

DOI: 10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.02.059

基于集成式激光位移传感器的轮对尺寸检测方法

侯建强¹, 马宏伟², 李鸿喜²

(1. 国能铁路装备有限责任公司肃宁车辆维修分公司, 河北 沧州 062350;

2. 天津哈威克科技有限公司, 天津 301799)

摘要:在轮对尺寸高精度检测过程中, 通常需要铁路车辆停靠在一个特定位置进行, 但是环境中存在的震动、噪声、光线等因素都可能对测量结果产生干扰, 出现检测误差问题。设计一种基于集成式激光位移传感器的轮对尺寸检测方法。利用激光位移传感器获取轮廓特征, 基于轮廓数据得到点云数据坐标位置, 将其进行转换后得到点云数据, 基于点云数据进行数据去噪处理, 结合最小二乘拟合法实现对轮对尺寸检测。实验结果表明: 所设计系统的最大检测误差仅为 0.2 mm, 最长检测时间为 46 s, 说明所提方法的检测精度高、速度快, 为铁路车辆的安全和正常运行提供了可靠保证。

关键词:轮对尺寸检测; 点云数据; 激光位移传感器; 最小二乘拟合法; 轮廓特征

中图分类号: TP242 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2025)02-0299-05

Wheel Set Size Detection Method Based on Integrated Laser Displacement Sensor

HOU Jianqiang¹, MA Hongwei², Li Hongxi²

(1. China Energy Railway Equipment Company Limited Suning Branch, Cangzhou 062350, China;

2. Tianjin Hveic Technology Co., Ltd., Tianjin 301799, China)

Abstract: High-precision detection of wheel set size requires railway vehicles parking at a specific location, where the measurement results may suffer environmental interferences such as vibration, noise and light leading to detection errors. Therefore, a wheel set size detection method based on integrated laser displacement sensors is designed. Laser displacement sensors are applied to obtain contour features, point cloud data coordinate positions are obtained based on contour data, which are transformed to obtain point cloud data. Data denoising is performed based on point cloud data, and the least squares fitting method is combined to detect wheel set size. The experimental results show that the maximum detection error of the designed system is only 0.2 mm, and the maximum detection time 46 s, which indicates that the proposed method has high detection accuracy and fast speed, and is a reliable guarantee for the safety and normal operation of railway vehicles.

Keywords: wheel set size detection; point cloud data; laser displacement sensor; least squares fitting method; contour features

0 引言

轮对是一种耦合部件^[1], 可以将机车车辆与轨道连接在一起, 轮对不仅承受着车辆的载荷, 还保障车辆在轨道中稳定运行。在车辆行驶过程中, 轮对承受着源于车辆与钢轨接触时引起的冲击力、车辆在拐弯和制动时产生的压力等, 这些冲击力与压力会增加轮对磨损, 当轮对磨损超过规定限度时, 会对车辆的稳定运行以及乘坐舒适度造成严重影响, 因此精准且快速地获得车辆轮对尺寸数值具有重大的实际意义^[2]。

为了提高车轮检测可靠性, 部分研究人员提出了相关的研究方法。程中国^[3]利用光截图像方

法, 设计车辆轮对外形尺寸检测系统, 对轮缘的宽度和厚度、车轮的直径以及内部间距展开实时在线测量, 利用预测模型预测和分析车辆车轮磨损趋势, 将轮对外廓尺寸参数与预测模型结合, 实现系统对轮对尺寸的检测。边志宏等^[4]检测车辆的轮对尺寸以及踏面板损伤, 得到轮对尺寸有效数值和踏面板损伤的预警图像, 综合系统的功能与检测方法, 利用仿射算法和磨损预测模型提高轮对检测精度, 实现系统对电力故障的检修。

以上两种系统忽视了轮对尺寸检测系统中轮缘顶点以及车辆沉降、环境干扰带来的误差问题, 很难做到高精度测量。为此, 本文设计一种基于集成式激光位移传感器的轮对尺寸检测方法。

基金项目: 哈尔滨铁路科研项目(GJNY-20-139)

第一作者简介: 侯建强(1987—), 男, 陕西神木人, 工程师, 本科, 研究方向为铁道车辆研究, gse56662@126.com。

1 轮对尺寸检测方法的设计与实现

1.1 基于集成式激光位移传感器的轮对尺寸数据采集

将集成式激光位移传感器按照设计的几何关系安装在钢轨两侧,当列车行驶通过激光传感器检测的区域时,激光扫描踏面和轮缘的轮廓形状,并输出轮对的切面图。经过算法处理获得轮对尺寸相关参数,从而进一步对车辆轮对尺寸进行检测^[5-6]。该采集设施在钢轨两侧分别安装两个车轮传感器,当有车轮通过传感器中间的钢轨区域时,即刻产生一个脉冲信号;当在轨道上连续通过两个车轮时,车轮传感器会产生两个脉冲信号。因而可通过两个脉冲时间差得到列车运行速度,也通过车轮传感器的信号来控制激光传感器和数据采集装置采集数据。该采集设施的检测原理如图1所示。激光传感器按照设计的几何关系安装在钢轨两侧,其中内侧传感器对车辆的运行速度进行采集,外侧传感器对轮对尺寸数据进行采集^[7]。

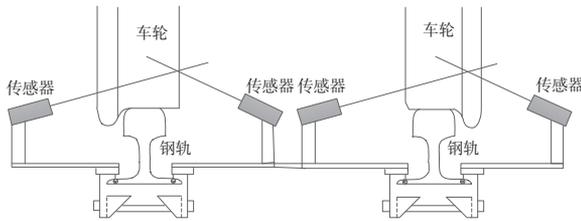


图1 检测原理图

假设激光位移传感器测量的位移信号为 $d(t)$,则激光位移传感器可以通过测量其反射回来的激光光束与传感器之间的距离变化来获得位移信号。通常,这个距离变化可以表示为

$$\Delta L(t) = L(t) - L_0 \quad (1)$$

式中: $L(t)$ 为传感器接收到的激光光束与被测物体之间的距离; L_0 为传感器在初始状态下与被测物体之间的距离。因此,激光位移传感器测量的位移信号可以表示为

$$d(t) = \Delta L(t) \times \cos\theta \quad (2)$$

通过激光位移传感器测量的位移信号和车轮的几何形状关系,将位移信号转换为轮廓特征为

$$h = H - d(t) \times \sin\alpha \quad (3)$$

式中: H 为激光光束到车轮表面的初始距离; α 为激光光束与车轮表面法向量之间的夹角。

通过激光位移传感器测量的位移信号和车轮移动速度关系,将位移信号转换为车辆运行速度为

$$S = \frac{\Delta d(t)}{\Delta(s_1 - s_2)} \cos\alpha \quad (4)$$

式中: s_1 为激光光束到车轮的初始时间; s_2 为激光光束到车轮的结束时间。

基于获取到的轮廓特征,得到激光位移传感器测量点云数据坐标位置原理图如图2所示。

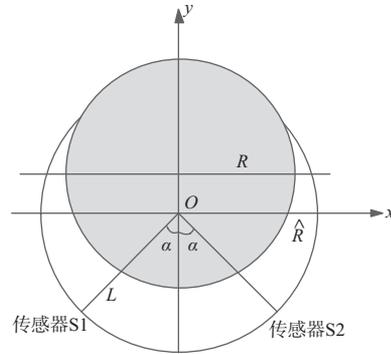


图2 激光位移传感器测量点云数据坐标位置图

由几何关系可得S1、S2探测点于坐标系 xOy 下的坐标分别为 (x_A, y_A) , (x_A, y_A) ,分别表示了传感器S1和传感器S2在坐标系 xOy 下的位置。它们可用于计算和分析轮对的切面图,以获得轮对尺寸相关参数,表达式为

$$\begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d(t) (\hat{R} - L) \sin\alpha \\ d(t) (\hat{R} - L) \cos\alpha \end{bmatrix} \quad (5)$$

基于式(3)得到的完整数据实现点云数据坐标位置的转换^[8],这样不仅能够快速显示因列车沉降带来的问题,而且还可以减少误差。经过集成式激光位移传感器得到的轮廓点云数据坐标转换公式为

$$\begin{bmatrix} x_B \\ y_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: (x_B, y_B) 表示点云数据转换后位置; (x_A, y_A) 表示点云数据转换前位置; θ 表示坐标转换时的旋转角度; t_x 表示轮缘顶点的横坐标平移参数; t_y 表示轮缘顶点的纵坐标平移参数。

1.2 集成式激光位移传感数据去噪处理

根据上述步骤得到变换点云数据坐标后,即可获得车轮轮廓完整形状,但是在测量中因环境因素干扰,例如电磁干扰、机械振动、温度变化等,导致轮廓失真,环境噪声通常具有频谱分布上的宽带特性,表现为在各个频率范围内都有一定能量分布。因此需要对其进行处理。集成式激光传感器内部在提取光条中心线时^[9],会产生数字化误差现象。那么轮廓数据会因受到环境干扰而产生

生噪点,因为数字化误差和噪点都会降低轮缘顶点计算精度,所以在实际测量轮廓数据前^[10],需要对数据进行去噪处理。

预设离散曲线 P 表示轮对断面轮廓数据, p_k 表示轮廓数据上任意点, p'_k 表示轮廓数据上任意点输出值,由此计算出任意点输出值坐标点的加权组合,其计算公式为

$$p'_k = \left(\begin{array}{c} (x'_k, y'_k) \\ \left(\frac{\sum_{i=-N}^N x_{k+i} \omega(k+i)}{\sum_{i=-N}^N \omega(k+i)}, \frac{\sum_{i=-N}^N y_{k+i} \omega(k+i)}{\sum_{i=-N}^N \omega(k+i)} \right) \end{array} \right) \quad (7)$$

式中: (x'_k, y'_k) 表示轮廓数据上任意点输出值的横纵坐标; k 表示时间常量; $i \in N$ 表示轮廓数据常数; ω 表示加权因子。

利用中值误差方法与空间连续度方法结合式(7)进一步计算加权因子 ω_1 和 ω_2 , 得到计算公式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_1(k+i) = \exp p'_k \left\{ -\frac{[2y_{k+i} - (y_{k+i-1} + y_{k+i+1})]^2}{\sigma_1^2} \right\} \\ \omega_2(k+i) = \exp p'_k \left\{ -\frac{\|p_{k+i} - p_k\|^2}{\sigma_2^2} \right\} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: y 表示离散曲线纵坐标; σ_1 表示基于中值误差的高斯白噪声系数; σ_2 表示基于空间连续度的高斯白噪声系数; ω_1 表示基于中值误差的加权因子; ω_2 表示基于空间连续度的加权因子。

根据轮廓数据复杂等级的噪声干扰方式,选取合适的高斯白噪声系数 σ 从而达到理想平滑效果,并利用聚类方法剔除空间尺寸较小的类,完成去噪处理,表达式为

$$\omega(k+i) = \left\{ \begin{array}{l} \omega_1(k+i) \times \omega_2(k+i) \\ \exp \left\{ -\frac{[2y_{k+i} - (y_{k+i-1} + y_{k+i+1})]^2}{\sigma_1^2} - \frac{\|p_{k+i} - p_k\|^2}{\sigma_2^2} \right\} \end{array} \right. \quad (9)$$

进行轮对尺寸检测时,去噪处理后的数据能够使得检测结果更加准确和可靠,更好地反映车辆轮对尺寸的实际情况,从而提高检测的精度和可靠性,为车辆安全和稳定运行提供更好的保障。

1.3 轮对尺寸检测

基于上述得到去噪后的激光位移传感数据,结合最小二乘拟合法实现对轮对尺寸检测。将去

噪后的传感数据输出到同一坐标系上,其表达式为

$$\begin{cases} u_m = x_m \cos \beta_2 - y_m \sin \beta_2 \omega(k+i) \\ v_m = y_m \cos \beta_2 + x_m \sin \beta_2 \omega(k+i) \end{cases} \quad (10)$$

式中: u_m 表示经过变换后的横轴坐标值; v_m 表示经过变换后的纵轴坐标值; x_m 表示原始横轴坐标值; y_m 表示原始纵轴坐标值; β_2 表示传感器与坐标系之间夹角。

将转换后的内外两侧两组坐标位置进行融合,其计算公式为

$$\begin{cases} u_n = u_n + p u_m \\ v_n = v_n + q v_m \end{cases} \quad (11)$$

式中: p 、 q 表示转换系数; u_n 、 v_n 分别表示融合坐标系对应的横、纵坐标位置。

在车辆运行过程中,车轮驶入激光位移传感器探测区间,通过对车轮轮缘顶点坐标值的测量,即可得到一组顶点坐标位置。假设车辆运行速度已知,通过时空转换和坐标旋转,再次得到一组新的顶点坐标位置,这是因为车辆在运行过程中,车轮上的顶点坐标位置会随着时间和空间的变化而发生位移。通过时空转换和坐标旋转,可以将测得的顶点坐标位置与原始所测点的位移进行对应,以获得准确的轮缘顶点坐标位置。

通过车辆运行速度和车轮在时间和空间上的位置信息进行坐标变换来获取对应的轮缘顶点坐标位置:

$$(x', y', z') = (x(t) + vt, y(t), z(t)) \quad (12)$$

式中: x' 表示车轮的前后位置; y' 表示车轮的上下位置; z' 表示车轮的左右位置; v 表示车辆运行速度; t 表示时间; $x(t)$ 表示车轮在时间 t 上的前后位置坐标; $y(t)$ 表示车轮在时间 t 上的纵向位置坐标; $z(t)$ 表示车轮在时间 t 上的横向位置坐标。

结合最小二乘法进行拟合,测量出轮径大小。

通过激光对射计算出车辆运行速度,其计算公式为

$$v = L_1 / [(T_1 - T_2) u_n v_n] \quad (13)$$

式中: L_1 表示两个激光对射开关之间的距离; T_1 、 T_2 表示激光对射开关在车轮驶入时发出信号的时间。

当激光对射开关与车轮上安装的激光位移传感器间距为 100 mm 以内时,即可探测到车辆在区间内的行驶速度。这是因为当车轮经过激光位移传感器时,激光束会被车轮表面的物体反射回传感器。通过测量反射时间,可以计算出车轮的位

移和速度。而当激光对射开关与传感器之间的距离较近(100 mm以内),激光束的测量精度和探测的时间分辨率都会提高,从而可以更准确地测量车辆的速度。

利用激光位移传感器对车辆在运行过程中的同一车轮进行 n 次采集,采集时间为 t_1, t_2, \dots, t_n , 采集轮缘顶点位置变化为 a_1, a_2, \dots, a_n , 与轮缘顶点位置对应的坐标为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n)$, 首先对 n 次采集的车轮纵坐标位置进行旋转,其计算公式为

$$Y_i = \begin{cases} y_i v \cos(90^\circ - \alpha) \\ y_i v \sin \alpha \end{cases} \quad (14)$$

式中: Y_i 表示旋转后的车轮纵坐标位置; y_i 表示纵坐标旋转值。

预设坐标原点在 t_1 时间,存在 $x_1 = 0$, 则对 n 次采集的车轮横坐标位置进行时空转换,其计算公式为

$$X_i = v(t_i - t_1) - |y_1 - y_i| \cot \alpha Y_i \quad (15)$$

式中: v 表示车辆行驶速度; X_i 表示时空变换后的车轮横坐标位置。

利用最小二乘拟合方法,结合式(14)和式(15)实现轮对尺寸检测,其计算公式为

$$D_m = \sqrt{a^2 + b^2 + 4 \frac{\sum (X_i^2 + Y_i^2) + a \sum X_i + b \sum Y_i}{n}} \quad (16)$$

式中 a, b 表示拟合参数。

2 实验结果与分析

为了验证基于集成式激光位移传感器的轮对尺寸检测方法的整体有效性,现对本文方法进行一系列相关测试,并与文献[3]方法以及文献[4]方法进行性能比较。选用 Matlab 仿真软件进行实验测试,设置实验所需的参数如表 1 所示。实验主要从轮对尺寸检测精度以及检测耗时入手,对 3 种方法进行比较,根据实验结果详细说明所提方法的轮对尺寸检测能力。实验平台如图 3 所示。

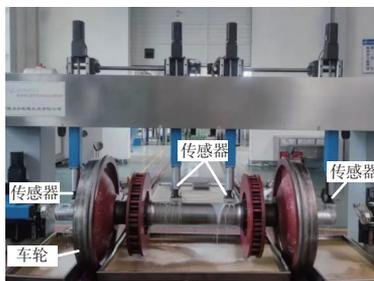


图 3 选取的实验平台

表 1 实验参数设置

参数	数值
车辆进站运行速度/(m/s)	5
车辆出站运行速度/(m/s)	10
进站轮轴负荷/kN	15
出站轮轴负荷/kN	20
传感器精度/mm	0.01
传感器发光光束波长/nm	655
传感器型号	BLD-100

2.1 检测精度

为了验证所提方法轮对尺寸检测的有效性,选取任意时间段内某公司的车辆为实验对象,将检测的车辆轮对尺寸建立成数据库,从数据库中随机选取 10 组样本,并对随机选取的 10 组轮对样本进行多次测量,将 3 种方法的检测测量平均值与实际测量值进行对比,根据实验结果分析出 3 种方法的检测精度以及稳定性。实验结果如表 2 所示。

表 2 轮对间车轴长度测量平均值比较 单位:mm

车轮样本编号	实际测量值	本文方法	文献[3]方法	文献[4]方法
1	836.7	836.7	846.3	856.8
2	836.3	836.3	839.5	846.9
3	835.4	835.3	845.2	845.4
4	835.6	835.5	845.6	855.8
5	834.8	834.8	844.3	854.3
6	837.7	837.7	847.8	827.9
7	836.3	836.3	856.8	826.8
8	835.6	835.4	855.5	825.3
9	836.7	836.7	846.2	816.4
10	837.8	837.6	857.4	827.2

实验对某公司车辆轮对间的车轴长度进行检测,并将 3 种方法测量的轮对间的车轴长度与实际测量值进行对比,根据实验结果可知,本文方法的轮对间的车轴长度与实际值最为接近,最大误差仅为 0.2 mm,而文献[3]与文献[4]方法的最大误差分别为 20.5 mm、20.3 mm,说明本文方法测量效果最好。

为了最直观地描述出本文方法对轮对尺寸检测精度,分别选取踏面厚度、轮缘高度以及轮径 3 种数据指标,对比 3 种方法的轮对检测精度,实验结果如图 4—图 6 所示。

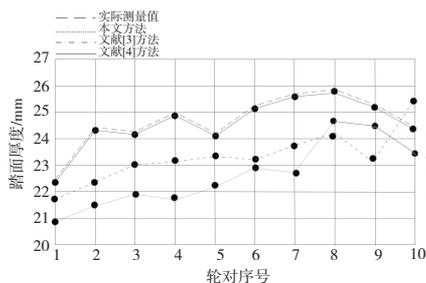


图4 3种方法的踏面厚度测量

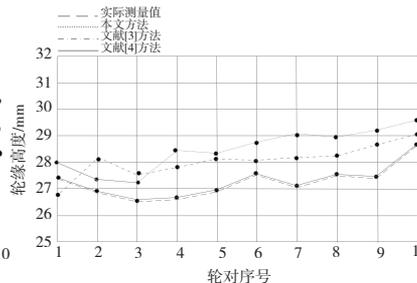


图5 3种方法的轮缘高度测量

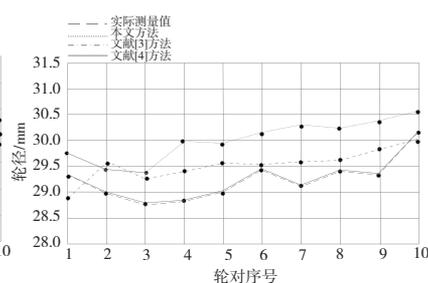


图6 3种方法的轮径测量

根据实验结果可知:因外界环境以及数据不完整等因素,导致对比方法的检测精度与实际平均测量值相差较大。但是能够清晰看出:本文方法不论是踏面厚度、轮缘高度还是轮径的测量数值,与实际测量值几乎相同,由此证明本文方法的检测精度是3种方法中最好的,能够代替人工检测,满足轮对尺寸测量的要求。

2.2 检测耗时

为了验证本文方法的综合有效性,从数据库中选取实验样本,通过增加实验次数,比较3种方法在检测时所消耗时间,如图7所示。

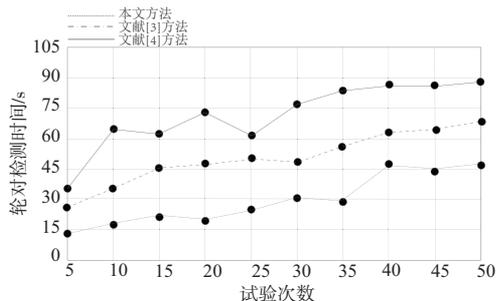


图7 3种方法的检测时间

根据实验结果可知:将3种方法检测所消耗时间对比后发现,本文方法最长检测时间为46 s,文献[3]方法最长检测时间为72 s,文献[4]方法最长检测时间为88 s,且随着实验次数的增加,本文方法检测所消耗时间比其他两种方法检测消耗时间都少,从而说明本文方法的检测能力强。

3 结语

轮对不仅承受着车辆的载荷,而且对车辆起到保障作用。但是,在车辆行驶过程中,轮对会受到车辆与钢轨接触时引起的冲击力和压力,这些冲击力与压力会增加轮对磨损。为了防止轮对磨损对车辆造成严重的安全问题,需要及时获得车辆轮对尺寸数值。为此提出基于集成式激光位移传感器的轮对尺寸检测方法设计方案,实验结果

表明:所设计方法的最大检测误差仅为0.2 mm,最长检测时间为46 s,说明本文方法不仅检测精度高、而且检测速度快,为铁路车辆的安全和正常运行提供了可靠保证。

参考文献:

- [1] 刘鹏飞,刘红军,高昊,等. 铁路重载货车轮对弹性振动及其动态影响[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(1): 91-99, 234.
- [2] LIU P F, YANG S P, LIU Y Q. Full-scale test and numerical simulation of wheelset-gear box vibration excited by wheel polygon wear and track irregularity[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, 167: 108515.
- [3] 程中国. 地铁车辆轮对外形尺寸在线检测系统[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(9): 228-231.
- [4] 边志宏,殷鸿鑫. 铁路货车轮对在线综合检测系统研究[J]. 中国铁路, 2021(3): 123-130.
- [5] JWO J S, LIN C S, LEE C H, et al. Intelligent system for railway wheelset press-fit inspection using deep learning[J]. Applied Sciences, 2021, 11(17): 8243.
- [6] 刘辉,冯海盈,孙钦密,等. 基于多元回归算法的激光位移传感器非线性误差建模和补偿[J]. 工具技术, 2021, 55(2): 87-90.
- [7] LAN M H, LI B, WEI X, et al. Measurement of aspheric surfaces using an arcuate region scanning method by 2D laser displacement sensor[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2185(1): 012078.
- [8] 邓世祥,吕彦明,王康,等. 线激光测量点云数据误差的预测与补偿[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(16): 458-465.
- [9] 魏双羽,白跃伟,刘凯. 接触式激光传感器集成测量方法的研究[J]. 工具技术, 2022, 56(5): 117-120.
- [10] REN M Y, YANG H J, ZHANG B N, et al. A low power-integrated temperature sensor interface circuit[J]. International Journal of Modern Physics B, 2022, 36(6): 1142-1151.

收稿日期:2023-06-12