[16]提出一种共路补偿空气扰动造成激光漂移的方法,用于长距离直线度测量,并能实时补偿空气扰动所带来的附加位置误差;金涛等^[17]设计一种空间对称四光路结构的直线度测量干涉仪,采用2个楔角胶合而成的楔面棱镜作为直线度传感器件,实现高精直线条外差干涉测量。传感器安装误差常基于几何投影关系进行单参数修正^[18-20],马金钰等^[21-22]基于三点测圆原理,定量分析位移传感器的角度安装误差对圆径测量的影响,提出安装误差校准方法;刘博文等^[23]在叶片轮廓快速测量中,针对安装产生的垂直度误差,建立全局标定参数矩阵并提出补偿方法;张旭

等^[24]提出一种基于线激光传感器的工件尺寸测量系统的误差补偿方法,分析了传感器和设备两者坐标轴夹角导致的工件尺寸坐标值的误差,利用坐标系投影和图像处理技术进行误差补偿;李欣飞等^[25]在火车轮三维几何参数在线测量中,设计分步式传感器标定策略,结合异形标定块精确解算传感器安装参数,建立极坐标偏心误差修正模型,实时补偿径向尺寸测量误差。

然而,上述方法普遍忽略了两类误差在测量系统中的耦合效应:进给轴的姿态偏差会改变传感器的实际测量基准,而传感器的安装偏角会放大运动轨迹误差对轮廓坐标的映射失真。例如,进给轴垂向直线度误差与传感器基准轴偏角共同导致轮廓横向坐标累积误差,二者的非线性叠加在长行程测量中可使误差放大数倍。当前研究缺乏对“运动-传感”误差链的统一建模,导致补偿策略停留在单一误差源修正层面,难以满足超精密测量的需求。

针对上述问题,本文提出一种基于多体系统理论的综合误差分析方法,构建包含进给轴直线度误差与传感器安装偏角误差的统一变换模型,设计运动轴误差与传感器位姿的辨识方法,结合四象限探测器与线激光传感器的融合数据,最终通过联合补偿矩阵对测量坐标系进行修正,实现导轨轮廓仪综合误差的补偿与精度提升。

1 基于多体系统理论的误差传递模型构建

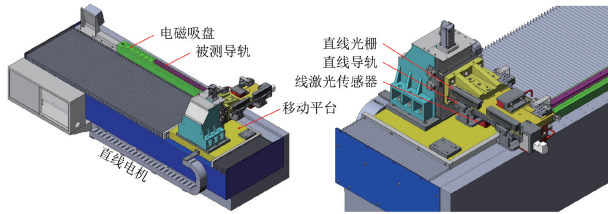
在导轨几何轮廓仪测量系统中,如图1所示,进给轴的直线度误差并非单一的位置偏差,而是包含沿三轴方向的平移误差与绕各轴的姿态偏差,这些误差通过末端传感器的位姿变化直接影响测量结果。本章基于多体系统理论,将进给轴视为“运动体”、传感器视为“末端执行体”,构建二者的误差模型,明确各误差源的传递路径与耦合机制,为后续的辨识与补偿提供理论基础。

1.1 坐标系定义与误差参数化

基于多体系统建模逻辑,参考标准D-H(Denavit-Hartenberg)参数法,测量系统坐标系遵循“基座-运动刚体-末端刚体”的核心逻辑:全局坐标系对应“基座刚体”,进给轴坐标系通过“平移关节(进给运动)+旋转关节(姿态偏差)”与基座关联,传感器坐标系通过“旋转关节(安装偏角)”与进给轴刚体关联,该结构可直接兼容



(a) 测量台实拍图
(a) Real shot picture of measuring platform



(b) 测量台物理示意图
(b) Physical schematic diagram of measuring platform

图1 导轨轮廓测量台

Fig. 1 Guide rail profile measuring platform

齐次变换矩阵,确保误差传递模型可迁移至末端激光扫描测头。

定义测量系统的核心坐标系,如图2所示。其中,全局坐标系 $O-XYZ$,以导轨基准面为 XY 平面,进给方向为 Z 轴, X 轴垂直于导轨工作面,作为轮廓测量的绝对基准;进给轴坐标系 $O_m-X_m Y_m Z_m$ 固连于进给平台,理想状态与 $O-XYZ$ 各轴平行,实际运动时产生位置偏差和姿态偏差;传感器理想坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$,理想安装时 $O_s=O_m$, Y_s 轴为激光测量轴线,平行于全局坐标系 Y 轴, Z_s 轴为进给运动方向,与全局 Z 轴共线。

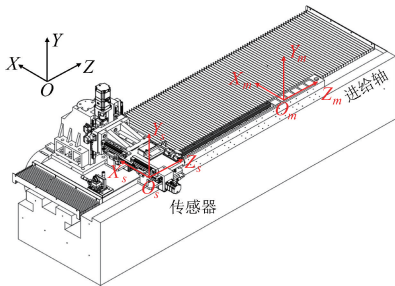


图2 测量系统坐标系定义

Fig. 2 Definition of coordinate system of measurement system

1.2 进给轴直线度误差的定义与建模

将进给轴的直线度误差分解为位置误差和姿态误差两部分,二者共同决定传感器的实际测量位姿。

位置误差即沿 X 、 Y 和 Z 轴的平移偏差 Δx 、 Δy 和 Δz 。其中, Δx 和 Δy 分别为横向和垂向直线度误差,直接影响传感器定位精度; Δz 为进给方向的位移误差,由

精密光栅(禹衡 JFT-10B-1740C3,分辨率 $0.01 \mu\text{m}$) 实时测量补偿,建模中可视为已知量。位置误差的存在会使传感器在测量过程中偏离理想的测量位置,例如 $\Delta x=5 \mu\text{m}$ 时,同一横截面内的导轨轮廓测点横向坐标会产生 $5 \mu\text{m}$ 的系统性偏移,该偏移需与后续传感器安装误差耦合分析。

姿态误差即绕非运动轴的旋转偏差,定义为绕 X_m 轴的俯仰角 α 、绕 Y_m 轴的偏摆角 β 、绕 Z_m 轴的翻滚角 γ 。姿态误差通过改变传感器测量方向影响精度,如俯仰角 α 会使 Y_m 轴倾斜,引入垂向坐标误差 $\Delta y_\alpha = l \cdot \tan\alpha$, l 为测量进给位移,在长行程测量中会累积为显著偏差。偏摆角 β 同理,会导致 X_m 轴倾斜,引入横向坐标误差 $\Delta x_\beta = l \cdot \tan\beta$,进而影响测量的准确性。对于绕 Z_m 轴的翻滚角 γ ,属于绕运动轴的独立姿态分量,不直接改变进给轨迹的空间方向,其影响可通过后文中的传感器安装偏角 γ' 间接表征,此处不再单独建模。

基于上述分析,将进给轴误差分解为 X/Y 轴位置误差和俯仰/偏摆姿态误差,其中,位置误差矩阵 $\mathbf{T}_{\text{trans}} = [\Delta x \ \Delta y \ 1]^T$,姿态误差矩阵 $\mathbf{R}_{\text{rotate}}$ 按“ $Y-X$ ”欧拉角顺序展开,小角度近似 ($\alpha, \beta \ll 1$) 并忽略高阶无穷小项。

$$\mathbf{R}_{\text{rotate}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta \\ 0 & 1 & -\alpha \\ -\beta & \alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

构建进给轴从理想位姿到实际位姿的变换矩阵。

$$\mathbf{T}_{\text{feed}} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{\text{rotate}} & \mathbf{T}_{\text{trans}} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \beta & \Delta x \\ 0 & 1 & -\alpha & \Delta y \\ -\beta & \alpha & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

1.3 传感器安装误差的定义与建模

传感器安装误差本质上是实际坐标系 $O'_s-X'_s Y'_s Z'_s$ 相对于理想坐标系 $O_s-X_s Y_s Z_s$ 的位姿偏差,直接导致激光射线方向偏离理论测量轴线,进而引入轮廓数据畸变。传感器理想安装时,其测量轴线(激光射线方向)应与全局坐标系 Y 轴重合,平行于导轨基准面,且线激光投射截面垂直于进给方向,将传感器安装误差参数化为绕 X_s 、 Y_s 和 Z_s 三轴的偏角:偏角 α' 、偏角 β' 、偏角 γ' 。

安装偏角示意图如图3所示。偏角 α' 指传感器绕自身 X_s 轴旋转,导致激光线在 Y_s-Z_s 平面内倾斜,使导轨圆弧滚道段呈现椭圆畸变,导轨侧基准面不垂直于底面,如图3(b)所示。偏角 β' 指传感器绕自身 Y_s 轴旋转,导致激光投射截面沿 Z_s 轴平移,使同一激光线上的测点在进给方向产生位置偏差,如图3(c)所示。偏角 γ' 指传感器绕自身 Z_s 轴旋转,导致激光线在 X_s-Y_s 平面内倾斜,影响高度方向的测量精度,如图3(d)所示。

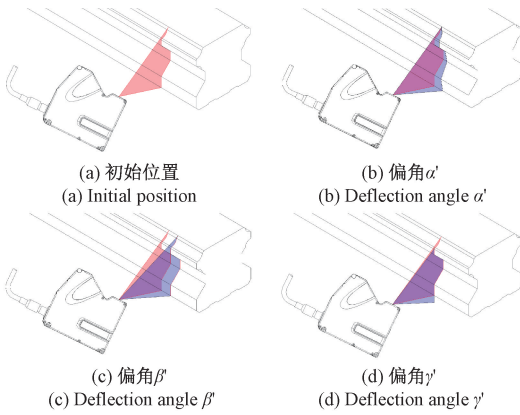


图3 安装偏角示意图

Fig. 3 Schematic diagram of installation deflection angle

安装角度变换矩阵 $\mathbf{R}_{\text{install}}$ 按“Z-Y-X”欧拉角顺序展开,小角度近似($\alpha', \beta', \gamma' \ll 1$)并忽略高阶无穷小项。

$$\mathbf{R}_{\text{install}} = \begin{bmatrix} 1 & -\gamma' & \beta' & 0 \\ \gamma' & 1 & -\alpha' & 0 \\ -\beta' & \alpha' & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

1.4 误差的耦合建模

传感器实际坐标系 O'_s 的位姿由进给轴误差 \mathbf{T}_{feed} 与自身安装误差 $\mathbf{R}_{\text{install}}$ 共同决定。

$$\mathbf{T}_{\text{total}} = \mathbf{T}_{\text{feed}} \cdot \mathbf{R}_{\text{install}} = \begin{bmatrix} 1 - \beta\beta' & -\gamma' + \beta\alpha' & \beta' + \beta & \Delta x \\ \gamma' + \alpha\beta' & 1 - \alpha\alpha' & -\alpha' - \alpha & \Delta y \\ -\beta' - \beta + \alpha\gamma' & \alpha' + \alpha + \beta\gamma' & 1 - \alpha\alpha' - \beta\beta' & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

对于测量点 $\mathbf{P}_{\text{ideal}} = [X, Y, Z, 1]^T$, 其在传感器实际坐标系下的坐标 $\mathbf{P}_{\text{actual}} = [X', Y', Z', 1]^T$ 满足:

$$\mathbf{P}_{\text{actual}} = \mathbf{T}_{\text{total}} \cdot \mathbf{P}_{\text{ideal}} \quad (5)$$

展开变换关系可得测量点在 X、Y 和 Z 方向上的总误差表达式,其中,测量横向误差 ΔX_{total} 、高度误差 ΔY_{total} 、进给误差 ΔZ_{total} 分别为:

$$\begin{cases} \Delta X_{\text{total}} \approx \frac{Y(\beta\alpha' - \gamma') + Z(\beta + \beta') + \Delta x}{1 - \beta\beta'} \\ \Delta Y_{\text{total}} \approx \frac{X(\gamma' + \alpha\beta') - Z(\alpha + \alpha') + \Delta y}{1 - \alpha\alpha'} \\ \Delta Z_{\text{total}} \approx \frac{-X(\beta + \beta' - \alpha\gamma') + Y(\alpha + \alpha' - \beta\gamma')}{1 - \alpha\alpha' - \beta\beta'} \end{cases} \quad (6)$$

实际测量中,测量误差由进给轴位置误差、姿态误差与传感器安装误差共同贡献。测量误差具有非线性耦合性,如 $(Y\beta\alpha')$ 、 $(X\alpha\beta')$ 等交叉项反映两类误差源的交互作用,其影响随偏角增大呈非线性增长,是传统单一误差

补偿方法失效的根本原因。建立测量误差的综合模型,为后续进行误差辨识和补偿奠定了理论基础,有利于实现对导轨几何轮廓测量精度的有效提升。

2 综合误差的辨识与补偿

基于前文构建的系统误差模型,设计进给轴直线度误差与传感器安装误差的辨识方法,通过构建联合补偿矩阵修正测量坐标系,实现多源误差的协同补偿。

2.1 进给轴直线度误差的辨识

进给轴直线度误差对测量结果的影响可分为直接影响和间接影响两种。直接影响指横向位置误差 $\Delta x/\Delta y$ 直接导致传感器扫描轨迹偏离理想轮廓线,使同一横截面内的测量点横向坐标出现系统性偏移;间接影响指姿态误差 α/β 通过改变传感器坐标系的姿态,放大或扭曲传感器安装误差的影响。例如,进给轴偏摆角 β 会使传感器 X 轴安装偏角 α' 的实际作用方向发生旋转,导致轮廓畸变从“单纯倾斜”变为“倾斜 + 偏移”的复合误差。

高精度的进给轴直线度误差对于准确获取导轨工作面的形貌特征至关重要。在前文建立误差模型的基础上,结合四象限探测器实现误差参数的高精度辨识,并提出测量数据的误差补偿方案。测量系统采用四象限探测器实时监测进给轴运动轨迹,四象限探测器由 4 个相同的 P-N 结光电二极管组成,通过检测各象限上激光光斑中心的偏移量,实时测量进给轴的横向 Δx 与垂向 Δy 直线度误差,如图 4 所示。

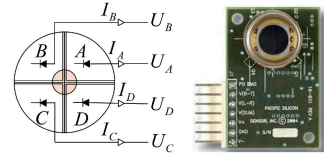


图4 四象限探测器

Fig. 4 Four-quadrant detector

四象限探测器固定于进给平台前端,随平台同步运动,其坐标系与进给轴坐标系 $O_m - X_m Y_m Z_m$ 固连,光斑中心坐标 $(x_{\text{qpd}}, y_{\text{qpd}})$ 直接反映进给轴在全局坐标系下的实时偏移。当激光准直光束投射到探测器上,各象限输出的电压信号 U_i 与光斑能量分布相关,经过信号处理后可得光斑中心位置,即:

$$\begin{cases} x_{\text{qpd}}(z_i) = k \frac{U_A + U_B - (U_C + U_D)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \\ y_{\text{qpd}}(z_i) = k \frac{U_A + U_D - (U_B + U_C)}{U_A + U_B + U_C + U_D} \end{cases} \quad (7)$$

式中: x_{qpd} 和 y_{qpd} 为光斑中心位置; k 为转换系数; z_i 为各采样点的进给位移。

获取进给轴在各采样点的横向/垂向偏移序列 $\{x_{qpd}(z_i), y_{qpd}(z_i)\}$ 后,采用二次多项式拟合偏移序列,分离线性项与非线性项,即:

$$\begin{cases} x_{qpd}(z) = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \varepsilon_x \\ y_{qpd}(z) = b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + \varepsilon_y \end{cases} \quad (8)$$

式中:零次项 $a_0 = \Delta x/b_0 = \Delta y$ 为进给轴横向/垂向位置误差;一次项系数 $a_1 = \beta/b_1 = \alpha$ 分别对应偏摆角 β 与俯仰角 α ;二次项 a_2/b_2 反映轨迹曲率; $\varepsilon_x/\varepsilon_y$ 为拟合残差。

2.2 传感器安装误差的辨识

线激光传感器的安装误差直接导致激光射线方向偏离理论测量轴线,是引发导轨轮廓数据畸变的关键因素。基于多系统理论的误差建模,设计安装误差的几何辨识方法,实现偏角误差的高精度提取,并提出基于齐次变换的补偿策略。

设传感器的某一条测点激光线有两点 $M = [x_m, y_m, z_m]^T$ 和 $N = [x_n, y_n, z_n]^T$,故待测导轨轮廓上存在两点 M' 和 N' ,应满足 $M' = R_{\text{install}} \cdot M, N' = R_{\text{install}} \cdot N$ 。

对 M' 和 N' 线性插值,得直线方程 $l_1(k) = kM' + (1-k)N'$ 。设点 P 为待测导轨轮廓上的实际测点,解得 P 点坐标为:

$$P = \begin{bmatrix} 0 \\ (1 + \gamma'^2)y_m - (\alpha' + \beta'\gamma')z_m \\ (1 + \beta'^2)z_m + (\alpha' - \beta'\gamma')y_m \end{bmatrix} \quad (9)$$

此时若将点 M 看作传感器的激光出射点,则线段 PM 的长度 d 即为该点测得的高度值。建立线段 PM 方程为 $l_2(k) = kM + (1-k)N - M$,解得:

$$d = \|kM + (1-k)N - M\| \approx \|x_m - \gamma'y_m + \beta'z_m\| \quad (10)$$

1) 偏角 γ'

设一条导轨测量轮廓线上存在点 $F = [x_f, y_f, z_f]^T$ 和 $T = [x_t, y_t, z_t]^T$,其坐标值对应全局坐标系下位置,建立两点的高度值,联立可得:

$$\gamma' = \frac{z_f - z_t}{x_f - x_t} \quad (11)$$

2) 偏角 β'

当进给轴位移 Z_{move} 时,取同一条激光线上移动前后的两点坐标为 $F = [x_f, y_f, z_f]^T$ 和 $T = [x_t, y_t, z_t]^T$,由三角关系可得偏角 β' 为:

$$\beta' = \frac{z_f - z_t}{Z_{\text{move}}} \quad (12)$$

3) 偏角 α'

设定测量平台的初始位置不在待测导轨的测量范围内,且必须满足线激光传感器的测量量程小于待测导轨的高度值,若不满足此条件,可将待测导轨换做标准量块

进行数据采集。进给轴运动时,传感器同步采集数据,取线激光传感器第1次采集到的数据点为 $F = [x_f, y_f, z_f]^T$,同一条激光线末端的数据点为 $T = [x_t, y_t, z_t]^T$ 。即采集同一条待测导轨(或标准量块)上同一轮廓线的两边缘点,联立解得:

$$\alpha' = -\frac{(1 + \beta'^2)(y_f - y_t)}{x_f - x_t} + \beta'\gamma' \quad (13)$$

2.3 综合误差的补偿

补偿的目标是消除由进给轴误差 T_{feed} 和传感器安装误差 R_{install} 共同引起的坐标系畸变。根据式(4)和(5),将测得点坐标 P_{actual} 转换到理想全局坐标系下的修正坐标 P_{correct} ,需要对总误差变换进行逆运算,即:

$$P_{\text{correct}} = T_{\text{total}}^{-1} \cdot P_{\text{actual}} = (T_{\text{feed}} \cdot R_{\text{install}})^{-1} \cdot P_{\text{actual}} \quad (14)$$

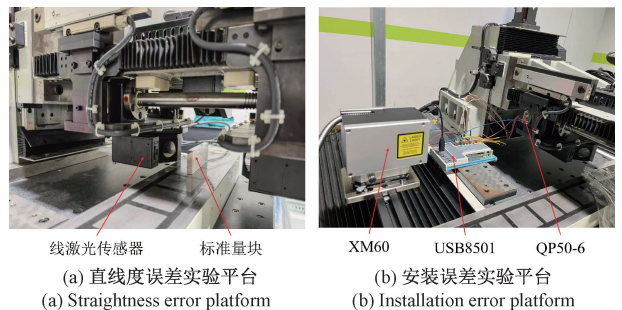
定义联合补偿矩阵 $T_{\text{compensation}} = (T_{\text{feed}} \cdot R_{\text{install}})^{-1}$,用于对原始测量坐标系的修正,如式(14)所示的补偿矩阵形式。联合补偿矩阵能同时修正位置、姿态、安装误差及其耦合项,实现对进给轴直线度误差和传感器安装误差的协同修正。

$$T_{\text{compensation}} = (T_{\text{feed}} \cdot R_{\text{install}})^{-1} = R_{\text{install}}^{-1} \cdot T_{\text{feed}}^{-1} = \frac{1}{(1 + \alpha'^2 + \beta'^2 + \gamma'^2)(1 + \alpha^2 + \beta^2)} \cdot \begin{bmatrix} 1 + \alpha'^2 & \gamma' + \alpha'\beta' & -\beta' + \alpha'\gamma' & 0 \\ -\gamma' + \alpha'\beta' & 1 + \beta'^2 & \alpha' + \beta'\gamma' & 0 \\ \beta' + \alpha'\gamma' & -\alpha' + \beta'\gamma' & 1 + \gamma'^2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 + \alpha'^2 + \beta'^2 + \gamma'^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 + \alpha^2 & \alpha\beta & -\beta & -(1 + \alpha^2)\Delta x - \alpha\beta\Delta y \\ \alpha\beta & 1 + \beta^2 & \alpha & -\alpha\beta\Delta x - (1 + \beta^2)\Delta y \\ \beta & -\alpha & 1 & -\beta\Delta x + \alpha\Delta y \\ 0 & 0 & 0 & 1 + \alpha^2 + \beta^2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

3 实验与结果

3.1 实验装置与测试平台搭建

为验证所提出的误差补偿方法,搭建导轨几何轮廓仪实验平台,如图5所示。



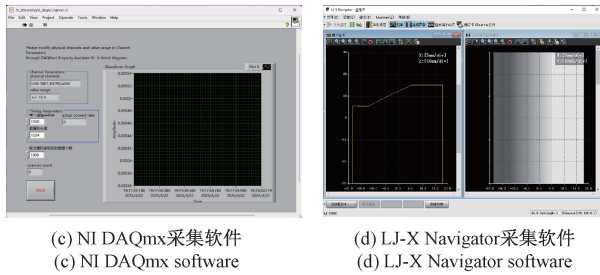


图5 导轨几何轮廓仪实验平台

Fig. 5 Experimental platform for guide rail geometric profiler

测量系统:激光干涉仪(Renishaw, XM60, 分辨率 $0.25\ \mu\text{m}$)的测量镜固定于进给平台;四象限探测器(First Sensor, QP50-6-42u)固定于进给平台前端,对准XM60激光发射器;线激光位移传感器(基恩士, LJ-X8060, 量程 $\pm 7.4\ \text{mm}$, 分辨率 $0.05\ \mu\text{m}$)垂直安装于平台侧方, 光轴指向导轨基准面;倾角传感器(北微, BW-IMU500, 精度 0.01°)安装于线激光位移传感器同侧;四通道数据采集卡(研华, USB8501)。

数据采集:NI DAQmx 实时采集四象限探测器数据(采样频率 $1\ \text{kHz}$), LJ-X Navigator 实时采集线激光传感器轮廓数据(采样频率 $1\ \text{kHz}$), 上位机通过 MATLAB 实现误差辨识算法与补偿计算。

机械系统:直线电机(雅克贝斯, AUM4-W-S-S1/AUM4-TL600)驱动, 气浮导轨导向, 直线光栅(禹衡, JFT-10B-1740C3, 分辨率 $0.01\ \mu\text{m}$)补偿定位精度。

3.2 进给轴直线度误差辨识方法验证

为系统验证本文提出的直线度误差辨识方法, 在 $800\ \text{mm}$ 全行程范围内进行直线度误差辨识实验。实验采用分段采样策略, 在 $800\ \text{mm}$ 行程内以 $50\ \text{mm}$ 为间隔设置17个测量点, 每个测量点进行3次重复测量取均值以减小随机误差。

测量系统中, 激光干涉仪 XM60 采集全行程直线度数据作为基准数据, 四象限探测器 QP50-6 同步采集运动轨迹, 根据式(8)解算得到横向、垂向直线度误差和姿态角参数。同时, 引入 B 样条法与最小区域法进行对比实验, 结果如表1所示(表中数据为3组重复实验的平均值)。

表1 直线度误差辨识结果

Table 1 Identification results of straightness error

参数	XM60	B 样条法	最小区域法	QP50-6
$\Delta x/\mu\text{m}$	0.200	0.090	0.199	0.199
$\Delta y/\mu\text{m}$	-1.000	-0.452	-1.000	-1.000
$\alpha/(10^{-3}^\circ)$	1.130	2.773	1.203	1.027
$\beta/(10^{-3}^\circ)$	0.300	10.284	0.376	0.257

实验结果表明, 本文方法采用二次多项式拟合, 与“位置误差+姿态角”的物理模型相匹配, 直线度辨识误差近似为0; 姿态角在 10^{-3} 量级, 辨识结果也较接近基准值, 其中 α 相对偏差为9.1%, β 相对偏差为14.3%, 整体吻合较好。

最小区域法以“最大偏差最小化”为优化目标, 基于一阶直线拟合, 忽略了误差中的弱非线性成分, 虽直线度误差辨识精度接近本文方法, 但姿态角辨识偏差略大, 最大相对偏差25.3%, 适用于纯线性误差场景; B样条法采用均匀节点的三次B样条拟合, 对局部噪声过度敏感, 导致直线度误差与姿态角辨识偏差极大, 不适用于本实验的误差补偿场景。

3.3 传感器安装误差辨识方法验证

为系统验证本文提出的线激光位移传感器安装偏角辨识方法, 在自主搭建的导轨几何轮廓仪实验平台上开展验证实验。实验采用 DIN861-1 标准级量块替代实际导轨作为标准测量基准, 通过三维螺旋微调机构实现传感器安装偏角的精确设置。对 0.5° 、 1.0° 、 1.5° 、 2.0° 这4个典型偏角工况, 每个角度进行3组重复实验, 其中, 偏角基准数据由 BW-IMU500 型惯性测量单元采集并标定, 实验测得的安装偏角辨识结果如表2所示(表中数据为3组重复实验的平均值)。

表2 安装偏角误差辨识结果

Table 2 Identification results of installation deflection angle error

实验工况/ $(^\circ)$	α'		β'		γ'	
	辨识值/ $(^\circ)$	相对误差/%	辨识值/ $(^\circ)$	相对误差/%	辨识值/ $(^\circ)$	相对误差/%
0.5	0.499	-0.200	0.515	3.000	0.516	3.200
1.0	0.994	-0.600	1.034	3.400	1.039	3.900
1.5	1.493	-0.470	1.545	3.000	1.548	3.200
2.0	1.980	-1.000	1.967	-1.650	1.972	-1.400

分析表明: 在 $0.5^\circ \sim 2.0^\circ$ 偏角范围内, 算法辨识误差绝对值均小于3.5%, 误差分布呈现非线性特征, 误差未随偏角增大呈现线性增长趋势。实验结果表明该方法具有良好的辨识精度, 验证了在导轨轮廓测量中的有效性。

3.4 综合误差补偿方法验证

1) 补偿效果仿真验证

为验证所提出的综合误差补偿矩阵对测量结果的补偿效果, 设计4组对比仿真实验。采用 MATLAB 生成5000点的模拟点云, 网格范围 100×100 , 统计各组点云与理想值的偏差均值、标准差、最大偏差等指标, 绘制偏差概率密度直方图与点云高度色图, 分析无补偿(原始点云数据)、仅修

正进给轴直线度误差、仅修正传感器安装误差、联合补偿(修正所有误差)综合误差 4 种情况下的点云误差补偿效果。

图 6 为 4 组实验的点云高度色图(深色调代表低值,浅色调代表高值),其中,浅色半透明面为理想平面。无补偿点云呈现明显的乱序排布,如图 6(a)所示,且与理想平面呈现区域性偏移;应用进给轴直线度误差补偿后

色块分布趋于集中,但仍残留沿垂向轴的倾斜,如图 6(b)所示;应用传感器安装误差补偿后,点云残留抛物面状凸起,如图 6(c)所示,与直线度误差模型基本一致;应用联合误差补偿矩阵后,点云颜色均匀,与理想平面几乎重合,如图 6(d)所示,表明进给轴直线度误差与传感器安装误差均得到有效补偿且效果良好。

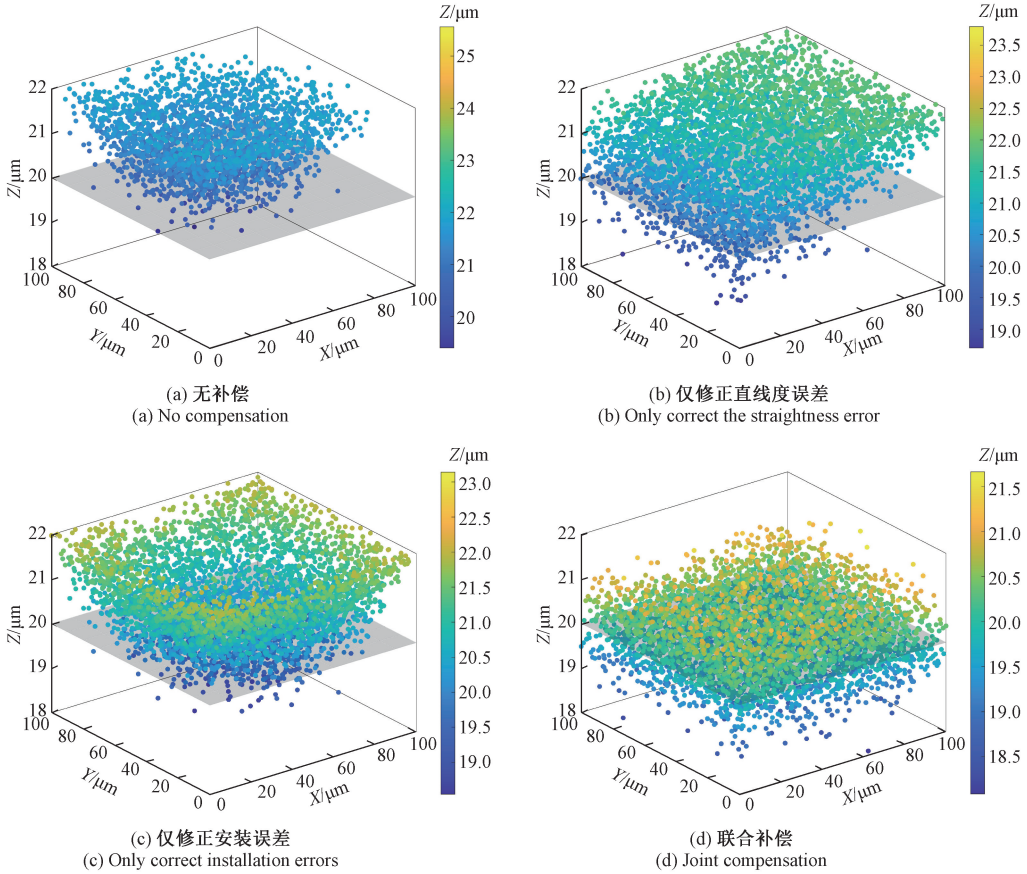


图 6 点云高度色图

Fig. 6 Point cloud height color map

图 7 为 4 组实验的偏差概率密度直方图,无补偿点云偏差呈宽幅非对称分布。单一补偿使分布曲线变窄,但仍存在右偏及残留长尾,说明其虽能降低误差离散程度,但残留误差导致均值偏离理想值(进给轴补偿均值 $1.247 \mu\text{m}$,传感器补偿均值 $0.855 \mu\text{m}$),验证了多源误差协同补偿的必要性。联合补偿偏差呈标准正态分布,峰值基本对齐 0 点,偏差均值 ($-0.003 \mu\text{m}$) 接近 0,表明系统误差已被有效消除,仅保留某些随机噪声。

2) 小角度近似假设影响仿真验证

本文在构建进给轴姿态误差矩阵式(1)与传感器安装误差矩阵式(3)时,均采用小角度近似,即令 $\sin\theta \approx \theta, \cos\theta \approx 1$,并忽略高阶无穷小项。进行误差量化分析,小角度近似理论上引入的误差为:

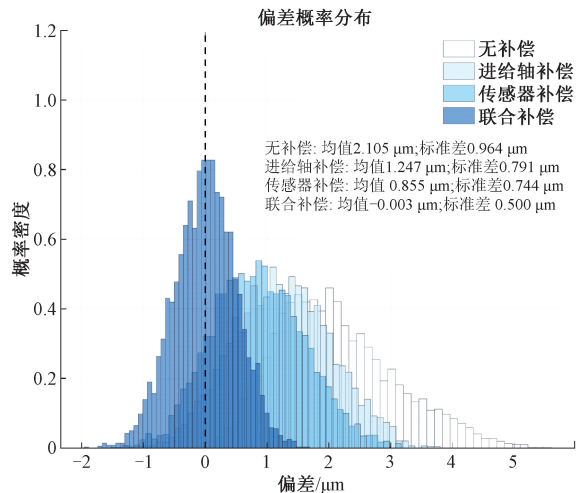


图 7 偏差概率密度直方图

Fig. 7 Histogram of deviation probability density

$$e_{\sin} = \sin\theta - \theta \approx -\frac{\theta^3}{6} \quad (16)$$

$$e_{\cos} = \cos\theta - 1 \approx -\frac{\theta^2}{2}$$

为评估小角度近似对误差辨识的实际影响,利用数值仿真计算,在偏角 $\leq 2.0^\circ$ 工况下,分别采用小角度近似模型与精确三角函数模型对 MATLAB 模拟点云进行误差辨识与补偿,仿真结果如表 3 所示。

表 3 小角度近似仿真结果

Table 3 Simulation results based on small-angle approximation

偏角/(°)	偏差均值/ μm	最大值/ μm	最小值/ μm	标准差/ μm
0	0	0	0	0
0.05	0.020	0.042	-0.002	0.013
1.00	0.038	0.082	-0.006	0.025
1.50	0.052	0.119	-0.015	0.038
2.00	0.064	0.153	-0.026	0.050

结果表明,在本文所涉及的偏角范围内,小角度近似引起的偏差呈现随偏角增大而线性递增的趋势,但整体误差量级始终处于亚微米级;最大偏差仅 $0.153 \mu\text{m}$,最小偏差 $-0.026 \mu\text{m}$, 2.0° 偏角下的均值 $0.064 \mu\text{m}$ 略大于传感器分辨率 ($0.05 \mu\text{m}$),但该偏差远小于导轨轮廓误差补偿的目标精度 (SP 级导轨 $\leq 3 \mu\text{m}$),在可接受的误差范围内。

此外,小角度近似简化了误差模型的复杂度和补偿矩阵的计算过程,提高了实时补偿的响应速度。因此,认为本文采用小角度近似是合理且有效的,在实际工况中,小角度近似的误差可以忽略。

3) 补偿效果实验验证

为验证所提出的综合误差补偿矩阵对测量精度的优化效果,在自主搭建的导轨几何轮廓仪实验平台上开展验证实验。实验选取 DIN861-1 标准级量块作为被测对象,分别在无补偿、仅修正进给轴直线度误差、仅修正传感器安装误差、联合补偿综合误差 4 种工况下进行全行程轮廓测量,每种工况重复测量 3 次取均值以降低随机误差影响。

实验过程中,线激光位移传感器采集量块原始高度数据,经不同补偿方法处理后,与基准数据对比分析误差修正效果。具体评价指标包括:轮廓偏差均值、轮廓偏差标准差、最大轮廓偏差,测量结果如表 4 所示。

由表 4 中数据可知,无补偿状态下,导轨轮廓测量偏差均值达 $6.229 \mu\text{m}$,最大偏差 $11.106 \mu\text{m}$,标准差 $2.197 \mu\text{m}$,数据离散程度较高,主要源于进给轴直线度误差与传感器安装误差的耦合影响;仅修正进给轴直线度

表 4 补偿效果实验结果

Table 4 Experimental results of compensation effect (μm)

补偿方案	偏差均值	标准差	最大值
无补偿	6.229	2.197	11.106
仅补偿直线度误差	3.936	1.047	4.749
仅补偿安装误差	4.595	1.978	8.259
联合补偿	2.301	0.502	2.311

误差后,偏差均值降至 $3.936 \mu\text{m}$,标准差降至 $1.047 \mu\text{m}$,但仍存在明显系统偏差,表明单一补偿无法消除传感器安装误差导致的畸变;仅修正传感器安装误差时,偏差均值 $4.595 \mu\text{m}$,标准差 $1.978 \mu\text{m}$,验证了多源误差耦合的必然性;而应用联合补偿矩阵后,偏差均值仅 $2.301 \mu\text{m}$,标准差 $0.502 \mu\text{m}$,最大偏差 $2.311 \mu\text{m}$,各项指标较无补偿状态均显著优化,偏差均值降低 36.9%,标准差降低 22.8%,最大偏差降低 20.8%,说明综合误差补偿方法有效消除了多源误差的耦合影响,实现了测量精度的大幅提升。

实验结果与仿真分析一致,进一步验证了所提出的多体系统误差模型及联合补偿矩阵的有效性,实现了滚动直线导轨全行程、跨尺度轮廓测量精度的显著提升。

4 结 论

1) 理论建模:建立进给轴直线度误差与传感器安装误差的多体系统综合模型,揭示了位置误差、姿态误差与安装偏角的非线性耦合机制,突破了传统单一误差源补偿的局限性。

2) 误差辨识:提出基于四象限探测器与线激光传感器的误差辨识方法,实现了运动轴轨迹偏差与传感器位姿参数的高精度提取,为联合补偿提供了准确的误差输入参数。

3) 实验验证:搭建导轨几何轮廓仪实验平台,在 800 mm 行程内进行了直线度误差辨识验证,在 $0.5^\circ \sim 2.0^\circ$ 偏角范围内进行了传感器安装误差辨识验证,两种方法辨识误差均控制在 3.5%,验证了在导轨轮廓测量中的有效性。

4) 补偿效果:设计 4 组对比仿真实验与实际实验,实验结果与仿真分析一致,进一步验证了所提出的多体系统误差模型及联合补偿矩阵的有效性。联合补偿后,导轨轮廓测量偏差均值降至 $2.301 \mu\text{m}$,误差降低 36.9%,实现了滚动直线导轨全行程高精度测量精度的显著提升。

参考文献

- [1] 喻精辉, 张朋海. 导轨系统重复定位精度关键影响因素研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(8): 36-41.
YU J H, ZHANG P H. Research on key influencing factors of repeatability of positioning of guide system[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(8): 36-41.
- [2] 赵宛男, 张云峰, 王军见, 等. 滚珠丝杠副综合评价方法研究[J]. 制造技术与机床, 2025(4): 180-188.
ZHAO W N, ZHANG Y F, WANG J J, et al. Research on the comprehensive evaluation method of ball screws[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2025(4): 180-188.
- [3] 欧屹. 滚动功能部件成套测评方法与装备及性能提升关键技术[J]. 世界制造技术与装备市场, 2022(1): 22-27.
OU Y. A complete set of evaluation methods & equipments for rolling functional components and key technologies for performance improvement [J]. World Manufacturing Engineering & Market, 2022(1): 22-27.
- [4] 王晓艺, 周长光, 钱超群, 等. 滚动直线导轨副额定静载荷算法修正及测定[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(10): 147-155.
WANG X Y, ZHOU CH G, QIAN CH Q, et al. Algorithm modification and measurement of basic static load rating of rolling linear guideway pair [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(10): 147-155.
- [5] 任瑛, 黄育争, 魏长胜, 等. 基于白光干涉的三维表面形貌拼接方法研究[J]. 光电技术应用, 2024, 39(2): 44-50.
REN Y, HUANG Y ZH, WEI CH SH, et al. Research on three-dimensional surface topography splicing method based on white light interference [J]. Electro-Optic Technology Application, 2024, 39(2): 44-50.
- [6] 宋辉旭, 蒋金哲, 石照耀, 等. 基于白光干涉仪的微小齿轮高精度测量方法[J]. 计量科学与技术, 2024, 68(4): 3-10.
SONG H X, JIANG J ZH, SHI ZH Y, et al. High-precision measurement method for micro gears based on white light interferometry [J]. Metrology Science and Technology, 2024, 68(4): 3-10.
- [7] 张相鹏, 宋明山, 孙永杰, 等. 基于激光跟踪仪的机床误差快速测量方法[J]. 制造技术与机床, 2024(10): 124-129.
ZHANG X P, SONG M SH, SUN Y J, et al. Rapid error measurement method of machine tool based on laser tracker[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2024(10): 124-129.
- [8] 胡安华, 陈大鹏, 刘建华, 等. 激光干涉仪在机床导轨平行度检测中的应用[J]. 机电工程技术, 2024, 53(6): 182-185.
HU AN H, CHEN D P, LIU J H, et al. Application of laser interferometer in parallelism measurement of machine tool guide rail [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2024, 53(6): 182-185.
- [9] 李金峰, 张泽阳, 王海同, 等. 一种滚动直线导轨副导轨型面检测方法 & 检测平台: 中国, CN202311432523.9[P]. 2024-02-09.
LI J F, ZHANG Z Y, WANG H T, et al. A rolling linear guide rail profile detection method and detection platform: China, CN2023114323.9[P]. 2024-02-09.
- [10] 李金峰, 张泽阳, 王海同, 等. 滚动直线导轨副导轨型面检测装置和使用方法: 中国, CN202411822550.1[P]. 2025-03-18.
LI J F, ZHANG Z Y, WANG H T, et al. Rolling linear guide rail profile detection device and use method: China, CN202411822550.1[P]. 2025-03-18.
- [11] 徐明辉, 朱凌宏. 滚动导轨直线度误差检测与评定[J]. 机械设计与制造, 2022(9): 49-51, 60.
XU M H, ZHU L H. Measurement and evaluation for straightness error of rolling guide [J]. Machinery Design & Manufacture, 2022(9): 49-51, 60.
- [12] 肖皓维, 孙广远, 李东航, 等. 数控进给轴阿贝余弦误差辨识与补偿方法[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2023(11): 42-46.
XIAO H W, SUN G Y, LI D H, et al. Identification and compensation method of abbe cosine error of CNC feed axis [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2023(11): 42-46.
- [13] 沈文华, 王西彬, 钱泳豪, 等. 深孔零件轴线直线度误差的在线测量与评定技术研究[J]. 中国机械工程, 2025, 36(9): 2011-2021.
SHEN W H, WANG X B, QIAN Y H, et al. Research on online measurement and evaluation of axial straight-

- ness errors for deep-hole parts [J]. *China Mechanical Engineering*, 2025, 36(9): 2011-2021.
- [14] 冯文龙, 沈牧文, 姚晓栋, 等. 大型龙门机床的直线度误差建模及误差补偿[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2015, 47(7): 31-36.
- FENG W L, SHEN M W, YAO X D, et al. Modeling for straightness error of large CNC gantry type machine tools and error compensation[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2015, 47(7): 31-36.
- [15] 张伟, 韩宗旺, 程祥, 等. 基于机器视觉零件轴线直线度误差测量的研究[J]. *光学精密工程*, 2021, 29(9): 2168-2177.
- ZHANG W, HAN Z W, CHENG X, et al. Research on straightness error measurement of part axis based on machine vision [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(9): 2168-2177.
- [16] 匡萃方, 冯其波, 刘斌, 等. 一种共路补偿激光漂移的直线度测量方法[J]. *光电工程*, 2005, 32(4): 32-34, 38.
- KUANG C F, FENG Q B, LIU B, et al. Measuring straightness method with common path compensation for laser drift [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2005, 32(4): 32-34, 38.
- [17] 金涛, 刘景林, 杨卫, 等. 线性位移台直线度高精密外差干涉测量装置[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(7): 1570-1577.
- JIN T, LIU J L, YANG W, et al. High-precision straightness interferometer for linear moving stage [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(7): 1570-1577.
- [18] 王森, 常颖, 崔尧尧, 等. 双轴倾角传感器离轴倾斜测量的误差校正[J]. *电子测量与仪器学报*, 2024, 38(8): 178-187.
- WANG S, CHANG Y, CUI Y Y, et al. Error correction for off-axis tilt measurement using biaxial tilt sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2024, 38(8): 178-187.
- [19] 黄喆, 沈小玲, 张历, 等. 面向双相机标靶的倾斜仪安装误差补偿方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(7): 152-159.
- HUANG ZH, SHEN X L, ZHANG L, et al. Compensation method for installation error of inclinometer with dual-camera target [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36(7): 152-159.
- [20] 汤洁, 王嘉伟, 石照耀. 考虑安装误差的 ZC1 蜗杆螺旋线偏差评定方法[J]. *仪器仪表学报*, 2023, 44(4): 181-188.
- TANG J, WANG J W, SHI ZH Y. Evaluation method of helix deviations for ZC1 worm considering installation errors [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2023, 44(4): 181-188.
- [21] 马金钰, 陈欣, 丁国清, 等. 基于激光位移传感器圆径测量的角度安装误差研究(英文)[J]. *红外与激光工程*, 2021, 50(5): 20200316.
- MA J Y, CHEN X, DING G Q, et al. Research on angle setting error of diameter measurement based on laser displacement sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(5): 20200316.
- [22] 钟亦林, 马有为, 丁国清, 等. 非接触三点内径测量法中角度安装误差的校准方法研究[J]. *仪表技术与传感器*, 2023(4): 107-112.
- ZHONG Y L, MA Y W, DING G Q, et al. Calibration of angle setting error in non-contact inner diameter measurement by three-point method [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2023(4): 107-112.
- [23] 刘博文, 陈世利, 杨毅, 等. 基于多线激光扫描的叶片轮廓快速测量系统标定方法[J]. *纳米技术与精密工程*, 2017, 15(6): 532-537.
- LIU B Q, CHEN SH L, YANG Y, et al. Calibration method for fast detection system of blade profile based on multiple line laser scanning [J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2017, 15(6): 532-537.
- [24] 张旭, 陈爱军, 沈小燕, 等. 基于线激光传感器的工件尺寸测量系统的误差补偿方法[J]. *计量学报*, 2020, 41(12): 1449-1455.
- ZHANG X, CHEN AI J, SHEN X Y, et al. Error compensation method for workpiece size measurement system based on line laser sensor [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(12): 1449-1455.
- [25] 李欣飞, 鄢然, 夏磊, 等. 线激光火车轮测量系统标定及误差修正方法[J]. *仪器仪表学报*, 2025, 46(6): 71-82.
- LI X F, YAN R, XIA L, et al. Calibration and error correction method for a line laser train wheel measurement system [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2025, 46(6): 71-82.

作者简介



王海同(通信作者),2010年于大连理工大学获得学士学位,2016年于清华大学获得博士学位,现为北京交通大学机械与电子控制工程学院教授、博士生导师,主要研究方向为机器人与智能制造技术、先进加工与智能制造、智能装备技术与工程等。

E-mail:htwang@bjtu.edu.cn

Wang Haitong (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Dalian University of Technology in 2010, and his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2016. He is currently a professor and master's supervisor in the School of Mechanical and Electronic Control Engineering at Beijing Jiaotong University. His main research interests include robotics and intelligent manufacturing technology, advanced processing and intelligent manufacturing, intelligent equipment technology and engineering, and so on.



李金峰,2008年于大连理工大学获得学士学位,2015年于清华大学获得博士学位,现为雁栖湖基础制造技术研究院(北京)有限公司副总工程师、科技发展部部长,主要研究方向为智能检测装备、工业母机及核心部件、可靠性测评等。

E-mail:lijinfeng@pcmi.com.cn

Li Jinfeng received his B. Sc. degree from Dalian University of Technology in 2008, and his Ph. D. degree from Tsinghua University in 2015. He is currently the deputy chief engineer and the minister of science and technology development department of Yanqi Lake Institute of Basic Manufacturing Technology Research Co., Ltd. His main research interests include intelligent detection equipment, industrial mother machine and core components, reliability evaluation, and so on.