

高温天气板式轨道宽窄接缝变形规律试验研究*

蔡理平¹, 陈松^{2,3}, 张斌²

(1. 中国铁路广州局集团有限公司江门工程建设指挥部 江门, 529101)

(2. 华东交通大学山区土木工程安全与韧性全国重点实验室 南昌, 330013)

(3. 江西交通职业技术学院建筑工程学院 南昌, 330013)

摘要 针对我国高速铁路 CRTS II 型板式无砟轨道接缝病害情况开展现场测试, 基于实测数据研究了温度荷载作用下轨道板宽窄接缝处变形与破坏规律。首先, 通过搭建轨道板温度场和宽窄接缝变形监测系统, 实现了对轨道板不同位置温度变化以及接缝处变形情况的实时获取; 其次, 基于特征参量选取支持向量机算法, 建立宽窄接缝变形预测模型, 通过 5 折交叉验证和网格搜索法对惩罚系数和核参数进行优化; 最后, 对高温天气作用下轨道板与宽窄接缝处日相对位移进行预测。试验结果表明: 夏季高温天气条件下, 宽窄接缝变形与层间温度变化量、竖向温度梯度和纵向温差存在较强的相关性; 预测模型具有较强的泛化能力, 宽窄接缝变形值预测相对误差分别降低至 9.565% 和 4.524%; 通过实测数据验证了模型的有效性, 预测精度分别达到 93.641% 和 97.669%, 可为避免宽窄接缝病害加剧及其他附加病害的产生提供预警, 满足工程实践的需要。

关键词 板式轨道; 接缝病害; 温度荷载; 相对位移; 支持向量机

中图分类号 U213.2+42; TH82

引言

CRTS II 板式无砟轨道因结构稳定性高、支承刚度好等特点, 被广泛应用于我国高速铁路。轨道板之间以 6 根纵向预应力钢筋进行连接, 接缝处采用现场浇筑的混凝土形式, 其服役性能直接影响轨道结构的平顺性与耐久性。

对于纵连板式无砟轨道, 轨道板所承受的温度荷载直接影响无砟轨道各结构层的应力与变形。轨道板在铺设施工过程中, 由于接缝位置后浇的混凝土体积小, 特别是狭窄的接缝难以压实, 因此接缝处混凝土成为纵向轨道板的薄弱环节^[1-3]。实测数据表明, 夏季高温天气情况下, 轨道板内部的最高温度可达 50 °C 以上。在温度荷载的作用下, 接缝处混凝土承受巨大的温度应力, 成为接缝处发生病害的主要原因之一^[4-6]。

作为轨道板纵向连接的关键点, 板间接缝在损坏发生后削弱了轨道板之间的纵向连接, 影响了线路的平顺度, 直接威胁到行车安全。为了对温度荷载作用下轨道板接缝位置的破坏机理和变形规律进行研究, 学者们开展了大量工作^[7-12]。高亮等^[13]建立

了路基上 CRTS II 型板式无砟轨道无缝线路计算模型, 研究持续高温荷载作用下宽窄接缝破损对无缝线路受力和变形的影响。张志超等^[14]通过建立温度荷载作用下桥上 CRTS II 型板式无砟轨道结构体系各部件纵向相互作用分析模型, 预测各结构层力和变形的影响。目前, 分析轨道板温度变形规律时多采用有限元方法^[15], 然而实际过程中宽窄接缝位置变形特征各异, 且计算建模时存在参数选取局限性与边界条件难以有效模拟等问题。因此, 基于运营线路的实测数据, 对轨道板内部温度场与接缝处变形发展规律开展研究具有十分重要的意义。

笔者选取华东地区某客运专线 CRTS II 板式无砟轨道接缝病害较为严重的地段, 搭建智能化轨道板关键参数监测终端, 采用现场实测的方式, 对轨道板与宽窄接缝相对位移和轨道板内部温度分布等参数进行研究, 分析了温度荷载作用下板间接缝相对位移规律, 以为高速铁路养护维修提供参考。

1 监测系统搭建

本次监测选取时间为 2019 年 8 月 1 日至 9 月 5

* 国家自然科学基金资助项目(52468062); 江西省重点研发计划“揭榜挂帅”资助项目(20223BBE51009); 中国铁路广州局集团科研资助项目(2021K093-Z)

收稿日期: 2023-04-03; 修回日期: 2023-05-21

日,为华东地区夏季高温天气。针对实际养护维修条件与运营要求,搭建轨道板温度场与接缝相对位移的测试设备,对运营线路CRTS II型轨道板关键参数进行实时在线监测。监测系统主要是利用光伏控制逆变一体机将太阳能进行回收并转化到锂电池内,进而对系统进行供电,利用4G网络将监测数据实时传送至后台服务监控中心,通过LabVIEW平台编写系统软件进行后端数据分析及处理,实现远程在线登录、查看与分析功能。

1.1 系统框架

系统主要由前端智能采集硬件、无线传输模块及后端监测与分析终端三部分构成。利用太阳能电池板为整个监测系统供电,将太阳能电池组安装于距离线路合适位置的安全区域,保证列车运行安全。通过设计主控系统、能源管理系统及4G传输模块实现对轨道板温度场与相对位移的远程采集、发送及存储功能,并可通过后台用户终端和数据库文件,对数据进行实时监控与历史调用。测试系统框架如图1所示。

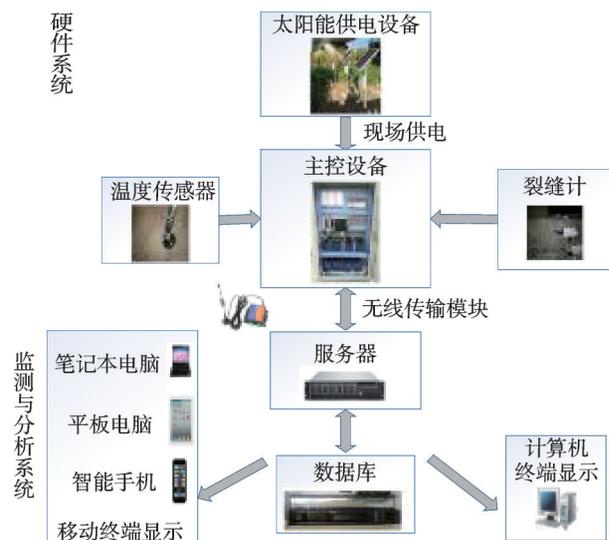


图1 测试系统框架

Fig.1 Test system framework

1.2 传感器安装

结合现场实际情况,选择接缝位置已出现破损的轨道板进行监测,其宽接缝处出现接缝与轨道板的离缝,窄接缝处出现明显的掉块现象。考虑到传感器尺寸与防水外壳的布置情况,将裂缝计分别布置于距离轨道板上表面50 mm与180 mm的宽、窄接缝位置,用于监测轨道板与接缝混凝土的相对位

移。所布置的裂缝计在列车荷载作用下,振动不产生输出,仅在被测接缝处发生开合或混凝土表面产生应变时才有输出。温度荷载作用下轨道板与接缝处产生相对位移时,裂缝计受拉位移输出为正,受压位移输出为负,其精度为0.01 mm,采样时间间隔为0.5 h。

沿线路中线在轨道板纵向中部(A点)和端部(B点)分别打孔埋入温度传感器,用于监测轨道板内部不同位置的实时温度。温度传感器与裂缝计具体布置如图2所示。轨道板厚度为200 mm,不同孔内温度传感器分别布置于距离板上表面50 mm与180 mm位置处,与裂缝计距离轨道板上表面的距离相同。温度传感器精度为0.01 °C,将采样时钟调整与裂缝计一致,采样时间间隔为0.5 h。

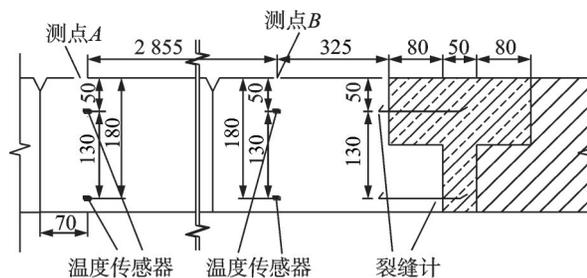


图2 温度传感器与裂缝计具体布置(单位:mm)

Fig.2 Specific arrangement of temperature sensor and crack meter(unit:mm)

2 测试数据分析

2.1 数据分析

将所监测的数据分为训练样本与测试样本,其中:8月1日至8月31日的监测数据为训练样本,用于分析和确定温度荷载作用下接缝位置处的相对位移规律,建立和优化接缝相对位移预测模型;9月1日至9月5日的监测数据为测试样本,用于分析和评价所建立模型的预测精度。

2.1.1 整体温度

轨道板内部整体温度变化将产生纵向温度应力,尤其在夏季高温天气下,内部不同位置与轨道板锁定时产生较大温差,进而产生巨大温度应力,加剧了轨道板挠曲变形程度,是纵连轨道板宽窄接缝破坏的主要原因之一。

笔者在分析不同处深度整体温度时,取板中、板端两孔内同一深度的温度平均值作为本深度位置的整体温度,即宽接缝处整体温度取两孔内距板表面50 mm深度处温度的平均值,窄接缝处整体温度取

两孔内距板表面180 mm深度处温度的平均值。统计8月期间宽、窄接缝处的整体温度分别如图3、4所示。

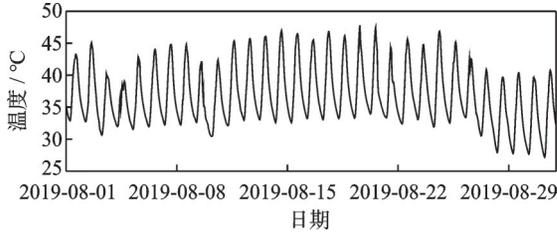


图3 宽接缝处整体温度

Fig.3 Global temperature at wide joint

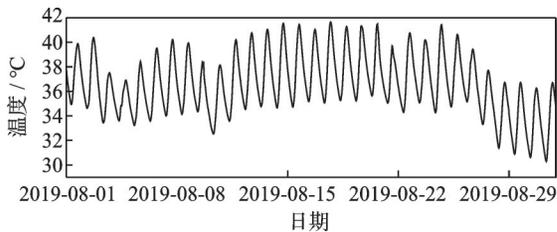


图4 窄接缝处整体温度

Fig.4 Global temperature at narrow joint

此外,宽接缝处每日整体温度最大值出现于13:00~15:00,整体温度最小值出现于4:30~6:30。窄接缝处与轨道表面距离大,受混凝土导热性影响,极值出现的时刻约延后2 h。监测期间,宽接缝处的整体温度变化范围为26.78~48.78℃,窄接缝处整体温度变化范围为29.78~42.79℃,可知距离轨道板表面越近,热交换越明显,温度变化范围越大。

2.1.2 竖向温度梯度

置于自然环境中的轨道板结构,受自然界气温的变化和日辐射等作用,在混凝土结构中形成较大的竖向温度梯度。竖向温度梯度不仅影响连续轨道结构的稳定性,也会加速轨道板接缝位置处的离缝与掉块的产生。

竖向温度梯度可根据宽窄接缝不同深度位置处的温度实测值来计算,其公式为

$$G = \frac{T_K - T_Z}{d} \quad (1)$$

其中: G 为温度梯度; T_K 为宽接缝处整体温度; T_Z 为窄接缝处整体温度; d 为宽窄接缝处温度传感器的间距,本研究中为0.13 m。

8月期间轨道板的竖向温度梯度如图5所示。分析可知,夏季高温天气情况下,竖向温度梯度在-32.3~58.62℃/m范围内呈昼升夜降的上下周期性波动趋势。

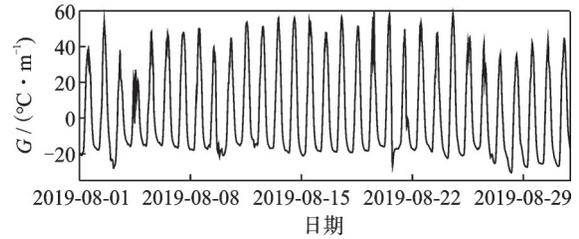


图5 竖向温度梯度

Fig.5 Vertical temperature gradient

2.1.3 纵向温差

轨道板内部不同位置配筋情况存在差异,同一块轨道板沿纵向不同位置温度亦存在差异,导致板中与板端相同深度处出现纵向温差。计算宽、窄接缝深度纵向温差分别如图6、7所示。

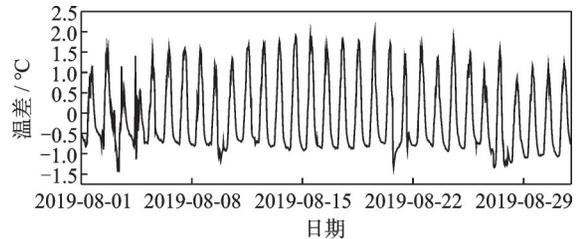


图6 宽接缝深度纵向温差

Fig.6 Longitudinal temperature difference of wide joint depth

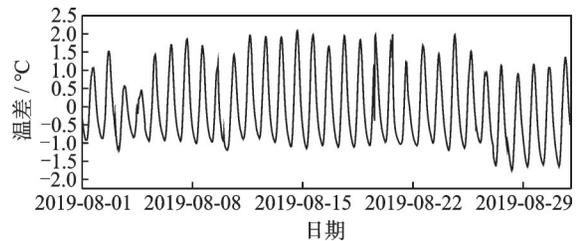


图7 窄接缝深度纵向温差

Fig.7 Longitudinal temperature difference of narrow joint depth

轨道板纵向温差虽然相比于竖向温差较小,但是周期性的纵向温差会加快轨道板的翘曲与变形,界面产生应力大于接缝处的黏结强度后,也会造成轨道板与接缝位置处产生离缝等病害。

2.1.4 接缝相对位移

宽窄接缝处每日相对位移最大正值出现于3:00~5:00,对应环境温度最低时刻,在风荷载的作用下,接缝处混凝土达到受拉极值。接缝处每日相对位移最小负值出现于12:00~14:00,对应环境温度最高时刻,在太阳辐射等因素的共同作用下,接缝处混凝土达到受压极值。8月期间宽、窄接缝处相对位移分别如图8、9所示。

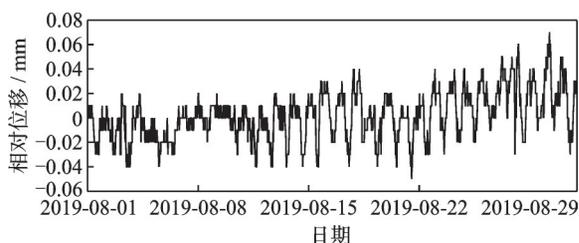


图 8 宽接缝处相对位移

Fig.8 Relative displacement at wide joint

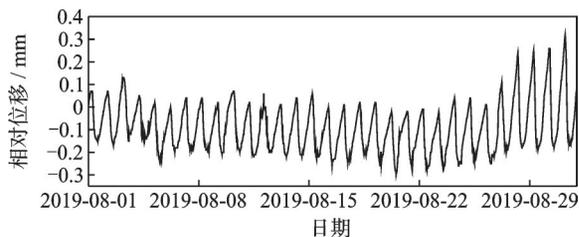


图 9 窄接缝处相对位移

Fig.9 Relative displacement at narrow joint

尽管窄接缝处整体温度变化小于宽接缝处,但是监测期间窄接缝处的相对位移量幅值大于宽接缝处的幅值。这是因为轨道板在设计时为削弱其热胀冷缩的影响,会在预制轨道板上表面设置预设假缝,将板轨道的上表面分隔成离散“宽轨枕”单元,使得在温度荷载作用下,上部的宽接缝处相对位移值小于下部的窄接缝处的相对值,这也与现场所发现的窄接缝位置处的病害情况更为严重相验证。

2.2 建模分析参数选取

轨道板内部温度特性直接影响到接缝处的相对位移变化规律,当接缝处混凝土达到破坏极限出现病害时,将直接影响到线路的平顺性。

为了分析轨道板宽窄接缝位置处相对位移规律,笔者统计了监测期间某日接缝处整体温度、竖向温度梯度和纵向温差与接缝处的相对位移量不同时刻的对应关系,得到宽、窄接缝相对位移与特征参数的关系分别如图 10、11 所示。分析可知,轨道板接缝处相对位移受到轨道板整体温度、竖向温度梯度和纵向温差的影响较为明显,可作为特征参量用于建立宽窄接缝相对位移预测模型。不同温度特征参数与宽窄接缝相关性检验结果如表 1 所示。

对比影响轨道板间接缝处相对位移的特征参数可知:距离轨道板表面不同深度的整体温度的关联性最强,高于竖向温度梯度与纵向温差的关联性;3 个特征参数与窄接缝相对位移的关联性更强,这与宽接缝位置处更容易受到气象参数的影响有关。

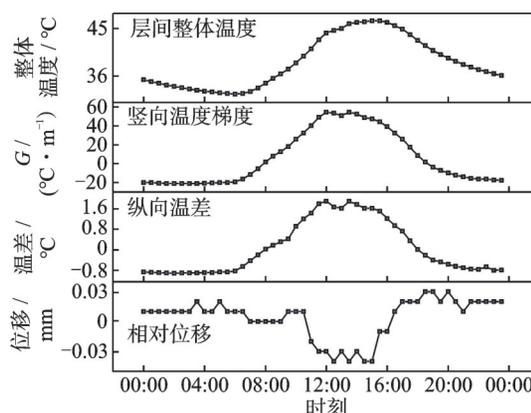


图 10 宽接缝相对位移与特征参数的关系

Fig.10 Relationship between relative displacement of wide joint and characteristic parameters

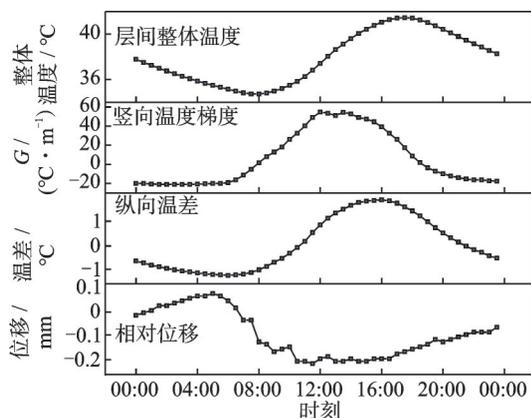


图 11 窄接缝相对位移与特征参数的关系

Fig.11 Relationship between relative displacement of narrow joint and characteristic parameters

表 1 不同温度特征参数与宽窄接缝相关性检验结果

Tab.1 Correlation test between different temperature characteristic parameters and wide-narrow joint

| 特征参数 | 相关系数 | |
|--------|--------|--------|
| | 宽接缝 | 窄接缝 |
| 整体温度 | -0.894 | -0.965 |
| 竖向温度梯度 | -0.664 | -0.698 |
| 纵向温差 | -0.438 | -0.770 |

整体上看,所选取的 3 个特征参数与接缝处相对位移相关性明显,通过分析这些特征参数,可以对宽窄接缝的相对位移量进行较好的表征与预测。

3 接缝相对位移预测模型

为了实现通过轨道板内部温度分布对宽窄接缝相对位移量进行精确预测,需要对分析的关键参数进行优化。选取最佳的惩罚系数 C 与最优核参数 $\gamma(g)$,建立最优的支持向量回归机(support vector

regression, 简称 SVR) 预测模型。基于 SVR 的接缝相对位移预测流程如图 12 所示。

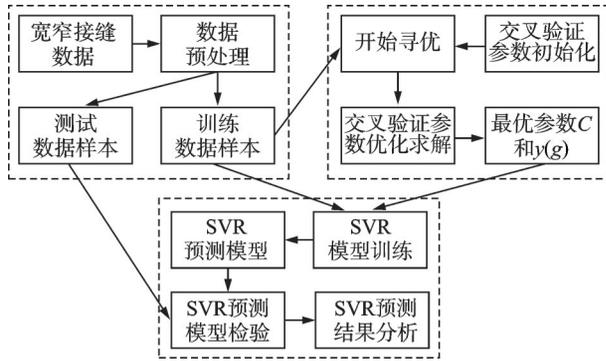


图 12 基于 SVR 的接缝相对位移预测流程

Fig.12 Prediction process of joint relative displacement based on SVR

3.1 数据处理

通过上述分析,选取整体温度、竖向温度梯度与纵向温差 3 个特征参量来预测板间接缝相对位移。预测模型建立前,需要将监测的原始数据进行归一化处理至 $[0,1]$ 区间,以消除输入变量之间由于量纲和数值大小的差异而造成的影响。关键参数归一化处理后作为宽窄接缝相对位移预测模型的输入值,归一化公式为

$$y = (x - a) / (b - a) \quad (2)$$

其中: x 为归一化前的关键参数原始数据; y 为归一化后的数据; a 为原始数据最小值; b 为原始数据最大值。

3.2 模型参数优化

选取高斯核函数建立接缝相对位移的预测模型,需要对参数惩罚系数 C 和核函数参数 $\gamma(g)$ 进行优化,本研究采用 5 折交叉验证法进行接缝相对位移预测模型参数优化。8 月期间监测数据作为训练测试样本,训练样本集划分为均等的 5 个不同子样本,进行 5 次训练和测试。

在参数寻优过程中将 C 和 $\gamma(g)$ 的取值范围均设定为 $[2^{-5}, 2^5]$, 步进均为 0.1。对于宽接缝处相对位移预测模型,交叉验证后得到最优惩罚系数 $C=30.443$, 最优核参数 $\gamma(g)=0.287$; 对于窄接缝处相对位移预测模型,交叉验证后得到 $C=6.964$, $\gamma(g)=0.031$ 。

3.3 模型验证与结果分析

利用最优参数所建立的预测模型对训练样本中

宽窄接缝处的位移量进行预测,从训练样本中随机选取 100 个用于模型精度的验证。宽、窄接缝处预测绝对误差分别如图 13、14 所示。

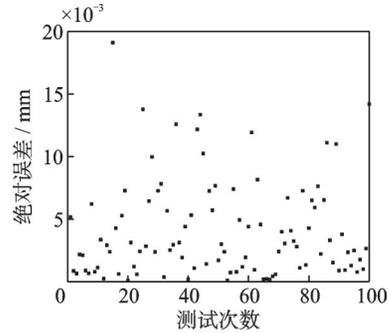


图 13 宽接缝处预测绝对误差

Fig.13 Prediction of absolute error at wide joint

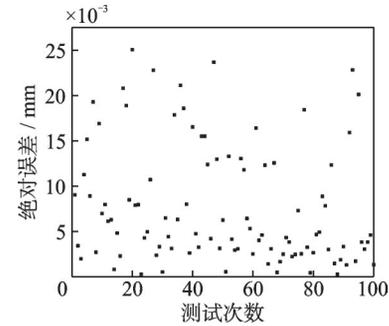


图 14 窄接缝处预测绝对误差

Fig.14 Prediction of absolute error at narrow joint

分析可知:宽接缝的相对位移回归预测值与实测值吻合度较高,在 100 个训练样本中平均误差量仅为 4.065×10^{-3} mm, 平均相对误差为 9.565%;窄接缝的相对位移回归预测值与实测值吻合度高于宽接缝,在 100 个预测样本中平均误差量为 3.653×10^{-3} mm, 平均相对误差为 4.524%。因此,通过上述 3 个特征向量构建的支持向量机回归模型的预测效果良好,可以通过不同深度整体温度、纵向温差与竖向温度梯度较为准确地预测出宽窄接缝位置处的相对位移量。

由于宽接缝位置距离轨道板上表面较近,且预设假缝的存在,其层间热传递规律更为复杂,更容易受到太阳辐射、风速等参数的影响,因此宽接缝处预测效果略低于窄接缝处的预测效果。

3.4 接缝处日相对位移幅值预测

轨道板接缝处的相对位移幅值直接影响到接缝处病害的发展规律,基于轨道板内温度分布特性实现对接缝处日相对位移幅值进行预测,可为相关部门的养护维修提供参考。基于所建立的接缝相对位

移预测模型,选取2019年9月1日至9月5日接缝处实测每日相对位移最大和最小值与预测值进行了对比。宽窄接缝预测结果分析如图15所示。

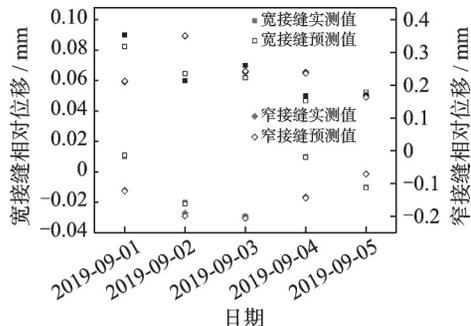


图15 宽窄接缝预测结果分析

Fig.15 Analysis of prediction results at wide and narrow joints

通过接缝日相对位移幅值的预测结果可知:宽接缝位置的平均误差为 2.940×10^{-3} mm,平均预测精度达到93.641%;窄接缝位置的平均误差为 4.153×10^{-3} mm,平均预测精度达到97.669%。所建立的支持向量回归机模型可以对所测位置处宽窄接缝的变形进行预估和分析。若增加监测样本数量,并考虑太阳辐射量与风速等密切影响结构表面温度的环境参数,可进一步提高相对位移预估的精度。

4 结 论

1) 随着轨道板不同深度整体温度、竖向温度梯度和纵向正温度梯度的增加,宽窄接缝变形尺寸增大,反之亦然。通过3个特征参数作为分析指标,宽窄接缝的相对位移量可以得到较好的表征与预测。

2) 基于实测数据建立夏季高温天气下的支持向量回归机预测模型,通过轨道板内部温度分布可以实现对宽窄接缝相对位移量的精确预测,宽窄接缝相对位移的相对误差分别为9.565%和4.524%。

3) 基于轨道板内的温度分布数据对接缝处每日相对位移幅值进行预测,宽窄接缝的日相对位移幅值的预测精度分别达93.641%和97.669%,可为相关部门的养护维修提供参考。

4) 本研究所提出的结论是依据华东地区夏季高温条件下现场试验实测值提出的,对于其他地区而言,由于区域气象条件不同,运用相关公式时应进行一定的修正。

参 考 文 献

- [1] 卢春房. 轨道工程[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2015: 245-250.
- [2] 赵国堂, 刘钰. CRTS II型板式无砟轨道结构层间离缝机理研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(7): 117-126.
ZHAO Guotang, LIU Yu. Mechanism analysis of delamination of CRTS II slab ballastless track structure [J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(7): 117-126. (in Chinese)
- [3] 雷拓, 郑毅飞, 闫玉康, 等. 基于移动单元法的高速铁路轨道不平顺特性研究[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(1): 88-93, 104.
LEI Tuo, ZHENG Yifei, YAN Yukang, et al. Characteristics analysis on dynamic irregularity of high speed railway based on moving element method [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(1): 88-93, 104. (in Chinese)
- [4] 黄伊琛, 高亮, 钟阳龙, 等. 夏季极端日温作用下无砟轨道板端上拱变形演化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 599-609.
HUANG Yichen, GAO Liang, ZHONG Yanglong, et al. Deformation evolution of upward arch of ballastless track slab at extreme daily temperature in summer [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(2): 599-609. (in Chinese)
- [5] 林超. 持续高温对CRTS II型板式无砟轨道温度场影响的试验研究[J]. 铁道建筑, 2016, 56(5): 15-18.
LIN Chao. Experimental study on influence of sustained high temperature on temperature field of CRTS II slab-type ballastless track [J]. Railway Engineering, 2016, 56(5): 15-18. (in Chinese)
- [6] 高建敏, 金忠凯, 赖思成. 温度梯度荷载对CRTS II型板式轨道层间损伤影响[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(1): 25-32.
GAO Jianmin, JIN Zhongkai, LAI Sicheng. Effect of temperature gradient load on interlayer damage of CRTS II slab track [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2022, 39(1): 25-32. (in Chinese)
- [7] 王宁波, 傅朝丰, 赵雨森, 等. 基于应变感知的桥梁梁端转角高精度测试[J]. 振动、测试与诊断, 2022, 42(1): 82-88.
WANG Ningbo, FU Zhaofeng, ZHAO Yusen, et al. Research on high precision measurement of beam end rotating angle based on strain perception [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2022, 42(1): 82-88. (in Chinese)
- [8] 楼梁伟, 谢永江, 辛学忠, 等. CRTS II型板式无砟轨道轨道板与宽接缝界面开裂研究[J]. 铁道建筑,

- 2015(1): 98-101.
- LOU Liangwei, XIE Yongjiang, XIN Xuezhong, et al. Study on crack in interface between track slab and wide joint for CRTS II slab-type ballastless track[J]. Railway Engineering, 2015(1): 98-101.(in Chinese)
- [9] 欧祖敏, 孙璐. 高速铁路无砟轨道板非线性温度效应简化计算方法[J]. 铁道学报, 2015(6): 79-87.
- OU Zumin, SUN Lu. Simplified calculation method on nonlinear temperature effects of high-speed railway ballastless track slab[J]. Journal of the China Railway Society, 2015(6): 79-87.(in Chinese)
- [10] 赵磊, 孙璐, 孙伟, 等. 均匀降温下CRTS II型高速铁路轨道板温度应力分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2017, 38(11): 1664-1668.
- ZHAO Lei, SUN Lu, SUN Wei, et al. Thermal stress analysis of CRTS II track-slab of high-speed railway under a uniform cooling condition[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2017, 38(11): 1664-1668.(in Chinese)
- [11] 赵林, 刘学毅, 赵华卫, 等. CRTS II型板式轨道宽接缝开裂对轨道受力的影响分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(1): 9-14.
- ZHAO Lin, LIU Xueyi, ZHAO Huawei, et al. The study of influence on track stress caused by the cracking at wide juncture of CRTS II prefabricated slab track [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(1): 9-14.(in Chinese)
- [12] 赵春光, 肖杰灵, 邸银桥, 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 Chunguang, XIAO Jieling, DI Yinqiao, 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.(in Chinese)
- [13] 高亮, 刘亚男, 钟阳龙, 等. 宽窄接缝破损对CRTS II型板式无砟轨道无缝线路受力的影响[J]. 铁道建筑, 2016, 56(5): 58-63.
- GAO Liang, LIU Yanan, ZHONG Yanglong, et al. Influence of damage of wide and narrow joints on mechanical performance of CRTS II slab-type ballastless track CWR[J]. Railway Engineering, 2016, 56(5): 58-63.(in Chinese)
- [14] 张志超, 曾志平, 元强, 等. 温度荷载作用下桥上CRTS II型板式轨道纵向力学特性研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(5): 982-989.
- ZHANG Zhichao, ZENG Zhiping, YUAN Qiang, et al. Study on longitudinal mechanical characteristics of CRTS II slab track on bridge under the temperature load [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(5): 982-989.(in Chinese)
- [15] 许振楠, 卜建清, 张吉仁. 温度梯度荷载作用下CRTS II型轨道板变形差异分析[J]. 高速铁路技术, 2020, 11(4): 65-69.
- XU Zhennan, BU Jianqing, ZHANG Jiren. Analysis of deformation difference of CRTS II track slab under temperature gradient load[J]. High Speed Railway Technology, 2020, 11(4): 65-69.(in Chinese)



第一作者简介:蔡理平,男,1986年11月生,硕士、高级工程师。主要研究方向为铁路工程建设管理、养护维修及信息化。曾发表《轮轨动荷载作用下全封闭声屏障的振动分析》(《中国铁路》2017年第4期)等论文。

E-mail:1476148498@qq.com

通信作者简介:张斌,男,1985年1月生,博士、副教授。主要研究方向为轨道结构动力学。

E-mail:zhangbin010@126.com