

# 基于激光基准的轨道平顺度检测仪

王孝贤<sup>1</sup>, 郭健<sup>1</sup>, 王会峰<sup>2</sup>, 王晓艳<sup>2</sup>, 穆柯楠<sup>2</sup>, 苟旭辉<sup>2\*</sup>, 倪敬雪<sup>2</sup>

<sup>1</sup>渭南市公路工程建设处, 陕西 渭南 714000;

<sup>2</sup>长安大学电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064

**摘要** 提出了一种基于激光基准的轨道平顺度检测仪,其可以对轨道的高低不平顺度、轨向不平顺度和曲率进行检测。轨道检测仪以激光为基准,利用水平仪和远程聚焦系统使激光垂直入射到光电靶面上,通过数据采集单元采集数据并将数据传送给数据处理单元,得到轨道的不平顺参数,并在人机交互界面上显示。实验结果表明,该轨道检测仪可靠性高,测量精度高,检测距离可达 200 m,测量精度为 1 mm。

**关键词** 测量; 高低不平顺; 轨向不平顺; 曲率; 光电靶; 激光基准

中图分类号 TP23

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.101202

## Railway Track Smoothness Detector Based on Laser Reference

Wang Xiaoxian<sup>1</sup>, Guo Jian<sup>1</sup>, Wang Huifeng<sup>2</sup>, Wang Xiaoyan<sup>2</sup>, Mu Kenan<sup>2</sup>,

Gou Xuhui<sup>2\*</sup>, Ni Jingxue<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Highway Project Construction Department of Weinan, Weinan, Shaanxi 714000, China;

<sup>2</sup>School of Electronic & Control Engineering, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China

**Abstract** A railway track smoothness detector based on laser reference is proposed, which can detect height irregularity, alignment irregularity and curvature. The detector uses laser as reference and uses gradienter and remote focusing system to make laser irradiate the photoelectric target vertically. The data is collected through the data acquisition unit and is transmitted to the data processing unit. The track irregularity parameters are obtained and displayed on the human-computer interface. The experimental results show that the proposed detector has high reliability and high accuracy. The detection distance can reach 200 m and the measurement accuracy is 1 mm.

**Key words** measurement; height irregularity; alignment irregularity; curvature; photoelectric target; laser reference

**OCIS codes** 120.1880; 100.3008

## 1 引言

列车行驶过程中会对轨道产生随机性和重复性的载荷,这将不可避免地造成轨道几何形位的不断变化。这种变化称之为轨道不平顺,会影响列车行驶的舒适性和安全性<sup>[1]</sup>,严重时还会导致列车脱轨,造成严重的安全事故。并且随着列车运量和速度的不断提高,对轨道的损坏也日益严重,轨道的不平顺度也随之提高。铁路部门需要定期对轨道不平顺度进行检测,修复轨道存在的

安全隐患。加强铁路轨道的检测力度,确保安全、高速、舒适的铁路运输环境,已经成为铁路工作中的一项重要基础工作<sup>[2]</sup>。

近年来,国内外对轨道不平顺度的检测主要依靠轨道检测车<sup>[3]</sup>。轨道检查车(简称轨检车)是一种大型动态监测设备,在使用轨检车时会影响列车的正常运行,并且轨检车的运行成本较高。针对轨检车的缺点,石家庄铁道大学的张兆夕等<sup>[4]</sup>提出了一种基于反向传播(BP)神经网络的轨道不平顺度检测系统,并结合 Android 设备对轨道平顺度状态进

收稿日期: 2018-09-05; 修回日期: 2018-10-24; 录用日期: 2018-12-20

基金项目: 中国博士后科学基金(2015M580805)、陕西省交通运输厅科技项目(17-16K)

\* E-mail: 442306601@qq.com

行在线识别;王俊峰等<sup>[5]</sup>研究了一种结合涡流位移传感器、LabVIEW 和 PXI (PCI eXtensions for Instrumentation) 设备的实时检测系统;Tsunashima 等<sup>[6]</sup>根据运行机车的倾斜角来测量轨道的不平顺度,提出一种利用全球定位系统(GPS)对故障位置进行定位的方法。

本文研究了一种便携、易安装、高精度的激光基准轨道平顺度检测仪,该仪器能够大幅度提高轨道检测效率和精度,为铁路的检测维修工作提供不平顺参数,减少工人的劳动强度,提高维修效率,保障行车安全。

## 2 轨道参数检测原理

轨道不平顺<sup>[1]</sup>是指两根钢轨的几何形状、尺寸和位置相较于设计标准的偏差,如图 1 所示。轨道不平顺相当于对列车增加了一种外部激扰,这是引起列车振动的主要因素<sup>[7]</sup>。按照对列车激扰方向的不同,可以将轨道不平顺分为高低不平顺、轨向不平

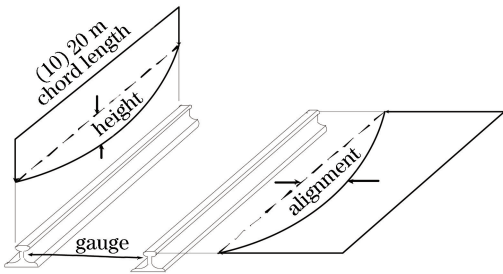


图 1 不平顺参数

Fig. 1 Irregularity parameters

顺、水平不平顺、扭曲不平顺等几类。

所研究的激光基准轨道平顺度检测仪主要针对轨道的高低不平顺度、轨向不平顺度和曲率进行检测,并对需要调整的轨道进行定位。

### 2.1 高低不平顺检测

高低不平顺<sup>[1]</sup>参数描述的是轨道中心线相对于理想中心线垂直方向的几何形变。轨道高低不平顺会造成轮轨力垂直方向的增减载,引起列车沉浮、点头,严重时可导致列车脱轨,从而造成严重的后果。

高低不平顺参数检测原理图如图 2 所示,轨道检测仪的发射端通过支架固定在铁路轨道的一端,调节水平仪和远程聚焦系统,使激光发射的光束能够垂直入射到接收端的靶面上,并且在靶面上清晰成像。然后通过靶面后的 CMOS 相机对靶面上的激光光斑采集处理得到光斑中心坐标。轨道检测仪的接收端安装在铁路轨道的待测位置上,通过检测辅助设备可以使接收端沿着铁轨方向移动。

进行高低不平顺参数测量时,取测量点 1 为标准参考点,检测仪的发射端位置保持不动,激光在测量点 1 处的靶面上成像并通过数据采集和处理系统得到激光光斑中心点与靶面零点  $o$  的距离  $y_1$ ,即标准距离;将接收端移动一定的弦长  $L$  到测量点 2 处,采集并处理数据,得到激光光斑中心点与光电靶面零点的距离  $y_2$ <sup>[8]</sup>。则测量点 2 相对于测量点 1 的高低不平顺参数  $y$  的计算公式为

$$y = y_1 - y_2 \quad (1)$$

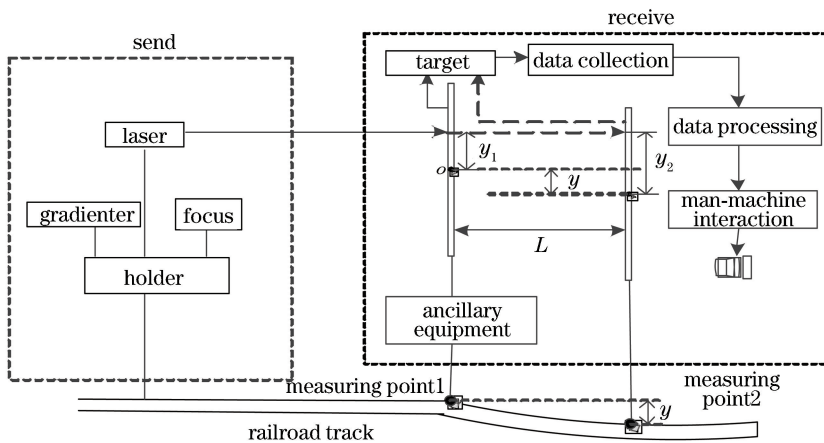


图 2 高低不平顺检测原理图(侧视图)

Fig. 2 Principle diagram of height irregularity detection (side view)

### 2.2 轨向不平顺检测

轨向不平顺<sup>[1]</sup>参数描述的是轨道中心线相对于

理想中心线轨向的几何形变。轨道轨向不平顺会造成轮轨力的横向力增大,引起列车侧摆、摇头,严重

时会造成列车爬轨脱轨,危及行车安全<sup>[9]</sup>。轨向不平顺检测原理图如图3所示,取测量点1为标准参考点,检测仪的发射端位置保持不动,激光在测量点1处的靶面上成像并通过数据采集和处理系统得到激光光斑中心点与靶面零点  $o_1$  的距离  $h_1$ ,即标准距离。将接收端移动一定的弦长  $L$  到测量点2处,得到激光光斑中心点与光电靶面零点  $o_2$  的距离  $h_2$ 。则测量点处的轨向不平顺参数  $h$  的计算公式为

$$h = h_1 - h_2. \quad (2)$$

### 2.3 曲率检测

曲率<sup>[10]</sup>指的是曲线上某个点的切线方向角对弧长的转动率,表明了一段曲线在某一点处的弯曲程度。如图4所示,在  $xoy$  坐标系中,曲线  $y =$

$f(x)$ 在点  $M$  处的曲率为  $K$ ,在点  $M$  处做与曲线凹向一致的密切圆,该圆称为曲线在点  $M$  处的曲率圆,其圆心  $d$  称为曲率中心,其半径  $\rho$  称为曲率半径<sup>[11]</sup>。曲率与曲率半径的关系为

$$\rho = \frac{1}{K}. \quad (3)$$

因此,只需求得曲线上某点密切圆的半径即可获知曲线上该点的曲率。

轨道曲率的检测原理如图5所示,在一段弦长为  $L$ 、曲率半径为  $\rho$  的弯曲轨道上,轨向方向上测量点1和测量点2相对于靶面零点的偏离量分别为  $l_1$  和  $l_2$ ,则测量点2相对于测量点1的偏离量  $l$  表示为

$$l = l_1 - l_2. \quad (4)$$

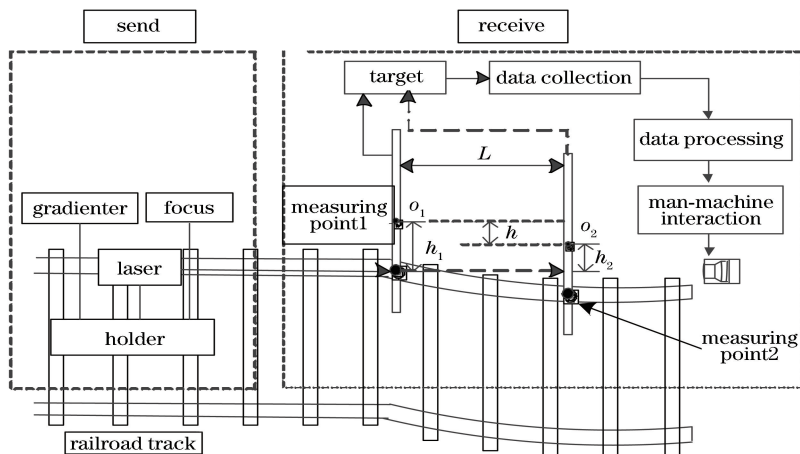


图3 轨向不平顺检测原理图(俯视图)

Fig. 3 Principle diagram of alignment irregularity detection (top view)

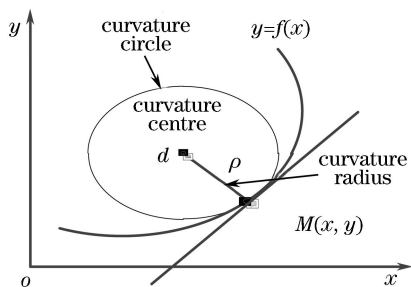


图4 曲率与曲率半径

Fig. 4 Curvature and curvature radius

根据图形的几何关系可得:

$$\rho^2 = (\rho - l)^2 + L^2, \quad (5)$$

则曲率半径为

$$\rho = \frac{L^2 + l^2}{2l}, \quad (6)$$

从而得到铁路轨道的曲率为

$$K = \frac{1}{\rho} = \frac{2l}{L^2 + l^2}. \quad (7)$$

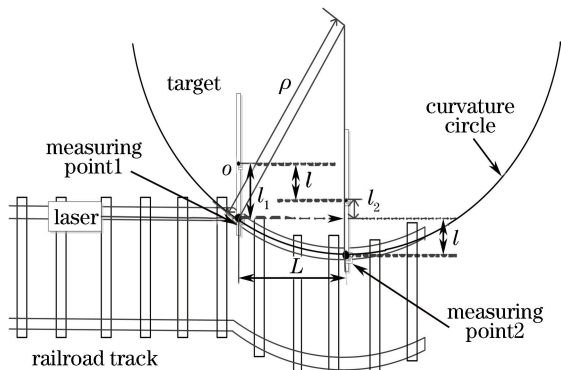


图5 曲率检测原理图(俯视图)

Fig. 5 Principle diagram of curvature detection (top view)

### 2.4 故障定位

为了在测量完成后调轨员能够迅速定位出需要

调整的轨道,在接收端的检测辅助设备的传动轴上安装编码器,传动轴每转动一圈,编码器产生  $n_0$  次脉冲。通过编码器实时测量得到产生的脉冲数  $n$ ,并根据转轮的半径  $R$  计算出接收端移动的距离  $s$ 。轨检仪每次测量前,首先输入起始点的里程值  $m_0$ ,然后通过编码器计算出接收端移动的距离  $s$ ,进一步得出当前接收端所处的里程值  $m$ ,计算公式为

$$m = m_0 + s = m_0 + 2n\pi R/n_0。 \quad (8)$$

### 2.5 激光光斑中心定位

激光光斑中心定位的精确度直接影响测量误差,本检测仪接收端的 CMOS 摄像头在得到激光光斑图像后首先将其经过图像金字塔算法<sup>[12]</sup>处理,定位出光斑图像的感兴趣区域(ROI),然后对 ROI 区域进行预处理,最后用灰度重心法求出光斑中心坐标。

本检测仪采用高斯金字塔算法<sup>[13]</sup>。采用高斯金字塔算法可以对图像缩小,加快对光斑中心定位的速度。假设图像金字塔的第  $n$  层表示为  $f_n$ ,  $\varphi$  表示尺度变化因子,则第  $n+1$  层的图像  $f_{n+1}$  可表示为

$$f_{n+1} = f_n \varphi。 \quad (9)$$

高斯金字塔算法处理图像的过程就是将第  $n$  层图像高斯模糊后进行亚采样操作。首先,对图像做高斯内核卷积运算,然后舍弃图像的偶数行和偶数列,获得第  $n+1$  层分辨率降低的图像,则第  $n+1$  层图像只有第  $n$  层图像的  $1/4$ ,同理可知,第  $n+2$  层图像只有第  $n$  层图像的  $1/16$ 。计算公式为

$$G_{n+1}(i, j) = \sum_{m=-2n}^2 \sum_{n=-2n}^2 W(m, n) G_n(2i + m, 2j + n), \quad (10)$$

式中:  $i, j$  分别表示图像的行、列数;  $G_{n+1}(i, j)$  和  $G_n(2i + m, 2j + n)$  分别表示第  $n+1$  层和第  $n$  层图像;  $W(m, n)$  为高斯卷积内核。图 6 为亚采样原理,对高斯卷积后的模糊图像进行亚采样,去掉偶数行和偶数列,将图像的尺寸缩小为原来的  $1/4$ ,经过多次处理可获得更多尺寸的金字塔图像。

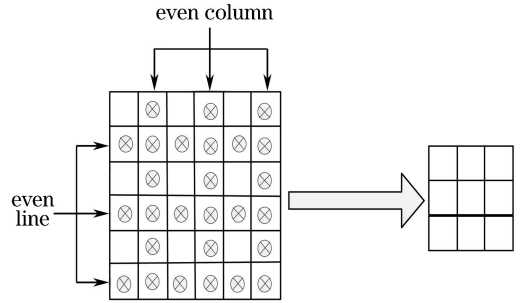


图 6 亚采样原理

Fig. 6 Principle of subsampling

### 3 轨道参数检测系统硬件设计

轨道平顺度检测仪硬件结构如图 7 所示,分为发射端和接收端两部分。检测仪的发射端主要由激光器、水平仪、远程聚焦系统和安装支架组成。接收端主要由检测辅助设备、靶面、CMOS 相机、数据采集系统、数据处理系统和人机交互界面组成<sup>[14]</sup>。

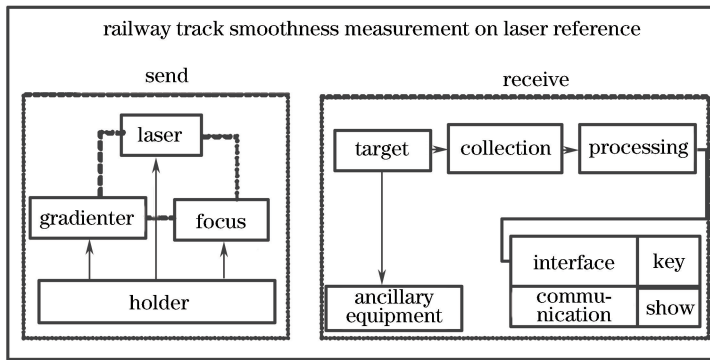


图 7 硬件系统结构

Fig. 7 Structural diagram of hardware system

### 4 轨道参数检测系统软件设计

控制系统的软件主要包括高低不平顺测量模块、轨向不平顺测量模块、曲率测量模块、零点设置模块和人机交互模块,如图 8 所示。

用户可以通过人机交互界面上的 3 个按键:高

低不平顺度检测按键(Key 1)、轨向不平顺度检测按键(Key 2)和曲率检测按键(Key 3)来切换不同的测量模式,并观察测量结果。程序中的零点设置模块可以根据用户的需要进行自由设置。主程序流程图如图 9 所示。

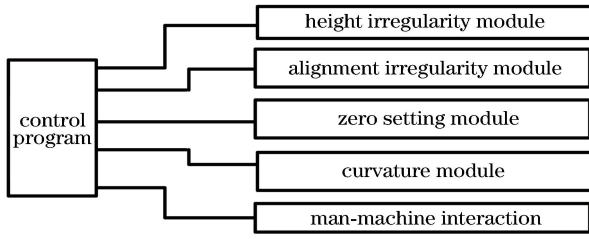


图 8 轨道检测仪的软件结构

Fig. 8 Structural diagram of software system of track detector

### 5 系统测试及性能检验

用瑞士奥特迈斯轨道检测仪和所研究的检测仪对同一段铁轨的高低不平顺参数和轨向不平顺参数进行检测。以奥特迈斯轨道检测仪测量出的数据为标准数据,所研究的检测仪测出的数据为测量数据。在距离发射端190~200 m 和220~230 m 范围内各取 20 个采样点进行测量,详细检测数据如表 1、表 2 所示。

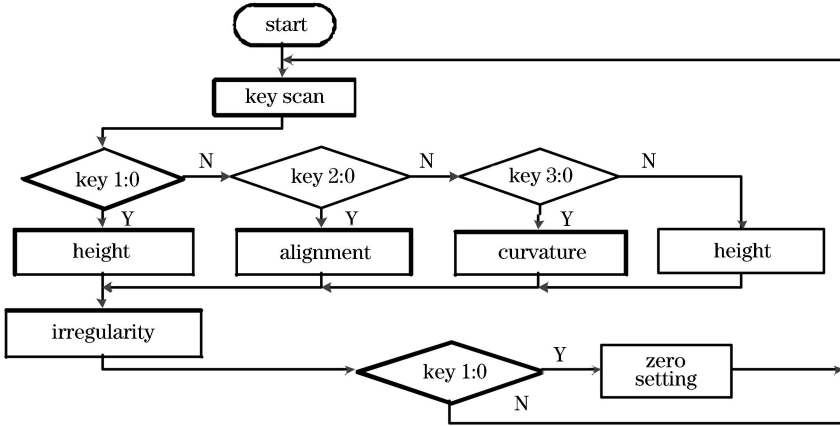


图 9 软件流程图

Fig. 9 Flow chart of software

表 1 190~200 m 范围内测量数据

Table 1 Data measured in range from 190 m to 200 m

Chord length /m	Standard height irregularity /mm	Measured height irregularity /mm	Standard alignment irregularity /mm	Measured alignment irregularity /mm
190.0	1.1	1.3	0.2	0.5
190.5	2.4	2.3	1.3	1.6
191.0	0.3	0.6	2.4	1.9
191.5	2.2	2.2	3.1	3.0
192.0	2.3	1.9	0.3	0.4
192.5	0.9	0.8	1.5	1.9
193.0	1.5	1.6	2.4	2.6
193.5	1.2	1.2	1.1	1.5
194.0	2.0	2.3	2.1	1.6
194.5	2.4	2.8	1.9	1.9
195.0	1.6	1.8	0.9	1.4
195.5	1.7	1.5	1.3	1.4
196.0	2.6	2.7	0.6	0.3
196.5	2.3	1.9	2.8	3.0
197.0	2.1	1.9	1.6	1.6
197.5	0.3	1.1	1.9	2.5
198.0	3.1	2.5	0.3	0.3
198.5	1.1	1.8	2.7	2.4
199.0	2.4	1.7	2.4	2.7
199.5	0.8	1.9	1.3	2.2

表 2 220~230 m 范围内测量数据

Table 2 Data measured in range from 220 m to 230 m

Chord length /m	Standard height	Measured height	Standard alignment	Measured alignment
	irregularity /mm	irregularity /mm	irregularity /mm	irregularity /mm
220.0	2.3	3.3	1.2	0.5
220.5	1.3	2.5	0.3	0.2
221.0	2.3	0.4	2.1	2.3
221.5	0.9	1.2	1.3	3.2
222.0	2.4	1.9	2.7	0.3
222.5	0.6	0.8	1.5	1.9
223.0	2.3	1.6	0.4	0.6
223.5	0.8	1.2	0.0	1.5
224.0	1.3	4.3	0.9	1.6
224.5	0.5	3.6	1.9	4.6
225.0	0.8	1.8	1.9	1.6
225.5	2.7	1.5	2.9	0.5
226.0	1.0	2.7	3.1	5.9
226.5	1.0	2.5	2.4	0.9
227.0	1.3	1.9	0.7	1.6
227.5	1.3	1.9	0.7	0.9
228.0	2.2	2.5	1.8	0.3
228.5	2.6	2.9	1.3	3.5
229.0	2.0	1.7	0.4	0.0
229.5	0.8	3.4	1.6	5.4

对比测量结果可得,当弦长在 190~200 m 范围时,高低不平顺参数的测量误差为 0~0.7 mm,轨向不平顺度的测量误差为 0.1~0.9 mm。当弦长在 220~230 m 范围时,高低不平顺参数的测量误差为 0.2~3.1 mm,轨向不平顺度的测量误差为 0.1~3.8 mm。误差主要来自其他强光对激光的干扰和对激光光斑中心定位产生的误差。根据实验结果对比可以看出:接收端距离发射端越远,测量的误差越大。所以此检测仪的最大测量弦长取 200 m 为宜。

## 6 结 论

激光基准轨道参数检测仪使用激光作为轨道检测仪的基准光源,激光光源在光电靶面上成像,通过数据采集和处理系统得到轨道的不平顺参数,并且通过人机交互界面实时显示轨道不平顺参数。通过现场实验检测可以得出,轨道检测仪的测量距离可达到 200 m,测量精度为 1 mm。本检测仪实时性强、可靠性高、精度高、硬件结构简单、便携、易安装,并且具有良好的人机交互界面,方便用户操作,能够大幅度提高铁路轨道日常检测维修工作的效率。

## 参 考 文 献

[1] Zhang G M, Luo L. Vehicle-track-bridge system

dynamic analysis model and track irregularities control on quasi & high-speed railway [J]. China Railway Science, 2001, 22(4): 136-138.

张格明, 罗林. 中高速条件下车线桥动力分析模型与轨道不平顺影响 [J]. 中国铁道科学, 2001, 22(4): 136-138.

[2] Gia K N, Ruigómez J M G, Castillo F G. Influence of rail track properties on vehicle-track responses [J]. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Transport, 2015, 168(6): 499-509.

[3] Liu T, Ren S W, Xu G Y, *et al.* Upgrade of gauge-alignment system of type GJ-4 track inspection car [J]. China Railway Science, 2006, 27(6): 137-140.  
刘铁, 任盛伟, 许贵阳, 等. GJ-4 型轨检车轨距-轨向检测系统改造 [J]. 中国铁道科学, 2006, 27(6): 137-140.

[4] Zhang Z X, Wang Z W, Zhou X F, *et al.* Track ride detection system based on BP neural network [J]. Electronic Technology & Software Engineering, 2018 (13): 168-169.

张兆夕, 王子伟, 周晓枫, 等. 基于 BP 神经网络的轨道不平顺度检测系统 [J]. 电子技术与软件工程, 2018(13): 168-169.

[5] Wang J F, Song W A. Design of rail wear detection system based on LabVIEW [J]. Microcomputer

- Information, 2007, 23(22): 156-158.
- 王俊峰, 宋文爱. 基于虚拟仪器的钢轨磨耗检测系统设计[J]. 微计算机信息, 2007, 23(22): 156-158.
- [6] Tsunashima H, Kojima T, Marumo Y, *et al.* Condition monitoring of railway track and driver using in-service vehicle [J]. Journal of Mechanical Systems for Transportation & Logistics, 2010, 3(1): 154-165.
- [7] Kang Xiong, Liu Xiubo, Li Hongyan, *et al.* PSD of ballastless track irregularities of high-speed railway [J]. Scientia Sinica Technologica, 2014, 44(7): 687-696.
- 康熊, 刘秀波, 李红艳, 等. 高速铁路无砟轨道不平顺谱[J]. 中国科学: 技术科学, 2014, 44(7): 687-696.
- [8] Zhao L. Research on improving measurement accuracy and signal to noise ratio of laser range finder [D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2010.
- 赵陆. 提高激光测距仪测量精度与信噪比的研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2010.
- [9] Wang K Y, Zhai W M, Liu J X, *et al.* Effect of rail irregularity wavelength on lateral running comfort of speed-raised train [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2007, 7(1): 1-5.
- 王开云, 翟婉明, 刘建新, 等. 线路不平顺波长对提速列车横向舒适性影响[J]. 交通运输工程学报, 2007, 7(1): 1-5.
- [10] Berggren E. Railway track stiffness: dynamic measurements and evaluation for efficient maintenance [D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2009.
- [11] Bian X C, Jiang H G, Chang C, *et al.* Track and ground vibrations generated by high-speed train running on ballastless railway with excitation of vertical track irregularities [J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 76: 29-43.
- [12] Li Y N, Zhao Y, Lin C Y, *et al.* Depth information extraction with pyramid Lucas-Kanade optical flow method based on image segmentation [J]. Journal of the China Railway Society, 2015, 37(1): 63-68.
- 李亚楠, 赵耀, 林春雨, 等. 基于图像分割的金字塔 Lucas-Kanade 光流法提取深度信息 [J]. 铁道学报, 2015, 37(1): 63-68.
- [13] Li Y C, Fan Y C, Du Y H, *et al.* Novel laser active image-denoising method [J]. Laser & Infrared, 2011, 41(9): 1036-1040.
- 李迎春, 范有臣, 杜永红, 等. 激光主动成像图像降噪方法 [J]. 激光与红外, 2011, 41(9): 1036-1040.
- [14] Hong S M. Study on the measurement method of track inspection car [D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2015.
- 洪思敏. 轨道检测小车测量方法的研究 [D]. 广州: 广东工业大学, 2015.