DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.06.007　　文章编号：1000-128X(2023)06-0056-07

基于旋转激光传感的多轨纵向位移在线监测方法

颜　荣[1]，伍剑波[1]，王　杰[1]，荆学喜[2]，丁玉柱[2]，康　轩[2]

（1.四川大学 机械工程学院，四川 成都　610065；
2.中国铁路兰州局集团有限公司 嘉峪关工务段，甘肃 嘉峪关　735103）

摘　要：钢轨纵向位移变化引起的断轨和胀轨会严重影响列车行驶安全。针对钢轨位移检测高精度、非接触和多轨测量的需求，文章提出一种基于旋转激光位移传感的多轨纵向位移在线监测方法，利用固定在钢轨上的角度标板将钢轨纵向位移转换为标板横向位移，然后利用旋转激光传感器同时采集多根钢轨标板横向位移，在此基础上提出基于滑动窗口阈值的凹槽特征识别方法，实现标板横向位移的测量准确性与稳定性。最后，将开发的钢轨位移监测系统部署在甘肃省嘉峪关市兰新线上行K730+000处进行长期测试。试验结果表明，新方法可实现多轨纵向位移的长期稳定在线监测与预警。

关键词：多轨纵向位移；在线监测；激光传感；标板特征识别；高速铁路

中图分类号：U213.2　　**文献标识码：**A

Online monitoring method for longitudinal displacement of multiple rails based on rotary laser sensing

YAN Rong[1], WU Jianbo[1], WANG Jie[1], JIN Xuexi[2], DING Yuzhu[2], KANG Xuan[2]

(1. College of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;
2. Jiayuguan Maintenance Section of China Railway Lanzhou Group Co., Ltd., Jiayuguan, Gansu 735103, China)

Abstract: Rail breakage and expansion resulting from changes in longitudinal displacement of the steel rail pose a significant threat to train safety. To address the need for high-precision, non-contact and multi-rail displacement detection, an online monitoring method for multi-rail longitudinal displacement based on rotary laser sensing was proposed in this paper. Angular gauge plates fixed on rails were used to convert the longitudinal displacement of rails into lateral displacement of gauge plates, and the lateral displacement of rail gauge plates were then captured by the rotary laser sensor. On this basis, a groove feature recognition method utilizing a sliding window threshold was proposed to ensure accurate and stable measurement of the lateral displacement of gauge plates. Finally, the developed rail displacement monitoring system was deployed for long-term testing at K730+000 on the Lanzhou-Urumqi railway in Jiayuguan city, Gansu province. The test results show that the proposed method could ensure long-term and reliable online monitoring and early warning of longitudinal displacement for multiple rails.

Keywords: multi-rail longitudinal displacement; online monitoring; laser sensing; gauge plate feature recognition; high-speed railway

---

基金项目：国家自然科学基金项目（51505308）
通信作者：伍剑波（1986—），男，教授，博士研究生导师，研究方向为结构健康监测；E-mail: wujianbo@scu.edu.cn
引用格式：颜荣, 伍剑波, 王杰, 等. 基于旋转激光传感的多轨纵向位移在线监测方法[J]. 机车电传动, 2023(6): 56-62.
Citation: YAN Rong, WU Jianbo, WANG Jie, et al. Online monitoring method for longitudinal displacement of multiple rails based on rotary laser sensing[J]. Electric drive for locomotives,2023(6): 56-62.

0　引言

我国铁路经过长期高速发展，总里程已超过 14 万 km，铁路运输已经成为我国最重要的交通运输方式和公共出行方式之一。为减少轨道维护成本，提高列车运行速度和平稳度，增强铁路运输和出行的经济效益，无缝线路技术逐渐普及。无缝线路长度可达数百公里，与其下部复杂结构共同作用，应对热胀冷缩，列车的运行稳定性和运行速度得到了极大的提升[1-2]。然而，由于无缝线路不存在轨缝，当环境温度变化时，钢轨热胀冷缩会导致钢轨变形；另一方面，上下坡路段列车加减速会导致钢轨受力不均，产生无缝钢轨爬行现象。因此，开展钢轨纵向位移在线监测，对消除钢轨断轨和胀轨潜在风险，实现列车运行安全具有重大意义。

钢轨位移监测主要难点主要包括：①监测精度要求高，对同一监测点误差不大于 3 mm；②不能干扰列车运行，即传感器安装方便、故障率低、钢轨端尽量不要供电；③多轨同时测量，高速铁路双向多根轨道同时测量，以降低成本。目前，钢轨位移测量主要通过定期进行人工巡检完成，但存在检测精度低、成本高等问题，尤其是无法监控巡检间隔期钢轨位移变化的规律。

为此，近年来相关研究团队开展了钢轨位移在线监测方法研究。文献[3]提出了一种基于 3D 移动测量系统点云数据的钢轨信息自动提取方法，为铁路基础设施智能化管理运维提供技术支撑。文献[4]研发、设计了数字影像式钢轨位移观测系统，实现了对轨道纵向位移等参数的实时监测。文献[5]设计了基于图像处理的钢轨纵向位移检测系统的总体方案，开发了图像采集方案及其相关机械结构，搭建了模拟试验平台，并在试验平台和真实钢轨上进行了测试。文献[6]提出一种基于机器视觉与光学成像原理的钢轨爬行监测方法。文献[7]介绍了采用光学设备和磁式设备对钢轨纵向位移进行长期监测。文献[8]提出了一种基于现场可编程逻辑门阵列（FPGA）和双目视觉的滑坡位移监测系统，通过双目相机采集待测坡道的原始图像，再利用 FPGA 可以并行运算的特性，实现了在室内模拟场景中测量滑坡表面位移。文献[9]提出了一种图像处理的钢轨纵向位移检测系统的实现算法，讨论了对采样数据进行预处理、二值化、Canny 边缘检测、纵向位移计算等算法的实现。文献[10]基于监控影像和数字图像处理技术，提出了一种表征结构位置特征点位移变化的方法，可以实现被检测物体的横向和纵向位移的检测。文献[11]提出一种基于物联网 5G 数据传输的接触网补偿装置在线监测方法与系统。然而，机器视觉方法受光线影响大，测量精度低，无法实现多轨测量。文献[12]研究了磁致伸缩位移传感器测量原理，设计了由磁致伸缩位移传感器和钢轨夹组成的钢轨位移测量单元，实现了位移量查询功能，以及胀轨、断轨预警功能。该方法需要将传感器安装在钢轨上，需要长期供电，大量部署后的维护保养工作会影响铁路运行。文献[13]基于相位法激光测距原理设计了楔形标靶，建立了一套钢轨位移纵向位移监测装置。该研究仅针对单一钢轨进行测量，成本高，无法满足多轨测量需求。综上所述，目前的钢轨状态监测研究主要集中在利用机器视觉方法对单一钢轨进行位移监测，机器视觉受光线影响，并且精度较低，同时无法实现满足多轨位移实时在线测量。

为实现高速铁路双向多根钢轨的纵向位移监测，本文提出一种基于旋转激光位移传感的多轨纵向位移在线监测方法，利用角度标板将被监测钢轨纵向位移转换为标板横向位移，然后利用旋转激光传感器采集多根钢轨标板横向位移信息，在此基础上提出了基于滑动窗口阈值的凹槽特征识别方法，最终实现钢轨高精度、非接触、多轨低成本测量。

1　总体方案

针对钢轨纵向位移监测的高精度、非接触、多轨测量需求，本文设计的多轨纵向位移在线监测方法整体架构如图 1 所示。监测系统包括本地激光数据采集和云端信号处理 2 部分。

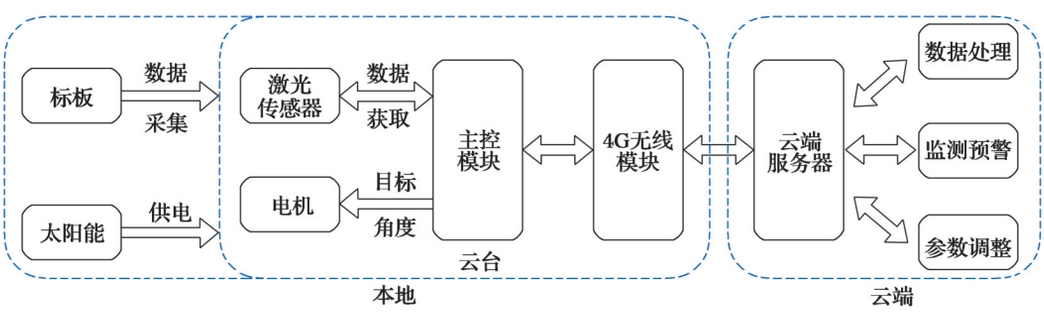


图 1　多轨纵向位移在线监测方法总体架构

Fig. 1　Scheme of online monitoring method for multi-rail longitudinal displacement

钢轨纵向位移激光数据采集方案如图 2 所示，将角度标板固定在多根钢轨上，激光位移传感器在云台作用下，依次旋转扫描多个标板，并将激光距离信息传输至云平台。角度标板为纯机械装置，无需供电，成

本低，安装牢固，因此不会影响列车运行。为测量钢轨的纵向位移，设计具有一定角度的标板，将钢轨的纵向位移转换为激光传感器可测量的标板横向位移，标板结构如图3所示。在激光传感器旋转过程中，激光传感器会扫描到除标板以外的枕木、石子等信息。为从激光传感器距离原始数据中准确识别出标板，在角度标板上设计有结构和尺寸固定的凹槽，形成特定的数据变化规律，利于标板的准确识别。为便于计算，将标板的斜边方向与钢轨纵向夹角设计为26.57 °，标板安装如图4所示。激光位移传感器布置于接触网杆上距钢轨平面1 m高处，接触网杆底部距离右轨4 m，距离左轨2.6 m。根据以上信息，可获得钢轨纵向位移 Δy_1 和 Δy_2：

$$\Delta y_1=\Delta x_1\times\cos\alpha\times\cot 26.57°=\Delta x_1\times\cos\left(\tan^{-1}\frac{1}{2.6}\right)\times\cot 26.57°\approx 1.87\Delta x_1 \tag{1}$$

$$\Delta y_2=\Delta x_2\times\cos\beta\times\cot 26.57°=\Delta x_2\times\cos\left(\tan^{-1}\frac{1}{4}\right)\times\cot 26.57°\approx 1.94\Delta x_2 \tag{2}$$

式中：α,β 分别为激光在左轨、右轨处与标板水平面之间的夹角；$\Delta x_1,\Delta x_2$ 分别为激光位移传感器测量所得到的与左、右标板的横向距离变化值。

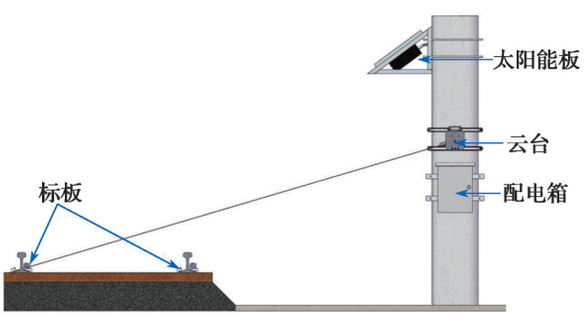


图2 基于激光位移传感的多轨纵向位移测量方法

Fig. 2 Scheme of measurement method for multi-rail longitudinal displacement based on laser displacement sensing

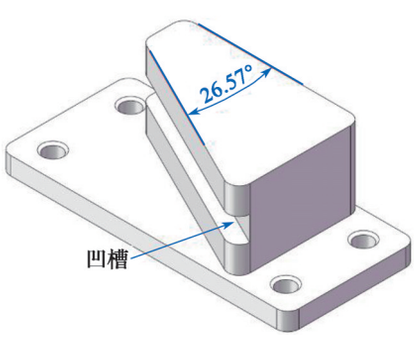


图3 标板

Fig. 3 Gauge plate

多轨纵向位移在线监测云端平台架构如图5所示，云端采用浏览器/服务器（Browser/Server）架构，监测数据库、数据处理算法和前端界面程序均部署在云服务器上。使用人员可通过浏览器访问云端网页，实现传感器监测控制、测量间隔时间配置等功能。

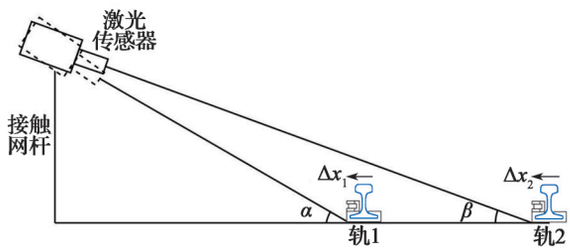


图4 标板安装示意图

Fig. 4 Installation diagram of gauge plate

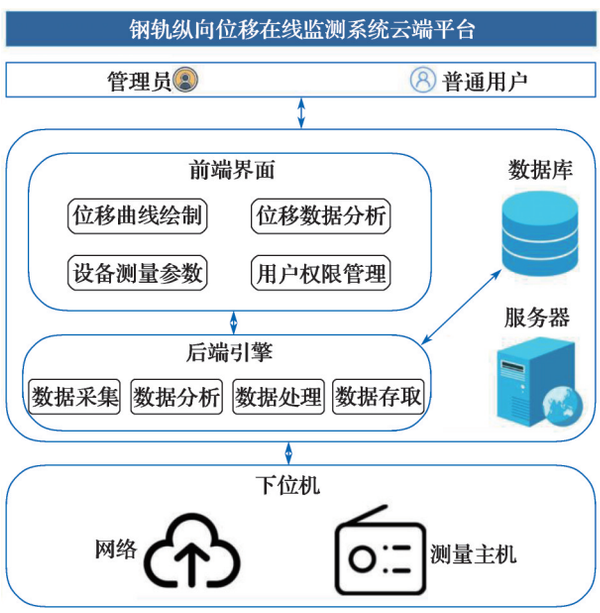


图5 多轨纵向位移在线监测云端平台架构

Fig. 5 Cloud platform architecture for online monitoring of multi-rail longitudinal displacement

2 标板特征提取与纵向位移算法

将激光测量平面作为标板截面，以激光传感器每次的测量数据索引为横轴，测量获得的标板距离为纵轴绘制原始数据曲线，原始数据曲线绘制过程如图6所示。

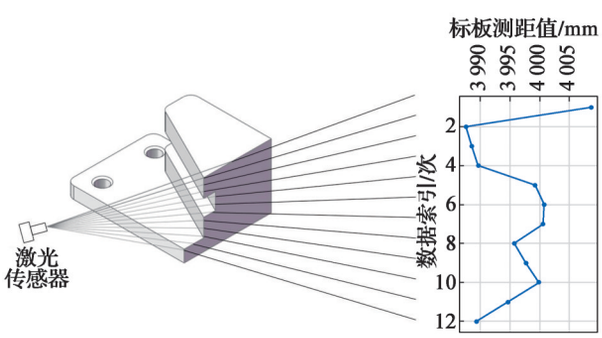
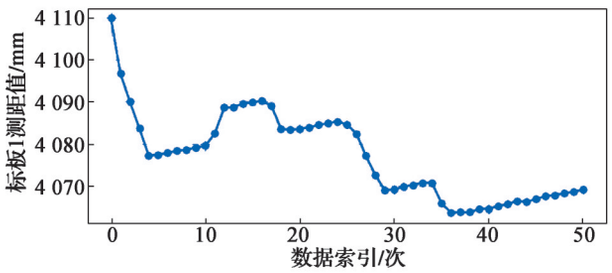


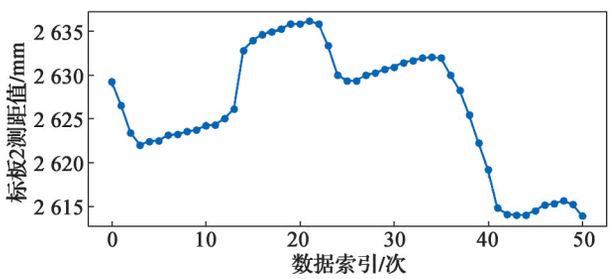
图6 原始数据曲线绘制过程示意

Fig. 6 Original data curve plotting process

在实际测量过程中，云台电机以小角度转动，测量单向双钢轨全部原始数据，如图7所示，其中突起部分即为标板凹槽。根据数据波动情况与现场环境状况，选用不同方法进行计算，位移计算流程如图8所示。



(a) 钢轨 1 全数据



(b)钢轨 2 全数据

图 7　单向双钢轨的完整激光测量原始数据

Fig. 7　Original data of complete laser measurement for one-way double rails

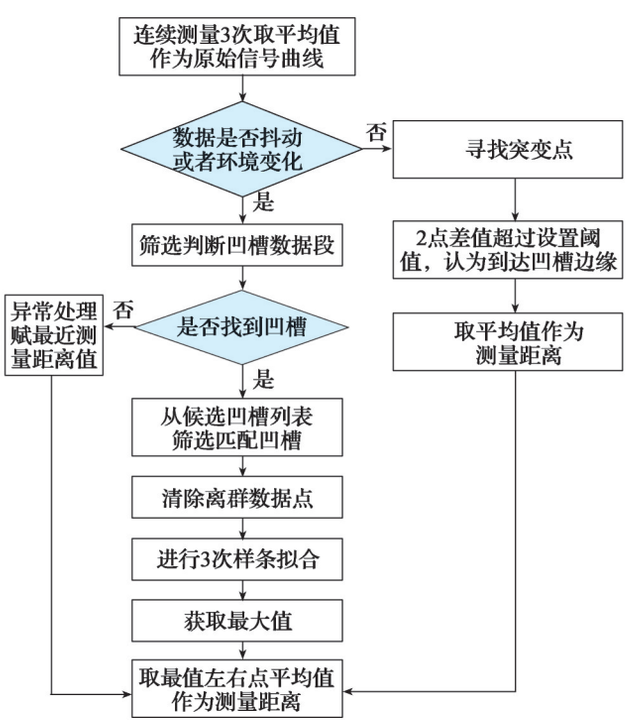


图 8　标板特征提取与纵向位移计算流程图

Fig. 8　Process of feature extraction of gauge plate and calculation of longitudinal displacement

如图 8 所示，若数据稳定波动较小，采用突变点寻找凹槽边缘的方法：以凹槽边缘作为参考测量点，通过设置突变阈值，遍历原始数据，得到每 2 个点的差值，并与阈值进行对比，在阈值范围内的即可识别为凹槽边缘。

若原始波形变化较大，数据参考点不稳定，为识别出凹槽特征，设计滑动窗口极值法如下：算法经过 2 次筛选提取出原始数据中的凹槽特征，然后对凹槽段数据进行样条拟合，减少波形突变；再选取凹槽数据中的最大值作为目标钢轨的当前测距值，为防止抖动，与最值处左、右 2 点进行平均，得到最终的计算测距值。通过对比当前测距值与安装初始测距值，计算出目标钢轨的横向位移，进而通过式(1)和式(2)计算出目标钢轨的纵向位移。

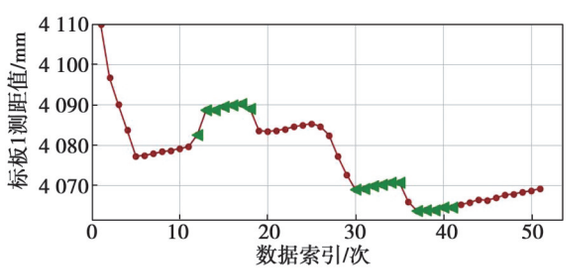
第一次筛选通过窗口宽度和窗口上下阈值筛选出原始数据中可能含有凹槽数据的窗口起始下标，程序筛选公式如下：

$$\mathrm{index}=\left\{\mathrm{i}\in\mathrm{N}\left|\begin{array}{c}1\leqslant\mathrm{i}\leqslant\mathrm{data_num}-\mathrm{w}\\ \mathrm{lower_limit}<\mathrm{R}<\mathrm{upper_limit}\end{array}\right.\right\} \tag{3}$$

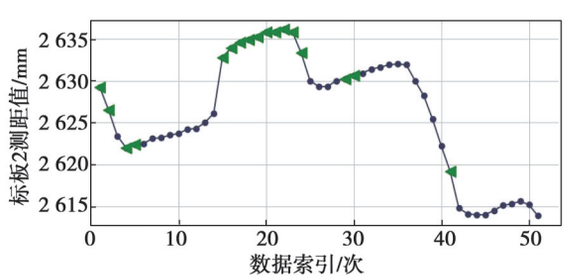
$$\mathrm{R}=\mathrm{MAX}\left(\mathrm{data}\left[\mathrm{i}:\mathrm{i}+\mathrm{w}\right]\right)-\mathrm{MIN}\left(\mathrm{data}\left[\mathrm{i}:\mathrm{i}+\mathrm{w}\right]\right) \tag{4}$$

式中：index 为所有可能含有凹槽数据段的窗口起始下标集合；data_num 为原始数据量；data 为原始数据；w 为窗口宽度；upper_limit 和 lower_limit 分别为窗口上阈值和下阈值；R 为可能含有凹槽数据段的窗口内数据的极差。

经过第一次筛选后所有可能含有凹槽数据段的窗口起始下标数据如图 9 中的绿色三角形所示。



(a) 钢轨 1 全数据



(b) 钢轨 2 全数据

图 9　第一次筛选后可能的凹槽数据段

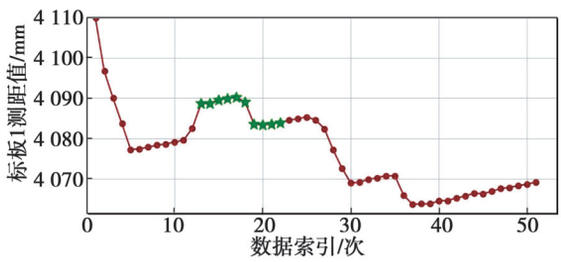
Fig. 9　Possible groove data segments after the first screening

进一步对提取出所有可能含有凹槽数据段窗口起始下标进行第二次筛选，程序筛选公式为

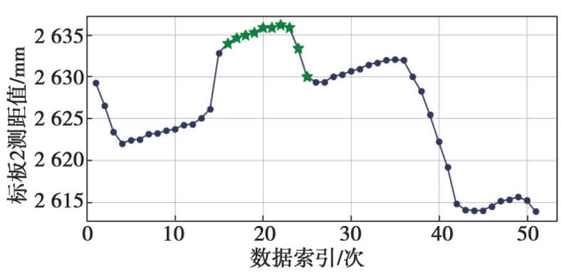
$$\mathrm{slot_index}=\left\{\mathrm{i}\in\mathrm{N}\left|\begin{array}{c}1\leqslant\mathrm{i}\leqslant\mathrm{index_num}-4\\ \mathrm{index}\left[\mathrm{i}+\mathrm{n}\right]-\mathrm{index}\left[\mathrm{i}+\mathrm{n}-1\right]=1\\ \mathrm{n}=\left[1{:}4\right]\end{array}\right.\right\} \tag{5}$$

式中：slot_index 为最终提取出含有凹槽数据窗口的起始下标；index 为所有可能含有凹槽数据段的窗口起始下标集合；index_num 为 index 集合的数据量；n 为 1 到 4 的集合，用于提取出 4 个连续的可能含有凹槽数据的窗口，并以这 4 个窗口中的第一个窗口作为最终含有凹

槽数据的窗口。经过二次筛选后含有凹槽数据段的窗口如图 10 中的绿色星形所示。



(a) 钢轨 1 全数据



(b) 钢轨 2 全数据

图 10　第二次筛选后含有凹槽数据段

Fig. 10　Groove data segments contained after the second screening

对筛选得到的数据进行样条拟合，其基本思想是设计一个以采样实际值为变量的三次多项式，使经过多项式计算后的输出数据逼近真实情况。三次样条曲线的多项式可以表示为

$$\hat{y}=a_0+a_1x+a_2x^2+a_3x^3 \tag{6}$$

$$\Delta_j^2=\left(y_j-\hat{y}_j\right)^2 \tag{7}$$

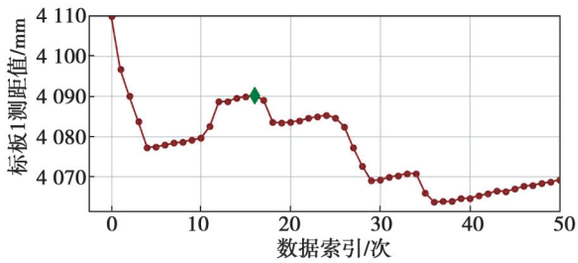
式中：a_0,a_1,a_2,a_3 为三次多项式相关系数；y 为实际值；j 为测量次数；Δ_j^2 为测量误差。

当曲线方程与激光实际测量值的方均误差最小时，可以求导曲线方程的系数 a_0,a_1,a_2,a_3 等。

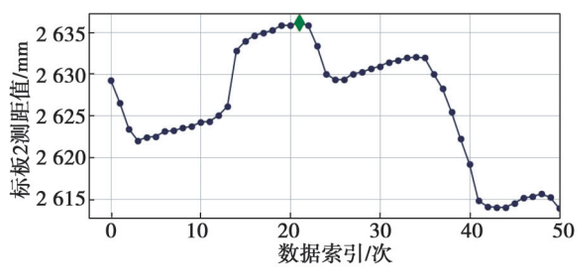
最后，在二次筛选后已经确定凹槽数据段的基础上，取凹槽数据段的最大值为标板测距值，如图 11 中绿色菱形所示。

3　试验测试

为验证本文提出方法的精度和稳定性，研制了单向双轨纵向位移监测系统。如需同时监测更多钢轨，



(a) 钢轨 1 全数据



(b) 钢轨 2 全数据

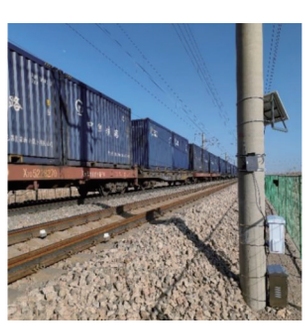
图 11　滑动窗口极值法提取测距值

Fig. 11　Extraction of distance measurement values through the sliding window extremum method

可在激光位移传感器测量范围内在钢轨上安装相应标板。监测系统由太阳能电池供电，监测数据与控制信息通过 4G 物联网卡进行双向通信。测试设备安装于甘肃省嘉峪关市兰新线上行 K730+000 处进行长期测试，测试路段坡度为 5.6‰ 的上坡路段，测试设备现场如图 12 所示。监测设备每 30 min 自动测量 1 次，测量 2 根钢轨的纵向位移变化。



(a) 云台



(b) 测试设备整体布置

12　测试设备现场安装图片

Fig. 12　Pictures of on-site installation of testing equipment

图 13 为 2023 年 6 月 5—20 日云端采集到的钢轨位移曲线变化图。2023 年 6 月 6—7 日的单日监测数据如

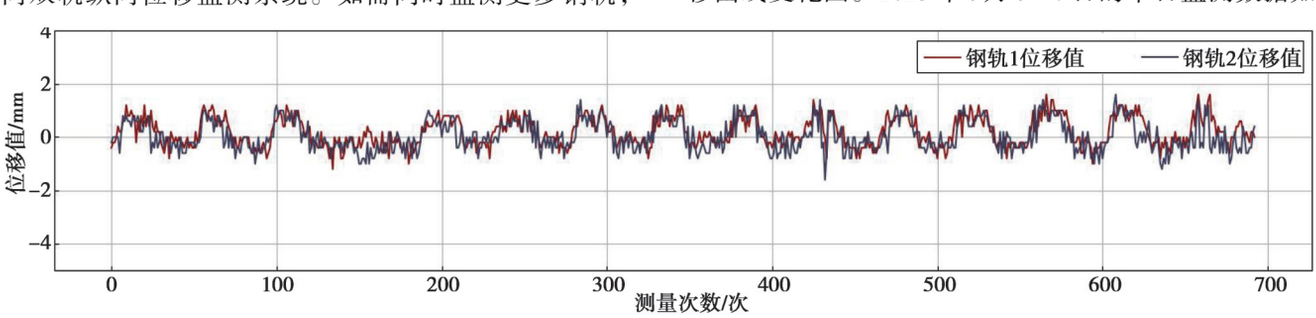


图 13　2023 年 6 月 5—20 日钢轨纵向位移变化曲线

Fig. 13　Longitudinal displacement curve of rails from June 5, 2023 to June 20, 2023

表1所示。安装时激光传感器测得两标板的原始距离分别为4 090 mm和2 636 mm。从测试结果可以看出，钢轨纵向位移呈周期性变化，波动范围在±2.0 mm内，同时两条钢轨位移波动具有明显的同步性，其原因为嘉峪关当地昼夜环境温差引起的钢轨热胀冷缩。经过15天的长期测试，系统稳定可靠，监测精度高，满足现场使用要求。

表1　2023年6月6日监测数据

Table 1　Monitoring data on June 6, 2023　　mm

标板1		钢轨1	标板2		钢轨2	标板1		钢轨1	标板2		钢轨2
测距值	横向位移	纵向位移	测距值	横向位移	纵向位移	测距值	横向位移	纵向位移	测距值	横向位移	纵向位移
4 089.9	–0.1	–0.2	2 636.0	0.0	0.0	4 090.2	0.2	0.4	2 636.1	0.1	0.2
4 089.8	–0.2	–0.4	2 635.6	–0.4	–0.8	4 090.1	0.1	0.2	2 635.7	–0.3	–0.6
4 090.0	0.0	0.0	2 635.9	–0.1	–0.2	4 090.1	0.1	0.2	2 636.0	0.0	0.0
4 089.8	–0.2	–0.4	2 635.9	–0.1	–0.2	4 090.1	0.1	0.2	2 635.7	–0.3	–0.6
4 090.0	0.0	0.0	2 635.9	–0.1	–0.2	4 090.1	0.1	0.2	2 636.2	0.2	0.4
4 089.9	–0.1	–0.2	2 635.7	–0.3	–0.6	4 089.9	–0.1	–0.2	2 635.7	–0.3	–0.6
4 090.0	0.0	0.0	2 636.0	0.0	0.0	4 089.8	–0.2	–0.4	2 635.9	–0.1	–0.2
4 090.3	0.3	0.6	2 636.1	0.1	0.2	4 089.7	–0.3	–0.6	2 635.5	–0.5	–1.0
4 090.5	0.5	1.0	2 635.8	–0.2	–0.4	4 090.0	0.0	0.0	2 635.6	–0.4	–0.8
4 090.2	0.2	0.4	2 635.8	–0.2	–0.4	4 090.0	0.0	0.0	2 635.9	–0.1	–0.2
4 090.6	0.6	1.2	2 636.5	0.5	1.0	4 090.0	0.0	0.0	2 636.1	0.1	0.2
4 090.8	0.8	1.6	2 636.7	0.7	1.4	4 090.2	0.2	0.4	2 635.8	–0.2	–0.4
4 090.5	0.5	1.0	2 635.8	–0.2	–0.4	4 090.2	0.2	0.4	2 635.7	–0.3	–0.6
4 090.3	0.3	0.6	2 635.9	–0.1	–0.2	4 090.3	0.3	0.6	2 635.8	–0.2	–0.4
4 090.2	0.2	0.4	2 635.8	–0.2	–0.4	4 090.3	0.3	0.6	2 635.7	–0.3	–0.6
4 090.4	0.4	0.8	2 636.6	0.6	1.2	4 090.1	0.1	0.2	2 636.2	0.2	0.4
4 090.5	0.5	1.0	2 636.4	0.4	0.8	4 090.0	0.0	0.0	2 636.0	0.0	0.0
4 090.7	0.7	1.4	2 636.6	0.6	1.2	4 090.1	0.1	0.2	2 635.7	–0.3	–0.6
4 090.8	0.8	1.6	2 635.8	–0.2	–0.4	4 090.0	0.0	0.0	2 635.7	–0.3	–0.6
4 090.3	0.3	0.6	2 635.7	–0.3	–0.6	4 089.9	–0.1	–0.2	2 635.8	–0.2	–0.4
4 090.4	0.4	0.8	2 636.0	0.0	0.0	4 090.1	0.1	0.2	2 635.8	–0.2	–0.4
4 090.3	0.3	0.6	2 635.8	–0.2	–0.4	4 090.1	0.1	0.2	2 636.1	0.1	0.2
4 090.0	0.0	0.0	2 636.0	0.0	0.0	4 090.0	0.0	0.0	2 636.2	0.2	0.4

4　结束语

钢轨断轨和胀轨将引起严重的列车运行安全事故。为此，本文提出了一种基于旋转激光扫描和角度标板的多轨纵向位移监测方法，将多根钢轨的纵向位移转化为可直接高精度测量的标板横向位移变化量。同时，针对旋转扫描过程中的枕木、石子等干扰因素，设计了具有明显凹槽结构特征的标板，并通过滑动窗口极值法实现对目标特征点的拾取。在此基础上，结合云平台技术、4G物联网通信技术，实现对钢轨纵向位移的远程在线监测。经过现场测试，应用本文提出方法的监测系统稳定性好、可靠性高，可满足实际使用要求，为后续大规模钢轨位移监测部署奠定了基础。

参考文献：

[1] 广钟岩, 高慧安. 铁路无缝线路[M]. 4版. 北京: 中国铁道出版社, 2005: 1-4.
GUANG Zhongyan, GAO Huian. Seamless railway track [M]. 4th ed. Beijing: China Railway Publishing House, 2005: 1-4.

[2] 高亮. 高速铁路无缝线路关键技术研究与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2012: 2-10.
GAO Liang. Research and application of key technologies for high speed railway seamless track[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2012: 2-10.

[3] 张东方, 谷利元, 季育文, 等. 基于3D移动测量系统点云数据的钢轨信息自动提取方法[J]. 机车电传动, 2021(2): 114-119.
ZHANG Dongfang, GU Liyuan, JI Yuwen, et al. Automatic rail information extraction method based on point cloud data of 3D mobile measurement system[J]. Electric drive for locomotives, 2021(2): 114-119.

[4] 贺佳, 张丽丽, 孔恒, 等. 数字影像式钢轨位移观测系统研究和应用[J]. 市政技术, 2023, 41(1): 207-212.
HE Jia, ZHANG Lili, KONG Heng, et al. Research and application of observation system of digital imaging rail displacement[J]. Municipal engineering technology, 2023, 41 (1): 207-212.

[5] 李堃鹏. 基于图像处理的钢轨纵向位移检测系统的设计与实现[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
LI Kunpeng. Design and implementation of rail longitudinal displacement detection system based on image processing [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022.

[6] 吴湘华, 季天莹, 陈峰, 等. 钢轨爬行及路基表层冻胀检测技术[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(3): 515-520.
WU Xianghua, JI Tianying, CHEN Feng, et al. Detection technology of railway subgrade frost heave and rail crawling [J]. Journal of railway science and engineering, 2015, 12(3): 515-520.

[7] 许勇. 无缝线路钢轨纵向位移监测技术研究[J]. 流体测量与控制, 2021, 2(2): 38-43.
XU Yong. Research on longitudinal displacement monitoring technology of seamless rail[J]. Fluid measurement & control, 2021, 2(2): 38-43.

[8] 龙庭威, 聂闻, 孔秋平, 等. 基于FPGA的双目视觉滑坡位移监测系统[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(5): 265-268.
LONG Tingwei, NIE Wen, KONG Qiuping, et al. Binocular visual landslide displacement monitoring system based on FPGA[J]. Automation & instrumentation, 2023(5): 265-268.

[9] 巩一帆, 董志学, 蒋力顺, 等. 基于图像处理的钢轨纵向位移检测系统的研究[J]. 计算技术与自动化, 2021, 40(3): 111-115.
GONG Yifan, DONG Zhixue, JIANG Lishun, et al. Research on rail longitudinal displacement detection system based on image processing[J]. Computing technology and automation, 2021, 40(3): 111-115.

[10] 高超, 王刘祺, 倪彤元, 等. 基于监控影像的结构位移跟踪监测研究[J]. 计量学报, 2023, 44(4): 514-520.
GAO Chao, WANG Liuqi, NI Tongyuan, et al. Research on structural displacement tracking monitoring based on surveillance camera videos[J]. Acta metrologica sinica, 2023, 44(4): 514-520.

[11] 刘朝晖. 基于物联网的接触网补偿装置在线监测方法[J]. 铁道技术标准(中英文), 2023, 5(5): 14-20.
LIU Zhaohui. On-line monitoring method of catenary compensation device based on internet of things (IoT)[J]. Railway technical standard (Chinese & English), 2023, 5(5): 14-20.

[12] 孙北林. 钢轨纵向位移在线监测系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.
SUN Beilin. A study on longitudinal rail displacement observation system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[13] 蒋万军, 韩占涛. 基于激光测距的铁路钢轨纵向位移检测系统的实现[J]. 科技与创新, 2022(14): 118-120.
JIANG Wanjun, HAN Zhantao. Implementation of railway rail longitudinal displacement detection system based on laser ranging[J]. Science and technology & innovation, 2022 (14): 118-120.

收稿日期：2023-07-19
修回日期：2023-09-07