

文章编号:1005-0523(2022)03-0031-06



# 高温季节轨道板温度模型的热流时延效应分析

方若望<sup>1</sup>,何越磊<sup>1</sup>,李再伟<sup>1</sup>,路宏遥<sup>1</sup>,赵彦旭<sup>2</sup>

(1. 上海工程技术大学城市轨道交通学院,上海 201620;2. 中铁二十一局集团有限公司,甘肃 兰州 730070)

**摘要:**为了准确反映我国东部地区某线路 CRTS II 型轨道板内温度变化受到外界环境因素及自身混凝土性质影响,考虑了热压导致不同深度热流存在的时延,运用频谱方法,研究了轨道板不同深度温度间的关系,考虑热力学理论建立了轨道板混凝土不同深度温度计算模型,并对该地区轨道板的日照实时温度场和竖向温度梯度进行研究。结果表明:同种介质中,由温度梯度引起的热流之间的延迟时间与传播距离成正比;轨道板不同深度温度序列相对表层,振幅以指数函数衰减,相位存在线性滞后;热量在轨道板中传递时,每深入 50 mm,轨道板温度变化延迟时间约 1.02 h;基于热流时延轨道板温度计算模型的平均相对误差为 1.9%~2.5%,可靠度为 92.85%~96.53%。

**关键词:**CRTS II 型轨道板;热力学分析;温度梯度;频谱分析;时间延迟

中图分类号:U213.2

文献标志码:A

本文引用格式:方若望,何越磊,李再伟,等. 高温季节轨道板温度模型的热流时延效应分析[J]. 华东交通大学学报,2022,39(3):31-36.

## Analysis on Heat Flux Delay Effect of Track Slab Temperature Model in High Temperature Season

Fang Ruowang<sup>1</sup>, He Yuelei<sup>1</sup>, Li Zaiwei<sup>1</sup>, Lu Hongyao<sup>1</sup>, Zhao Yanxu<sup>2</sup>

(1. School of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. China Railway 21st Bureau Group Co., Ltd., Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In order to accurately reflect the influence of external environmental factors and concrete properties on the temperature change in CRTS II track slab of a line in eastern China, considering the time delay of heat flow at different depths caused by hot pressing, the relationship between temperature at different depths of track slab is studied by using the spectrum method. Referring to the thermodynamic theory, the calculation model of temperature at different depths of track slab concrete is established, and the sunshine real-time temperature field and vertical temperature gradient of track slab in this region are studied. The results show that the delay time of heat flow caused by temperature gradient is proportional to the propagation distance in the same medium. The temperature series at different depths of the track slab are relative to the surface layer, and the amplitude decays with an exponential function, and the slab has a linear lag. During the heat transfer process in the track slab, the track slab temperature change delay time is about 1.02 h with each depth of 50 mm. The average relative error of the temperature calculation model based on the heat flow delay track slab is between 1.9% and 2.5%, and the reliability is between 92.85% and 96.53%.

收稿日期:2021-09-24

基金项目:国家自然科学基金项目(51978393);甘肃省科技计划资助项目(19ZD2FA001);中国铁建科技研发项目(2019-B08)

**Key words:** CRTS II track slab; thermodynamic analysis; temperature gradient; spectral analysis; time delay

**Citation format:** FANG R W, HE Y L, LI Z W, et al. Analysis on heat flux delay effect of track slab temperature model in high temperature season[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(3): 31–36.

CRTS II型板式无砟轨道作为我国高速铁路重要组成结构,其混凝土结构破坏与温度效应有重要关系<sup>[1]</sup>。温度作用力的剧烈变化会使轨道板产生诸多病害,常见的有裂缝、挤压掉块和翘曲变形<sup>[2-3]</sup>。轨道结构在长期的温度荷载变化下会产生不可逆转的损伤,其中由于纵向的伸缩变形将导致宽窄接缝区域破损掉块<sup>[4]</sup>,轨道结构整体升温对轨道板与砂浆层界面开裂影响较大<sup>[5]</sup>,竖向温度梯度是引起砂浆层界面离缝的主要原因。诸多研究探讨了温度梯度对无砟轨道的结构特性影响。钟垚等<sup>[6]</sup>研究高温条件及最高设计正温度梯度下,轨道板与砂浆层之间仍会产生层间离缝且靠近板角位置更为严重。Song等<sup>[7]</sup>提出了CRTS II板式无砟轨道结构热变形和界面分离的分析方法,揭示了CRTS II板式无砟轨道结构在自然环境条件下的温度场、热变形、界面损伤和界面分离的特点。刘钰等<sup>[8]</sup>指出考虑热效应引起的应力是正确设计结构的必要环节,提出了一种基于有限元方法的混凝土结构在时、空变温度荷载作用下应力应变分析的数值方法。现有的大部分研究<sup>[9-10]</sup>默认热传播速度无限大,系统时刻处于平衡状态。但在实际问题中,从状态发生改变到建立平衡存在时间差,即由于温度差异导致的热传递具有延迟效应。本文以华东某线路CRTS II型板式无砟轨道为例,研究环境温度、太阳辐射等外界因素与轨道板自身内因对轨道板内部温度分布的影响。建立基于热流时延的轨道板系统温度模型,为后续在不破坏轨道结构的前提下评估轨道结构受力变形和维护提供理论依据。包括指导施工作业,防止因破坏轨道结构产生巨大的温度梯度及应力。

## 1 无砟轨道板内温度分析

白天,轨道板表面由于外界环境因素升温,并通过分子热传导向深处传递热量;夜间,轨道板表面因与自然环境热交换而首先冷却,热量从板深处向上输送。轨道板温度的变化首先从表面开始,逐渐影响深层板温度的变化,其变化幅度随深度

的增加而减少。轨道板中热量传递的大小与快慢还与板自身特性有关。在自然科学土壤研究中<sup>[11]</sup>,若土壤是均质的,其深处的传热仅通过分子的热传导,而且土壤表面温度随时间有周期性变化,则土壤内温度的变化遵循傅里叶定律:热量传递愈深,则温度周期变化的振幅衰减的越多;由温度梯度引起的热流之间的延迟时间与传播距离成正比。

上述理念用公式展现,将其应用到轨道板温度变化中,假设轨道板中混凝土是均质的,初步得到轨道板板内温度简易关系,即轨道板内部温度由表层温度曲线经过幅值变化和平移所得,结果如下

$$T(t+\tau, d) = \gamma(T_{\text{表}} + \bar{T}_{\text{表}}) + \bar{T}_d \quad (1)$$

式中: $T$ 为某一深度轨道板的温度,K; $\tau$ 为轨道板不同深度温度变化与轨道板表层的时间差,h; $d$ 为深度,m; $\gamma$ 为不同深度温度幅值与轨道板表层的比值; $T_{\text{表}}$ 为轨道板表层温度,K; $\bar{T}_{\text{表}}$ 为表层平均温度,K; $\bar{T}_d$ 为不同深度的平均温度,K。

## 2 热力学板温求解模型

式(1)可大致反映出轨道板内温度与板表的对应关系。但是作为轨道板结构与外界环境的交界部位,轨道板表层温度受外界环境因素变化更为敏感,且存在突变的情形。为了减少由于仪器自身原因或者记录到的环境因素偶发变化带来的影响,本文进一步考虑热力学因素加入修正项来减少误差。

### 2.1 太阳辐射

对监测的太阳辐射数据进行如下处理:先通过3次样条插值运算丰富数据量,然后采用复化Simpson公式对时间段求积分。对前2h吸收的太阳辐射求均值,作为该时间段影响轨道板温度变化的太阳辐射量。将区间 $[a, b]$ 分成 $n$ 个子区间 $[x_j, x_{j+1}]$ ( $j=0, 1, \dots, n-1$ ),第 $j$ 个子区间的中点为 $x_{j+0.5}$ ,子区间长度为 $h$ 。

应用复化Simpson公式的太阳辐射求解公式如下

$$q_1 = \frac{h}{24} \left( f(a) + f(b) + 2 \sum_{j=1}^{n-1} f(x_j) + 4 \sum_{j=0}^{n-1} f(x_{j+0.5}) \right) \quad (2)$$

式中: $f(a)$ 为2 h前的时刻测得的太阳辐射值, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $f(b)$ 为该时刻测得的太阳辐射值, $\text{W}/\text{m}^2$ 。

## 2.2 热对流

热对流指的是在温差的作用下,由流体的运动所引起的热量传递。通常为了方便起见,工程上采用牛顿冷却定律<sup>[12]</sup>来计算混凝土表面与空气的对流换热密度,计算式为

$$q_2 = h_c (T_s - T_u) \quad (3)$$

式中: $h_c$ 为对流传热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ,它取决于流体和固体表面的固有特性以及流体的速度分布,固体的温度分布; $T_s, T_u$ 分别为轨道板表面温度和空气温度, $\text{K}$ 。本文计算混凝土结构表面的对流换热系数采用 Saetta 等<sup>[13]</sup>给出的对流换热公式,计算式为

$$h_c = 5.6 + 4.0 v \quad (v < 5 \text{ m/s}) \quad (4)$$

$$h_c = 7.15 v^{0.78} \quad (v \geq 5 \text{ m/s}) \quad (5)$$

式中: $v$ 为风速, $\text{m}/\text{s}$ 。

## 2.3 热辐射

任何具有温度的物体,其热能将通过电磁波的形式向外发射能量,这种现象称之为热辐射。本文采用式(6)对轨道板混凝土表面热辐射能量密度进行计算

$$q_3 = \varepsilon \sigma [T_s^4 - T_u^4] \quad (6)$$

式中: $\varepsilon$ 为表面黑度,对于混凝土可取0.94; $\sigma$ 是黑体辐射常数,为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

## 2.4 热流板温模型

轨道板表层净吸收的热流密度如下

$$q = q_1 - q_2 - q_3 \quad (7)$$

式中: $q$ 为净热流密度,表示单位时间单位面积通过的热量, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $q_1$ 是太阳辐射密度, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $q_2$ 是热对流密度, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $q_3$ 是热辐射密度, $\text{W}/\text{m}^2$ 。

以轨道板表层吸收的净能量所能转化的温度量减去实际轨道板表层温度的变化量,剩余部分作为修正项来减小误差。

将轨道板温度场计算假设为一维热传导问题,则轨道板内部温度可大致看成是轨道板表层温度曲线经过幅值放缩,相位延后所得。由式(1)结合热传递理论下的修正项,可得出轨道板板内不同深度温度计算公式如下

$$T(t+\tau, d) = \gamma (T_{\text{表}} + \bar{T}_{\text{表}}) + \bar{T}_{\text{表}} + \gamma (\beta q - \Delta T_{\text{表}}) \quad (8)$$

式中: $\beta$ 为能量转化为温度的转化系数,取0.004; $\Delta T_{\text{表}}$ 为表层温度实测变化值, $\text{K}$ 。

以式(8)为核心计算公式,构成最终轨道板内不同深度温度计算模型。区别于温度拟合预测<sup>[14]</sup>,考虑了实时环境因素对轨道板内温度带来的影响,更有理论依据。对于不同地区的轨道板内温度变化规律,其幅值衰减 $\gamma$ 与延迟时间 $\tau$ 有所不同。

## 3 热流时延模型计算

以华东地区某高速铁路2018年7月26日到8月25日期间测得的数据作为试验计算验证依据,数据内容包括风速、太阳辐射、环境温度、轨道板表层及不同深度温度等,数据收集间隔为0.5 h。监测的板温数据为路基轨道板板中位置,具体位置如图1所示。

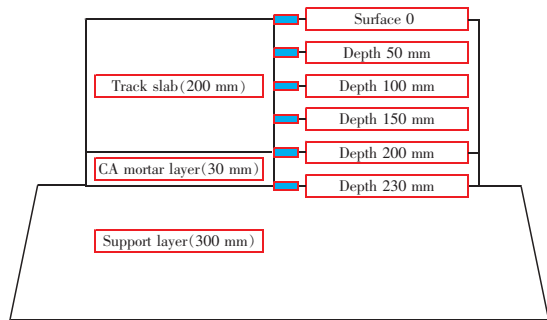


图1 轨道板温度监测位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of track plate temperature monitoring position

### 3.1 实测轨道板温度曲线

实测轨道板温度曲线验证了热流存在时延,并且幅值衰减的理论(图2)。

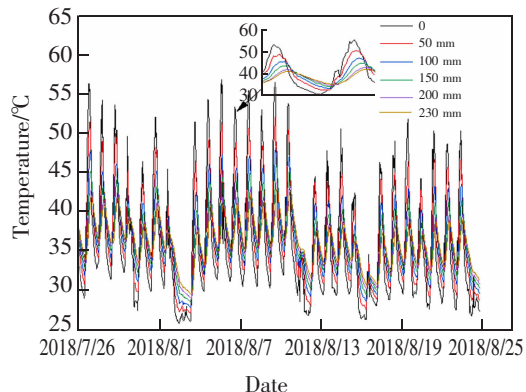


图2 轨道板内不同深度温度曲线

Fig.2 Temperature curves of different depths in track slab

### 3.2 轨道板不同深度温度频域曲线

为了得出轨道板表层与不同深度温度曲线关系的参数,采用频谱分析的方法<sup>[15]</sup>,求出相应的 $\tau, \gamma$ 与深度 $d$ 的关系。将测得的温度数据傅里叶变换后,得到如图3(a)所示频域特性。轨道板表层与不同深度温度频域特性相似,仅在频率为 $1.158 \times 10^{-5}$  Hz时,温度峰值有较大区别,对应的周期为23.99 h。其余频率峰值相较于前者可忽略不计,本文仅考虑最大处峰值所蕴含的信息。若记表层温度峰值为1,得到各深度峰值的拟合函数为

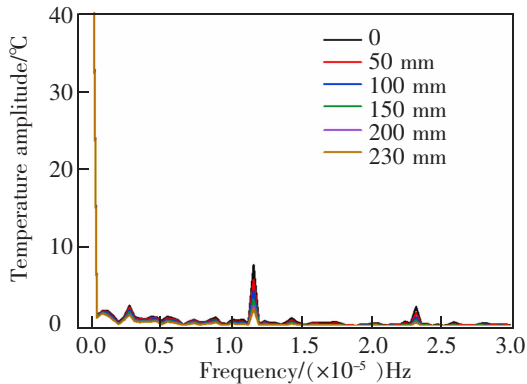
$$\gamma = 0.99 \exp(-5.37d) \quad (9)$$

式中: $\gamma$ 为轨道板各深度处温度峰值相对表层的比值; $d$ 为深度,m。由式(9)可得出轨道板内各处温度幅值随深度呈指数衰减。

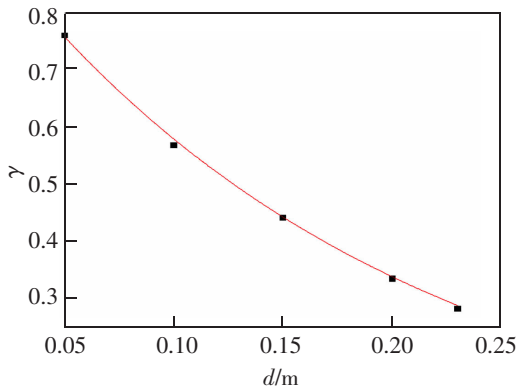
若记表层温度峰值初始相位为0,得到各深度温度相位的拟合函数为

$$\varphi = -5.317d - 0.027 \quad (10)$$

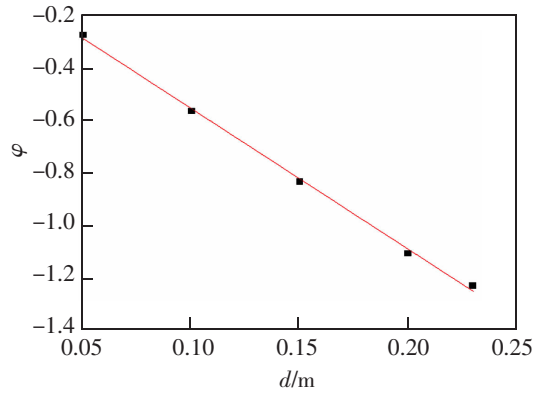
式中: $\varphi$ 为轨道板各深度处温度相对表层的滞后相位。由式(10)可得出轨道板内各处温度相位随深度呈线性滞后。



(a) Temperature spectrum analysis of track plate



(b) Schematic diagram of temperature amplitude and surface ratio at different depths of track plate



(c) Schematic diagram of temperature and surface phase difference at different depths of track plate

图3 轨道板不同深度温度频域特征  
Fig.3 Frequency domain characteristics of temperature at different depths of track slab

由图3(c)相位差推时间差,得

$$\tau = \frac{24\varphi}{2\pi} \approx -20.309d - 0.103 \quad (11)$$

式中: $\tau$ 为轨道板不同深度温度变化相较于轨道板表面的时间差,h,负号代表延迟。

表1 不同深度温度变化时间延迟

Tab.1 Time delay of temperature change at different depths

Depth/mm	The time that the temperature change lags behind the surface of the track slab/h
50	1.12
100	2.13
150	3.15
200	4.16
230	5.18

上述频域分析表明,轨道板不同深度温度相对表层温度序列,振幅以指数函数衰减,相位存在线性滞后。同时也证明了无砟轨道板板内温度热流时延模型的可靠性。

## 4 热流时延模型验证

由本文热流时延模型计算所得的不同深度温度曲线与实测温度对照展示如图4。由图4可以看出,最终求得的不同深度温度曲线与实测温度曲线吻合得较好,进而求出其平均相对误差并进行可靠度分析(表2)。

计算求得轨道板各深度温度相对于实际温度数据的平均相对误差在1.9%~2.5%。统计绝对误差大于2℃的点占总监测点数的比例为 $D$ 。定义可靠度为 $1-D$ ,结果显示在92.85%~96.53%,满足实验要求。

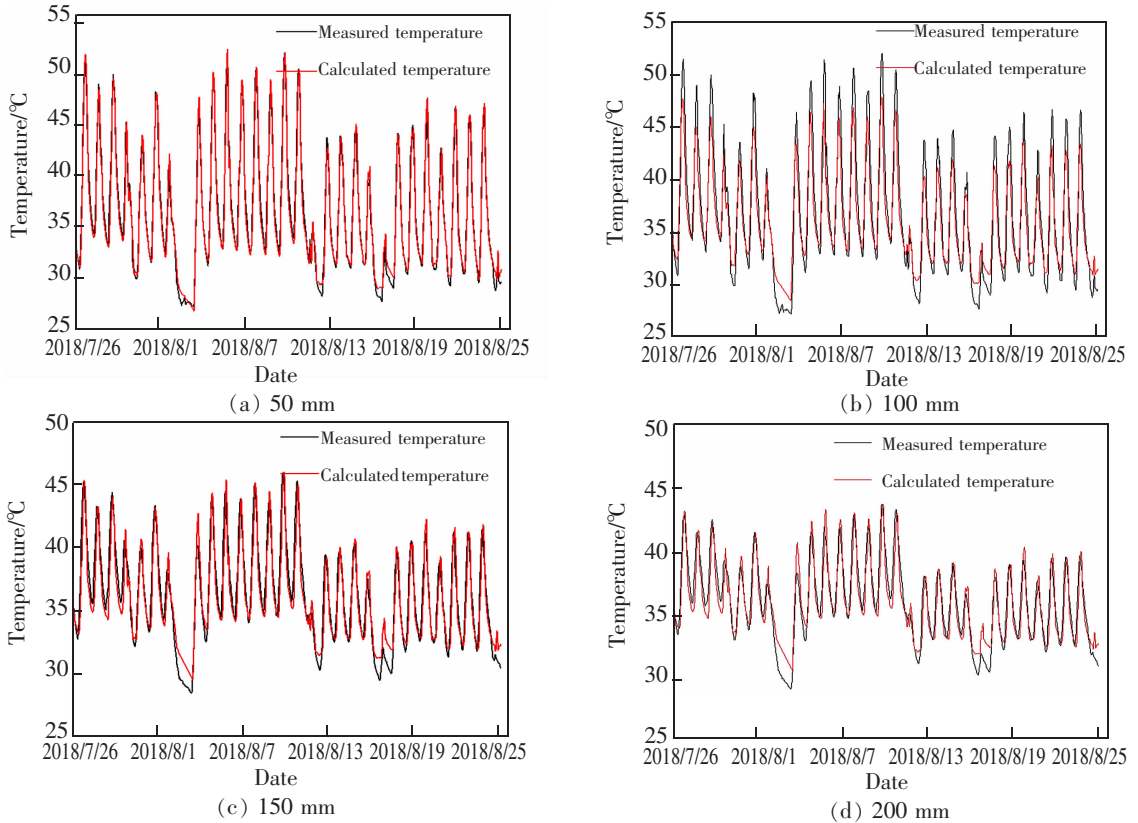


图4 轨道板不同深度计算温度对照

Fig.4 Comparison of calculated temperature at different depths of track slab

表2 计算所得温度的平均相对误差与可靠度

Tab.2 Average relative error and reliability of calculated temperature

Depth of track slab/mm	Mean relative deviation/%	Reliability/%
50	1.9	96.53
100	2.3	94.80
150	2.5	92.85
200	2.4	94.03

## 5 结论

本文考虑输入状态发生改变到建立平衡存在时间差,把时间延迟引入到轨道板混凝土热力学分析。从温度场作用于轨道板混凝土结构将改变其性能的点出发,分析了热力学中不同的温度传递方式以及热流密度对轨道板内温度变化的影响。得出以下结论。

1) 对轨道板温度进行频谱分析得出轨道板内各处温度幅值随深度呈指数衰减,温度相位随深度呈线性滞后。热量在轨道板中传递时,每深入50 mm,轨道板温度变化延迟时间约1.02 h。

2) 轨道板表面吸收的净热量除去部分转化为内能,剩余量作为修正项避免了由于仪器自身原因或者记录到的环境瞬态变化带来的影响。与对温度拟合预测相比,考虑了实时环境因素对轨道板内温度带来的影响,更有理论依据。

3) 考虑了热力学理论的温度计算模型平均相对误差在1.9%~2.5%,可靠度在92.85%~96.53%,为后续在不破坏轨道结构的前提下分析轨道板应力及维护提供参考。

4) 为简化模型,未考虑长期阴雨天温度的复杂变化,期间会有较大误差。

## 参考文献:

- [1] SUN H Y, FU W J, ZHOU W L, et al. Effect of chemical shrinkage and temperature shrinkage on early cracking of recycled concrete[J]. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering, 2020, 15(S1): 1-10.
- [2] 徐庆元, 范浩, 李斌. 无砟轨道温度梯度荷载对列车-路基上板式无砟轨道系统动力特性的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2013, 10(3): 1-6.  
XU Q Y, FAN H, LI B. Effect of temperature gradient load on ballastless track on dynamic characteristics of train-roadbed slab ballastless track system[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2013, 10(3): 1-6.
- [3] LIU G C. Numerical simulation and analysis of the effect of temperature on the fission of concrete[J]. Thermal Science, 2019, 23: 184.
- [4] 韩志刚, 孙立. CRTS II 型板式轨道轨道板温度测量与变形分析[J]. 铁道标准设计, 2011(10): 41-44.  
HAN Z G, SUN L. Temperature measurement and deformation analysis of CRTS II slab track slab[J]. Railway Standard Design, 2011(10): 41-44.
- [5] ZENG X H, ZHU H S, QIU X J, et al. Deterioration of CA mortar filling layer under cyclical thermal loading[J]. Construction and Building Materials, 2020, 259(7): 119678.
- [6] 钟焱, 何越磊, 路宏遥, 等. 持续高温作用下 CRTS II 型无砟轨道层间离缝分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2018, 15(5): 1128-1133.  
ZHONG K, HE Y L, LU H Y, et al. Analysis of interlayer separation of CRTS II ballastless track under continuous high temperature[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2018, 15(5): 1128-1133.
- [7] SONG L, LIU H B, CUI C X, et al. Thermal deformation and interfacial separation of a CRTS II slab ballastless track multilayer structure used in high-speed railways based on meteorological data[J]. Construction and Building Materials, 2020, 237(7): 117528.
- [8] 刘钰, 赵国堂. CRTS II 型板式无砟轨道结构层间早期离缝研究[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(4): 1-7.  
LIU Y, ZHAO G T. Study on early joint separation of CRTS II slab ballastless track structure[J]. China Railway Science, 2013, 34(4): 1-7.
- [9] 梁金宝, 戴公连, 唐宇, 等. 桥上 CRTS II 型板式无砟轨道温度作用取值研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 122-127.  
LIANG J B, DAI G L, TANG Y, et al. Study on temperature effect of CRTS II slab ballastless track on bridge[J]. Journal of Railway, 2021, 43(1): 122-127.
- [10] 刘昊旻, 路宏遥, 何越磊, 等. 基于优化气象参数的轨道板内部温度试验研究与预测分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2019, 16(5): 1120-1128.  
LIU H W, LU H Y, HE Y L, et al. Experimental study and prediction analysis of internal temperature of track slab based on optimized meteorological parameters[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2019, 16(5): 1120-1128.
- [11] 肖金香, 穆彪, 胡飞. 农业气象学[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.  
XIAO J X, MU B, HU F. Agrometeorology[M]. 2rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [12] 肖国军. 薄壁空心高墩混凝土结构昼夜及季节性温度效应研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.  
XIAO G J. Study on diurnal and seasonal temperature effect of thin-walled hollow high pier concrete structure[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [13] SAETTA A, SCOTTA R, VITALIANI R. Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads[J]. Journal of Structural Engineering, 1995, 121(3): 446-457.
- [14] 张建清. 无砟轨道温度场实测数据分析与神经网络预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2020.  
ZHANG J Q. Study on measured data analysis and neural network prediction of temperature field of ballastless track [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.
- [15] 刘学毅, 李佳莉, 康维新, 等. 无砟轨道温度简便计算及极端天气影响分析[J]. 西南交通大学学报, 2017, 52(6): 1037-1045.  
LIU X Y, LI J L, KANG W X, et al. Simple temperature calculation and extreme weather influence analysis of ballastless track[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2017, 52(6): 1037-1045.



第一作者: 方若望(1997—), 男, 硕士研究生。研究方向为轨道交通基础设施安全检测。E-mail: 1159883488@qq.com。



通信作者: 何越磊(1972—), 男, 教授, 博士。研究方向为轨道交通安全与检测技术。E-mail: hylloc@163.com。

(责任编辑: 吴海燕 刘棉玲)