

文章编号 1004-924X(2017)03-0616-09

## 点云频域配准的双目双线结构光列车轮对检测

王 华<sup>1,2</sup>, 邢春齐<sup>1\*</sup>, 高金刚<sup>2</sup>, 张 爽<sup>2</sup>, 朱可可<sup>3</sup>

(1. 长春工业大学 机电工程学院, 吉林 长春 130012;

2. 长春工程学院 机电工程学院, 吉林 长春 130012;

3. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022)

**摘要:**针对单线结构光测量因范围有限以及遮挡等原因而无法检测整个车轮的轮缘及踏面的问题,提出了一种列车轮对双目双线结构光检测方法。该方法采用两组双线结构光传感器进行测量和数据采集。在两传感器产生的点云进行配准的过程中使用截面点云数据还原点云矩阵,然后对其进行傅里叶变换,在计算旋转角度时先进行极坐标转换,最后求得两矩阵的互功率谱,从而得到点云的旋转和平移矩阵。在此过程中考虑到点云噪声的存在,将辛格函数近似代替无噪声的互功率谱傅里叶反变换,从而确定在频域配准时噪声对配准参数的确定并无影响。接着采用相对值比较的算法和主成分分析拟合基准平面,对轮对直径方向进行标定。利用标定值对扫描数据进行处理,得出包括车轮直径、车轮滚动圆径向跳动等对尺寸参数。实验表明:点云频域配准的双目双线轮对检测技术对车轮直径的测量尺寸误差 $\leq \pm 0.05$  mm,车轮端跳的测量误差 $\leq \pm 0.06$  mm,车轮径跳的测量误差 $\leq 0.04$  mm。与标准轮对检测数据相比可知,该系统满足轮对检测精度的要求。

**关键词:**非接触测量;结构光;轮对检测;双目双线;点云频域配准

中图分类号:TB92;TP391 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172503.0616

## Detection of wheel-set size of rail vehicle using double 2D laser displacement sensors based on point cloud data registration in frequency domain

WANG Hua<sup>1,2</sup>, XING Chun-qi<sup>1\*</sup>, GAO Jin-gang<sup>2</sup>, ZHANG Shuang<sup>2</sup>, ZHU Ke-ke<sup>3</sup>

(1. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. School of Mechatronic Engineering,

Changchun Institute of Technology, Changchun 130012, China;

3. School of Mechatronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

\* Corresponding author, E-mail:524719665@qq.com

**Abstract:** Detection method for train wheel set was proposed based on binocular and double-line structured light for solving the problem that rim and tread of the whole wheel can not be detected due to the limited measurement scope and shield of single-line structured light and other relevant reasons. Two groups of line structured sensor were employed in the measurement and data acquisition. Each group contained two laser displacement sensors. Point cloud matrix was restored with point cloud data on section in the process of registration of point cloud produced by the sensors, then was covered by Fourier transform. In calculation of rotation angle, polar coordinates were converted firstly and the

收稿日期:2016-09-09;修订日期:2016-10-12.

基金项目:吉林省科技发展计划资助项目(No. 20160204005GX)

cross-power spectrum of two matrices was solved finally to obtain rotation and translation matrices of the point cloud. During the process, Fourier inversion transform of noise-free cross-power spectrum was replaced by Sinc function approximation to determine that the noise in the registration of frequency domain had no influence on determination of registration parameters. Then datum plane was fitted with relative value comparison algorithm and Principal Component Analysis (PCA) to calibrate the diameter directions of wheel set. The canning data was processed with calibration values to acquire the dimension parameters of wheel set, such as diameter, radial runout of rolling circle. The result shows that the measurement error of the binocular and double-line detection system based on point cloud registration in frequency domain is less than  $\pm 0.05$  mm in diameter, the axial runout is less than  $\pm 0.06$  mm and radial runout of wheel is less than  $\pm 0.04$  mm. Compared with standard wheel set detection technology, this system meets the requirements for precision of wheel set detection.

**Key words:** non-contact measurement; line structured light; wheel-set detection; point cloud data registration in the frequency domain; couple 2D laser

## 1 引 言

随着我国轨道交通的快速发展,列车运行安全问题变得越来越重要。轮对作为列车重要的支撑运动部件,承受较大的动、静载荷及冲击,列车的高速运行要求轮对的各项参数满足列车高速运行时的技术要求,因此其关键尺寸的检测对列车安全运行有着重要的意义。

轮对测量方式可分为接触式测量和非接触式测量。原有的人工卡钳测量属于接触式测量,虽然操作较为简单,但测量结果受人为因素影响,测量精度较低<sup>[1]</sup>。并且随着生产企业和列车维修保养部门检测效率的提高,人工测量已无法满足高精度、自动化及高测量效率的需求<sup>[2]</sup>。随着国内对列车轮对检测研究的不断深入,近年来非接触式轮对测量系统成为关注焦点<sup>[3]</sup>。非接触轮对测量主要分为动态在线测量技术和静态检测技术。其中,动态在线测量技术虽然具有检测速度快、自动化程度较高,不占用车辆周转时间等优点,但测量精度较低(轮缘宽度、高度的测量误差 $\leq \pm 0.2$  mm,车轮直径测量误差 $\leq \pm 0.5$  mm)<sup>[4-6]</sup>,且径跳、端跳等多个尺寸不能完全测量<sup>[7-8]</sup>。随着国内高速动车组的迅猛发展,其运行速度也在不断刷新,列车安全运行要求轮对具备的技术标准也相应提高,现有动态测量设备已很难满足检测精度的要求。相比于动态测量,静态测量无需考虑列车运行带来的震动,测量光平面与轮轴中心重合度要求低,更容易达到较高的测量精度,且可以方便测量径跳、端跳等尺寸,不仅适合于轮对生产后的最终检测,而且适用于列车轮对的返修检测。本文基于静态测量原理,提出了一种列车轮对双目双线结

构光测量系统,并利用点云频域配准方法实现了车轮对的高精度快速检测。

## 2 测量系统组成

如图1所示,根据轮廓踏面形状,使用单个激光会产生投射盲区,因此单台相机无法完全捕捉车轮踏面轮廓。既然用单个传感器无法扫描车轮踏面完整的轮廓,这里采用两组线结构光传感器,每组两台,如图2所示。其中传感器1、传感器3为上下固定安装,传感器2、传感器4上下可调,如此安装以便调整传感器2、4的上下位置,保证每组中两传感器的光平面在同一平面内。图中左右顶尖顶紧轮对,使轮对在测量旋转时保持悬空状态,且保证在整个测量过程中轮对无轴向位移,以达到高精度测量径跳的目的。摩擦轮为轮对旋转提供动力,为保证检测过程中轮对运行平稳,将轮对旋转速度控制在3~6 r/min。摩擦轮的安装中心轴连接回转编码器,回转编码器发出的信号触发传感器进行测量数据采集。整个系统框架如图2所示。

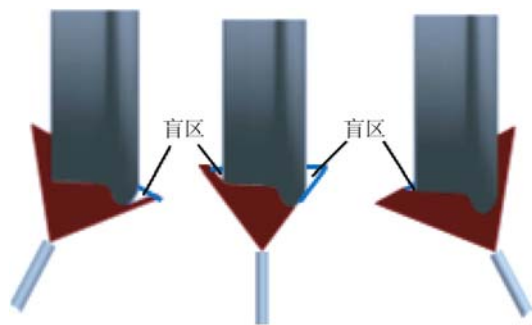


图1 单激光投射产生的盲区

Fig.1 Blind zone of single laser beam

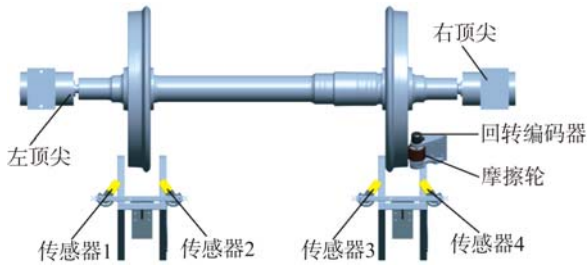


图 2 双目双线结构光车轮对检测系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of wheel-set size detection system based on binocular vision and double line-structured lights

### 3 检测系统标定

#### 3.1 踏面坐标融合及标定

如图 2 所示,首先根据三角法分别对传感器 1、传感器 2 进行标定,确定图像与光平面的透视关系<sup>[9]</sup>,从而得到平面图像与空间坐标的关系。检测时传感器在各自的相机坐标系中扫描,其检测数据亦在各传感器坐标系中定义。为得到完整的踏面轮廓监测数据,需将传感器 1、传感器 2 的数据进行拼接,而传感器 1、传感器 2 采集同步触发,所以  $y$  方向的点云数据是同步对齐的,根据两部分点云的分布特点,可知两点云只存在  $x-z$  方向上的平移和旋转,如图 3 所示。

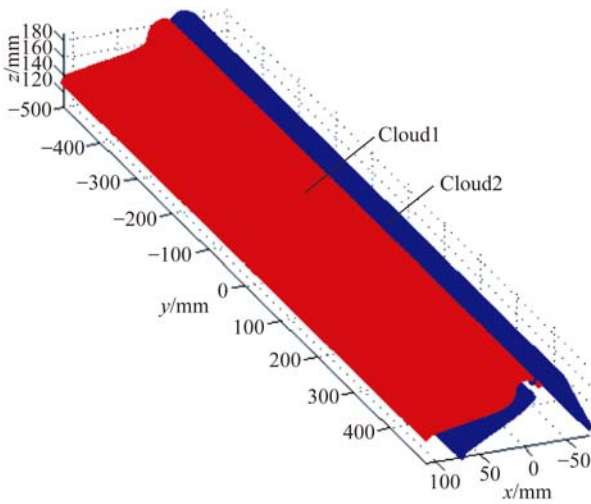


图 3 传感器 1 和传感器 2 的点云关系

Fig. 3 Relations of point clouds between sensor 1 and sensor 2

根据图 3 中点云关系的特点,本文还原点云矩阵并在频域中进行配准,具体步骤如下:

(1) 在  $y$  方向任取一截面并提取该截面中两传感器的点云数据,如图 4 所示。

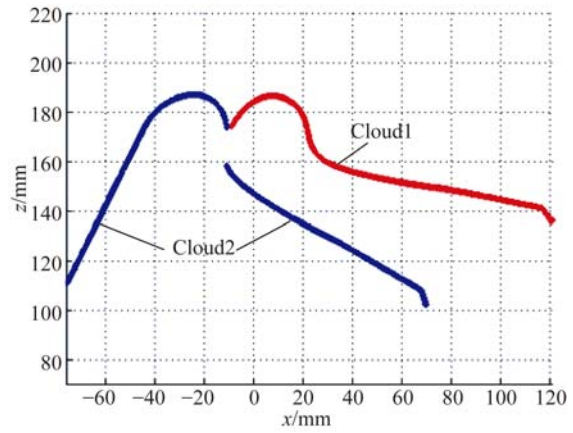
图 4  $y$  方向的点云截面

Fig. 4 Cross sections of point clouds along  $y$  axis

由图 4 可得两点云的截面方程为:

$$\begin{cases} C_1 = [x_i, y_i, z_i] \\ C_2 = [x_j, y_j, z_j] \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_{1k} = [x_\omega, y_\omega, z_\omega] \\ C_{2k} = [x_\nu, y_\nu, z_\nu] \end{cases}, \quad (2)$$

其中:  $i \in [1, m], j \in [1, n], m, n$  分别为两点云的个数;  $\omega \in [1, i_k], \nu \in [1, j_k]$ ;  $k$  表示点云的第  $k$  个截面,  $i_k, j_k$  分别表示  $C_1, C_2$  在截面  $k$  处的点云数量。

令:

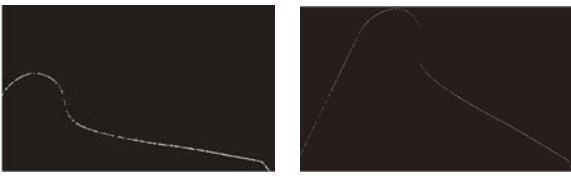
$$\begin{cases} M_1 = \max(x_i) - \min(x_i) \\ N_1 = \max(z_i) - \min(z_i) \\ M_2 = \max(x_j) - \min(x_j) \\ N_2 = \max(z_j) - \min(z_j) \\ M = \max(M_1, M_2) \\ N = \min(N_1, N_2) \end{cases}, \quad (3)$$

$$\begin{cases} x_{1i} = x_i - \min(x_i) \\ z_{1i} = z_i - \min(z_i) \\ x_{1j} = x_j - \min(x_j) \\ z_{1j} = z_j - \min(z_j) \end{cases}. \quad (4)$$

创建  $Z_1 = Z_2 = \rho N \times \rho M$  二维全零矩阵, 并令:

$$\begin{cases} Z_1(\rho z_{1i-2}, \rho x_{1i-2}) = 1 \\ Z_2(\rho z_{1j-2}, \rho x_{1j-2}) = 1 \end{cases}, \quad (5)$$

其中  $\rho \in [1, 10n], n \in \mathbf{N}^*$ , 为放大系数。两还原矩阵如图 5 所示。



(a)点云 1 (a)Point cloud 1 (b)点云 2 (b)Point cloud 2

图 5 点云还原矩阵

Fig. 5 Restored matrices of point clouds

(2)假设  $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$  的维数一致,并满足关系:

$$f_1(x, y) = f_2(x - x_0, y - y_0). \quad (6)$$

则其 Fourier 变换关系为:

$$F_1(\mu, \nu) = F_2(\mu, \nu) \cdot e^{-j2\pi(\frac{\mu x_0}{M} + \frac{\nu y_0}{N})}, \quad (7)$$

其中  $F_1(\mu, \nu)$ 、 $F_2(\mu, \nu)$  分别为  $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$  的 Fourier 变换。那么求式(5)中的平移量可建立互功率谱<sup>[10]</sup>:

$$\frac{F_1(\mu, \nu) F_2^*(\mu, \nu)}{|F_1(\mu, \nu) F_2^*(\mu, \nu)|} = e^{-j2\pi(\frac{\mu x_0}{M} + \frac{\nu y_0}{N})}, \quad (8)$$

其中  $F_2^*$  表示  $F_2$  的复共轭。对式(8)两侧进行逆 Fourier 变换,可得到一个中心点不为零但其他位置为零的冲击函数。此函数的中心点为  $(x_0, y_0)$ ,其峰值反映  $f_1(x, y)$ 、 $f_2(x, y)$  的匹配程度,理想状态下峰值为 1。由图 5 可知,  $Z_1$ 、 $Z_2$  两矩阵差异较大,为满足频域中的匹配条件,以数值固定选取的方式在点云  $C_{1k}$ 、 $C_{2k}$  中选取共有的踏面直线点云数据即可,不要求严格相同,然后再次矩阵化,结果如图 6 所示。



(a)点云 1 (a)Point cloud 1 (b)点云 2 (b)Point cloud 2

图 6 相同特征点云矩阵

Fig. 6 Matrices of point clouds with same characteristics

由图 6 可以看出,点云矩阵不但存在平移而且存在旋转,为能进行平移先进行旋转,假设:

$$f_1(x, y) = f_2[x \cos \theta_0 + y \sin \theta_0, -x \sin \theta_0 + y \cos \theta_0]. \quad (9)$$

令  $f_{1p}(d, \theta)$ 、 $f_{1p}(d, \theta)$  分别为  $f_1(x, y)$ 、

$f_2(x, y)$  的极坐标变换,则有:

$$f_{1p}(d, \theta) = f_{1p}(d, \theta - \theta_0). \quad (10)$$

从式(10)中可以看出,  $f_{1p}(d, \theta)$ 、 $f_{1p}(d, \theta - \theta_0)$  是一种简单的加减关系,即角度旋转。对选好的点云矩阵进行极坐标转换,结果如图 7 所示。



(a)点云 1 (a)Point cloud 1 (b)点云 2 (b)Point cloud 2

图 7 点云矩阵数据的极坐标转换

Fig. 7 Polar coordinate conversion of point cloud data

根据式(9)、式(10)及 Fourier 变换的性质可得:

$$F_1(\mu, \nu) = F_2[(\mu \cos \theta_0 + \nu \sin \theta_0), (-\mu \sin \theta_0 + \nu \cos \theta_0)] e^{-j\varphi(\mu, \nu)} \\ \Rightarrow F_{1p}(\mu, \nu) = F_{2p}(\mu, \nu) e^{-2j\pi(\frac{\nu_0}{M})}, \quad (11)$$

其中:  $F_1$ 、 $F_2$  分别为  $f_1$ 、 $f_2$  的 Fourier 变换,  $F_{1p}$ 、 $F_{2p}$  分别为  $f_{1p}$ 、 $f_{1p}$  的 Fourier 变换。互功率谱有:

$$\frac{F_{1p}(\mu, \nu) F_{2p}^*(\mu, \nu)}{|F_{1p}(\mu, \nu) F_{2p}^*(\mu, \nu)|} = e^{-j2\pi(\frac{\nu_0}{M})}, \quad (12)$$

其中  $F_{2p}^*$  表示  $F_{2p}$  的复共轭,并令  $F^{-1}$  为式(12)的傅里叶逆变换。



图 8 同一特征放大的点云数据

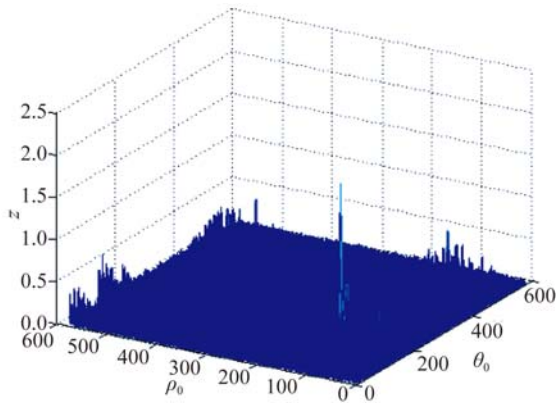
Fig. 8 Amplification of point cloud data with same characteristics

(3)受传感器精度的限制,同一特征点云数据也会存在差异,尤其在式(5)中的放大系数  $\rho$  取值较大时,数据会出现跳动,如图 8 所示。式(12)是理想情况下互功率谱的计算形式,而本文的点云矩阵则会受到均值接近于零的离散噪声的影响,用公式表示为:

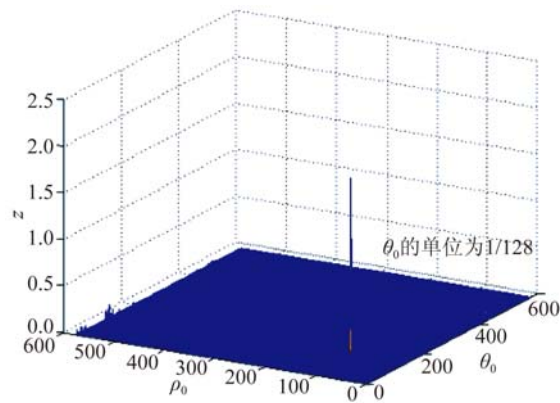
$$C_\eta(d, \theta) = C(d, \theta) + \eta(d, \theta), \quad (13)$$

其中:  $C_\eta$  为互功率谱式(12)的 Fourier 逆变换,  $C$  为无噪声理想状态下的 Fourier 逆变换,  $\eta$  为均值无限接近零的随机噪声。理想状态下,  $C$  为一个 Dirichlet 函数, 根据文献<sup>[10]</sup>可知:

$$C(d, \theta) = \frac{1}{MN} \frac{\sin(\pi(N\theta - \theta_0))}{\sin(\pi(N\theta - \theta_0)/N)} \cdot \frac{\sin(\pi(M \cdot d))}{\sin(\pi(M \cdot d)/M)}. \quad (14)$$



(a) Fourier 逆变换  
(a) Fourier inverse transform



(b) 辛格函数  
(b) Sinc function

图 9 不同变换方法获得的函数图像对比

Fig. 9 Function contrast between different transform methods

根据文献<sup>[11]</sup>, 对式(12)进行 Fourier 逆变换, 得到函数的各点信号型为:

$$q(I, J) = \begin{cases} A(I, J) + \eta(I, J), & \text{有相关的信号值} \\ \eta(I, J), & \text{不相关的信号值} \end{cases}, \quad (16)$$

其中:  $A(I, J)$  为反应旋转角度相关程度的信号,  $\eta(I, J)$  为随机噪声点产生的信号。

有角度相关的信号峰值功率为  $C_A = A^2$ , 噪声的平均功率为:

$$E_\eta = \frac{1}{MN} \sum_{I=1}^M \sum_{J=1}^N [\eta(I, J)]^2 = \sigma_\eta^2. \quad (17)$$

则互功率谱计算的关于旋转角度相关的信噪比为:

$$R_{\text{SNR}} = 10 \log \left( \frac{C_A}{\sigma_\eta^2} \right). \quad (18)$$

为方便计算, 将辛格函数标准值为 1 的峰值信号减去  $F^{-1}$  的峰值信号近似作为噪声信号, 得信噪比为 47.32 dB。从图像及信噪比来看, 噪声并没有影响旋转角度的判别, 求得  $\theta_0 = 0.334$ 。将

$$\tilde{C}(d, \theta) \approx \frac{\sin(\pi(N\theta - \theta_0))}{\pi(N\theta - \theta_0)} \cdot \frac{\sin(\pi(Md))}{\pi(Md)}. \quad (15)$$

式(14)非常接近于辛格函数, 以辛格函数式(15)近似代替式(14), 即用式(15)近似为式(12)无噪声的 Fourier 逆变换。

综上, 直接对式(12)进行 Fourier 逆变换得到的函数图像, 和以辛格函数代替的函数图像如图 9 所示。

点云按式(16)进行旋转得到:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta_0 & 1 & \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0 & 1 & \cos \theta_0 \end{pmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{jd} \\ y_{jd} \\ z_{jd} \end{bmatrix}. \quad (19)$$

将旋转得到点云进行显示, 如图 10 所示(侧视图)。

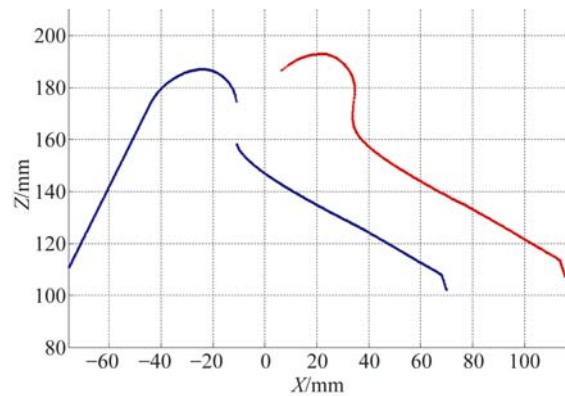


图 10 点云旋转后

Fig. 10 Point cloud after rotation

(4)同理按照步骤(2)可求出平移向量  $t^{[12]}$  为  $(-44.51, 0, -6.03)^T$ , 则有平移公式如下:

$$\begin{bmatrix} \cos \theta_0, 1, \sin \theta_0 \\ -\sin \theta_0, 1, \cos \theta_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_j \\ y_j \\ z_j \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}. \quad (20)$$

点云平移后如图 11 所示。

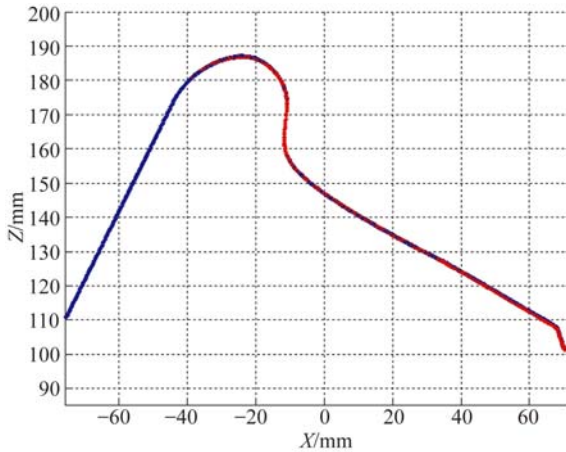


图 11 点云配准后的图像

Fig. 11 Point cloud after registration

### 3.2 直径测量标定

传感器数据采集由图 2 中摩擦轮的回转编码器触发,为保证车轮直径在 810~920 mm 内摩擦轮在车轮外侧 70 mm 宽的表面都有足够的摩擦力,摩擦轮中心平面与轮对中心的距离设置为 400 mm,用  $R$  表示。摩擦轮直径为 100 mm,用  $d$  表示,如图 12 所示。摩擦轮与轮轴回转中心的距离是固定不变的,所以摩擦轮旋转固定圈数即为轮对旋转一周。回转编码器每圈为 100 个脉冲,则有:

$$n = \frac{2\pi R}{\pi d} 100, \quad (21)$$

式中  $n$  为轮对旋转一周回转编码器产生的脉冲数据。

根据式(21)可知,轮对旋转一周对应回转编码器产生的脉冲数为 800。为避免轮对启动或停止时摩擦轮与轮对的相对滑动,影响数据的准确性,需使轮对旋转大于 1.2 圈,并取中间正好为轮对旋转 1 周,即在整个测量数据中取中间 800 个脉冲触发的测量数据<sup>[13]</sup>。为保证编码器在长期运转后的精度,采用文献[14]的方法进行修正补偿。

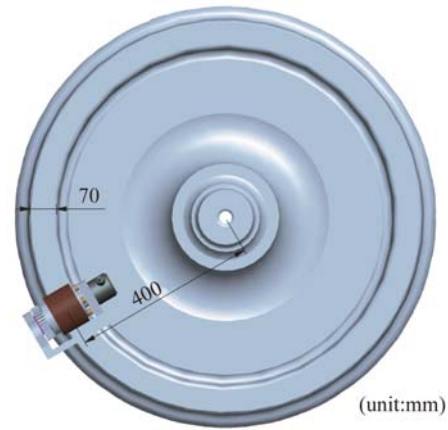


图 12 摩擦轮与轴心的固定距离

Fig. 12 Distance between axes of wheel-set and surge wheel

图 11 中的点云数据包括了车轮内侧基准面的数据,需将该数据提取出来并作为检测基准,点云轮廓线上一点  $p_w$  于前后相邻两点  $p_{w-10}, p_{w+10}$  组成向量:

$$\begin{cases} \mathbf{V}_1 = (x_{w-10} - x_w)g + (z_{w-10} - z_w)k \\ \mathbf{V}_2 = (x_w - x_{w+10})g + (z_w - z_{w+10})k \end{cases} \quad (22)$$

从每条点云轮廓线计算以上两向量的角度,当夹角大于某阈值时,该点已不属于基准面,循环该方法直到所有点云轮廓线搜索完毕。

对搜索出的点云数据进行主成分分析<sup>[15]</sup>,拟合成空间平面  $AX + BY + CZ = D$ 。定义车轮滚动圆直径在距车轮内侧面 70 mm 的车轮踏面上,根据拟合平面,提取距该拟合平面垂直距离最接近 70 mm 处的车轮踏面数据点,将该数据用坐标转换法使之呈圆周分布<sup>[16]</sup>。直角坐标系  $xyz$  与圆柱坐标系  $\rho\varphi z^p$  的对应关系为:

$$\begin{cases} z = \rho \cos \varphi \\ y = \rho \sin \varphi \\ x = z^p \end{cases} \quad (23)$$

根据式(20)有:

$$\rho = \frac{J + z}{\cos \varphi} = \frac{K + y}{\sin \varphi}, \quad (24)$$

式中  $J, K$  为比较算法标定系数。在圆柱坐标系中,根据整个轮廓线扫描条数可得出每两条轮廓线之间的夹角。根据标准轮对已检测出的直径 ( $d = 2\rho$ ),便可得到标定系数  $J, K$  的值。将该值保存到检测程序中,进行其他车轮直径的测量。根据得到的标定系数将轮廓扫描数据还原,结果如图 13 所示。

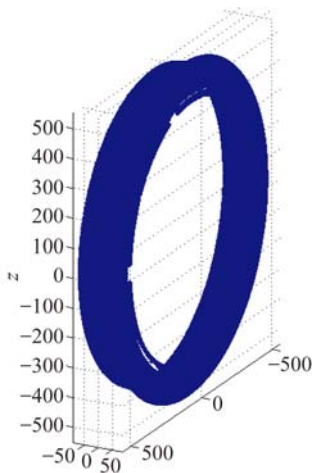


图 13 轮廓还原数据

Fig. 13 Restored data of wheel

## 4 尺寸计算

### 4.1 计算车轮径向跳动

除轮对直径外,还需对车轮径跳等尺寸进行检测,检测位置如图 14 所示。车轮径跳与车轮直径的测量位置相同,所以在直径测量标定过程中搜索出距空间基准平面 70 mm 的踏面测量数据点,即为车轮径跳数据点。

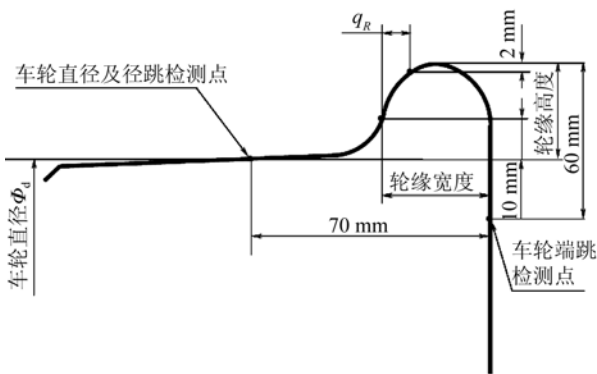


图 14 车轮检测参数

Fig. 14 Wheel parameters

径向跳动定义为同一界面内实际表面上各点到基准轴线间距离的最大变动量。在直角坐标系下,径向跳动  $\Delta i$  的计算公式为:

$$\Delta i = \max z_c - \min z_c, \quad (25)$$

式中  $z_c$  为在直角坐标系下已选出各直径点的  $z$  坐标。

在圆柱坐标系下,径向跳动  $\Delta i$  的计算公式为:

$$\Delta i = \max \rho_b - \min \rho_b, \quad (26)$$

式中  $\rho_b$  为在圆柱坐标系下已选出各直径点的  $\rho$  坐标,即半径值。式(25)在选取的数据中直接运算,式(26)则进行了坐标转换。为使检测程序运行时间较短,这里采用式(25)进行计算。

### 4.2 计算车轮端跳

车轮端跳检测点被定义在距轮缘最高点 60 mm 处的车轮内侧面。根据此要求先找出每条轮廓线中的最高点,即  $\max Z_i$ ,利用条件:  $\max Z_i - 60$  mm 选出内侧面距轮缘最高点 60 mm 的数据点。将选择出的数据点按式(24)运算可得车轮端跳为:

$$\max X - \min X. \quad (27)$$

## 5 实验验证

实验搭建的检测系统平台如图 10 所示。该实验系统中标准轮对经权威部门检测得到的数据视为标准数据。

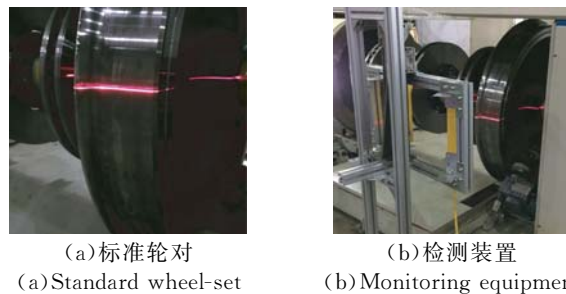
(a) 标准轮对  
(a) Standard wheel-set(b) 检测装置  
(b) Monitoring equipment

图 15 车轮对检测系统

Fig. 15 Detecting system of wheel-set

在测量实验中,将每组传感器在车轮踏面方向融合后,采用 1 : 69.39 减速机带动摩擦轮驱动轮对以 5 r/min 进行旋转,回转编码器每回转一周,传感器采集 100 条数据。轮对旋转大于一周,取中间 800 条数据作为车轮轮廓的检测数据,首次利用标准轮对标定时,标准轮对的车轮直径为 921.37 mm,得到的标定系数  $K$  为 348.26。利用得到的标定系数对标准车轮的车轮直径、车轮端跳和车轮径跳进行 6 次测量。测量数据如表 1 所示。

表 1 标准轮对的重复测量结果

Tab.1 Result of standard wheel-set in repeated measurements

序号	车轮直径/mm		车轮端跳/mm		车轮径跳/mm	
	检测系统 标准值	检测系统 标准值	检测系统 标准值	检测系统 标准值	检测系统 标准值	检测系统 标准值
1	921.39		0.13		0.09	
2	921.37		0.11		0.08	
3	921.41	921.37	0.13	≤0.07	0.07	≤0.06
4	921.34		0.09		0.08	
5	921.40		0.12		0.10	
6	921.33		0.09		0.10	
均值	921.372		0.115		0.087	

从表 1 可知,直径的测量误差 < ±0.05 mm,端跳的测量误差 ≤ ±0.06 mm,径跳的测量误差 ≤ ±0.04 mm。

除标准轮对外,还对另外 1 个轮对进行了 3 次测量,为了对比,对此轮对的车轮端跳进行了人工测量。对直径采用轮径尺测量,由于车轮径跳的测量位置有较为严格的规定,暂未进行人工测量。轮对 2 的检测数据如表 2 所示。

根据表 1 与表 2 可得,测量系统对车轮直径的重复测量精度 ≤ 0.07 mm;(重复测量精度表示系统检测结果的稳定程度,为多次测量值的最大值与最小值之差)端跳、径跳的重复测量精度 ≤ 0.04 mm。

参考文献:

[1] 王君可. 基于 CCD 成像技术的火车轮对检测系统 [D]. 大连:大连交通大学,2008.  
WANG J K. A Detection System of Train Wheel Based on CCD Imaging Technology [D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2008. (in Chinese)

[2] 刘畅. 列车轮对踏面几何参数检测技术研究 [D]. 长春:长春理工大学,2014.  
LIU CH. Research on Detection Technology of Geometric Parameters of Train Wheelset Tread [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

[3] 任宏伟,李声. 基于图像的轮对在线动态检测应用研究 [J]. 机车车辆工艺, 2004(5):29-31.  
REN H W, LI SH. Research on the application of online dynamic detection of wheelset based on image [J]. Locomotive & Rolling Stock Technology,

表 2 轮对 2 的重复测量结果

Tab.2 Result of second wheel-set in repeated measurements

序号		车轮直径/mm		车轮端跳/mm		车轮径跳/mm
		检测系统	手动	检测系统	手动	检测系统
		测量结果	测量值	测量结果	测量值	测量结果
1	左	916.33	916.36	0.12	0.05	0.09
	右	916.41	916.48	0.11	0.05	0.08
2	左	916.36	916.30	0.09	0.05	0.12
	右	916.40	916.42	0.14	0.06	0.08
3	左	916.36	916.38	0.10	0.05	0.13
	右	916.47	916.48	0.16	0.06	0.12

6 结 论

本文根据列车轮对高精度、高自动化的检测要求,提出了列车轮对非接触式静态测量方法,介绍了双目双线结构光测量系统的结构和工作原理,提出了点云数据还原至矩阵中并在在频域中配准的方法。利用回转编码器进行数据采集、主成分分析拟合平面、直角坐标与圆柱坐标转换和相对值比较算法,从而完成了对车轮直径方向的标定。实验结果证明:云频域配准的双目双线轮对检测方法对车轮直径的测量尺寸误差 ≤ ±0.05 mm;车轮端跳的测量误差 ≤ ±0.06 mm;车轮径跳的测量误差 ≤ 0.04 mm,基本满足轮对的检测要求。

2004(5):29-31. (in Chinese)

[4] 冯其波,陈士谦,崔建英,等. 轮对几何参数动态测量系统 [J]. 中国铁道科学, 2008, 29(5):138-144.  
FENG Q B, CHEN SH Q, CHUI J Y, et al.. A system for dynamically measuring geometric parameters of wheelset [J]. China Railway Science, 2008, 29(5):138-144. (in Chinese)

[5] 薛琴,陈玮. 双 CCD 轮对图像测量系统研究 [J]. 微计算机信息, 2007, 23(19):164-166, 163.  
XUE Q, CHEN W. Research on the image measurement system of wheel set with double CCD [J]. Microcomputer Information, 2007, 23 (19): 164-166, 163. (in Chinese)

[6] 李学雷. 轮对参数全自动测量系统 [D]. 成都:西南交通大学, 2005.  
LI X L. An automatic Diagram for the Parameter of the Wheelset [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong

- University, 2005. (in Chinese)
- [7] XING Z Y, CHEN Y J, WANG X H, *et al.*. On-line detection system for wheel-set size of rail vehicle based on 2D laser [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2015, 127(4):1695-1702.
- [8] 高岩, 邵双运, 冯其波. 一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7):0708005.
- GAO Y, SHAO SH Y, FENG Q B. A novel method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7):0708005. (in Chinese)
- [9] 毕超, 房建国, 刘京亮, 等. 基于球形目标的激光位移传感器光束方向标定 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(3):678-685.
- BI CH, FANG J G, LIU J L, *et al.*. Calibration of beam direction of laser displacement sensor based on spherical target [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3):678-685. (in Chinese)
- [10] FOROOSH H, ZERUBIA J B, BERTHOD M. Extension of phase correlation to subpixel registration [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(3):188-200.
- [11] 王学伟, 王春歆, 张玉叶. 点目标图像信噪比计算方法 [J]. *电光与控制*, 2010, 17(1):18-21.
- WANG X W, WANG CH X, ZHANG Y Y. Research on SNR of point target image [J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(1):18-21. (in Chinese)
- [12] 孙辉, 李志强, 孙丽娜, 等. 一种空域和频域相结合的运动图像亚像素配准技术 [J]. *中国光学*, 2011, 4(2):154-160.
- SUN H, LI ZH Q, SUN L N, *et al.*. Sub-pixel registration of special and frequency domains for video sequences [J]. *Chin. Opt.*, 2011, 4(2):154-160. (in Chinese)
- [13] 李超, 刘树昌, 刘鹏, 等. 外触发方式下相机同步抓拍系统研究 [J]. *测试技术学报*, 2014(4):339-344.
- LI CH, LIU SH CH, LIU P, *et al.*. Research of camera synchronous capture system under external trigger mode [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2014(4):339-344. (in Chinese)
- [14] 冯英翘, 万秋华, 王树浩. 小型光电编码器长周期误差的修正 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(9):2491-2497.
- FENG Y Q, WANG Q H, WANG SH J. Correction of long-period error for small photoelectric encoders [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(9):2491-2497. (in Chinese)
- [15] 浮丹丹, 周绍光, 徐洋, 等. 基于主成分分析的点云平面拟合技术研究 [J]. *测绘工程*, 2014, 23(4):20-23.
- FU D D, ZHOU SH G, XU Y, *et al.*. Point cloud fitting technology based on principal component analysis [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2014, 23(4):20-23. (in Chinese)
- [16] 田晓, 李全海. 基于坐标转换的三维空间圆柱面拟合 [J]. *工程勘察*, 2014, 42(12):79-82.
- TIAN X, LI Q H. Fitting of spatial cylindrical surface based on 3D coordinate transformation [J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2014, 42(12):79-82. (in Chinese)

#### 作者简介:



王 华(1963—),男,吉林长春人,教授,硕士生导师,1985年、1990年于吉林工业大学分别获得学士、硕士学位,2009年于吉林大学获得博士学位,主要从事智能检测、机器视觉等方面的研究。E-mail: wh-changchun@tom.com; 1336528482@qq.com

#### 通讯作者:



邢春齐(1988—),男,河北张家口人,硕士研究生,主要从事机器视觉方面的研究。E-mail:524719665@qq.com