DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2514150

线激光火车轮测量系统标定及误差修正方法*

李欣飞,鄢 然,夏 磊,赵 青,张凯飞
(重庆理工大学机械工程学院 重庆 400054)

摘 要:针对火车轮三维几何参数在线测量中存在的传感器标定流程复杂、工件放置偏心误差等问题,提出了一种基于多个线激光传感器的高精度测量系统及误差修正方法。通过构建多层坐标动态变换模型,实现了不受放置偏心约束下传感器数据到车轮三维几何信息的精准映射;结合分步标定策略,利用立方体、圆柱体及异形回转体标定块,依次标定传感器安装姿态参数与位置参数,并通过位姿微调机构实现多传感器共面校准,解决大型扫描设备装配误差导致的共面难题;针对车轮放置偏心问题,提出基于极坐标动态修正的偏心误差补偿方法,通过实时计算工件轴心偏移量,追踪工件轴心轨迹,显著降低了径向尺寸测量误差,克服了传统机械定心在特殊工况下的局限性。实验结果表明,系统测量绝对误差<±0.069 mm,重复性标准差<0.049 mm,径向尺寸误差修正后波动范围缩减至 0.170 mm 以内,满足工业级精密测量要求。实际工程应用中,系统对 915KKD 型车轮的复杂几何特征测量结果与激光跟踪仪基准值的最大相对误差<0.135%,验证了其可靠性与工程适用性。该系统不仅适用于火车车轮的测量,还可推广至其他回转体等工件的三维精密测量场景,为多个线激光传感器旋转扫描测量系统提供了一种通用的标定与误差修正方法。

关键词:线激光传感器;位姿标定;误差修正;火车轮测量;三维测量
中图分类号:TH74 **文献标识码**:A **国家标准学科分类代码**:460.4

Calibration and error correction method for a line laser train wheel measurement system

Li Xinfei, Yan Ran, Xia Lei, Zhao Qing, Zhang Kaifei
(*College of Mechanical Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China*)

Abstract: To address the challenges of complex sensor calibration procedures and workpiece placement eccentricity in online 3D geometric parameter measurement of train wheels, this study proposes a high-precision measurement system based on multiple line laser sensors, along with an error correction method. A multi-layer dynamic coordinate transformation model is developed to accurately map sensor data to the wheel's 3D geometric information without being constrained by placement eccentricity. A stepwise calibration strategy is employed, using cube, cylinder, and profiled rotary calibration blocks to sequentially calibrate the installation pose and position parameters of the sensors. A pose fine-tuning mechanism is further implemented to achieve coplanar calibration of multiple sensors, overcoming coplanarity challenge caused by assembly errors in large-scale scanning systems. To address wheel placement eccentricity, an eccentricity error compensation method based on dynamic polar coordinate correction is introduced. By computing the axis offset in real-time and tracking the workpiece axis trajectory, radial dimension measurement errors are significantly reduced, overcoming the limitations of traditional mechanical centering under special operating conditions. Experimental results show that the system achieves an absolute measurement error is less than ±0.069 mm, a repeatability standard deviation below 0.049 mm, and a fluctuation range of radial dimension errors after correction reduced to within 0.170 mm, meeting industrial-grade precision measurement requirements. In practical engineering applications, the maximum relative error between the system's measurement results for complex geometric features of a 915KKD-type wheel and reference values obtained by a laser tracker is less than 0.135%, confirming the system's reliability and engineering applicability. Beyond train wheels, the system can be extended to other rotary workpieces for 3D precision measurements,

收稿日期:2025-06-12 Received Date: 2025-06-12
*基金项目:国家自然科学基金(52305247)项目资助

providing a universal calibration and error correction solution for multi-line-laser-sensor rotational scanning measurement systems.

Keywords: line laser sensor; pose calibration; error correction; train wheel measurement; 3D measurement

0 引 言

火车车轮作为轨道交通装备的核心承载部件,其几何参数精度直接决定了轮轨动态接触特性及列车运行安全性[1]。传统接触式测量方法存在效率低等问题,难以满足现代化智能制造对高精度在线检测的需求。线激光扫描技术凭借其高效率、高分辨率等优势,通过激光三角测量原理,可以快速重构物体表面的三维形貌,为复杂轮廓工件的数字化测量提供了有效的解决方案[2-7]。

尽管该技术已取得显著进展,但在大尺寸工件在线测量中仍面临多传感器协同标定困难、工件放置偏心导致误差累积等挑战[8-9]。尤其对于火车车轮等大质量、复杂轮廓工件,如何实现多传感器数据的高效融合与动态误差修正,成为提升测量精度的关键问题。由于线激光传感器的安装误差、倾斜角度等因素的影响,测量结果可能会与实际目标存在偏差[10]。针对此问题,国内外学者针对不同应用场景提出了多种标定方法。例如,Li 等[11]设计了具有圆柱面、平面和 V 形凹槽等特征的标定块,并提出了基于该标定块的校准方法,有效提高了线激光齿轮测量系统的标定精度。李津容等[12]提出了四孔平面标定件的全局标定方法。Wang 等[13]针对钢轨轮廓测量中激光不共面引起的测量误差问题,提出了一种基于投影变换的修正模型,将该误差控制在 0.10 mm 以内,既保证了测量精度,又减少了现场安装要求。在火车车轮等回转体工件的测量场景中,常采用旋转扫描方式获取工件完整的点云数据。然而,这一方式会引入旋转误差和偏心,影响测量精度。针对此问题,可以通过转轴标定和机械定心来减小误差。例如,徐永安等[14]通过测量固定在转台上的标定球在不同位置球心的方法标定转台中心轴线的参数,实现多视角测量数据的拼合。易杰等[15]利用图像数据样本和多视几何约束,对传感器间的姿态参数和旋转轴线进行求解。陈翰等[16]在研制的铸钢车轮在线三维测量系统中设计了一套对中定位单位,使得车轮能够准确的放置在旋转平台上。仝宇博等[17]在研究的全金属螺杆钻具定子内轮廓测量系统中设计了一套机械定心传动机构,使传感器以定心机构构建的基准轴线为旋转中心进行测量。然而,现有方法在应对待测工件的重量较大、体积较大或热态测量等特殊工况时,传统方法往往难以通过外力实现精确定位[18],亟需研究新型动态补偿机制。

综合上述分析,构建了一套基于多个线激光传感器旋转扫描火车车轮三维测量系统。内容包括:提出放置偏心场景下的多层坐标系动态映射模型,通过传感器姿态矩阵与位移矩阵的联合优化,实现多传感器数据的高效融合;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,通过转台旋转过程中的轴心轨迹动态追踪,实时补偿径向尺寸测量误差。实验验证表明,该系统在复杂工况下仍能保持亚毫米级测量精度,为火车车轮的智能化在线检测提供了可靠的技术支撑。所提方法针对多个线激光传感器旋转扫描系统的共性问题设计,其核心思路也可扩展至各类需要多传感器协同扫描的三维测量场景。

1 测量原理及方法

1.1 测量系统三维建模

如图 1 所示,为火车车轮三维测量系统模型。工作时,车轮放置在转台上,多组线激光传感器共同测量车轮的一个断面轮廓,通过旋转扫描的方式获取到车轮的三维几何信息。

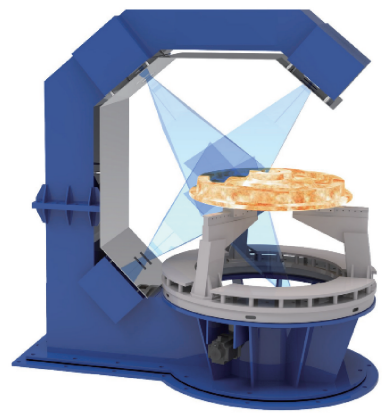

图 1 火车车轮三维测量系统装置

Fig. 1 Installation diagram of the 3D train wheel measuring system

如图 2 所示,为测量系统模型建立坐标系,分别包括机器坐标系($O_m - x_m, y_m, z_m$)、车轮坐标系($O_w - x_w, y_w, z_w$)、线激光传感器坐标系($O_{s_i} - x_{s_i}, y_{s_i}, z_{s_i}$)、线激光传感器轮廓数据坐标系($O_{d_i} - x_{d_i}, y_{d_i}, z_{d_i}$),$i$ 为传感器编号。机器坐标系、传感器坐标系、传感器轮廓数据坐标系为固定坐标系,车轮坐标系与车轮固连在一起为运动坐标系。

如图 3 所示为线激光传感器扫描模型图。

设系统中的某一线激光传感器获取到车轮断面的轮廓数据为:

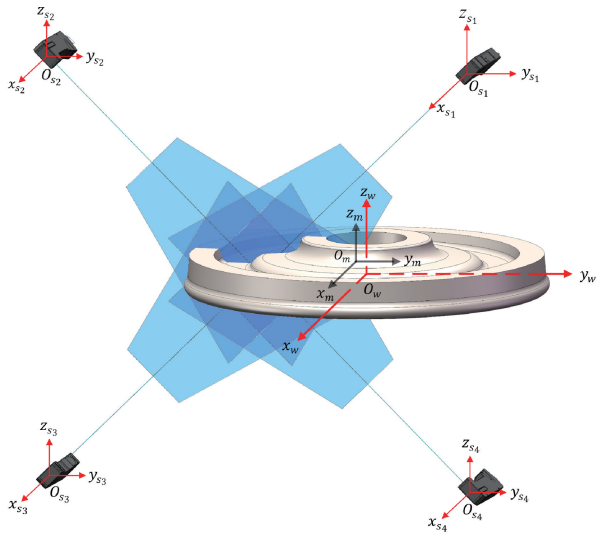

图 2　火车车轮三维测量系统模型

Fig. 2　Model diagram of the 3D train wheel measuring system

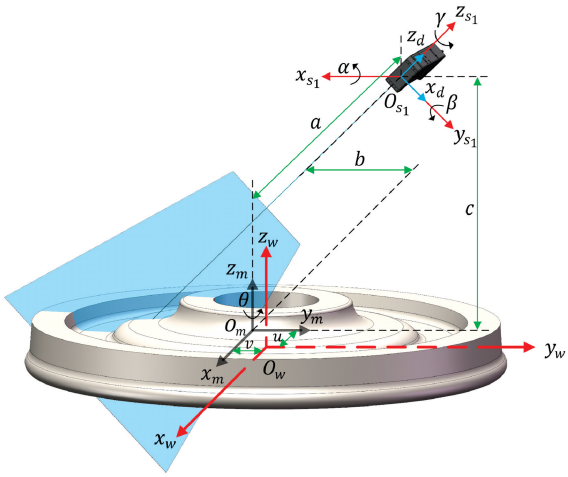

图 3　线激光传感器扫描模型

Fig. 3　Schematic diagram of the line laser sensor scanning model

$$\boldsymbol{D}_d = (x_d, 0, z_d)^{\mathrm{T}} \tag{1}$$

将该轮廓数据 $\boldsymbol{D}_d$ 转换到其传感器坐标系下,可表示为:

$$\boldsymbol{D}_s = \boldsymbol{R}_0 \boldsymbol{D}_d = (0, x_d, z_d)^{\mathrm{T}} \tag{2}$$

式中:$\boldsymbol{D}_s = (x_s, y_s, z_s)^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{R}_0 = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$。

设线激光传感器绕自身坐标系 x、y、z 轴转动产生的俯仰角为 α,偏摆角为 β,滚转角为 γ,安装姿态以 $z-x-y$ 的顺序进行描述[19],可得到其变换矩阵为:

$$\boldsymbol{R}_s = \boldsymbol{R}_z \boldsymbol{R}_x \boldsymbol{R}_y = \begin{bmatrix} \cos\gamma & -\sin\gamma & 0 \\ \sin\gamma & \cos\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \tag{3}$$

进一步地,将 $\boldsymbol{D}_s$ 转换到机器坐标系下,可表示为:

$$\boldsymbol{D}_m = \boldsymbol{R}_s \boldsymbol{D}_s - \boldsymbol{T}_s \tag{4}$$

式中:$\boldsymbol{D}_m = (x_m, y_m, z_m)^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{T}_s = (a, b, c)^{\mathrm{T}}$;$a$、$b$、$c$ 分别表示线激光传感器坐标系原点距离机器坐标系原点在 x_m、y_m、z_m 方向上的偏置距离。

设车轮坐标系原点在初始状态下距离机器坐标系原点在 x_m、y_m 方向上的偏置距离分别为 u、v,进一步地,将 $\boldsymbol{D}_m$ 转换到车轮坐标系下,可表示为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_w \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_w^{-1} \boldsymbol{R}_w \boldsymbol{T}_w \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_m \\ 1 \end{bmatrix} \tag{5}$$

式中:$\boldsymbol{D}_w = (x_w, y_w, z_w)^{\mathrm{T}}$;$\boldsymbol{T}_w = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -u \\ 0 & 1 & 0 & -v \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;$\boldsymbol{R}_w = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$;$\theta$ 为测量时转台的旋转角度。

最终,得到线激光传感器实测的车轮三维几何数据可表示为:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_w \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_w^{-1} \boldsymbol{R}_w \boldsymbol{T}_w \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_s \boldsymbol{R}_0 \boldsymbol{D}_d - \boldsymbol{T}_s \\ 1 \end{bmatrix} = \boldsymbol{T}_w^{-1} \boldsymbol{R}_w \boldsymbol{T}_w \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_s & \boldsymbol{T}_s \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{R}_0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{D}_d \\ 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

系统中其他线激光传感器的测量数据也可用同样的方法得到。

综上,可知测量结果受到 α、β、γ、a、b、c、u、v、θ 的直接影响。其中 α、β、γ、a、b、c 为固定值,由传感器安装姿态和位置决定;u、v 为不定值,随每次车轮放置位置不同、转台转动角度而变化;θ 已知,为测量该轮廓数据时转台的旋转角度。因此,对传感器进行位姿标定以及对车轮放置偏心进行修正可有效提高测量系统的精度。

1.2　传感器安装位姿标定

在理想情况下,该测量系统中的各线激光传感器应当相互呈 90°安装,并且测量区域应位于车轮的同一断面上。然而,对于面向火车车轮在线测量的此类大型设备,由于其零部件众多且体积庞大,制造和装配过程中很难达到理想的精度。因此,在线激光传感器底座增加位姿微调机构是十分必要的。如前所述,传感器位姿的 6 个

自由度均会影响测量结果,而在安装时同时将这 6 个参数调至理想状态难度极大。为此,提出的方法是通过调整传感器姿态来标定参数 α、β、γ,并利用传感器的测量数据确定参数 a、b、c,再根据参数 a 的值调整传感器位置,实现多传感器共面。

为确定各个线激光传感器 α、β、γ、a、b、c 参数值,为测量系统设计了 3 种标定块,分别为立方体标定块、圆柱体标定块、径向截面呈“十字形”的异形回转体标定块,用于标定传感器的安装姿态和位置。安装时,立方体标定块和圆柱体标定块装配在转台的一个支撑架上,该支撑架的中心平面重合于理想扫描截面;回转体标定块装配在转台的 3 个支撑架上,轴线重合于转台的回转中心线。通过分析 α、β、γ、a、b、c 各参数对线激光传感器测量结果产生的影响,标定过程将按照 $\alpha \rightarrow \beta \rightarrow \gamma \rightarrow a \rightarrow b \rightarrow c$ 的顺序依次对各参数进行标定。

1) 偏摆角 α

如图 4 所示,在转台零点位置的支撑架上安装立方体标定块。理想状态下,标定块上的 4 个面应分别与对应线激光传感器坐标系的 z_s 轴垂直。在这种理想状态下,线激光传感器扫描到对应面的轮廓的斜率为 0,而偏摆角 α 不为 0 时,斜率将不为 0。

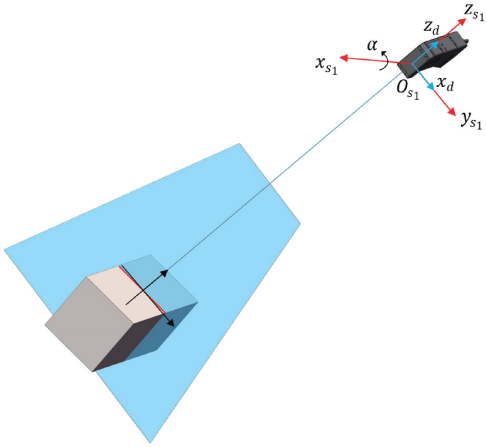

图 4 偏摆角 α 标定图

Fig. 4 Calibration diagram of the α yaw angle

设某一传感器扫描到立方体标定块对应面的一组轮廓数据为:

$$\boldsymbol{D}_{\alpha} = (x_i, 0, z_i)^{\mathrm{T}}, \quad i = 1, 2, \cdots, N \tag{7}$$

式中:N 为轮廓数据点的个数。

利用最小二乘法对 $\boldsymbol{D}_{\alpha}$ 进行直线拟合,得到直线斜率 k。实时监测传感器数据并记录,微调传感器安装的偏摆角度,使 k 满足如式(8)所示条件。

$$|k| \leqslant \Delta T_1 \tag{8}$$

式中:ΔT_1 为直线拟合的误差阈值,ΔT_1 越小代表标定精度越高,其大小可根据测量精度要求确定[20]。

此时可认为传感器的偏转角 α 已经标定完成,系统中的各个传感器的偏摆角为:

$$\alpha_i = \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}(i - 1), \quad i = 1, 2, 3, 4 \tag{9}$$

式中:i 为传感器编号。

2) 俯仰角 β

俯仰角 β 标定图如图 5 所示。

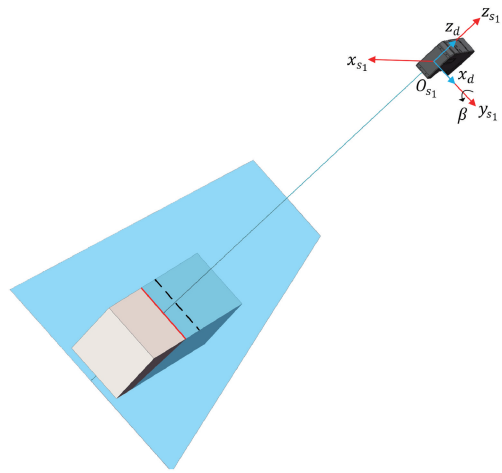

图 5 俯仰角 β 标定图

Fig. 5 Calibration diagram of the β pitch angle

设此时某一传感器扫描到立方体标定块对应面的一组轮廓数据为:

$$\boldsymbol{D}_{\beta} = (x_i, 0, z_i)^{\mathrm{T}}, \quad i = 1, 2, \cdots, N \tag{10}$$

根据 $\boldsymbol{D}_{\beta}$ 计算此时传感器原点 O_s 到立方体标定块对应面的距离为:

$$z_{\mathrm{meas}} = \frac{\sum_{i=1}^{N} |z_i|}{N} \tag{11}$$

理想状态下,测得的距离为最小值 $z_{\min}$,而当俯仰角 β 不为 0 时,$z_{\mathrm{meas}} > z_{\min}$。实时监测传感器数据并记录最小值 $z_{\mathrm{meas,min}}$,微调传感器安装的俯仰角度,使 $z_{\mathrm{meas,min}}$ 满足如式(12)所示条件。

$$z_{\mathrm{meas,min}} - z_{\min} \leqslant \Delta T_2 \tag{12}$$

式中:ΔT_2 为实际测量得到的最小距离误差阈值,ΔT_2 越小代表标定精度越高,其大小可根据测量精度要求确定。

此时可认为传感器的俯仰角 β 已经标定完成,系统中的各个传感器的俯仰角为 0。

3) 滚转角 γ

如图 6 所示,在转台零点位置的支撑架上安装圆柱体标定块。理想状态下,线激光传感器扫描到圆柱体标定块的轮廓数据为一段圆弧,而滚转角 γ 不为 0 时,轮廓数据将变为一段椭圆弧。

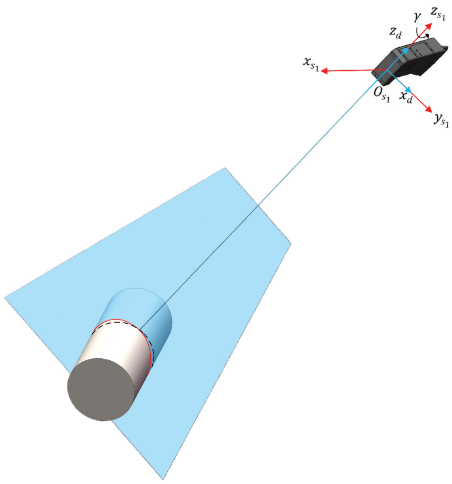

图 6　滚转角 γ 标定图

Fig. 6　Calibration diagram of the γ roll angle

设某一传感器扫描到圆柱体标定块的一组轮廓数据为:

$$\boldsymbol{D}_{\gamma} = (x_i, 0, z_i)^{\mathrm{T}}, \quad i = 1, 2, \cdots, N \tag{13}$$

利用随机采样一致性算法[21]对 $\boldsymbol{D}_{\gamma}$ 进行椭圆拟合,得到椭圆的长轴长度 l_a 和短轴长度 l_b。实时监测传感器数据并记录,微调传感器安装的滚转角度,使 l_a 和 l_b 满足如式(14)所示条件。

$$l_a - l_b \leqslant \Delta T_3 \tag{14}$$

式中:ΔT_3 为椭圆拟合的误差阈值,ΔT_3 越小代表标定精度越高,其大小可根据测量精度要求确定。

此时可认为传感器的滚转角 γ 已经标定完成,系统中的各个传感器的滚转角为 0。

4) 偏置距离 a、b、c

如图 7 所示,在转台的支撑架上安装回转体标定块。此时,标定块与转台同心,每个线激光传感器均能扫描到回转体标定块大小不同的两个圆柱面。设回转体标定块的外径为 R,内径为 r。

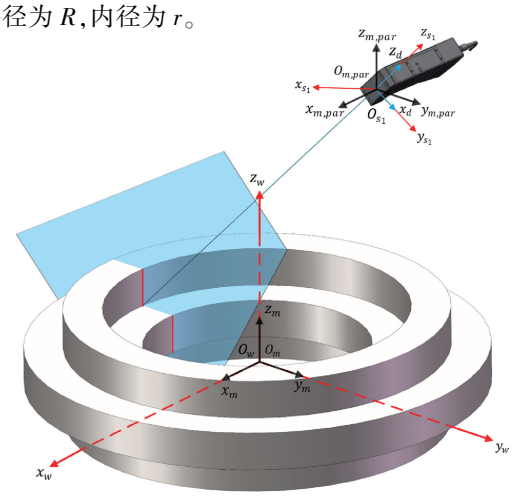

图 7　偏置距离标定图

Fig. 7　Calibration diagram of the offset distance

设某一传感器扫描到圆柱体标定块的一组轮廓数据为:

$$\boldsymbol{D}_{o} = (x_i, 0, z_i)^{\mathrm{T}}, \quad i = 1, 2, \cdots, N \tag{15}$$

如前所述,传感器姿态的标定已经完成。将 $\boldsymbol{D}_{o}$ 变换至与机器坐标系平行的坐标系($O_{m,par} - x_{m,par}, y_{m,par}, z_{m,par}$),得到:

$$\boldsymbol{D}_{m,par} = \boldsymbol{R}_s \boldsymbol{R}_0 \boldsymbol{D}_{o} \tag{16}$$

利用直通滤波对 $\boldsymbol{D}_{m,par}$ 进行过滤,可得到外圆柱面部分的轮廓数据,即:

$$\boldsymbol{D}_{R} = \mathrm{PassThrough}_R(\boldsymbol{D}_{m,par}) = (x_{i,R}, y_{i,R}, z_{i,R})^{\mathrm{T}}, \quad i = 1, 2, \cdots, N_R \tag{17}$$

同上,可得到内圆柱面部分的轮廓数据,即:

$$\boldsymbol{D}_{r} = \mathrm{PassThrough}_r(\boldsymbol{D}_{m,par}) = (x_{i,r}, y_{i,r}, z_{i,r})^{\mathrm{T}}, \quad i = 1, 2, \cdots, N_r \tag{18}$$

进一步地,令:

$$t = \frac{\sum_{i=1}^{N_R} |y_{i,R}|}{N_R} - \frac{\sum_{i=1}^{N_r} |y_{i,r}|}{N_r} \tag{19}$$

如图 8 所示为偏置距离标定 XOY 平面投影视图。

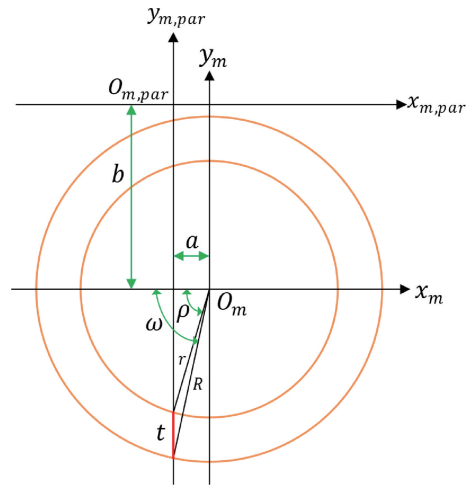

图 8　偏置距离标定 XOY 平面投影视图

Fig. 8　XOY planar projection view of the offset distance calibration

已知 R、r、t,则有:

$$\begin{cases} r\sin\rho + t = R\sin\omega \\ r\cos\rho = R\cos\omega \end{cases} \tag{20}$$

进一步解得:

$$\begin{cases} \rho = \arcsin\left(\dfrac{R^2 - r^2 - t^2}{2rt}\right) \\ \omega = \arccos\left(\dfrac{r\cos\rho}{R}\right) \end{cases} \tag{21}$$

取 $\boldsymbol{D}_{m,par}$ 中内圆柱面上一点在 XOY 平面上的投影坐标为 $\left(0, \dfrac{\sum_{i=1}^{N_r} y_{i,r}}{N_r}\right)$,该点在机器坐标系下的坐标为

$(-r\cos\rho, -r\sin\rho)$，由此，可以得到：

$$\begin{cases} a = -r\cos\rho \\ b = -r\sin\rho - \dfrac{\sum_{i=1}^{N_r} y_{i,r}}{N_r} \end{cases} \tag{22}$$

联立式(9)可得：

$$c = b \tag{23}$$

微调传感器安装位置，将其沿自身 x 轴平移偏置距离 a，可消除激光测量平面不过转台中心引起的误差并实现各个线激光传感器的共面。

5) 位姿调整

标定过程如前所述，按照先姿态后位置的方式进行。在姿态标定阶段依次标定线激光传感器的 α、β、γ 角度，α、β、γ 分别表示线激光传感器绕自身 x、y、z 轴的旋转角度，x、y、z 轴相互垂直，每个角度调整完后的测量阈值判定结果都只与当前调整的角度有关，且依次标定时后续角度的调整过程不会影响之前已经标定的结果。姿态标定完成后，此时传感器自身坐标系的 x 轴已与机器坐标系的 x 轴平行。进一步地，在位置标定阶段，通过测量得到两个坐标系原点之间的偏置距离 a、b、c，移动调整传感器的 x 轴偏置距离 a，使得线激光测量平面与机器转台中心重合。

如图 9 所示为传感器的位姿调整装置。根据提出的位姿标定方法分析，位姿调整装置设计有 3 个相互垂直的旋转自由度和一个平移自由度。平移机构安装在机架上，通过装配约束其与机器坐标系 x 轴平行，旋转机构安装在平移机构上。同时，先姿态后位置的标定方式可消除 3 个旋转轴相交的约束条件，简化位姿调整装置的复杂性。在姿态标定阶段，调整角度时传感器坐标系原点变化导致的偏置距离变化，并不影响在位置标定阶段测量得到姿态标定后两个坐标系原点之间的最终结果。

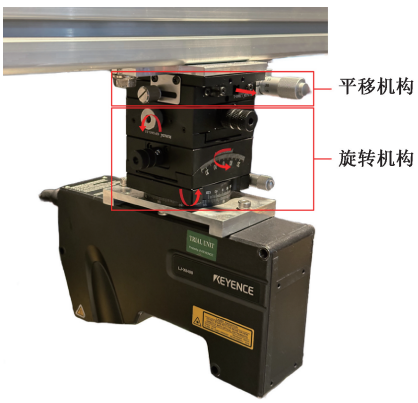

图 9 位姿调整装置

Fig. 9 Position and posture adjustment mechanism

1.3 放置偏心误差修正

在理想情况下，待测工件在测量过程中应始终保持旋转中心与工件轴线重合。当旋转中心与工件轴线不重合且存在偏心距 e 时，会导致工件径向尺寸测量产生偏心误差[22]。

如图 10 所示为放置偏心测量径向尺寸误差图。

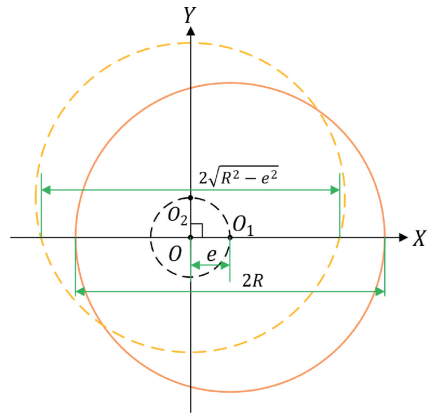

图 10 放置偏心测量径向尺寸误差图

Fig. 10 Radial dimension error diagram caused by placement eccentricity

假设一个圆形的标准工件，半径为 R，其圆心为 $O_1(e,0)$，旋转中心为 $O(0,0)$，即存在偏心且偏心距为 e。根据圆的定义，圆上任意一点到圆心 $O_1(e,0)$ 的距离是圆的半径 R，即：

$$(x-e)^2 + y^2 = R^2 \tag{24}$$

以 O 为极坐标原点、OX 为极轴建立极坐标，圆上任意一点的极坐标为 (r,θ)、笛卡尔坐标为 $(r\cos\theta, r\sin\theta)$，得：

$$r^2 - 2re\cos\theta + e^2 = R^2 \tag{25}$$

该圆的极坐标方程 $r(\theta)$ 为：

$$r(\theta) = e\cos\theta + \sqrt{R^2 - e^2\sin^2\theta} \tag{26}$$

此时，测得工件的直径 l 为：

$$l = r(\theta) + r(\theta+\pi) = 2\sqrt{R^2 - e^2\sin^2\theta} \tag{27}$$

当 $\sin^2\theta = 1$，即 $\theta = \dfrac{\pi}{2}, \dfrac{3\pi}{2}, \cdots$ 时，l 取最小值 $2\sqrt{R^2-e^2}$；当 $\sin^2\theta = 0$，即 $\theta = 0, \pi, \cdots$ 时，l 取最大值 $2R$，l 的取值范围为 $[2\sqrt{R^2-e^2}, 2R]$。因此，偏心距 e 导致直径尺寸测量时产生的误差 t 为：

$$2\left(\sqrt{R^2-e^2} - R\right) \leqslant t \leqslant 0 \tag{28}$$

然而，在火车车轮的热态在线测量等实际应用中，由于待测工件质量大、温度较高，且机械手的重复定位精度有限，待测工件在放置到测量机后，难以实现精确的定位和二次定心。针对这一问题，提出了一种待测工件放置偏心误差的修正方法，旨在提高测量精度并克服传统定

心方式的局限性。

如图 11 所示,待测工件放置偏心时测量系统模型可简化为投影在 XOY 平面上的视图。

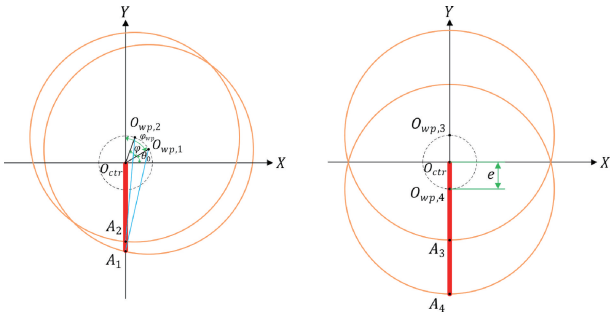

图 11　放置偏心测量 XOY 平面图

Fig. 11　XOY plan view of placing eccentricity measurements

Y 轴负半轴为线激光测量区域,旋转中心为 O_{ctr},工件轴心为 $O_{wp,1}$,测量值为 $|\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{ctr}\boldsymbol{A}_1}|$,而真值为 $|\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{wp,1}\boldsymbol{A}_1}|$。当转台旋转角度 φ 时,$O_{ctr}O_{wp,1}$ 同样绕 O_{ctr} 旋转角度 φ 到 $O_{ctr}O_{wp,2}$,此时工件轴心变为 $O_{wp,2}$,测量值为 $|\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{ctr}\boldsymbol{A}_2}|$,而真值变为 $|\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{wp,2}\boldsymbol{A}_2}|$。分析可得,若已知每次测量时工件轴心的位置,即式(6) 中参数 u、v 的值,便可对放置偏心引起的径向尺寸误差进行修正。当转台旋转至 $O_{wp,3}A_3$ 和 $O_{wp,3}O_{ctr}$ 共线且方向相同时,测量值 $|\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{ctr}\boldsymbol{A}_3}|$ 为最小值;当转台旋转至 $O_{wp,4}A_4$ 和 $O_{wp,4}O_{ctr}$ 共线且方向相反时,测量值 $|\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{ctr}\boldsymbol{A}_4}|$ 为最大值。因此,待测工件放置的偏心距为:

$$e = \frac{|\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{ctr}\boldsymbol{A}_4}| - |\overrightarrow{\boldsymbol{O}_{ctr}\boldsymbol{A}_3}|}{2} \tag{29}$$

以 O_1 为极坐标原点、O_1X 为极轴建立极坐标,工件轴心 O_2 的初始极坐标为 (e,θ_0)。记转台旋转至 $O_{wp,3}A_3$ 和 $O_{wp,3}O_{ctr}$ 共线且方向相同时的转动角度为 φ_{wp},则:

$$\theta_0 = \frac{\pi}{2} - \varphi_{wp} \tag{30}$$

进一步地,将极坐标转换为笛卡尔坐标可得到工件轴心 O_2 的坐标,即:

$$\begin{cases} x = e\cos(\theta + \theta_0) \\ y = e\sin(\theta + \theta_0) \end{cases} \tag{31}$$

式中:θ 为转台旋转角度;x、y 分别对应式(5) 中参数 u、v 的值。

系统测量时转台每旋转一定角度传感器测量一个待测工件的一个断面,提出的方法可以在转台旋转一周扫描完成后,计算得到每次测量时的工件轴心坐标,即前文所述的参数 u、v, 实现放置偏心误差的修正。

综上所述,经过测量系统建模并分析,得到的影响测量结果的 9 个参数均通过标定、测量或计算方式已知,利用线激光旋转扫描方式获取到了完整的车轮三维几何信息。

2　实验验证与分析

2.1　测量精度与重复性分析

如图 12 所示,为测量机实物图。如图 13 所示,测量机的 4 个线激光传感器选用基恩士 LJ-X8900,规格参数如表 1 所示。

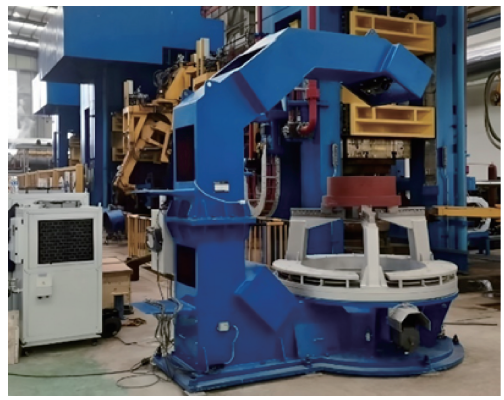

图 12　测量机实物

Fig. 12　Photograph drawing of the measuring machine

图 13　基恩士 LJ-X8900

Fig. 13　KEYENCE LJ-X8900 sensor

表 1　LJ-X8900 规格参数

Table 1　Specifications of the LJ-X8900 sensor

型号	基准距离/mm	测量范围/mm				重复精度/μm		直线性	轮廓数据间隔/μm		轮廓数据数量
		Z 轴(高度)	X 轴(宽度)			Z 轴(高度)	X 轴(宽度)	Z 轴(高度)	X 轴(宽度)		
			近	基准距离	远						
LJ-X8900	980	±400 (F. S. =800)	300	510	720	10	25	近~基准距离:±0.015% of F. S. 全部区域:±0.05% of F. S.	225(100)		3 200 点

测量机的 4 个线激光传感器采用前文所述的方法进行安装和标定后,采用标准回转体作为基准工件对优化后的测量系统进行综合性能评估。标准回转体如图 14 所示,其包含 D 系列直径特征(D_1 - D_3)和 H 系列高度特征(H_1 - H_2)共 5 个关键尺寸,如图 15 所示。

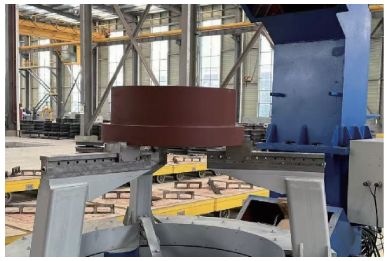

图 14 标准回转体实物

Fig. 14 Photograph diagram of the standard rotary body

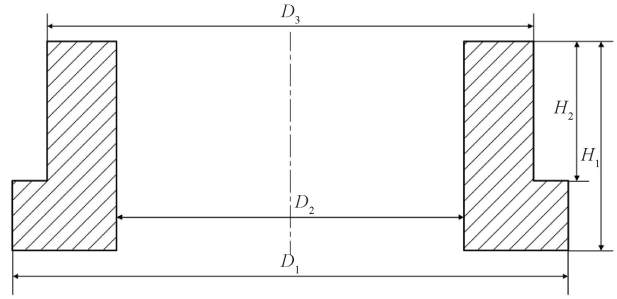

图 15 标准回转体尺寸

Fig. 15 Dimensions drawing of the standard rotary body

标准回转体的理论设计尺寸与实际测量数据如表 2 所示,实测值与理论值的最大偏差为-0.04 mm,表明该标准件具有可靠的计量溯源性,满足几何公差要求。在标准回转体放置偏心 3 mm 范围内,使用测量机重复扫描该标准回转体,进行 10 次重复测量,数据如表 3 所示。

表 2 标准回转体尺寸

Table 2 Dimensions of the standard rotary body

(mm)

序号	测量尺寸	理论值	实测值
1	D_1	800.00	799.96
2	D_2	700.00	700.02
3	D_3	500.00	499.96
4	H_1	300.00	300.02
5	H_2	200.00	199.98

表 3 测量机测量回转体结果

Table 3 Measuring machine measurement results of the standard rotary body (mm)

序号	测量尺寸	测量序列										平均值	极差	标准差
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10			
1	D_1	799.977	800.018	800.024	800.003	800.017	799.988	800.013	800.019	799.992	800.008	800.005 9	0.047	0.018
2	D_2	700.021	700.084	700.075	700.085	700.046	700.083	700.049	700.061	700.079	700.052	700.063 5	0.064	0.021
3	D_3	499.978	500.016	499.992	500.012	499.997	500.011	499.973	500.012	499.983	499.987	499.996 1	0.043	0.016
4	H_1	300.014	300.061	300.043	300.062	300.028	300.048	300.043	300.057	300.031	300.038	300.042 5	0.048	0.015
5	H_2	199.944	199.980	199.953	199.971	199.962	199.953	199.979	199.944	199.971	199.953	199.961 0	0.036	0.014

实验验证与分析表明,测量机在采用优化安装与标定方法后展现出优异的测量精度特性。通过对标准回转体工件的重复测量数据统计,如表 4 所示,测量均值与基准值的绝对偏差均控制在±0.046 mm 范围内,测量点的最大单次误差为 0.065 mm,所有测量项的相对偏差绝对值均低于 0.009 5%,达到工业级精密测量要求。测量重复性指标方面,各测点的极差分布在 0.036~0.064 mm,标准差均<0.021 mm,最低达 0.014 mm 验证了系统的高稳定性。直径测量项的误差普遍高于高度测量项,这与理论模型中因传感器空间角度安装误差累积效应及工件偏心导致的径向尺寸敏感特性一致。此外,测量重复性指标中,直径项的极差与标准差略高于高度项,进一步验证了偏心误差对径向尺寸的影响更为显著。

表 4 测量机测量结果统计

Table 4 Statistical analysis measuring machine results

序号	测量尺寸	基准值/mm	平均值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	最大偏差/mm
1	D_1	799.96	800.005 9	0.045 9	0.005 7	0.064
2	D_2	700.02	700.063 5	0.043 5	0.006 2	0.065
3	D_3	499.96	499.996 1	0.036 1	0.007 2	0.056
4	H_1	300.02	300.042 5	0.022 5	0.007 5	0.042
5	H_2	199.98	199.961 0	-0.019 0	-0.009 5	-0.036

进一步地,将标准回转体在转台上以不同偏心值进行放置,使用测量机扫描,测量数据如表 5 所示。

表 5　放置偏心不同时测量机测量结果

Table 5　Measurement results under different placement eccentricity conditions　(mm)

序号	测量尺寸	放置偏心											
		0.82	1.23	3.26	4.89	7.88	9.34	10.86	13.26	15.05	16.77	18.43	20.59
1	D_1	800.051	800.028	800.062	800.039	799.994	799.977	799.937	800.073	800.034	800.062	800.068	799.977
2	D_2	700.111	700.088	700.077	700.105	700.145	700.122	699.986	700.077	700.111	700.139	700.031	700.156
3	D_3	500.022	500.017	499.988	500.005	500.073	500.056	499.971	500.056	500.073	499.994	500.039	500.011
4	H_1	300.031	300.043	300.026	300.048	300.054	300.065	300.009	300.043	300.020	300.060	300.037	300.026
5	H_2	199.969	199.935	199.957	199.980	199.986	200.003	199.952	199.997	199.969	199.974	199.957	199.952

从放置偏心实验结果的数据统计可见,随着放置偏心值增大,直径特征的测量值波动显著加剧,如表 6 所示。

表 6　不同放置偏心值下测量机数据统计

Table 6　Statistical data of measurements under various eccentricity values　(mm)

序号	测量尺寸	放置偏心	平均值	极差	标准差	最大偏差
1	D_1		800.025 2	0.136	0.044	0.113
2	D_2		700.095 7	0.170	0.049	0.136
3	D_3	0.82~20.59	500.025 4	0.102	0.034	0.113
4	H_1		300.038 5	0.056	0.017	0.045
5	H_2		199.969 3	0.068	0.020	−0.045

以 D_2 为例,当偏心值从 0.82 mm 增至 20.59 mm 时,其测量值在 699.986~700.156 mm 范围内变化,极差达 0.170 mm;而高度特征的测量值波动范围较小,如 H_1 在 300.009~300.065 mm 变化,极差仅为 0.056 mm。这表明,径向尺寸对偏心误差的敏感性远高于轴向尺寸,与理论模型中误差累积效应一致。通过图 16 所示的测量趋势分析图可进一步揭示偏心值与测量误差的关系,对于直径项,测量误差随偏心增加呈近似线性增长,但影响较小,误差增长趋势较平缓;对于高度项,测量误差与偏心值无明显线性关系,但其标准差略有上升,表明偏心可能通过转台振动间接影响了轴向测量的稳定性。尽管偏心对测量值波动存在影响,所有测量值的绝对误差均控制在±0.136 mm 以内,测量机在放置偏心误差修正后仍表现出较强的鲁棒性。

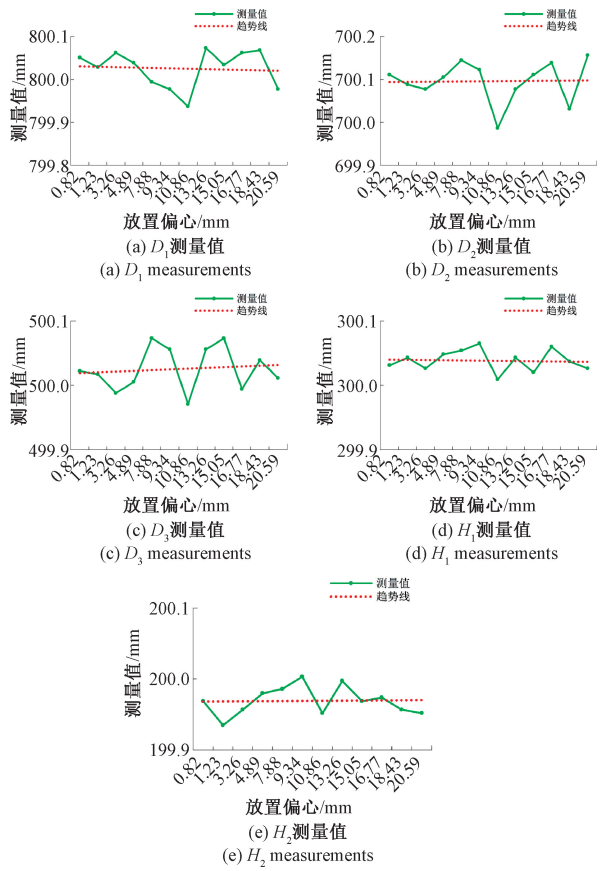

图 16　放置偏心测量趋势分析图

Fig. 16　Trend analysis of radial measurement error due to placement eccentricity

2.2　实际应用验证

为验证测量系统的工程适用性,如图 17 所示,对 915KKD 型快速客车辗钢整体车轮进行了现场测量。

图 17　915KKD 型车轮

Fig. 17　915KKD-type train wheel

实验采用 AT403 激光跟踪仪(空间坐标测量精度基础精度为 15 μm,然后每多 1 m,精度再增加 6 μm)获取车轮各部位的基准值,使用测量机对车轮进行了 5 次重复扫描,得到的测量数据如表 7 所示。

表 7 测量车轮结果

Table 7 Measurement results of the wheel (mm)

序号	测量尺寸	基准值	测量序列				
			1	2	3	4	5
1	踏面直径	917.268	917.331	917.334	917.231	917.334	917.307
2	内侧轮辋内径	778.342	778.385	778.379	778.367	778.371	778.324
3	外侧轮辋内径	775.720	775.733	775.756	775.782	775.764	775.728
4	内侧轮毂外径	277.624	277.642	277.589	277.592	277.587	277.631
5	外侧轮毂外径	277.730	277.678	277.661	277.663	277.748	277.711
6	轮缘直径	971.150	971.195	971.123	971.207	971.182	971.169
7	轮辋高度	137.185	137.156	137.162	137.187	137.149	137.186
8	轮毂高度	178.481	178.479	178.463	178.477	178.453	178.458
9	轮辋侧辐板厚度	22.031	21.979	21.982	22.046	22.083	21.976
10	中间辐板厚度	30.962	30.942	30.975	31.005	31.007	31.018
11	轮毂侧辐板厚度	26.052	26.053	26.093	26.115	26.108	26.067
12	内侧毂辋距	69.024	68.977	69.017	69.002	68.994	68.981
13	外侧毂辋距	27.784	27.750	27.727	27.741	27.753	27.798
14	内侧辋板距	51.592	51.582	51.542	51.557	51.528	51.536
15	外侧辋板距	111.135	111.097	111.115	111.109	111.101	111.128

对测量数据进行统计分析,计算各测量项的均值、绝对误差及重复性指标,具体结果如表 8 所示。

表 8 测量机测量数据统计

Table 8 Statistical analysis of wheel measurement data

序号	测量尺寸	基准值/mm	平均值/mm	绝对误差/mm	相对误差/%	极差/mm	标准差/mm
1	踏面直径	917.268	917.307 4	0.039 4	0.004	0.103	0.044
2	内侧轮辋内径	778.342	778.365 2	0.023 2	0.003	0.061	0.024
3	外侧轮辋内径	775.720	775.752 6	0.032 6	0.004	0.054	0.022
4	内侧轮毂外径	277.624	277.608 2	−0.015 8	−0.006	0.055	0.026
5	外侧轮毂外径	277.730	277.692 2	−0.037 8	−0.014	0.087	0.037
6	轮缘直径	971.150	971.175 2	0.025 2	0.003	0.084	0.032
7	轮辋高度	137.185	137.168 0	−0.017 0	−0.012	0.038	0.018
8	轮毂高度	178.481	178.466 0	−0.015 0	−0.008	0.026	0.012
9	轮辋侧辐板厚度	22.031	22.013 2	−0.017 8	−0.081	0.107	0.049
10	中间辐板厚度	30.962	30.989 4	0.027 4	0.088	0.076	0.031
11	轮毂侧辐板厚度	26.052	26.087 2	0.035 2	0.135	0.062	0.027
12	内侧毂辋距	69.024	68.994 2	−0.029 8	−0.043	0.040	0.016
13	外侧毂辋距	27.784	27.753 8	−0.030 2	−0.109	0.071	0.027
14	内侧辋板距	51.592	51.549 0	−0.043 0	−0.083	0.054	0.021
15	外侧辋板距	111.135	111.110 0	−0.025 0	−0.022	0.031	0.012

结果表明,测量系统在复杂几何特征测量中表现出较高的精度,所有测量项的绝对误差均<±0.069 mm,最大相对误差<0.135%,满足工程测量要求;各测量项的重复性指标良好,极差最大值为 0.107 mm,标准差最大值

为 0.049 mm,具有较好的稳定性;相对误差分析显示,轮毂侧辐板厚度和外侧毂辋距的相对误差较大,这是由于这些部位的几何特征较为复杂所致,但测量结果仍控制在允许范围内;测量均值与基准值的对比分析表明,系统测量结果与激光跟踪仪基准值具有良好的一致性,验证了测量系统的可靠性。

综上所述,该测量系统在实际工程应用中表现出良好的测量精度和重复性,能够满足复杂几何特征的测量需求,为车轮质量检测提供可靠的技术支持。

3　结　　论

聚焦于火车车轮三维测量领域,成功构建了一套基于多线激光传感器的火车车轮三维测量系统。通过建立多层坐标动态映射模型,在不受车轮放置偏心约束下建立了从激光传感器轮廓数据到车轮三维几何信息的精准映射链。采用定制化标定块和分步标定策略,解决了大型测量设备中传感器安装姿态与位置的参数标定难题,有效保障了多传感器协同测量一致性。针对工件放置偏心问题,提出了基于极坐标的轴心追踪模型,通过动态计算偏心参数修正径向尺寸测量误差,实验表明在不同偏心值下系统均能保持较高精度,极大提升了测量系统的鲁棒性。经实验验证,该测量系统在精度和稳定性方面表现出色,满足工业级精密测量要求实际车轮测量中,系统绝对误差<±0.069 mm,重复性标准差<0.049 mm,在实际应用中也展现出良好的工程适用性,能为车轮三维尺寸测量提供有力的技术支持。同时,提出的标定及误差修正方法对线激光旋转扫描测量系统具有一定的通用性,其多层坐标变换模型、分步标定策略及偏心修正逻辑,可直接迁移至线激光传感器在大型回转体等领域的三维测量中,为工业级精密测量提供了一种通用的技术框架。

参考文献

[1] 孙善超,王成国,李海涛, 等. 轮/轨接触几何参数对高速客车动力学性能的影响[J]. 中国铁道科学, 2006(5):93-98.
SUN SH CH, WANG CH G, LI H T, et al. Effect of wheel/rail contact geometric parameters on dynamic performance of high-speed passenger cars[J]. China Railway Science, 2006(5): 93-98.

[2] YANG R Z, HUANG J ZH, CHEN Z, et al. Measurement and optimization method for aero-engine rotors based on binocular multi-line laser sensing and virtual assembly[J]. Measurement, 2025, 242: 115808.

[3] JIN L, LI S Y, QIN G, et al. Outer surface defect detection of steel pipes with 3D vision based on multi-line structured lights[J]. Measurement Science and Technology, 2024, 35(6): 065203.

[4] QIAO Y Q, YE Y L, SU F, et al. Automated high-resolution 3D inspection methods for sealant applications in aerospace based on line structured light[J]. Review of Scientific Instruments, 2025, 96(1):0231032.

[5] DAI G H, ZHANG Q Q, XU X Y, et al. A calibration method of line-structured light system for measuring outer circle dimension during machining[J]. Results in Engineering, 2024, 23: 102525.

[6] YAN L T, YANG CH H, GE Y, et al. On-line measurement of rolling contact wear performance of plastic gear material using line structured light[J]. Measurement, 2024, 238: 115282.

[7] 叶涛,何威燃,刘国鹏, 等. 基于卷积神经网络的线结构光高精度三维测量方法[J]. 仪器仪表学报,2025, 46(2):183-195.
YE T, HE W R, LIU G P, et al. High-precision 3D measurement method of line structured light based on convolutional neural network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(2): 183-195.

[8] ZHANG ZH M, LI P Y, HUANG Q H, et al. High-precision self-centering detection of complex surface features in rotary workpieces using dual non-coaxial line-structured light[J]. Measurement, 2025, 253: 117564.

[9] LIU CH W, FU X, DUAN F J, et al. A novel method to calibrate the rotation axis of a line-structured light 3-dimensional measurement system[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2023, 164: 107524.

[10] 李天宇,刘昌文,段发阶, 等. 线结构光三维形貌测量系统精度影响因素分析[J]. 光学学报, 2024, 44(21):2112001.
LI T Y, LIU CH W, DUAN F J, et al. Analysis of factors influencing accuracy in line-structured light three-dimensional surface measurement systems[J]. Acta Optica Sinica, 2024, 44(21): 2112001.

[11] LI M CH, SHI ZH Y, SUN Y Q, et al. A calibration method of line laser 3D gear measurement system[J]. Measurement, 2025, 242: 116204.

[12] 李津容,葛广言,冯晓冰, 等. 在机测量线激光传感器安装位姿的全局标定[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(9):158-165.
LI J R, GE G Y, FENG X B, et al. Global calibration of laser sensor installation pose of on-machine measurement line[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(9): 158-165.

[13] WANG L, WANG H, HAN Q, et al. A laser plane

attitude evaluation method for rail profile measurement sensors[J]. Sensors, 2023, 23(10): 4586.

[14] 徐永安,杨钦,怀进鹏. 转台中心轴线标定误差分析与修正[J]. 北京航空航天大学学报,2005(8):899-903.
XU Y AN, YANG Q, HUAI J P. Analysis and modification of turntable's axis calibration[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2005(8): 899-903.

[15] 易杰,陈瀚,叶浩, 等. 多个单目线激光传感器旋转扫描系统高精度标定方法[J]. 铸造技术, 2017, 38(12):2989-2993,2997.
YI J, CHEN H, YE H, et al. High-precision calibration method for rotation scanning system with multiple monocular laser sensors[J]. Foundry Technology, 2017, 38(12): 2989-2993,2997.

[16] 陈瀚,张思瑾,高见, 等. 基于多个线激光传感器旋转扫描的铸钢车轮在线三维测量技术[J]. 中国激光, 2019,46(7):199-205.
CHEN H, ZHANG S J, GAO J, et al. Online three-dimensional measurement technology for steel wheel based on rotating scanning of multiple line-laser sensors[J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(7): 199-205.

[17] 仝宇博,王洪喜,唐霖, 等. 全金属螺杆钻具定子内轮廓测量系统的设计与测试[J]. 电子测量技术, 2023(23):188-194.
TONG Y B, WANG H X, TANG L, et al. Design and testing of stator inner contour measurement system for all-metal screw drilling tools[J]. Electronic Measurement Technology, 2023(23): 188-194.

[18] 鄢然,李欣飞,夏磊, 等. 一种火车车轮轮廓测量装置: 中国,CN202311600751.2[P]. 2024-01-09.
YAN R, LI X F, XIA L, et al. A train wheel profile measuring device: China, CN202311600751.2[P]. 2024-01-09.

[19] 叶柳康,叶文华,杨高杰, 等. 线激光传感器测量系统的安装姿态标定方法[J]. 组合机床与自动化加工技术,2022(7):122-126.
YE L K, YE W H, YANG G J, et al. Installation attitude calibration method of line laser sensor measurement system[J]. Combined Machine Tool and Automatic Processing Technology, 2022(7): 122-126.

[20] 石照耀,孙衍强. 齿轮三维测量中线激光传感器位姿标定方法[J]. 仪器仪表学报,2021,42(12):39-46.
SHI ZH Y, SUN Y Q. Pose calibration method for midline laser sensor for three-dimensional measurement of gears[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(12): 39-46.

[21] 高金锋,梁冬泰,陈叶凯. 基于标准圆柱的线激光轮廓扫描机器人手眼标定方法[J]. 机器人,2022,44(3):321-332.
GAO J F, LIANG D T, CHEN Y K. Hand-eye calibration method of line laser profile scanning robot based on standard cylinder[J]. Robot, 2022, 44(3): 321-332.

[22] ADAMCZAK S, JANECKI D, STEPIEN K. Cylindricity measurement by the V block method-theoretical and practical problems[J]. Measurement, 2011, 44(1): 164-173.

作者简介

李欣飞,2023 年于重庆理工大学获得学士学位,现为重庆理工大学硕士研究生,主要研究方向为数字化与智能制造。
E-mail:1780295190@qq.com

Li Xinfei received his B.Sc. degree from Chongqing University of Technology in 2023. He is currently pursuing his master's degree at Chongqing University of Technology, with research interests focused on digitalization and intelligent manufacturing.

鄢然(通信作者),2010 年于华中科技大学获得学士学位,2016 年于华中科技大学获得博士学位。现为重庆理工大学副教授,主要研究方向为深度学习与计算机视觉、智能制造与工业机器人等。
E-mail:yanran@cqut.edu.cn

Yan Ran (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2010 and Ph.D. degree from Huazhong University of Science and Technology in 2016. He is currently an associate professor at Chongqing University of Technology, with research interests in deep learning and computer vision, intelligent manufacturing and industrial robots.