

文章编号:1005-0523(2025)06-0066-08



## 基于异常特征提取的纵连轨道板接缝 损伤识别

刘浩然,李再伟,路宏遥,何越磊

(上海工程技术大学城市轨道交通学院,上海 201620)

**摘要:**为深入研究CRTS II型板式无砟轨道的宽窄接缝损伤机理并对其进行损伤识别,在华东地区某客运专线开展现场调研,并对轨道板温度与接缝位移进行长期监测。基于DBSCAN聚类算法,对高温季节下表征轨道板能量输入的温度与能量输出的位移数据进行筛选和异常特征数据的提取,结合标准差所代表的数据离散程度,分析轨道板的能量积聚与突然释放过程,建立数据驱动与物理机制相结合的综合计算模型,并提出了一种基于异常特征提取的宽窄接缝损伤识别方法。结果表明,夏季持续高温期间,轨道板温度和接缝位移变化存在长时间不协调的情况,所建立的物理模型为宽窄接缝损伤识别分析均补充了8个异常特征数据;长时间高温会导致轨道板内产生能量积聚和突然释放的现象,这种能量变化在宽接缝位置表现更为明显,会对宽窄接缝造成较大的损伤影响。

**关键词:**无砟轨道;宽窄接缝;异常特征提取;能量平衡体系;损伤识别

中图分类号:U213.2

文献标志码:A

本文引用格式:刘浩然,李再伟,路宏遥,等.基于异常特征提取的纵连轨道板接缝损伤识别[J].华东交通大学学报,2025,42(3):66-73.

## Damage Identification in Joints of Longitudinal Continuous Track Slabs Based on Abnormal Feature Extraction

Liu Haoran, Li Zaiwei, Lu Hongyao, He Yuelei

(School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** To investigate the damage mechanism of the wide and narrow joints of CRTS II slab ballastless tracks and identify damage, a field investigation was conducted on a passenger-dedicated line in the East China region, followed by long-term monitoring of track slab temperature and joint displacement. Based on the DBSCAN clustering algorithm, temperature data representing energy input and displacement data representing energy output during high-temperature seasons were screened and abnormal feature data were extracted. By incorporating the standard deviation, which represents data dispersion, to analyze the energy accumulation and sudden release process within the track slabs, a comprehensive computational model combining data-driven and physical mechanisms was established. A novel method for identifying wide and narrow joints damage based on abnormal feature extraction was proposed. The results show that, during the period with prolonged high temperature in summer, there is a long-term inconsistency between the temperature of the track slab and the displacement of the

收稿日期:2024-10-22

基金项目:国家自然科学基金项目(52472450);上海市教育委员会科研项目(2024AI007)

joints. The established physical model supplemented eight additional abnormal characteristic data for damage identification analysis of wide and narrow joints. In addition, prolonged high temperatures lead to energy accumulation and sudden release within the track slabs, with more pronounced energy changes observed at wide joint locations, thereby causing significant damage to the wide and narrow joints.

**Key words:** ballastless track; wide and narrow joints; abnormal feature extraction; energy balance system; damage identification

**Citation format:** LIU H R, LI Z W, LU H Y, et al. Damage identification in joints of longitudinal continuous track slabs based on abnormal feature extraction[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(3): 66-73.

近年来,我国高速铁路和客运专线的大规模建设推动了无砟轨道的快速发展和广泛应用<sup>[1]</sup>。CRTS II型板式无砟轨道是一种重要的铁路轨道结构<sup>[2]</sup>,其宽窄接缝是保证结构具备良好纵向刚度和稳定性的关键部位,由于宽窄接缝是后浇混凝土结构,它与预制轨道板存在一定的性能差异,在运营过程中由于极端气候条件等影响,CRTS II型板式无砟轨道结构的宽窄接缝可能出现挤碎、开裂等不同程度的损伤,造成轨道结构整体稳定性和结构强度下降,同时导致轨道线路不平顺,危及行车安全<sup>[3]</sup>。

目前,关于宽窄接缝损伤机理分析及板式无砟轨道损伤识别已经做了一些相关研究。张泽群等<sup>[4]</sup>通过建立无砟轨道有限元模型,结合现场实测数据,对轨道板接缝不同界面损伤规律及分布差异进行了精细化分析。Li 等<sup>[5]</sup>通过建立轨道有限元模型,认为窄接缝不完整时界面损伤起始的温升可以远低于窄接缝无损伤时的温升。刘钰等<sup>[6]</sup>建立宽窄接缝损伤数值模型,模拟了混凝土劣化等条件下的宽窄接缝损伤情况,探讨了各种因素对宽窄接缝损伤的影响。Zhang 等<sup>[7]</sup>就宽接缝的开裂深度和开裂长度对CRTS II型板式无砟轨道力学性能的影响进行了详细分析。赵春光等<sup>[8]</sup>认为窄接缝弹性模量降低比宽窄接缝弹性模量整体降低对轨道板的垂向稳定性影响更为显著。金忠凯<sup>[9]</sup>建立了用于CRTS II型板式无砟轨道砂浆层离缝损伤识别的BP神经网络模型,研究了BP神经网络对砂浆层离缝损伤的识别。刘渝等<sup>[10]</sup>通过数值仿真分析所得无砟轨道模态信息,利用轨道板脱空区域的广义柔度曲率局部峰值来进行轨道板脱空损伤识别。任娟娟等<sup>[11]</sup>基于粒子群优化算法-支持向量机(PSO-SVM),构建了板式无砟轨道CA砂浆脱空识别模型。

以CRTS II型板式无砟轨道为研究对象,从轨道板和宽窄接缝的变形机理入手,并对华东地区某客运专线进行现场调研和长期试验监测;利用DBSCAN聚类算法筛选轨道板温度和接缝位移中具有异常特征的数据,结合数据标准差反映的轨道板能量变化情况,建立数据驱动与物理机制相结合的综合计算模型,从而分析轨道板内能量变化异常时所对应的宽窄接缝变化情况。目前国内外基于异常特征提取和轨道板能量平衡体系对宽窄接缝损伤进行分析和识别方面,尚未开展深入的研究工作。本研究试图为CRTS II型板式无砟轨道宽窄接缝结构设计优化和养护维修策略更新提供一定的理论依据。

## 1 现场调研与监测

### 1.1 现场调研分析

通过现场调查发现,相对于其他部位,宽窄接缝作为后浇混凝土结构表现出较高的破损率。同时,它也是轨道结构中应力集中的区域,容易因受力产生较大的变形。因此,宽窄接缝不可避免地成为薄弱环节,通常是轨道结构病害的密集区域,主要损伤形式体现为:现场宽窄接缝损伤率较高,存在窄接缝结构混凝土完全破碎的情况,且此时窄接缝底部已存在脱空现象。在1 km的路基段CRTS II型板式无砟轨道中,其宽窄接缝有21%处于结构完全断裂、掉块等严重破损状态。根据现场多处宽窄接缝病害的总结,可知其损伤发展规律为:首先是宽窄接缝连接处的断裂,接着是窄接缝的失效,随后可能会出现窄接缝底部的脱空现象,最终导致宽窄接缝同时损坏、结构失效等不利情况。

宽窄接缝结构的破坏是一个损伤和断裂交互

作用的耦合过程,其实质是混凝土材料逐渐失去强度,同时伴随着能量的耗散<sup>[12]</sup>。为了研究宽窄接缝结构的损伤机理并对其进行识别,可以从结构能量平衡的角度来考虑,这意味着要关注结构中能量输入和输出之间的平衡,以判断结构是否趋于稳定。宽窄接缝处的损伤,究其原因是由于相邻轨道板对其反复做功的结果。在周围气象条件的影响下,轨道板内部的能量输入(温度)会随之发生变化,而轨道板的能量输出(位移)变化则是为了能量平衡而产生的自我调节机制。如果轨道板内部能量积聚并突然释放便会引起其宽窄接缝结构的断裂损伤和变形过大,影响轨道结构整体的安全性和稳定性。从表观上讲,如果轨道板的实际位移与由温度变化引起的理论位移不协调,轨道板就会因能量不平衡而导致其宽窄接缝处积聚应力和结构失稳等不良情况的发生,如图1所示。

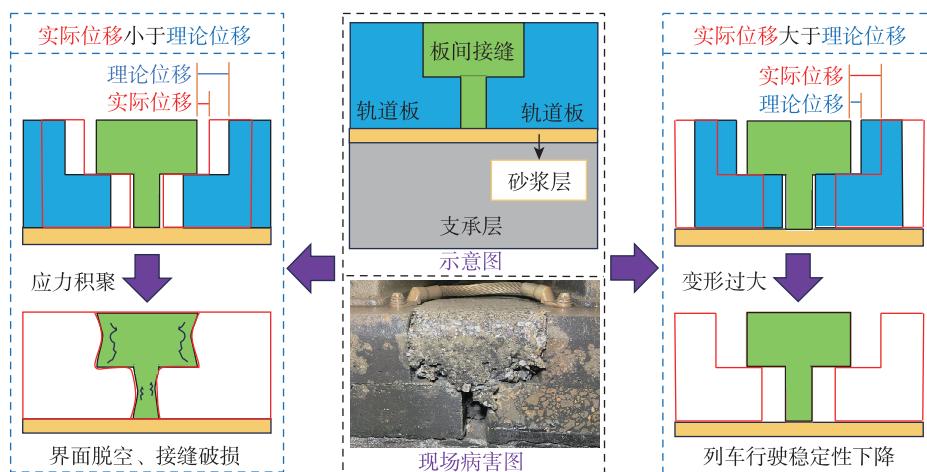


图1 相邻轨道板能量变化异常对宽窄接缝的影响

Fig. 1 Impact of abnormal energy variation in adjacent track slabs on the wide and narrow joints

## 1.2 现场监测

为探究宽窄接缝的损伤机理与其轨道板内部能量变化的关系,在华东地区某客运专线开展现场监测工作,监测传感器的分布情况如图2所示。在宽接缝与轨道板间、窄接缝与轨道板间分别布设一个位移传感器,来监测其对应位置的轨道板相对纵向位移,以反应轨道板对宽窄接缝的不同影响,位移正值代表轨道板与宽窄接缝的间隙变小,负值则

变大。同时在轨道板上打孔,并在距轨道板表面深度50 mm和150 mm处分别布设一个温度传感器,以监测对应深度位置的温度变化。

## 1.3 监测数据分析

对全年的监测数据进行分析,发现轨道板温度和纵向位移数据具有良好的相关性,如图3所示。其中轨道板50 mm深度处温度和宽接缝处纵向位移的相关性系数为0.80,150 mm深度处温度和窄接缝处纵向位移的相关性系数为0.77,因此将这两组数据作为样本进行后续分析。

根据全年轨道板温度与接缝位移变化的数据分析结果,发现二者对高温天气较为敏感,结合纵连轨道板结构易受高温影响的特点,以及夏季高温期间添乘检查次数明显增加的实际检修情况,可得出轨道板能量积聚后突然释放的现象在夏季高温期间最为显著,这一时期为全年最不利工况。因此,选取这一时间段的数据进行分析,以便更好地揭示轨道板温度与接缝位移变化异常对轨道板损伤的影响。轨道板温度与其相应位置的接缝位移

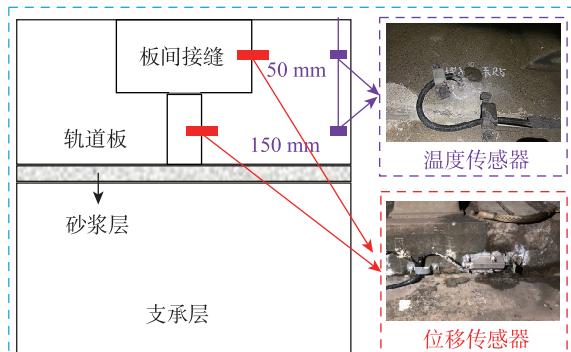


图2 监测传感器布设

Fig. 2 Installation of monitoring sensors

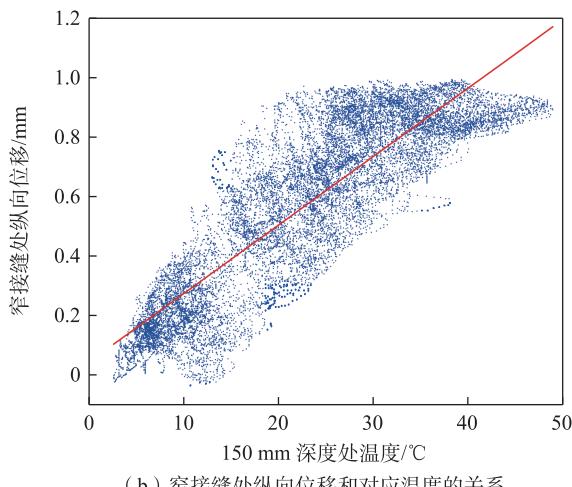
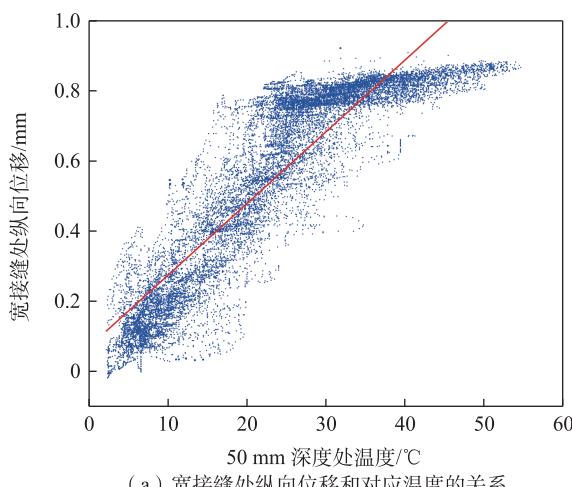


图3 轨道板温度与接缝位移关系

**Fig. 3 Relationship between track slab temperature and joints displacement data**

变化情况如图4所示。

在夏季持续高温期间,轨道结构宽接缝和窄接缝处二者的板温和位移整体变化趋势大致相同。在此时间段内,轨道板温度持续变化,最大变化值达到9.49 °C,但其位移在温度变化对应的一段时间内,存在变化幅度很小后突现巨大峰值的情况。因此,可以将监测数据中轨道板温度和对应接缝位移变化异常的数据提取出来,将其归于异常特征数据。

## 2 异常特征值提取算法

### 2.1 DBSCAN聚类算法

聚类分析是一种重要的无监督学习算法,其中DBSCAN(density-based spatial clustering of applications with noise)是一种典型的基于密度的空间聚

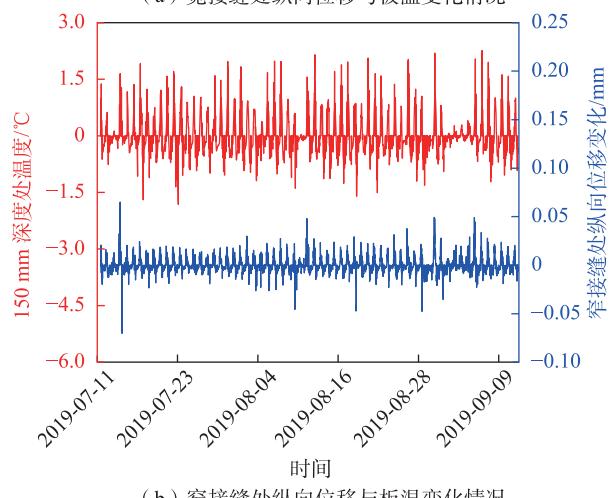
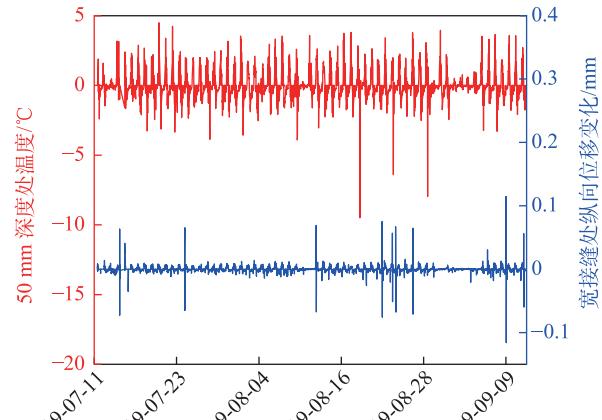


图4 高温季节的接缝位移与板温变化

**Fig. 4 Variation of joints displacement and track slab temperature in high-temperature seasons**

类算法,在处理大规模和具有噪声的数据集方面具有显著的效果<sup>[13]</sup>。DBSCAN聚类算法具有两个关键参数:邻域半径(Eps)和最少点数目(MinPts)<sup>[14]</sup>,它们的取值大小关乎数据的不同剥离程度,根据这两个参数,该算法将数据点分为3个类别:

1) 核心点:对某一数据集 $D$ ,若样本 $p$ 的 $\varepsilon$ 领域内至少包含MinPts个样本(包括样本 $p$ ),则样本 $p$ 称为核心点;

2) 边界点:对于非核心点的样本 $b$ ,若 $b$ 在任意核心点 $p$ 的 $\varepsilon$ 领域内,则样本 $b$ 称为边界点;

3) 噪声点:对于非核心点的样本 $n$ ,若 $n$ 不在任意核心点 $p$ 的 $\varepsilon$ 领域内,则样本 $n$ 称为噪声点。

### 2.2 基于DBSCAN聚类算法的模型建立

针对在华东地区现场的实际监测数据,将轨道

板宽接缝处纵向位移和50 mm深度处温度、窄接缝处纵向位移和150 mm深度处温度组成2组数据样本,利用莱茵达准则剔除其中的错误值后,通过计算数据  $k$ -距离曲线的拐点值来确定该组数据的 Eps 参数值;然后计算每个样本邻域内数据点的数量,如果这个数量大于等于 MinPts,则将该样本标记为核心点;接着,对于每个核心点,找到其密度直达和密度可达的样本,并将它们也标记为核心点,而非核心点则被忽略,在这个过程中,使用邻域距离阈值 Eps 来确定样本之间的密度连接关系。对于非核心点,如果它位于核心点的邻域内(以 Eps 为半径),则将其标记为边界点,否则将其标记为噪声点<sup>[15]</sup>;最后,根据核心点之间的连接关系建立模型,将样本划分为不同的簇,即提取异常特征数据,算法流程如图 5 所示。

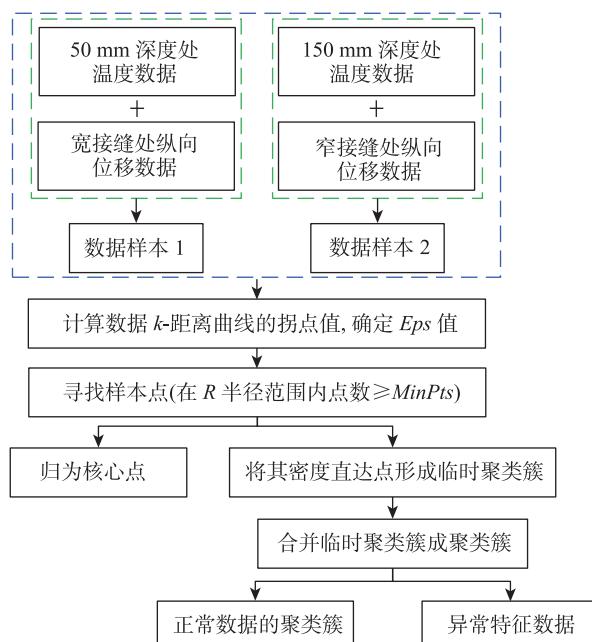


图 5 DBSCAN 聚类算法计算流程

Fig. 5 Computational process of the DBSCAN clustering algorithm

### 2.3 模型参数选择

在选择模型的 Eps 值和 MinPts 值过程中,需要考虑到数据集的特征、聚类任务的目标以及经验性的调整。因此在使用 DBSCAN 算法时,需要进行参数调优,以找到最适合特定数据集和筛选任务的 Eps 和 MinPts 值。

对于 MinPts 的选择,需要综合考虑数据集的维数和样本数量,一般而言,MinPts 应该大于等于 3。

在 DBSCAN 聚类算法中,该值选取采用 MinPts 等于 2 倍维数的计算方法,因此随着数据集维数的增加,MinPts 的取值也会相应增加,且对于较大的数据集,MinPts 的值应选择较大的数值。在 DBSCAN 聚类算法中,数据特征包括时间、轨道板温度、接缝位移、轨道板温度与接缝位移比值变化这 4 个方面,由此,MinPts 值取 8。同时也意味着将轨道板能量变化作为该模型的数据筛选条件之一。确定 Eps 值的方法是计算每个样本与所有其他样本之间的距离,并选择第  $k$  个最近邻的距离作为参考,然后按照距离从大到小排序,得到  $k$ -距离曲线。在  $k$ -距离曲线上,寻找斜率变化最大的拐点,该拐点对应的距离值就是 Eps 的合适取值。利用实际监测数据绘制  $k$ -距离曲线,以夏季持续高温期间的宽接缝处纵向位移与对应温度数据的  $k$ -距离曲线为例,如图 6 所示。

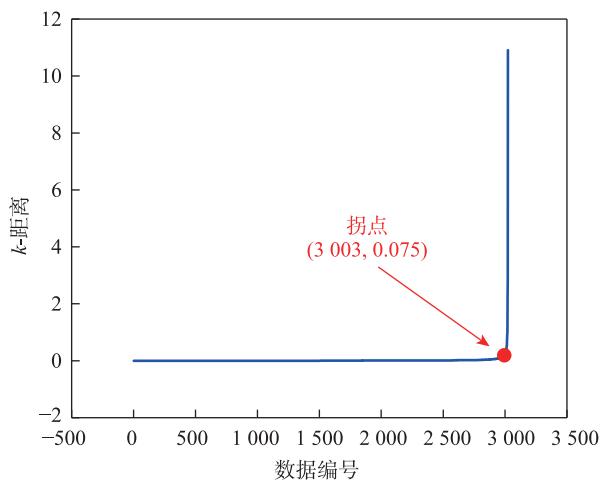


图 6  $k$ -距离曲线与拐点坐标

Fig. 6  $k$ -distance curve and inflection point coordinates

所有数据  $k$ -距离曲线的拐点坐标情况如表 1 所示。在计算各自数据时,DBSCAN 聚类算法模型将自动计算其  $k$ -距离曲线的拐点坐标,并将其纵坐标作为 Eps 值输入模型进行计算,以获得更精确的数据筛选效果。

表 1 数据  $k$ -距离曲线的拐点坐标

Tab.1 Inflection point coordination on the  $k$ -distance curve of the data

数据来源	拐点坐标
宽接缝处	(3 003, 0.075)
窄接缝处	(3 019, 0.070)

### 3 异常特征数据分析

#### 3.1 数据筛选和异常特征数据提取

利用DBSCAN聚类算法将轨道板宽接缝处纵向位移和50 mm深度处温度、窄接缝处纵向位移和150 mm深度处温度这2组数据样本在夏季持续高温的时间段下进行筛选和异常特征数据提取,数据筛选结果如图7所示。图中绿色点代表正常数据,红色点代表异常特征数据,紫色点代表异常特征数据在坐标轴xy,xz,yz面上的投影。

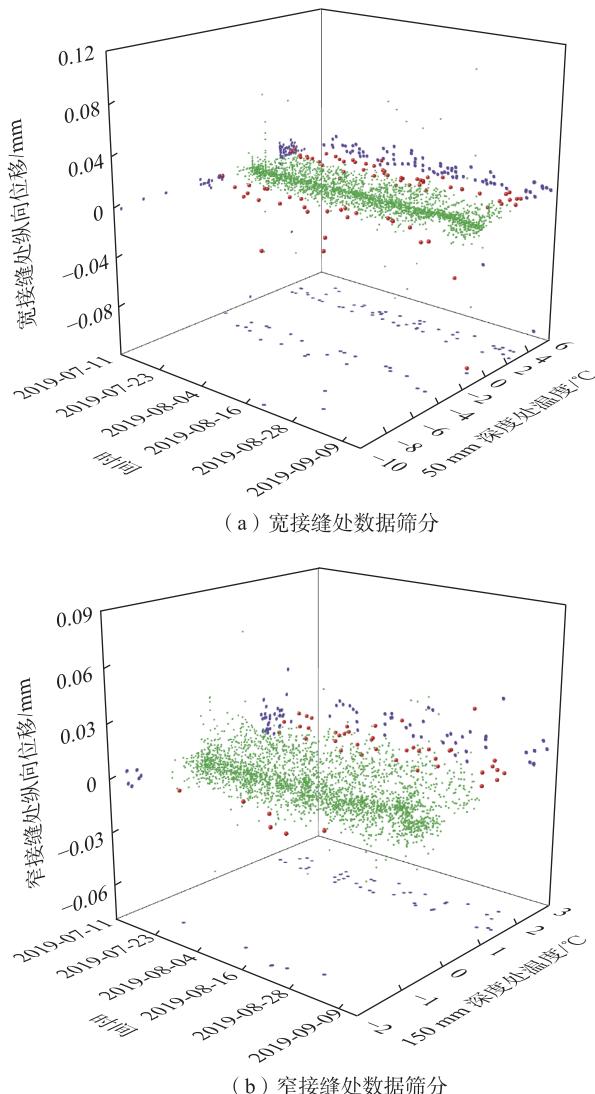


图7 数据样本的筛选结果

Fig. 7 Results of data sample screening

在夏季持续高温期间,宽窄接缝的异常特征数据分布区域大致相同,都主要集中在轨道板温度与接缝位移变化量比值较大的位置,说明轨道板能量

变化异常是形成异常特征数据的主要因素。且宽接缝处数据中的异常特征数据点多于窄接缝处,说明在持续高温天气下,宽接缝位置受到相邻轨道板挤压等不利影响更多。但由于窄接缝结构尺寸更小,相同条件下比宽接缝更容易受损,故现场窄接缝通常先于宽接缝损伤。经DBSCAN聚类算法,将每个数据样本筛选为正常数据和异常特征数据,各类数据点的数量如表2所示。

表2 筛分后各类数据点的数量

Tab.2 Number of data points in each category

数据来源	after screening		个
	正常数据	异常特征数据	
宽接缝处	2 906	81	
窄接缝处	2 926	53	

#### 3.2 基于能量物理变化的异常特征数据补充分析

由于DBSCAN聚类算法建立的数学模型所提取的异常特征数据量较少,为了全面分析轨道板能量变化异常时刻对其宽窄接缝的损伤影响,采用轨道板温度和接缝位移比值的数据标准差与其相应的轨道板能量变化情况建立物理模型进行补充论证。标准差是一种用于衡量数据离散程度的统计量,它能够量化数据点相对于其平均值的分散程度,且提供了一个衡量数据集内部变异性的指标。模型采用总体标准差计算,其计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (1)$$

式中: $x_i$ 为数据点;  $\mu$ 为总体的均值;  $n$ 为总体数据点的数量。

为了比较具有不同数据量级的宽窄接缝数据,进行二者标准差数据的归一化处理,以确保数据的可比性和一致性,计算公式为

$$\sigma' = \frac{\sigma_i}{\sigma_{\max}} \quad (2)$$

式中: $\sigma'$ 为归一化后的标准差; $\sigma_i$ 为标准差数据点; $\sigma_{\max}$ 为标准差数据最大值。

在夏季持续高温期间,宽窄接缝的归一化数据标准差及其相应的能量变化情况如图8所示。

经数据标准差反应的轨道板能量变化关系分析,轨道板在夏季持续高温期间,确实存在能量积聚与突然大量释放的现象,且在宽接缝位置表现更为明显,其中在宽接缝数据标准差最大的位置,轨

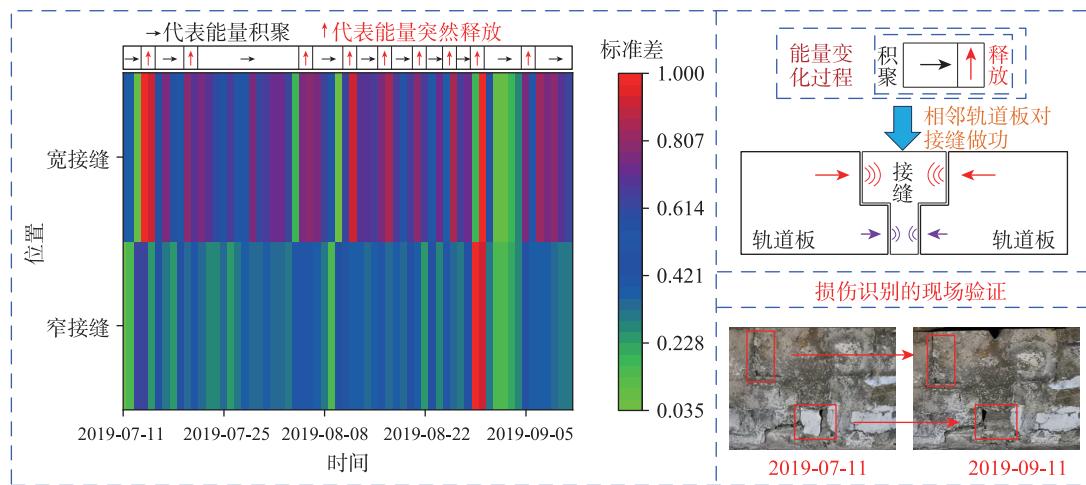


图8 数据标准差及能量变化情况  
Fig. 8 Standard deviation of data and energy variation

道板温度变化了  $9.49^{\circ}\text{C}$ , 而该时间点前后各 3 h 内最大接缝位移仅变化了 0.008 mm。此外, 相邻轨道板每次能量积聚并突然释放后, 便会对宽窄接缝做功, 长时间的重复作用下, 会造成宽窄接缝的结构强度与稳定性下降。

将每次能量积聚后突然释放时间段内的异常特征数据 1 与利用 DBSCAN 聚类算法所提取的异常特征数据 2 进行对比验证和补充分析, 构建结合数据驱动与物理机制的综合计算模型, 用于描述轨道板能量变化与宽窄接缝响应之间的关系。经计算, 发现二者所表现的轨道板能量变化异常时刻具有较好的吻合性, 且利用数据标准差反应的轨道板能量变化情况所建立的物理模型为宽窄接缝损伤识别分析均补充了 8 个异常特征数据。

为验证所建立的数据驱动与物理机制相结合的综合计算模型对宽窄接缝损伤识别的效果, 对监测区域的宽窄接缝损伤情况进行了详细记录。由图 8 可知, 在经历 7—9 月份的持续高温影响后, 宽接缝和窄接缝位置均出现了掉块、脱空现象, 其中宽接缝位置的脱空现象更为严重。这表明, 在夏季持续高温期间, 轨道板内部确实存在频繁的能量积聚和突然释放现象, 导致宽窄接缝处的应力集中, 进而引起变形和损坏。通过现场对比和验证, 进一步证明了所建立模型的正确性和有效性。

#### 4 结论

- 根据现场监测数据分析, 轨道板的宽接缝处纵向位移和 50 mm 深度处温度、窄接缝处纵向位移

和 150 mm 深度处温度二者数据间都具有良好的相关性。且在夏季持续高温期间, 轨道板温度和接缝位移变化存在长时间不协调的情况。

- 利用 DBSCAN 聚类算法可准确提取出样本中的异常特征数据, 结合标准差所代表的数据离散程度来反映轨道板的能量积聚与突然释放的过程, 进而建立结合数据驱动与物理机制的综合计算模型, 有效地提升了宽窄接缝的异常特征数据分析效率, 具有较好的适用性。

- 在夏季持续高温期间, 相邻轨道板内部会频繁积聚能量并突然释放, 导致宽窄接缝处的应力集中, 进而引起其变形和损坏, 且宽接缝受影响较大。

#### 参考文献:

- [1] 张鹏飞, 唐强强, 吴必涛, 等. 桥上 II 型板式无砟轨道纵向力智能分析系统[J]. 华东交通大学学报, 2023, 40(5): 95-105.  
ZHANG P F, TANG Q Q, WU B T, et al. Intelligent analysis system for longitudinal force of CRTS II slab ballastless track on bridge[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2023, 40(5): 95-105.
- [2] 李再伟, 李思宇, 何越磊, 等. 无砟轨道服役状态的移动端监测系统开发应用[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2020, 39(12): 6-12.  
LI Z W, LI S Y, HE Y L, et al. Development and application of mobile terminal monitoring system for ballastless track in service[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University(Natural Science), 2020, 39(12): 6-12.
- [3] LIU X K, ZHANG W H, XIAO J L, et al. Damage mecha-

- nism of broad-narrow joint of CRTS II slab track under temperature rise[J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2019, 23(5): 2126-2135.
- [4] 张泽群, 何越磊, 崔斐, 等. 温度荷载作用下高铁纵连无砟轨道板间接缝界面损伤研究[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(3): 65-71.  
ZHANG Z Q, HE Y L, GAO F, et al. Research on interfaces damage of slabs joints of longitudinal ballastless track of high speed railway under temperature load[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(3): 65-71.
- [5] LI Y, CHEN J J, WANG J X, et al. Study on the interface damage of CRTS II slab track under temperature load[J]. Structures, 2020, 26: 224-236.
- [6] 刘钰, 赵国堂, 曹毅杰, 等. 整体温升作用下纵连板式无砟轨道宽窄接缝损伤演化研究[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(4): 19-27.  
LIU Y, ZHAO G T, CAO Y J, et al. Study on damage evolution of wide and narrow joints in longitudinally connected slab ballastless track under load of overall temperature rise[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45 (4): 19-27.
- [7] ZHANG S F, REN J J, WANG J. Wide juncture cracking effect on the CRTS II slab track[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 405/408: 1824-1829.
- [8] 赵春光, 肖杰灵, 邱银桥, 等. 温升荷载下宽窄接缝损伤对轨道板垂向稳定性的影响研究[J]. 铁道标准设计, 2018, 62(11): 29-34.  
ZHAO C G, XIAO J L, DI Y Q, et al. Study on the effect of wide and narrow joints damages on the vertical stability of track slab under the load of temperature rising[J]. Railway Standard Design, 2018, 62(11): 29-34.
- [9] 金忠凯. 高速铁路CRTS II型板式无砟轨道砂浆层离缝损伤的动力影响及其识别研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
JIN Z K. Dynamic influence and identification of mortar gap damage of CRTS II slab ballastless track in high speed railway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [10] 刘渝, 赵坪锐, 徐天赐, 等. 基于广义柔度曲率信息熵的板式轨道脱空损伤识别[J]. 铁道标准设计, 2024, 68(4): 48-54.  
LIU Y, ZHAO P R, XU T C, et al. Void damage identification of slab track based on generalized flexibility curvature information entropy[J]. Railway Standard Design, 2024, 68(4): 48-54.
- [11] 任娟娟, 杜威, 叶文龙, 等. 基于PSO-SVM的板式无砟轨道CA砂浆脱空损伤识别[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2021, 52(11): 4021-4031.  
REN J J, DU W, YE W L, et al. Contact loss identification of CA mortar in prefabricated slab track based on PSO-SVM[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2021, 52(11): 4021-4031.
- [12] 赵建强. 早期加载养护下砾石骨料混凝土强度损伤及能量耗散研究[J]. 矿业研究与开发, 2023, 43(1): 38-42.  
ZHAO J Q. Study on strength damage and energy dissipation of gangue aggregate concrete under early-age loading and curing[J]. Mining Research and Development, 2023, 43(1): 38-42.
- [13] 尹宏伟, 杭雨晴, 胡文军. 融合异常检测与区域分割的高效K-means聚类算法[J]. 郑州大学学报(工学版), 2024, 45(3): 80-88.  
YIN H W, HANG Y Q, HU W J. Efficient K-means with region segment and outlier detection[J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2024, 45 (3): 80-88.
- [14] 陈航, 何可人, 蒋利炜. 基于DBSCAN的三维点云缺失数据分类系数优化仿真[J]. 计算机仿真, 2024, 41(3): 477-481.  
CHEN H, HE K R, JIANG L W. Optimization and simulation of missing data classification coefficients for 3D point cloud based on DBSCAN[J]. Computer Simulation, 2024, 41(3): 477-481.
- [15] 张佳丽. 基于改进DBSCAN的聚类方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2023.  
ZHANG J L. Research on clustering method based on improved DBSCAN[D]. Changchun: Jilin University, 2023.



**第一作者:** 刘浩然(1997—),男,硕士研究生,研究方向为轨道板服役关键参数融合分析。E-mail: lhr1432295823@126.com。



**通信作者:** 李再伟(1983—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为轨道结构动力分析。E-mail: lzw\_5220964@163.com。

(责任编辑:吴海燕)