气温骤变下桥上无砟轨道温度场与温度效应分析

余路，张鹏飞

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

摘要：全球气候变化引发气温骤变事件频发，对桥上无砟轨道服役安全带来新挑战。基于传热学理论，构建桥上CRTSIII型无砟轨道热-力耦合精细化数值模型，结合现场温度监测试验开展模型验证，探究气温骤升、骤降对轨道温度场、力学响应及几何形位的影响规律。结果表明：气温骤升使轨道板温度梯度由81.55 ℃/m增至112.04 ℃/m，骤降时降至−5.95 ℃/m；温度响应沿板深递减且存在相位滞后，板底滞后于板顶，板边、板角热敏感性高于板中。骤升增大各结构层纵向应力位移；骤降时钢轨纵向应力位移最大降幅达17.41%，轨道板、底座板发生压-拉受力反转，易诱发层间非协调变形。气温骤降对轨道几何扰动更强，内外轨竖向位移最大降幅24.20%，轨面水平偏差降幅达46.76%，劣化轨道平顺性，威胁行车安全。该研究可为复杂气候下桥上无缝线路设计及运维提供理论参考。

关键词：无砟轨道；桥上无缝线路；气温骤变；温度场；温度效应

中图分类号：U213.9　　**文献标志码：**A

Analysis of temperature field and temperature effect of slab track on bridge under sudden temperature change

YU Lu, ZHANG Pengfei

(State Key Laboratory of Safety and Resilience of Civil Engineering in Mountain Area, East China Jiaotong University, Nanchang Jiangxi 330013, China)

Abstract: Frequent sudden temperature-change events induced by global climate change pose new challenges to the service safety of slab track on bridge. Based on heat-transfer theory, a refined thermo-mechanical coupling model of CRTS III slab track on bridge is established, which is validated by field temperature monitoring experiment. The influences of sudden temperature rise and drop on the temperature field, mechanical responses and track geometry are investigated. The results show that sudden temperature rise increases the vertical temperature gradient of track slab from 81.55 ℃/m to 112.04 ℃/m, while sudden temperature drop reduces it to −5.95 ℃/m. The temperature response decreases along the slab depth with obvious phase lag: the slab bottom lags behind the slab top, and the slab edges and corners exhibit higher thermal sensitivity than the slab middle. Sudden temperature rise increases the longitudinal stress and displacement of each structural layer. Under sudden temperature drop, the maximum reduction of longitudinal stress and displacement of rails reaches 17.41%. Compression-tension stress reversal occurs in track slabs and base slabs, which may induce interlayer incompatible deformation. Sudden temperature drop causes severer disturbance to track geometry: the maximum reduction of vertical displacement of inner and outer rails is 24.20%, and the cross level deviation decreases by up to 46.76%, deteriorating track regularity and threatening train-operation safety. This study can provide a theoretical reference for the design and maintenance of continuously welded rail on bridge under complex climatic conditions.

Key words: slab track; continuous welded rail on bridge; sudden temperature-change; temperature field; temperature effect

CRTSIII型无砟轨道结构作为桥上铺设形式，是我国高铁领域广泛采用的主要轨道结构类型之一[1-3]。在运营阶段，轨道结构常暴露于气温的瞬时剧烈波动中，短时太阳辐射急剧增强可致温度骤升，而突发强降雨则使结构表面迅速降温并加剧热耗散，从而形成显著的瞬态温度梯度，诱发层间离缝、翘曲等病害。

收稿日期：2026−10−10

基金项目：国家自然科学基金项目(52368063，52178425)；江西省自然科学基金项目（20252BAC250113）

研究表明[4]，此类非稳态热冲击所诱发的热应力与应变响应，远超季节性温变效应。因此，系统研究短时气温骤升、骤降对桥上无砟轨道结构热力学行为的影响，对保障桥上无砟轨道无缝线路长期服役安全具有重要意义。

近年来，关于桥上无砟轨道温度场及其温度效应演化规律研究，国内外学者已取得较为丰富的研究成果。针对北京地区 CRTSII型无砟轨道，高亮等[5]通过现场试验探究了其温度场分布，并深入分析了板面温度与气温之间的相互关系。针对西藏地区的双块式无砟轨道结构，LOU、SHI 等[6-7]进行了现场温度场试验，运用机器学习理论，构建了轨道板温度梯度的预测方法。依据桥上无砟轨道的长期温度监测数据，梁金宝等[8]建立了轨道结构温度梯度的拟合公式。刘钰等[9]通过建立传热数值模型，探究了持续高温和气温骤变等两类工况对 CRTSII型板式无砟轨道温度场的作用机制。闫斌等[10-12]构建桥上 CRTSII型无砟轨道数值计算模型，揭示了极端温度荷载下轨道结构受力演化规律、不同地域的无砟轨道的非线性温度分布规律及无砟轨道遮盖效应对简支箱梁温度场的影响。周锐等[13]通过桥上 CRTSII型板式无砟轨道缩尺试验，探究了温度变化速率对轨道结构的温度场与应力分布特征的影响。ZHOU 等[14-15]构建了桥上 CRTSII型无砟轨道的缩尺试验，分析了在升温、降温及循环温度荷载工况下轨道结构的温度演化特征和力学特性变化。在整体升温与温度梯度作用下，Li 等[16]分析了 CRTSII型无砟轨道界面损伤随黏结程度变化的响应特征。利用有限元法，赵丽华等[17]建立了桥上 CRTSI型无砟轨道分析模型，并围绕东北严寒地区桥上无砟轨道结构的温度特性展开探究，对轨道板及水泥沥青砂浆层的垂向温度梯度荷载开展了系统地分析。依托有限元平台，李文昊等[18]构建了路桥过渡段纵连式无砟轨道精细化模型，揭示高低温极端工况下轨道体系、摩擦板、过渡板与端刺构件的力学响应及变形演化特征。针对多种桥上无砟轨道结构形式，张鹏飞等[19-21]构建精细化计算模型，阐明了温度荷载诱发的轨道纵向受力特征，以及梁体温差、扣件纵向阻力等参数对桥上无缝线路纵向力学行为的调控机制。蔡小培等[22]建立路桥过渡段热-力耦合精细模型，探究了桥隧过渡段区域无砟轨道温度场分布特征，以及纵连轨道板在温度荷载下的纵向力受力特性。

综上所述，当前研究多聚焦于设计温度梯度、高温或低温等常规热环境因素对无砟轨道温度场及其力学性能的影响，而针对气温骤变等极端瞬态事件的研究相对匮乏，尤其在气温骤变事件对桥梁上 CRTSIII型无砟轨道结构方面更为薄弱。现行规范亦缺乏针对此类瞬态温度作用的合理分析方法。鉴于此，本文基于传热学理论与间接热-力耦合方法，选取高速铁路桥上无砟轨道作为研究对象，建立桥上 CRTSIII型板式无砟轨道精细化热-力耦合数值模型，系统揭示气温骤变条件下轨道结构温度场演化特征及其诱导的力学响应规律。

1 桥上 CRTSIII型无砟轨道热-力耦合精细化模型建立

1.1 温度场理论方程

基于材料各向同性与均质的假设，并结合傅里叶热传导定律，可得无砟轨道结构的内部传热方程[7]：

$$\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x}+\frac{\partial^2 T}{\partial y}+\frac{\partial^2 T}{\partial z}\right)=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1}$$

式中：λ代表热导率，T为温度，ρ为密度，c为比热容。

式(1)采用解析法求解难度大，可通过数值仿真开展研究。建立模型时，将气温、太阳辐射及风速等环境因子纳入其中，同时定义第三类热交换边界条件，进而借助有限元分析计算温度场的空间分布[9]。

作用于轨道结构表层的综合热流密度记为q，其计算公式如式(2)所示[9]。

$$q=q_s+q_c+q_r \tag{2}$$

式中：q_s为结构物表面吸收的太阳辐射强度密度；q_c为对流换热形成的热流密度；q_r则是轨道结构表面与大气之间温差诱发的辐射换热热流。

$$q_s=a_s I_s=a_s\left(I_{DM}+I_{D\theta}+I_{R\theta}\right) \tag{3}$$

$$q_c = h_c(T - T_a) \tag{4}$$

$$q_r = \varepsilon C_0[(273+T_a)^4 - (273+T)^4] - \varepsilon(1-\varepsilon_a)C_0(273+T_a)^4\cos^2\frac{\theta}{2} \tag{5}$$

式中：a_s为辐射吸收率；I_{DM}、$I_{D\theta}$、$I_{R\theta}$分别为太阳直接辐射、散射辐射、反射辐射；h_c为受风速调控的对流换热系数，采用凯尔别克经验公式计算得到[23]；T_a为气温；ε_a为大气辐射系数；C_0为斯蒂芬-玻尔兹曼常量；ε指物体的发射率，θ表征倾斜面的倾角。

$$T_a = \overline{T}_a + \tilde{T}_\alpha\left[0.96\sin\omega\left(t - t_0\right) + 0.14\times\sin 2\omega\left(t - t_0\right)\right]\frac{1}{2} \tag{6}$$

式中：$\overline{T}_a$表示为日平均气温，$\tilde{T}_\alpha$表示为日温差。t_0为太阳辐射峰值时刻与气温峰值时刻的差值再加 1；t以 6:00 为起始时刻，起始值设为 0；ω代表角频率。

第三类边界条件如下式：

$$\lambda\frac{\partial T}{\partial n} = h(T_a^{'} - T) \tag{7}$$

式中：h为综合换热系数，其可由式 8 求得；T_a'是一种假想的外界综合大气温度，可由式(9)求得。

$$h = h_c + h_r \tag{8}$$

$$\begin{cases} T_a^{'} = T_a + (a_s I_s - q_{ra})/h \\ q_{ra} = \varepsilon(1-\varepsilon_a)C_0(273+T_a)^4\cos^2(\theta/2) \end{cases} \tag{9}$$

式中：h_r为辐射热交换系数，可由式(10)求得。

$$h_r = \varepsilon[4.8 + 0.075(T_a - 5)] \tag{10}$$

1.2 模型建立

依托梁-板-轨协同作用机制与传热基本理论，采用有限元手段，选取高速铁路度桥（5×32 m 简支梁+(70+130+70) m 连续梁+5×32 m 简支梁桥）作为工程算例，构建桥上 CRTSIII型无砟轨道热-力耦合精细化数值模型。桥梁跨径及支座布置如图 1 所示。

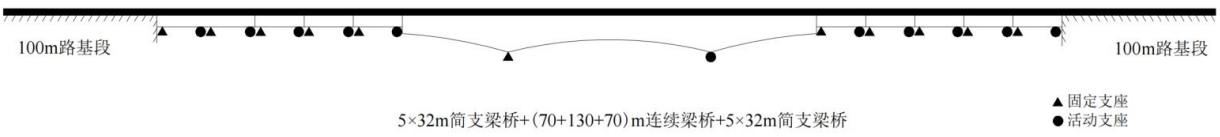


图 1 桥梁布置示意图

Fig.1 Layout of long-span bridges

精细化模型所涵盖的桥上无砟轨道体系由钢轨、轨道板、自密实混凝土、底座板、土工布与桥梁主体共同组成，构造形式见图 2。其中 CHN60 钢轨选用 BEAM188 梁单元来建模；WJ-8 常阻力扣件间隔 0.63 m 布置，借助 COMBIN14 线性弹簧表征扣件横向、垂向刚度，对应取值依次为 50 kN·mm^{-1}、35 kN·mm^{-1}，纵向约束则通过 COMBIN39 非线性弹簧单元实现模拟。轨道板、自密实混凝土层以及底座板均选用 SOLID70 实体单元。桥梁主体同样采用 SOLID70 实体单元；桥台、墩顶位置的纵向约束由 COMBIN14 弹簧单元模拟，桥台纵向刚度、简支梁墩顶刚度、连续梁墩顶刚度分别设置为 3000 kN/cm、350 kN/cm、2000 kN/cm。隔离层分别布置于自密实混凝土层和底座板之间，采用面-面接触算法，切向摩擦系数为 0.7。桥梁两侧均设置 100 m 长的路基段，以此削弱边界效应。轨道板、自密实混凝土层等构件的几何尺寸参考文献[24]。桥上无砟轨道结构各构件的热力学参数详见文献[25]。

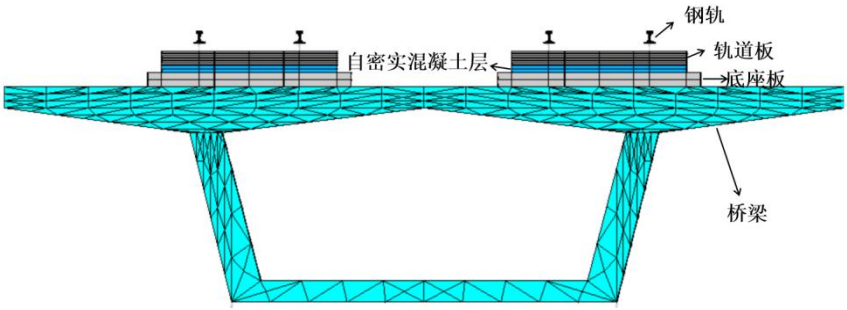


图 2 桥上无砟轨道结构仿真模型

Fig.2 Model of slab track on bridge

1.3 模型验证

1.3.1 现场试验

在南昌某高铁试验基地开展了 CRTSIII型无砟轨道温度场现场监测试验，试验现场见图 3。监测试验同步采集轨道板温度及周边环境气象因素（包括太阳辐射、风速与气温），其中轨道板的温度监测数据主要用于数值模型的验证，气象数据则作为数值模拟边界条件的输入依据。轨道板板中顶面（记为 B0 点）与底面（记为 B4 点）均布设高精度 PT100 热电阻温度传感器；定制的气象监测站置于轨道板周边，可实时采集气象数据，测试频率为 2 min/次。



图 3 CRTSIII型无砟轨道温度场试验

Fig.3 Temperature experiment of CRTS III slab track

1.3.2 实测值与计算值对比

选取 2024 年 8 月 4 日、8 月 21 日两组现场实测数据开展温度场模型验证。以现场实测气象要素作为热边界条件，其中 8 月 4 日、21 日最大太阳辐射依次为 1155、1168 W/m²，最高气温分别为 41.36、36.97 ℃，最低气温分别为 28.58、27.78 ℃，两日平均风速取 1 m/s。基于以上热边界条件和建立的精细化模型，开展温度场数值计算并提取仿真模型输出的温度时程曲线，与轨道板板中 B0、B4 测点现场实测温度序列开展比对，结果见图 4。由图 4 可见，模型计算得到的温度时程变化规律与现场实测结果整体吻合良好，能够准确复现轨道板温度昼夜升降、峰值出现滞后的演化特征。定量误差分析表明：B0 测点温度计算值与实测值的均方根误差为 2.17～2.31 ℃，B4 测点均方根误差为 1.22～1.60 ℃。模型验证中存在一定的偏差，究其原因，主要是在建模过程中对桥上无砟轨道结构进行了合理简化处理。综上，模型计算结果与实测数据的一致性验证了本文所建立的精细化模型具有良好的准确性。

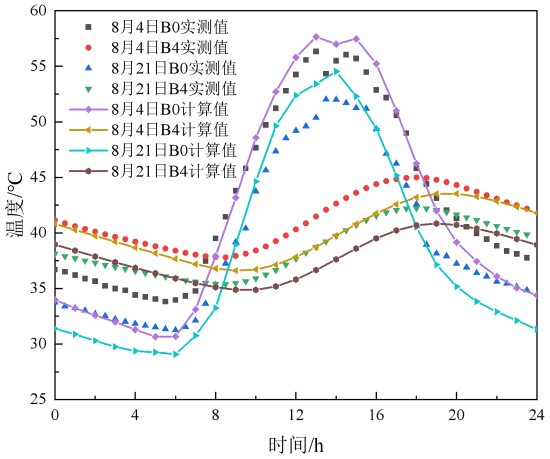


图 4 温度实测值与模型计算值对比

Fig.4 Comparison between temperature measured values and model calculated values

2 气温骤变对桥上 CRTSIII型无砟轨道温度场影响

以 8 月 21 日为基准工况，设定气温骤升与骤降两种工况如下：气温骤升发生于太阳辐射最强的 10:00 至 14:00 时段，骤降出现在气温最高的 12:00 至 16:00 时段。气温的短时变化通过调整大气透明系数、风速及气温实现。气温骤升工况设定为：平均气温为 38 ℃，气温振幅保持恒定，大气透明系数与风速分别取 0.9 和 0 m/s。气温骤降工况则为：平均气温降至 23 ℃，气温振幅保持恒定，大气透明系数与风速分别取 0.2 和 3 m/s。

将短时气温骤变工况作为瞬态边界条件施加于桥上 CRTSIII型无砟轨道热-力耦合有限元模型，获得气温骤变条件下的全域温度场分布。对比气温骤变后与原气温做作用下的轨道板温度梯度，其结果如图 5 所示。

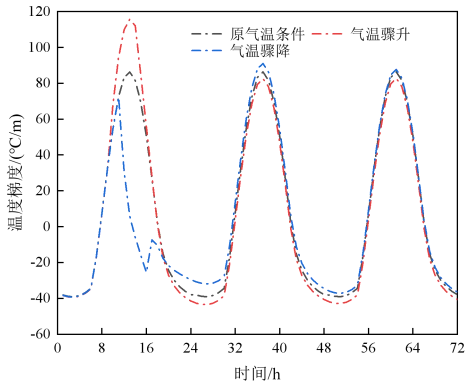


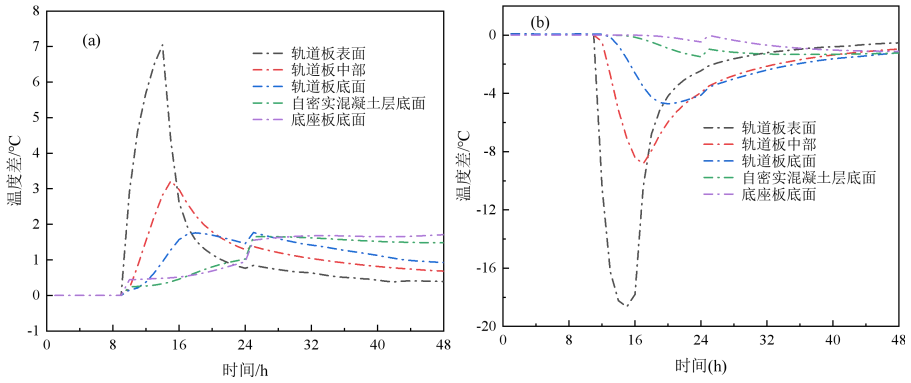
图 5 气温骤变作用下结构温度梯度的演变规律

Fig.5 Variation laws in temperature gradient under the effect of sudden temperature change

由图 5 表明：（1）气温骤变条件下轨道板温度梯度呈现出显著的瞬时响应特性。在气温骤升当日的 14 点，轨道板温度梯度由 81.55 ℃/m 快速升至 112.04 ℃/m，增幅达到了 37.39%；而在气温骤降当日 14 点，温度梯度降至-5.95 ℃/m。此现象源于混凝土较低的热扩散率所致的热惯性效应：当外界气温快速升高时，轨道板表面温度瞬时上升，而内部温升滞后，致使温度梯度急剧放大；反之，气温骤降时轨道板表层迅速冷却，内部热量尚未充分散失，导致温度梯度迅速衰减甚至反向。（2）在气温骤升次日，轨道板温度梯度低于原气温条件；在气温骤降次日，轨道板温度梯度高于原气温条件。究其原因，在骤升当日，轨道结构内部集聚了更多的热量，但散热速度未提升，致使内部温度比原气温条件高，但次日表面温度回归原气温水平时，故其温度梯度反而低于原气温条件。与此相反，在气温骤降当日后，由于轨道结构内部前期热量被带走，故次日温度梯度反而高于原气温条件。（3）自气温骤变作用次日及之后，骤变工况与原气温条件之间的温度梯度差异显著减弱。随着时间推移，不同气温工况的传热边界条件逐步趋同，气温

骤升与骤降所诱发的温度梯度差异在次日 8 时前后基本不复存在。

以轨道板中部为观测点，图 6 定量展示了三种气温工况下轨道结构沿深度方向的温度差值演化特征。结果表明：（1）轨道板温度差值沿着轨道结构深度增加而递减。气温骤升时，轨道板表面、中部及底面温度差极值分别为 7.05 ℃、3.22 ℃、1.76 ℃；气温骤降时，对应极值分别为 - 18.66 ℃、- 8.4 ℃、- 4.72 ℃。该分布规律源于轨道板表面直接暴露于外界环境中，热扰动以非稳态导热形式向内部传递，导致内部响应幅值随深度逐层衰减。（2）温差极值出现时刻存在显著相位滞后性，轨道板表面受到气温骤变反应最快，而轨道板板底极值出现时刻显著延迟。气温骤升时刻，轨道板表面、底面温差极值分别出现在 14:00 和 18:00。气温骤降过程中，对应峰值则延后至 15:00 与 20:00。该时滞效应体现了非稳态导热过程中热惯性的空间累积特征。

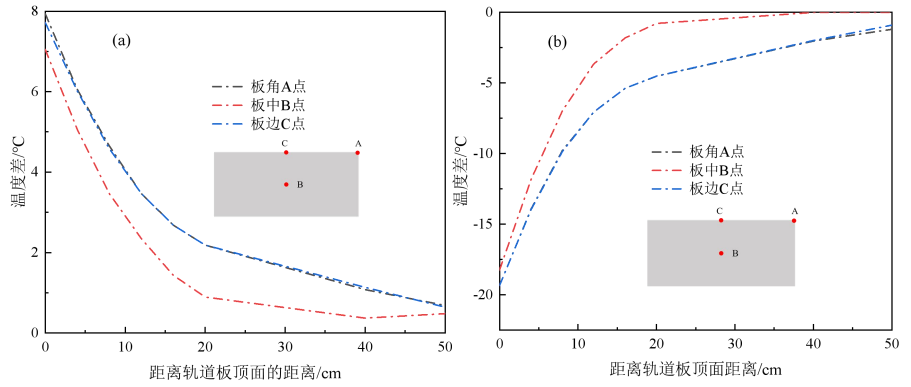


(a) 气温骤升；(b) 气温骤降

图 6 气温骤变作用下轨道结构温度对比

Fig.6 Temperature comparison of track structure under sudden temperature change effect

为系统评估气温短时骤变对桥上轨道结构不同部位温度场的影响，选取气温骤变典型突变时刻（14:00），对轨道结构板角、板中、板边的三处特征位置开展温度差分析，其结果如图 7 所示。由图 7 可得以下结论：（1）相较于气温骤升，气温骤降在轨道结构诱发的温度变幅更为显著；然而，该差异沿深度方向迅速衰减，至轨道板底面时，二者温差已趋于接近。（2）无论是气温骤升还是气温骤降工况下，轨道板中部 B 点温度变化幅度均小于板边与板角变化幅度，表明板边与板角对气温骤变更具敏感性。分析其原因，轨道板中部主要受到热辐射传递交换作用，而板边、板角同时受辐射与风致对流的作用，热交换路径更为多元，导致温度响应更为剧烈。（3）气温骤变引起的轨道结构温度变幅沿着竖向深度变化呈非线性分布，轨道板（0~20 cm）部分温度变幅远高于轨道板以下部分（20~50 cm）的温度变幅。该结果提示，若直接套用现行规范中的线性温度梯度模型评估复杂气温突变环境下的温度效应，可能引入不可忽略的偏差，进而影响结构安全与服役性能的准确预测。



(a) 气温骤升；(b) 气温骤降

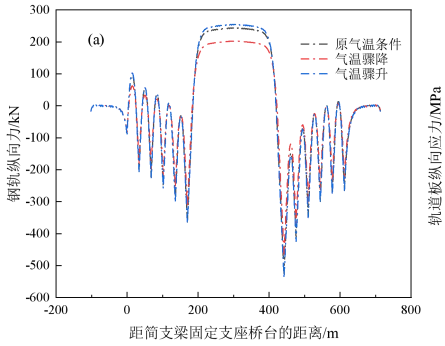
图 7 气温骤变下无砟轨道结构不同部位温度差

Fig. 7 Temperature difference at different parts of slab track under sudden temperature change

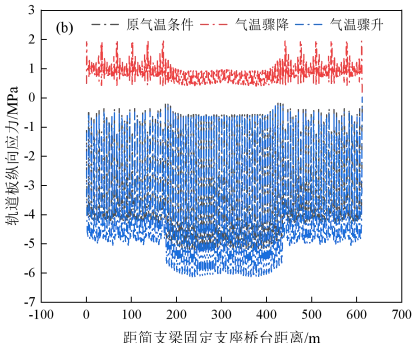
3 气温骤变对桥上 CRTSIII型无砟轨道无缝线路温度应力与变形影响

3.1 气温骤变对桥上 CRTSIII型无砟轨道无缝线路温度应力影响

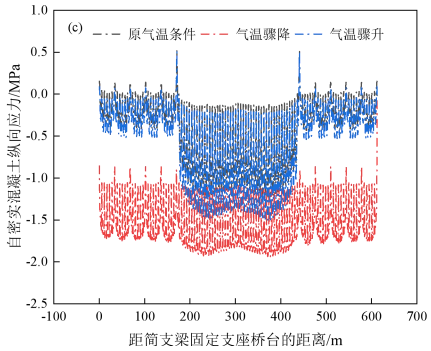
考虑气温骤变当日 16:00 时刻紧邻气温骤变时间，故选取该时刻作为特征时刻，开展气温骤变对桥上无砟轨道无缝线路结构温度应力影响分析。将气温骤变事件的传热边界条件分别加载于建立的桥上无砟轨道热-力耦合有限元模型，提取桥上轨道结构纵向力与纵向位移力学特性指标如图 8 所示，其纵向力、位移极值如表 1、表 2 所示。



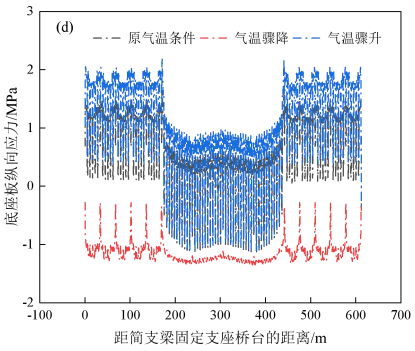
(a) 钢轨纵向力



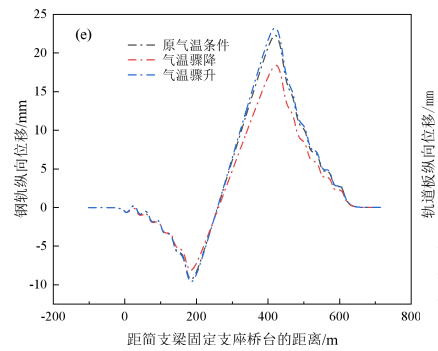
(b) 轨道板纵向应力



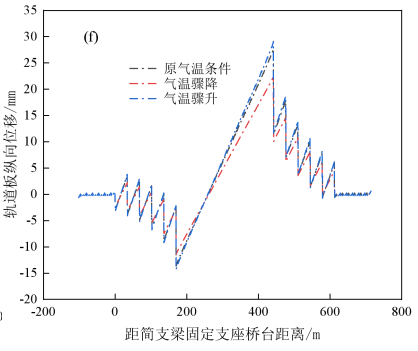
(c) 自密实混凝土纵向应力



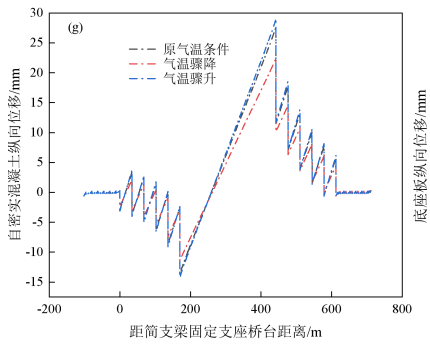
(d) 底座板纵向应力



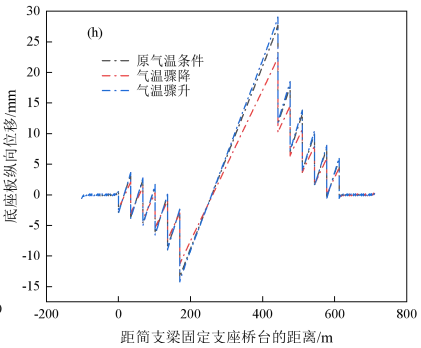
(e) 钢轨纵向位移



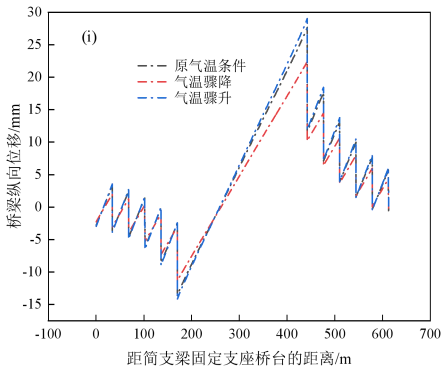
(f) 轨道板纵向位移



(g) 自密实混凝土纵向位移



(h) 底座板纵向位移



(i) 桥梁纵向位移

图 8 气温骤变下轨道结构纵向（应）力与位移

Fig.8 Longitudinal stress and displacement of track structure subjected to sudden temperature change

表 1 各构件纵向（应）力最大值

Tab.1 Maximum longitudinal stress of each component

工况	F_r/kN	S_{ts}/MPa	S_{scc}/MPa	S_{bp}/MPa
原气温条件	244.11/-524.66	-5.219	-1.225	1.656
气温骤降	202.743/-462.958	1.96	-1.937	-1.351
气温骤升	254.896/-539.708	-6.133	-1.5	2.194

注：F_r 代表钢轨纵向力极值，拉力取正、压力取负；S_{ts}、S_{scc}、S_{bp} 依次为轨道板、自密实混凝土层、底座板的纵向应力峰值。

表 2 各构件纵向位移最大值(mm)

Tab.2 Maximum longitudinal displacement of each component (mm)

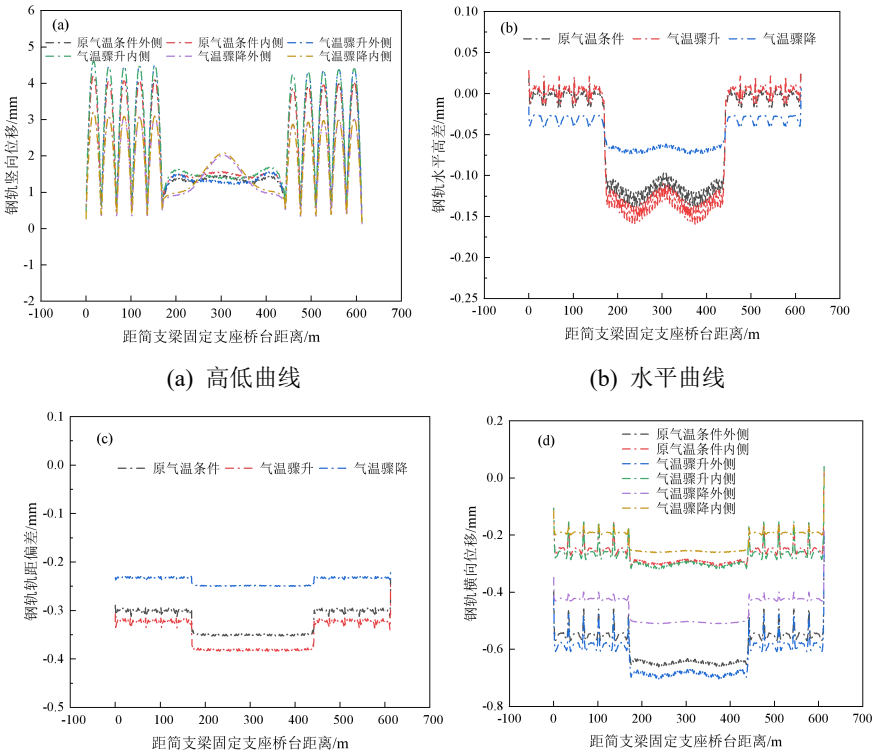
工况	D_r	D_{ts}	D_{scc}	D_{bp}	D_b
原气温条件	22.278	27.723	27.719	27.689	27.674
气温骤降	18.4	22.424	22.452	22.444	22.439
气温骤升	23.255	29.094	29.084	29.049	29.03

注：D_r 为钢轨最大纵向位移；D_{ts}、D_{scc}、D_{bp} 分别为轨道板、自密实混凝土层、底座板最大纵向位移。

由图 8 和表 1、2 可知：（1）在气温骤升后，钢轨、轨道板、自密实混凝土、底座板纵向（应）力较原气温条件相比，均随之增大，分别增大了 4.42%/2.75%、17.51%、22.45%、32.49%；同时，以上轨道结构层纵向位移亦随之增大，分别增大了 4.38%、4.95%、4.92%、4.91%，桥梁纵向位移峰值同步上升，提升幅度达到 4.9%。（2）在气温骤降后，钢轨纵向力、位移较原气温条件分别减小了 16.95%/11.76%、17.41%；轨道板、底座板受力特性与原气温条件相比，发生了较大的变化，即轨道板纵向应力最大值由压应力 - 5.219 MPa 转变为拉应力 1.96 MPa，底座板纵向应力最大值由拉应力 1.656 MPa 转变为压应力 - 1.351 MPa。与此同时，自密实混凝土层最大纵向应力增幅高达 58.12%。虽然钢轨纵向受力看似减小了，但轨道结构受力发生剧烈变化，其主要归因于轨道板温度场由正温度梯度瞬时切换为负温度梯度及轨道板表面温度骤降，导致结构层内外温度差异显著增大，从而诱发高附加温度应力，将显著增加了轨道结构开裂及服役病害风险。（3）在气温骤降后，钢轨、轨道板、自密实混凝土、底座板、桥梁纵向位移均呈减小趋势，其中钢轨与轨道板的纵向位移减幅分别为 17.4%、19.11%。二者减幅差异显著，表明轨–板界面存在明显的非同步变形，易诱发轨板不均匀位移病害，进而影响桥上列车运行安全。

3.2 气温骤变对桥上 CRTSIII型无砟轨道无缝线路几何形位影响

考虑模型的对称性，取同一侧线路左右钢轨进行对比，以分析气温骤变对桥上无缝线路几何形位影响。针对轨道几何形位的不同指标，分别采用相应位移量进行表征：轨距以左右钢轨横向相对位移衡量，轨向取两股钢轨各自的横向位移，轨道水平采用左右钢轨竖向相对高差，轨道高低则选用两股钢轨各自的竖向位移。设置第 3 章中 3 种工况以分析气温骤变对轨道几何形位的影响，得到原气温条件、气温骤升及气温骤降下的高低、水平、轨距和轨向等几何形位变形曲线（见图 9）及其最大值（见表 3）。



(a) 高低曲线　　(b) 水平曲线

(c) 轨距曲线　　(d) 轨向曲线

图 9 气温骤变下桥上钢轨几何形位变化

Fig.9 Geometric change of rail on bridges under sudden temperature change

表 3 气温骤变下轨道几何形位最大值(mm)

Tab.3 Maximum value of rail geometry under sudden temperature change (mm)

计算工况	钢轨竖向位移（内侧）	钢轨竖向位移（外侧）	钢轨横向位移（内侧）	钢轨横向位移（外侧）	水平	轨距
原气温条件	0.131/4.205	0.154/4.206	-0.309/0.039	-0.661/-0.196	-0.139	-0.353
气温骤升	0.139/4.592	0.167/4.602	-0.320/0.04	-0.704/-0.199	-0.159	-0.384
气温骤降	0.087/3.215	0.093/3.188	-0.262/0.035	-0.511/-0.186	-0.074	-0.25

由图 9 及表 3 可知：（1）在气温骤升、骤降作用下，桥上钢轨竖向位移、横向位移、轨距及水平等几何形位指标的空间分布规律总体上与原始气温条件基本一致。（2）气温骤升使竖向位移、横向位移、轨距及水平各项指标整体增大，骤降则致其普遍减小，此变化与轨道板温度梯度随气温升降而增减所引发的结构变形密切相关。（3）气温骤降对钢轨几何形位的影响显著强于骤升。具体而言，气温骤升时钢轨内、外侧竖向位移分别增加 9.2%和 9.42%，水平偏差增幅为 14.39%；而骤降时相应指标分别降低 23.54%和 24.20%，水平偏差降幅达 46.76%。内、外侧横向位移与轨距在骤升时增幅分别为 3.56%、6.51%及 8.78%，骤降时则分别减少 15.21%、22.69%和 29.18%。结果表明，气温短时骤变显著影响钢轨几何形位，特别是气温骤降后钢轨的水平、轨距短时间内剧烈变化，引发钢轨几何形位多指标协同劣化，威胁行车安全。

4 结论

1) 气温骤变显著加剧桥上轨道结构温度场的非稳态特性。气温骤升使轨道板温度梯度由 81.55 ℃/m 增至 112.04 ℃/m，骤降则降至−5.95 ℃/m；温差极值出现时刻存在显著相位滞后性，轨道板板底滞后于板顶，且极值数值随轨道板深度而递减；板边与板角对气温骤变的热敏感性高于板中。

2) 在气温骤升后，钢轨、轨道板、自密实混凝土层与底座板纵向（应）力及纵向变形均高于原气温工况。在气温骤降后，钢轨纵向力、位移较原气温条件分别减小了 16.95%/11.76%、17.41%；轨道板与底座

板受力状态发生压–拉反转；气温骤降后，钢轨、轨道板、自密实混凝土、底座板、桥梁纵向位移均呈减小趋势，其中钢轨与轨道板的纵向位移减幅差异显著，影响桥梁列车运行安全。

3) 气温骤变作用下，桥上钢轨各几何形位指标（竖向位移、横向位移、轨距及水平）的空间分布规律与常温工况基本一致，气温骤升使各几何形位指标整体增大，而气温骤降则导致其普遍减小，其中骤降工况的影响更为显著。气温骤降使内、外侧竖向位移分别降低 23.54%和 24.20%，水平偏差降幅达 46.76%，变化幅度远超气温骤升工况。短时间内急剧变化的几何形位指标，不仅影响了轨道平顺性，也对行车安全构成潜在风险。

参考文献:

[1] 张鹏飞, 余路, 江浩宇, 等. 持续高温环境下桥上 CRTSIII型无砟轨道热响应分析[J]. 华东交通大学学报, 2025, 42(4): 80-87.
ZHANG Pengfei, YU Lu, JIANG Haoyu, et al. Thermal response analysis of CRTS III ballastless track on bridge under continuous high-temperature environment[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2025, 42(4): 80-87.

[2] JIA Bingliang, ZHANG Xuanyi, JIA Youquan, et al. Life-cycle cracking resistance reliability analysis of CRTS III track slab on bridge[J]. Engineering Structures, 2026, 346: 121634.

[3] REN Juanjuan, QU Changheng, LIANG Jie, et al. Experimental study on temperature field characteristics of CRTS III prefabricated slab track in cold regions[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2024, 24(3): 152.

[4] 朱兆聪, 梁汝鸣, 葛序尧, 等. 气温骤降对超长混凝土结构底板温度应力的影响[J]. 建筑结构, 2023, 53(S1): 1723-1727.
ZHU Zhaocong, LIANG Ruming, GE Xuyao, et al. Influence of temperature sudden drop on temperature stress of super-long concrete structure floor[J]. Building Structure, 2023, 53(S1): 1723-1727.

[5] 高亮, 尤明熙, 肖宏, 等. CRTSII型板式无砟轨道温度分布与环境温度关系的试验研究[J]. 铁道建筑, 2016, (5): 6-9.
GAO Liang, YOU Mingxi, XIAO Hong, et al. Experimental study on relation between temperature distribution in CRTSII slab-type ballastless track and ambient temperature[J]. Railway Engineering, 2016, (5): 6-9.

[6] LOU Ping, SHI Tao, ZHENG Weiqi, et al. Experimental and statistical analysis of the vertical temperature gradient for ballastless railway track in alpine and plateau environs[J]. Acta Polytechnica Hungarica, 2023, 20(1), 123-142.

[7] SHI Tao, LOU Ping, ZHENG Weiqi, et al. A hybrid approach to predict vertical temperature gradient of ballastless track caused by solar radiation[J]. Construction and Building Materials, 2022, 352(000): 15.

[8] 梁金宝, 戴公连, 唐宇, 等.桥上 CRTSII型板式无轨道温度作用取值研究[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 122-127.
LIANG Jinbao, DAI Gonglian, TANG Yu, et al. Study on values of temperature actions for CRTS II slab ballastless track on bridge[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1): 122-127.

[9] 刘钰, 蒋典佑, 孙晓丹, 等. 单元无砟道床温度场时空分布非均匀特征[J]. 铁道学报, 2023, 45(8): 118-128.
LIU Yu, JIANG Dianyou, SUN Xiaodan, et al. Temporal and spatial non-uniformity of temperature field of unit ballastless track bed [J]. Journal of Railways, 2023, 45(8): 118-128.

[10] 闫斌, 程瑞琦, 谢浩然, 等. 极端温度作用下桥上 CRTSII型无砟轨道受力特性[J]. 铁道科学与工程学报, 2021, 18(4): 830-836.
YAN Bin, CHENG Ruiqi, XIE Haoran, et al. Mechanical characteristics of CRTS II ballastless track on

bridge due to extreme temperature load[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2021, 18(4): 830-836.

[11] YAN Bin, CHENG Ruiqi, XIE Haoran, et al. Vertical nonlinear temperature gradient and temperature load mode of ballastless track in China[J]. Mathematics, 2022, 10(1): 120.

[12] 闫斌, 田江浩, 付贺鑫, 等. 考虑无砟轨道遮盖效应的简支箱梁温度场研究[J]. 铁道工程学报, 2025, 42(3): 30-35.
YAN Bin, TIAN Jianghao, FU Hexin, et al. Study on the temperature field of simply supported box girder bridges considering ballastless track sheltering effect[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2025, 42(3): 30-35.

[13] 周锐, 陈登高, 朱烜, 等. 不同温度速率下桥上 CRTSII型板式无砟轨道热力学性能研究[J]. 铁道学报, 2024, 46(5): 100-109.
ZHOU Rui, CHEN Denggao, ZHU Xuan, et al. Study on thermodynamic properties of CRTS II slab ballastless track on bridge under different temperature rates[J]. Journal of the China Railway Society, 2024, 46(5): 100-109.

[14] ZHOU Lingyu, WEI Tianyu, ZHANG Guangchao, et al. Experimental study of the influence of extremely repeated thermal loading on a ballastless slab track-bridge structure[J]. Materials, 2023, 16(3): 1234.

[15] ZHAO Lei, ZHOU Lingyu, ZHANG Guangchao, et al. Experimental study of the temperature distribution in CRTS-II ballastless tracks on a high-speed railway bridge[J]. Applied Sciences, 2020, 10(6): 1980.

[16] LI Yang, CHEN Jinjie, WANG Jianxi, et al. Study on the interface damage of CRTS II slab track under temperature load[J]. Structures, 2020, 26: 224-236.

[17] 赵丽华, 王浩宇, 梁浩. 基于气象数据的桥上 CRTSI型无砟轨道温度特性精细化分析[J]. 科学技术与工程, 2025, 25(28): 12253-12263.
ZHAO Lihua, WANG Haoyu, LIANG Hao. Refined analysis of temperature characteristics of CRTS I ballastless tracks on bridges using meteorological data[J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(28): 12253-12263.

[18] 李文昊, 勾红叶, 杨怀志, 等.极端温度作用下桥上纵连式无砟轨道台后端刺受力变形特性[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2023, 54(10): 4201-4209.
LI Wenhao, GOU Hongye, YANG Huaizhi, et al. Stress and deformation characteristics of end stab behind abutment of longitudinally connected slab ballastless track on bridge under extreme temperature load[J]. Journal of Central South University (Natural Science) 2023, 54(10): 4201-4209.

[19] 张鹏飞, 桂昊, 高亮, 等. 简支梁桥上I型板式无砟轨道制动力与位移分析[J]. 铁道科学与工程学报, 2017, 14(11): 2323-2332.
ZHANG Pengfei, GUI Hao, GAO Liang, et al. Analysis of braking force and displacement for CRTS I slab ballastless track on simply supported bridge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017, 14(11): 2323-2332.

[20] 张鹏飞, 姚典, 涂建, 等. 双向温梯荷载下简支梁桥上 CRTSII型板受力变形[J]. 北京交通大学学报, 2021, 45(1): 32-38.
ZHANG Pengfei, YAO Dian, TU Jian, et al. Stress and deformation of CRTS II track slab on simply supported beam bridge under bidirectional temperature gradient load[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2021, 45 (1): 32-38.

[21] 张鹏飞, 桂昊, 高亮, 等. 桥上 CRTSIII型板式无砟轨道无缝线路伸缩力影响因素分析[J]. 北京交通大学学报, 2018, 42(6): 15-23.
ZHANG Pengfei, GUI Hao, GAO Liang, et al. Analysis on influencing factors of expansion-contraction force of CRTS III slab track CWR on bridge. Journal of Beijing Jiaotong University, 2018, 42(6): 15-23.

[22] 陈泽林, 蔡小培, 张乾, 等. 基于热流固耦合的桥隧过渡段无砟轨道空间温度场分析[J]. 华中科技大

学学报(自然科学版), 2024, 52(2): 127-133.
CHEN Zelin, CAI Xiaopei, ZHANG Qian, et al. Spatial temperature field analysis of ballastless track in transition section of bridge and tunnel based on heat-fluid-structure interaction[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2024, 52(02): 127-133.

[23] 彭友松. 混凝土桥梁结构日照温度效应理论及应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
PENG Yousong. Studies on theory of solar radiation thermal effects on concrete bridges with application[D]. Chengdu: Southwest China Jiaotong University, 2007.

[24] 桂昊. 桥上 CRTSIII型板式无砟轨道无缝线路纵向力研究[D]. 南昌: 华东交通大学, 2019.
GUI Hao. Study on longitudinal force of CRTS III slab track CWR on bridge[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2019.

[25] 张鹏飞, 余路, 宋慧来, 等. 高温下桥上无砟轨道温度场与温度效应规律研究[J]. 铁道学报, 2026, 48(4): 195-204.
ZHANG Pengfei, YU Lu, SONG Huilai, et al. Research on temperature field and temperature effect of ballastless track on long-span bridges under high temperature conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2026, 48(4): 195-204.



第一作者：余路（1990—），男，高级工程师，博士，研究方向为桥上无砟轨道无缝线路设计理论及关键技术。



通信作者：张鹏飞（1975—），男，教授，博士，博士生导师，研究方向为桥上无砟轨道无缝线路设计理论及关键技术。