 DOI: https://doi.org/10.12349/edc.v8i5.10303

Research on Temperature Effects on the Main Beam of a Long-Span Public-Rail Dual-Use Cable-Stayed Bridge

Xiaonan Guo

China Railway Fourth Bureau Group Fourth Engineering Co., Ltd., Anhui, Hefei, 410119, China

Abstract

This study investigates the temperature effects on structural components and combined temperatures of a Ma 'anshan public-rail dual-use bridge's auxiliary channel steel truss cable-stayed bridge. Using the Midas/Civil finite element software, a structural simulation model was developed to analyze thermal impacts. Key findings include: 1. The influence order of temperature effects on main beam vertical displacement: cable temperature variation> main beam temperature variation> main tower temperature variation; 2. Longitudinal displacement at main beam ends is primarily determined by beam temperature; 3. Temperature differences between bridge components are the primary cause of vertical deformation; 4. Structural temperature increases amplify both maximum positive/negative bending moments on the main beam and axial forces on its chords compared to closure temperatures, while temperature decreases produces opposite effects. These results provide a scientific foundation for constructing long-span cable-stayed bridges in central and western China, significantly enhancing their safety performance.

Keywords

public-rail dual-use cable-stayed bridge; finite element software; temperature effect; structural deformation; internal force analysis

大跨度公铁两用斜拉桥主梁温度效应研究

郭小楠

中铁四局集团第四工程有限公司，中国·合肥 安徽 410119

摘　要

本文以马鞍山公铁两用大桥副汊航道钢桁梁斜拉桥为工程背景，基于Midas/Civil有限元软件建立桥梁结构仿真计算模型，对公铁两用斜拉桥的构件温度及组合温度的效应进行研究。得出如下结论：各构件温度作用对主梁竖向位移的影响度排序：拉索温度变化＞主梁温度变化＞主塔温度变化；主梁的梁端纵向位移基本只受主梁温度作用的影响；斜拉桥各构件之间的温差是引起主梁竖向变形的主要原因；相比于合拢温度，相比于合拢温度，结构温度升高会增大主梁所受的最大正负弯矩和主梁弦杆所受的最大轴力，而温度降低则相反。研究结果为中西部地区大跨度斜拉桥建设提供了科学依据，对提高大跨度公铁两用斜拉桥的安全性有重要意义。

关键词

公铁两用斜拉桥；有限元软件；温度效应；结构变形；内力分析

1 引言

斜拉桥作为一种常用的大跨度桥梁，具有外形美观、承载能力强等特点 [1]，在现代铁路建设中被广泛应用。在我国中西部地区的铁路桥梁建设中广泛采用斜拉桥方案，不仅可以提高铁路的通行能力、改善区域交通情况，还能够节约建设成本、减少对环境的影响 [2]。此外，目前世界大跨度斜拉桥大多数为钢桁梁斜拉桥 [3]，钢桁梁斜拉桥不仅具有斜拉桥的跨越能力大、强度高、施工操作简单、造型美观等一般优点之外，还充分利用了钢材自重轻、强度高、韧性好和材质均匀等特点 [4]。

但由于长期暴露在露天环境中，在太阳辐射和温度变化等环境因素的作用下，桥梁结构中会产生明显的温度效应 [5]。大跨度桥梁结构在强烈的温度变化下将会产生十分严重的温致效应，从而导致严重的应力集中和变形，难以满足其耐久性和适用性要求 [6]。由于气候条件复杂多变，温度变化幅度大，桥梁结构的温度效应尤为明显 [7-8]，例如，在夏季高温季节，大跨度斜拉桥受高温照射，桥梁结构会发生热胀冷缩，进而引起桥面板的伸缩变形和斜拉索的张紧 [9]；而在冬季寒冷季节，温度下降会导致桥梁收缩，引起桥面板的收缩变形和斜拉索的减张 [10]。

研究大跨度斜拉桥在温度荷载作用下的变形规律与内力特征，对确保结构安全、优化设计、提高施工质量、延长使用寿命、推动理论发展和提升经济性等方面具有重要意义。本文以工程实例为背景，基于桥梁结构仿真计算模型，

【作者简介】郭小楠（1989–），男，中国内蒙古乌兰察布人，本科，高级工程师，从事铁路工程研究。

对公铁两用斜拉桥的构件温度及组合温度的效应进行研究。

2 有限元建模

2.1 工程背景

马鞍山公铁两用大桥副汊航道钢桁梁斜拉桥主梁跨度布置为：（56+168+392+168+56）m，采用三片主桁结构主梁。主梁上弦采用公路正交异性整体钢桥面，下弦采用箱桁和板桁结合的铁路整体桥面。主桁上、下弦杆均采用箱型截面，腹杆采用箱型截面或 H 型截面。桥址所在区域属于北亚热带季风气候区。年平均气温 15-16℃，极端最高气温达 43℃，极端最低气温为 -14.0℃。

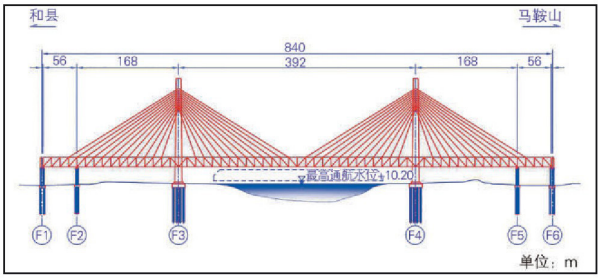


图 1 马鞍山公铁两用大桥副汊航道钢桁梁斜拉桥总体布置图

2.2 有限元建模

Midas/Civil 有限元模型如图所示。上下弦杆及腹杆截面共计 23 个，材料使用 Q370q 型钢材，单元采用一般梁单元。桥塔材料选用 C60 混凝土，单元采用一般梁单元，节点设置在两侧塔柱断面中心线上，除最上方合并区段外，截面均为单箱单室变截面。拉索单元采用桁架单元，因 Midas 数据库中无抗拉强度 ≥2100MPa 钢绞线，材料选用 strand1960 钢绞线，单元截面为圆形截面，为弥补抗拉强度，截面直径采用索套管外径。

全桥共 18 个支座，主梁与墩台之间的支座、主梁和主塔横梁之间的支座采用弹性连接模拟。本文仅研究斜拉桥竖向及纵桥向的温度响应，为简化模型，忽略抗风支座的弹性刚度，桥塔处主梁与桥塔横向固结。有限元模型图如图 2 所示：

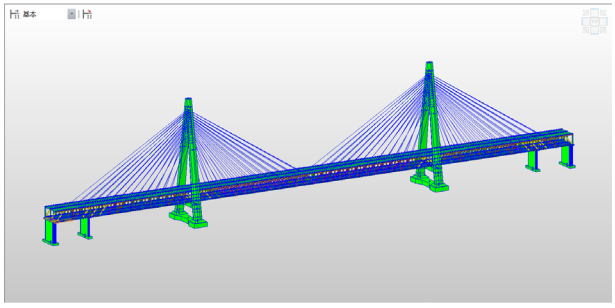


图 2 有限元模型示意图

3 单构件温度作用下斜拉桥主梁的变形特征

现以有限元软件 Midas/Civil 的默认温度（0° C）为初始温度（在初始温度下主梁的竖向位移和梁端位移均为 0），别控制拉索、主梁、主塔三部分构件的最终温度（±10° C、±20° C、±30° C）模拟斜拉桥单构件的温度变化，分析单构件温度作用下主梁的变形响应。

3.1 拉索升降温工况

拉索温度作用下主梁的梁端位移及跨中竖向位移如表 2 所示，正值表示主梁纵向拉伸，负值表示主梁纵向收缩。当拉索升温时，主梁纵向拉伸；当拉索降温时，主梁纵向收缩。据表中数据可以看出，梁端位移与拉索温度变化量成正比。

拉索温度作用下主梁的竖向位移如图 3 所示，正值表示向上，负值表示向下。在六种工况下，主梁位移的最大值均位于跨中处，由于边墩和辅助墩的存在，边跨的竖向位移较小，可以忽略不计。在拉索降温 30 度、降温 20 度、降温 10 度的工况下，除靠近辅助墩的小部分范围外，其余部分主梁的竖向位移均向上，跨中的竖向位移最大，分别为 0.204m、0.136m、0.068m，主跨范围内主梁的变形曲线近似于抛物线。同时，主梁的竖向位移与拉索温度变化量成正比。

表 1 拉索温度变化下主梁的梁端纵向位移及跨中竖向位移

温度工况	梁端位移（cm）	跨中竖向位移（cm）
降温 30 度	-0.48	20.4
降温 20 度	-0.32	13.6
降温 10 度	-0.16	6.8
升温 10 度	0.16	-6.8
升温 20 度	0.32	-13.6
升温 30 度	0.48	-20.4

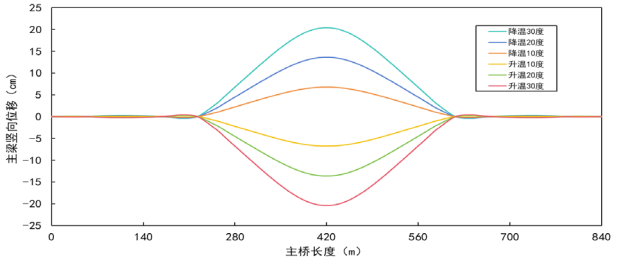


图 3 拉索温度作用下主梁的竖向变形

3.2 桥塔升降温工况

桥塔温度作用下主梁的梁端纵向位移如表 3 所示，正值表示主梁纵向拉伸，负值表示主梁纵向收缩。当主塔升温时，主梁纵向拉伸；当主塔降温时，主梁纵向收缩。同时，梁端位移量与主塔温度变化量成正比。

桥塔温度作用下主梁的竖向位移如图 4 所示，正值表示向上，负值表示向下。当主塔升温时，主梁竖向位移方向向下；当主塔降温时，主梁竖向位移方向向上。在六种温度荷载下，主梁竖向位移的最大值均位于跨中处。在桥梁主跨范围内，主梁的竖向位移曲线近似于抛物线，升降温幅度越

大，位移量越大，且位移量与温度变化量成正比。在边跨上，边墩与辅助墩之间的主梁竖向位移较小，可以忽略不计；辅助墩与主塔之间的主梁竖向位移较大，位移方向与主跨段相同，但极值和变化幅度均小于主跨段。

表 2 主塔温度变化下主梁的梁端纵向位移及跨中竖向位移

温度工况	梁端位移（cm）	跨中竖向位移（cm）
降温 30 度	0.18	-8.82
降温 20 度	0.12	-5.88
降温 10 度	0.06	-2.94
升温 10 度	-0.06	2.94
升温 20 度	-0.12	5.88
升温 30 度	-0.18	8.82

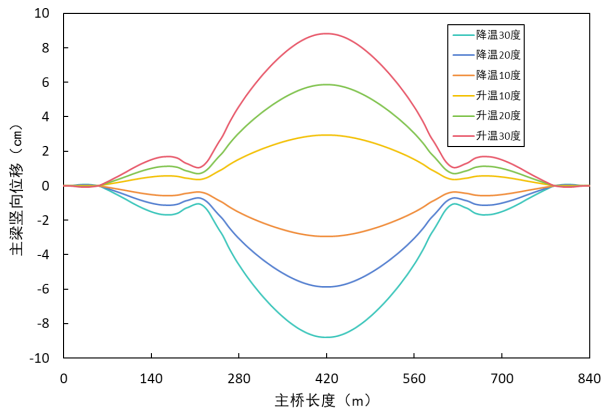


图 4 主塔温度作用下主梁的竖向变形

3.3 主梁升降温工况

主梁温度作用下主梁的梁端纵向位移及跨中竖向位移如表 4 所示，正值表示主梁纵向拉伸，负值表示主梁纵向收缩。当主梁降温时，主梁纵向收缩；当主梁升温时，主梁纵向拉伸。同时，梁端位移量与主梁温度变化量成正比。

主梁温度作用下主梁的竖向位移如图 5 所示，正值表示向上，负值表示向下。当主梁升温时，主梁竖向位移方向向上；当主梁降温时，主梁竖向位移方向向下。在六种温度荷载下，主梁竖向位移的最大值均位于跨中处。在桥梁主跨范围内，主梁的竖向位移曲线近似于抛物线，升降温幅度越大，位移量越大，且位移量与温度变化量成正比。在边跨上，边墩与辅助墩之间的主梁竖向位移较小，可以忽略不计；辅助墩与主塔之间的主梁竖向位移较大，位移方向与主跨段相反，且极值和变化幅度均远小于主跨段。

3.4 单构件温度作用影响度对比

单构件温度变化下主梁的梁端纵向位移如表 5 所示。各构件温度变化下主梁的梁端纵向位移与温度变化量成正比；主梁梁端纵向位移中，各构件影响度排序：主梁温度变化>拉索温度变化>主塔温度变化；主梁、拉索降温时，主梁纵向收缩，升温时，主梁纵向拉伸，而主塔升降温时主梁纵向变形与前两者相反。

表 3 主梁温度变化下主梁的梁端纵向位移及跨中竖向位移

温度工况	梁端位移（cm）	跨中竖向位移（cm）
降温 30 度	-14.64	-11.12
降温 20 度	-9.77	-7.41
降温 10 度	-4.88	-3.71
升温 10 度	4.88	3.71
升温 20 度	9.77	7.41
升温 30 度	14.64	11.12

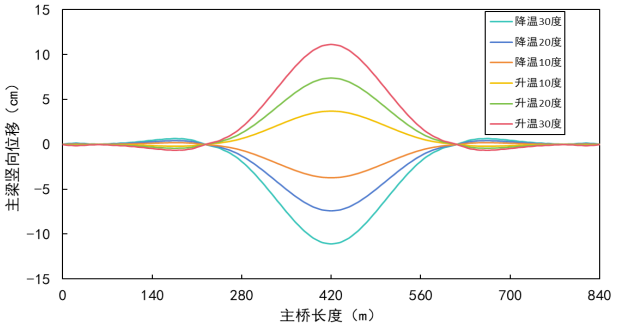


图 5 主梁温度作用下主梁的竖向变形

表 4 各构件温度变化下主梁的梁端纵向位移一览表

温度工况	拉索	主塔	主梁
	单构件作用下梁端纵向位移（cm）		
降温 30 度	-0.48	0.18	-14.64
降温 20 度	-0.32	0.12	-9.77
降温 10 度	-0.16	0.06	-4.88
升温 10 度	0.16	-0.06	4.88
升温 20 度	0.32	-0.12	9.77
升温 30 度	0.48	-0.18	14.64

表 5 是各单构件温度变化下主梁的跨中竖向位移，从表中看出：各构件在升降温度相同时主梁的跨中竖向位移方向相反，但位移量相同；各构件温度变化下主梁的跨中竖向位移梁与温度变化量成正比；主梁竖向位移中，各构件温度影响排序：拉索温度变化>>主梁温度变化>主塔温度变化；在主跨段，拉索降温时主梁位移方向向下，升温时跨中位移方向向上，而主塔和主梁升降温时主梁的位移方向与拉索升降温时相反。

此外，从图 3、图 4、图 5 中可知：拉索温度变化并不会引起边跨段主梁的竖向变形，而主梁和主塔温度变化会引起边跨范围内辅助墩与主塔横截面之间区段主梁的竖向变形，且主塔温度变化时该区段的位移方向与主跨相同，主梁温度变化时该区段的位移方向与主跨段相反；拉索和主梁温度变化时主塔横截面处的主梁无竖向位移，主塔温度变化时该处主梁会出现竖向位移。

表 5 各构件温度变化下主梁的跨中竖向位移一览表

温度工况	拉索	主塔	主梁
	单构件作用下主梁跨中竖向位移（cm）		
降温 30 度	20.40	-8.81	-10.4
降温 20 度	13.60	-5.88	-7.61
降温 10度	6.80	-2.94	-3.81
升温 10 度	-6.80	2.94	3.81
升温 20 度	-13.60	5.88	7.61
升温 30 度	-20.40	8.81	11.42

4 组合温度作用下斜拉桥主梁的变形特征

主梁变形响应分析所取的组合工况如表 6 所示。

表 6 组合温度工况一览表

序号	构件升降温度		
	主塔	主梁	拉索
1	升温 30 度	升温 30 度	升温 30 度
2	升温 30 度	升温 30 度	升温 40 度
3	升温 30 度	升温 40 度	升温 40 度
4	升温 30 度	升温 40 度	升温 50 度
5	降温 30 度	降温 30 度	降温 30 度
6	降温 30 度	降温 30 度	降温 40 度
7	降温 30 度	降温 40 度	降温 40 度
8	降温 30 度	降温 40 度	降温 50 度

图 6 是各组合工况下主梁的竖向位移。据图可知，在主跨上，工况一和工况五作用下主梁的竖向变形远低于其他工况，结合在上一小节得出的单构件温度作用下主梁的竖向变形与温度变化值成正比的结论，可以推断出当主梁、主塔和拉索三部分构件温度相同时，主梁的竖向变形均远小于三部分构件存在 5℃～ 15℃的温度差时的情况。据此可得出结论：斜拉桥各构件之间的温度差是引起主梁主跨范围内竖向变形的重要原因。

在主跨上，工况四和工况八作用下主梁的竖向位移明显大于其他工况。由此可知，斜拉桥各构件之间的温差是不可忽略的。工况四作用下的主梁跨中位移是工况一作用下的 60 倍、工况二作用下的 1.4 倍、工况三作用下的 3.1 倍，不管是忽略了任何两种构件的温差，对主梁主跨的竖向变形都有相当大的影响，进而影响列车运行的平稳度，影响乘客的舒适度，

表 7 是各组合工况下主梁的梁端纵向位移和跨中竖向位移，据表可知工况一和工况二作用下的梁端位移相差极小，同时工况三和工况四作用下的梁端位移相差极小，而工况一、二与工况三、四的差别在于主梁的温度。

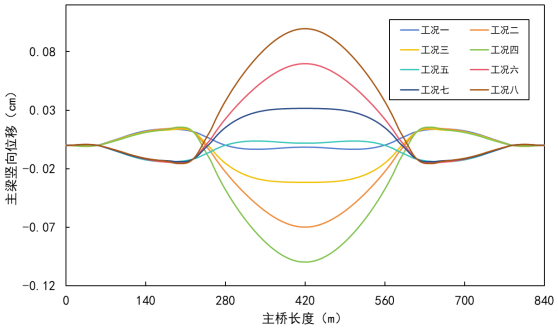


图 6 各组合工况下主梁的竖向位移

表 7 各组合工况下主梁的梁端纵向位移及跨中竖向位移

工况序号	梁端位移（cm）	跨中竖向位移（cm）
1	14.94	-0.17
2	15.08	-6.98
3	19.95	-3.17
4	20.11	-9.97
5	-14.94	0.17
6	-15.08	6.98
7	-19.95	3.17
8	-20.11	9.97

5 温度作用下斜拉桥主梁的内力特征

5.1 恒载作用下主梁的内力特征

图 7、图 8 分别是是恒载作用下的主梁上弦杆和下弦杆的轴力图，由图可知，绝大部分上下弦杆均受压，且在主跨段轴力变化平缓。

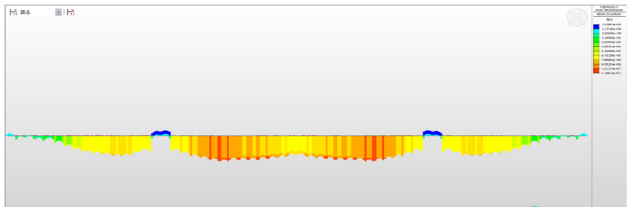


图 7 恒载作用下主梁上弦杆轴力图

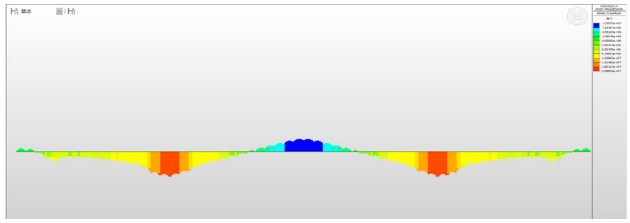


图 8 恒载作用下主梁下弦杆轴力图

图 9 是恒载作用下的主梁弯矩图从图中可以看出，上弦杆的弯矩曲线在每个节段内都近似为抛物线，且各上弦杆在节点处有最大的负弯矩，在中心处有最大正弯矩。

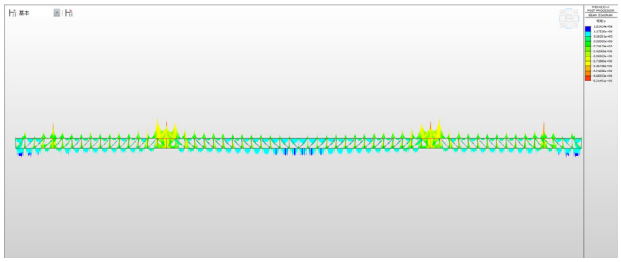


图 9 恒载作用下主梁弯矩图

5.2 温度作用下主梁的内力特征

表 8 是各组合下主梁上下弦杆的最大轴力。由表可知，当恒载与温度工况四进行组合时，相比于仅恒载作用下，其上下弦杆最大轴力均有所降低；当恒载与温度工况八进行组合时，相比于仅恒载作用下，其上下弦杆最大正轴力均有所降低。相对于合拢温度，当温度升高会增大主梁所受的最大轴力，而温度降低则相反。

表 9 是各组合下主梁上下弦杆的正负最大弯矩。由表可知，当恒载与温度工况四进行组合时，相比于仅恒载作用下，其上下弦杆最大正负弯矩均有所降低；当恒载与温度工况八进行组合时，相比于仅恒载作用下，其上下弦杆最大正负弯矩均有所降低。相对于合拢温度，当温度升高会增大主梁所受的最大正负弯矩，而当温度降低则会减小主梁所受的最大正负弯矩。

表 8 各组合下主梁上下弦杆的最大轴力

组合	上弦杆最大轴力（单位：kN·m）		下弦杆最大轴力（单位：kN·m）	
	受压	受拉	受压	受拉
仅恒载	11483	2437	20883	10705
恒载＋工况四	12660	6439	25064	12435
恒载＋工况八	10306	1177	18862	8976

表 9 各组合下主梁上下弦杆的最大正负弯矩

组合	上弦杆最大弯矩（单位：kN·m）		下弦杆最大弯矩（单位：kN·m）	
	正弯矩	负弯矩	正弯矩	负弯矩
仅恒载	1062	3936	1389	5307
恒载＋工况四	1140	4510	1471	6342
恒载＋工况八	977	3136	1362	5300

6 结论

(1) 斜拉桥主梁的变形响应是各构件温度荷载作用下主梁响应的叠加。单构件温度变化下主梁的竖向位移和梁端纵向位移与温度变化量成正比。主梁竖向位移中，各构件温度影响度排序：拉索温度变化＞主梁温度变化＞主塔温度变化。主梁梁端纵向位移中，各构件温度影响度排序：主梁温度变化＞＞拉索温度变化＞主塔温度变化。拉索温度变化引起的主梁边跨段的竖向变形较小，而主梁和主塔温度变化引起的主梁边跨段的竖向变形较大。

(2) 在恒载作用下或恒载与温度荷载共同作用下：大部分上下弦杆均受压，且上弦杆的轴力变化较下弦杆更为平缓；上下弦杆的弯矩曲线在每个节段内都近似为抛物线，且各上弦杆在节点处有最大的负弯矩，在中心处有最大正弯矩；越靠近主塔支座和辅助墩支座的节段最大负弯矩越大、最大正弯矩越小；越远离主塔支座和辅助墩支座的节段最大负弯矩越小、最大正弯矩越大。

(3) 温度荷载对主梁的内力有较大的影响。相比于合拢温度，结构温度升高会增大主梁所受的最大正负弯矩和主梁弦杆所受的最大轴力，而温度降低则会减小主梁所受的最大正负弯矩和主梁弦杆所受的最大轴力。

参考文献

[1] 尹永杰. 大跨度桥梁的设计要点及优化措施探讨 [J]. 工程技术研究, 2020, 5(08): 225-6.

[2] 何祥平.基于长期实测的大跨度斜拉桥钢桥塔服役性能研究[D].东南大学,2022.

[3] 邓舒文.大跨度钢桁梁斜拉桥温度效应分析[D].长沙理工大学,2014.

[4] 曹晓娟.基于二维云模型的PL钢桁梁斜拉桥步履式顶推施工安全风险评价[D].江西理工大学,2023.

[5] 陈波,郑瑾,王建平.桥梁结构温度效应研究进展[J].武汉理工大学学报,2010,32(24):79-83.

[6] FU Y, DEWOLF J T. Effect of differential temperature on a curved post-tensioned concrete bridge [J]. Advances in Structural Engineering, 2004, 7(5): 385-97.

[7] 刘文硕,吕方舟,戴公连,等.高速铁路大跨度斜拉桥钢箱梁温度模式分析[J].铁道科学与工程学报,2023,20(11):4031-4040.

[8] 戴公连,詹琢然,何昌林,等.基于实测的斜拉桥拉索温度规律及模式研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2025,53(02):62-68.

[9] ZHOU L, XIA Y, BROWNJOHN J M, et al. Temperature analysis of a long-span suspension bridge based on field monitoring and numerical simulation [J]. Journal of Bridge Engineering, 2016, 21(1): 04015027.

[10] 韩石.高原高寒地区桥梁温度作用计算方法研究[D].长安大学,2023.