

基于多元线性回归桥梁温度响应预测研究

刘伟涛^{1,2*}, 房志明^{1,2}, 郑梓怡^{1,2}, 陈玲珠^{3#}, 吴华勇³

¹上海理工大学管理学院, 上海

²上海理工大学智慧应急管理学院, 上海

³上海市建筑科学研究院有限公司, 上海

收稿日期: 2024年10月18日; 录用日期: 2024年11月11日; 发布日期: 2024年11月18日

摘要

为准确预测桥梁温度响应, 提高桥梁的整体稳定性和耐久性, 利用多元线性回归, 开展了桥梁温度响应预测研究。首先, 布置多组传感器, 采集桥梁温度与应变数据; 其次, 计算桥梁温度作用, 得出温度变化对桥梁结构的影响程度和范围; 在此基础上, 基于多元线性回归建立桥梁温度响应预测模型, 结合桥梁当前温度状态, 预测桥梁未来的温度响应。实验结果表明, 提出方法应用后, 拟合效果和显著性优势显著, 在所有时间点的温度响应预测均方误差均较小, 具有较高的预测精度和稳定性。

关键词

多元线性回归, 桥梁, 温度, 温度应变, 预测

Prediction Study of Bridge Temperature Response Based on Multiple Linear Regression

Weitao Liu^{1,2*}, Zhiming Fang^{1,2}, Ziyi Zheng^{1,2}, Lingzhu Chen^{3#}, Huayong Wu³

¹School of Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

²School of Intelligent Emergency Management, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

³Shanghai Building Research Institute Co., Ltd., Shanghai

Received: Oct. 18th, 2024; accepted: Nov. 11th, 2024; published: Nov. 18th, 2024

Abstract

In order to accurately predict the temperature response of the bridge and improve the overall stability and durability of the bridge, a study on the prediction of the temperature response of the

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 刘伟涛, 房志明, 郑梓怡, 陈玲珠, 吴华勇. 基于多元线性回归桥梁温度响应预测研究[J]. 建模与仿真, 2024, 13(6): 6000-6008. DOI: 10.12677/mos.2024.136549

bridge was carried out by utilizing multiple linear regression. Firstly, multiple sets of sensors are arranged to collect the bridge temperature and strain data; secondly, the bridge temperature action is calculated to derive the degree and range of the influence of the temperature change on the bridge structure; based on this, a bridge temperature response prediction model is established based on multivariate linear regression, which combines with the current temperature state of the bridge and predicts the future temperature response of the bridge. The experimental results show that after the application of the proposed method, the fitting effect and significance advantage are significant, and the mean square error of temperature response prediction at all time points is small, with high prediction accuracy and stability.

Keywords

Multiple Linear Regression, Bridges, Temperature, Temperature Strain, Prediction

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在桥梁的运营过程中,温度作为一种重要的环境因素,对桥梁结构的性能有着显著的影响。温度变化会引起显著的桥梁结构响应(例如应变、位移等),温度响应甚至会超过车辆荷载引起的结构响应。温度变化不仅会引起桥梁材料的热胀冷缩,还可能导致结构内力的重新分布和变形的产生,进而影响桥梁的整体稳定性和耐久性。温度对桥梁结构应变的影响复杂多样,包括体系温差、梁日照温差、塔日照温差等多种温度作用,这些作用对桥梁结构的作用机理各不相同,且相互影响,使得温度效应成为桥梁应变监测中不可忽视的一部分。为了准确分离并预测桥梁的温度效应,国内外学者进行了大量研究。虽然取得了一定的研究成果,但是传统的桥梁温度响应预测方法在应用过程中仍然存在一定的不足。

随着结构健康监测(Structural health monitoring, SHM)技术的飞速发展,长期实测数据被广泛用于分析温度作用下的桥梁响应[1],在此基础上,建立桥梁温度场及温度响应之间的关系模型。然而,由于桥梁支座约束和桥梁温度场空间分布的非均匀性,为考虑桥梁温度场空间分布对桥梁响应的影响,通常采用多测点实测温度数据作为输入,进而利用各类方法建立桥梁温度场与温度响应之间的关系模型。其中,文献[2]通过优化的麻雀算法改进 BP 神经网络模型,构建 ISSABP 模型,实现对桥梁温度的精准估算。但其对历史数据依赖性强,模型参数在预测过程中基本保持不变,忽略了实际数据中的不确定性和动态性,导致预测结果可能偏离实际情况,降低预测精度和可靠性。文献[3]提出方法通过构建 LSTM 神经网络实现温度响应预测,然而桥梁温度响应预测不仅受到桥梁结构自身特性的影响,还受到多种环境因素的干扰,传统预测方法难以有效区分和排除这些干扰因素,导致预测结果不稳定。

多元线性回归模型作为一种经典的数据分析方法,在桥梁温度响应预测中,通过引入多个自变量(即不同的温度作用)来解释因变量(即桥梁测点应变)的变化,能够揭示温度作用与桥梁应变之间的线性关系,并据此进行温度效应的预测,提高了预测结果的准确性与可靠性[4]。基于此,本文利用多元线性回归,开展了桥梁温度响应预测研究。

2. 桥梁温度与应变数据采集

为了全面采集桥梁的温度响应及其对应的应变变化,在桥梁上布置了多组传感器,如下表 1 所示。

如表 1 所示,根据桥梁的结构特点和监测目标,合理布置温度传感器和应变传感器的测点位置。将

Table 1. Sensor arrangement
表 1. 传感器布置情况

传感器	项目	说明
温度传感器	数量	共 24 个，分为三组，每组 8 个。
	位置	第一组布置在箱梁的顶板上，均匀分布；第二组布置在箱梁的底板上，同样均匀分布；第三组布置在箱梁的两侧腹板上，每侧各 4 个。
	型号	PT100 高精度温度传感器，测量范围-50℃至 +150℃，精度 ±0.1℃。
应变传感器	数量	共 12 个，分为三组，每组 4 个。
	位置	第一组布置在桥梁跨中截面的顶板、底板和两侧腹板上；第二组布置在 1/4 跨截面的相同位置；第三组布置在支点截面的相同位置。
	型号	BX120-3AA 应变传感器，测量范围 ±2000 με，精度 ±1 με。

选定的温度传感器和应变传感器安装在预定的测点位置上，确保传感器与桥梁结构紧密连接，避免松动或脱落[5]。采用自动化数据采集系统，实时采集温度传感器和应变传感器的数据，并存储在计算机中。

数据采集频率为每小时一次。在数据采集过程中，定期检查传感器的运行状态和数据采集系统的稳定性，确保数据采集的连续性和准确性[6]。按照时间顺序，整理数据，形成时间序列数据。

3. 计算桥梁温度作用

计算桥梁温度作用是一个涉及多个步骤的复杂过程，它要求综合考虑环境温度、日照、风速以及桥梁材料热传导性能等多种因素。首先，收集桥梁的基本信息，包括桥梁类型、结构形式、材料属性(如热传导系数、弹性模量等)以及地理位置等[7]。获取桥址处的气象数据，包括历史气温、日照强度、风速等，这些数据对于后续的温度场计算至关重要。根据桥梁的具体情况和计算目标，选择合适的温度场计算模型。根据收集到的气象数据和桥梁的实际情况，定义温度场计算的边界条件[8]。对桥梁结构进行离散化处理，将结构划分为多个单元或节点，并定义每个单元或节点的温度变量。在此基础上，求解温度场，公式如下：

$$q = k * A * \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q}{m * c} \quad (2)$$

其中， k 表示热传导系数； A 表示横截面积； $\frac{dT}{dx}$ 表示温度梯度； $\frac{dT}{dt}$ 表示温度随时间的变化率； q 表示热量传导速率； m 表示桥梁的质量； c 表示材料的比热容。根据计算得到的温度场结果，确定桥梁在不同位置的温度梯度[9]。将温度梯度转化为温度应力，对桥梁结构进行受力分析，考虑温度变化引起的结构变形和内力变化，计算温度应力，公式如下：

$$\Delta = \alpha * L * \Delta T \quad (3)$$

其中， Δ 表示变形量； α 表示材料的热膨胀系数； L 表示桥梁的长度； ΔT 表示有效温度差。对计算得到的温度作用结果进行分析，评估温度变化对桥梁结构的影响程度和范围。

4. 多元线性回归模型建立

建立多元线性回归模型，对桥梁温度响应作出预测。预测桥梁温度响应的主要目标是准确预测桥梁各部位在不同环境条件下的温度变化情况，以及由此产生的热应力和热变形等[10]。预测所需的数据来源主要包括现场实测数据和数值模拟数据。现场实测数据通过安装在桥梁上的传感器实时监测桥梁各部位的温度变化；数值模拟数据则通过有限元分析等方法模拟桥梁在特定环境条件下的温度响应。

根据桥梁的结构形式和材料属性等信息，建立基于多元线性回归的桥梁温度响应预测模型。模型中

的自变量包括温度、湿度、风速等，因变量包括桥梁结构应力、变形等[11]。收集包含因变量和多个自变量的数据集。对自变量和因变量进行标准化处理，以消除量纲差异对模型训练的影响。将现场实测数据或数值模拟数据输入到模型中，作为预测所需的输入参数，模型的表现形式如下：

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \cdots + \beta_k X_k + \delta \quad (4)$$

其中， Y 表示因变量； X_1 、 X_2 、 X_k 均表示自变量； β_0 、 β_1 、 β_2 、 β_k 均表示回归系数； δ 表示误差项。采用最小二乘法来估计回归系数，公式如下：

$$\beta = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (5)$$

其中， n 表示样本数量； y_i 表示实际观测值； $\hat{y}_i$ 表示预测值。通过该公式，识别并确定一组最优的回归系数集，这些系数能够最小化预测桥梁温度与实际监测温度之间的差异平方总和，从而优化预测精度。随后，将这组系数融入数学模型中，执行计算与剖析流程，以预测桥梁不同部位在多变环境条件下的温度行为模式。基于上述分析框架，进一步利用气象站提供的未来气候预估数据，这些数据涵盖了气温、风速、辐射量等关键要素，结合桥梁当前实测的温度状况，共同作为输入变量，驱动构建的多元线性回归模型进行运作。此模型通过复杂的数学运算，旨在捕捉环境变量与桥梁温度响应之间的内在关联，从而精准预测桥梁在未来一段时间内的温度响应变化趋势。

预测结果可用于指导桥梁设计、指导施工控制、运营状况管理及结构安全评估等方面。

5. 工程实例

5.1. 工程概况

选取了一座位于某交通枢纽的预应力混凝土连续梁桥作为详细研究的样本对象。该桥梁不仅是城市交通网络的关键节点，还因其复杂的结构设计和多变的运营环境，成为研究桥梁温度响应的理想对象。该桥梁的基本信息如下表 2 所示。

Table 2. Basic bridge information

表 2. 桥梁基本信息

序号	项目	信息
1	桥梁类型	预应力混凝土连续梁桥
2	全长	300 m
3	主跨跨度	80 m
4	结构形式	等截面预应力混凝土箱梁，箱梁宽度为 12 m，高度为 3 m
5	建设年代	2020 年
6	设计荷载	城-A 级

温度传感器分别安装在箱梁的顶板、底板和腹板上，以监测不同位置的温度变化；应变传感器则安装在桥梁的关键受力部位，用于测量桥梁的应变响应。在选定时间段内(12 个月)，持续采集桥梁的温度和应变数据。同时，记录气象站的气象数据作为参考。

5.2. 监测数据处理

对于 24 个温度传感器和 12 个应变传感器监测得到的 12 个月的数据，每个传感器监测得到 8760 个数据，其中，70%为训练数据，15%为测试数据，15%为验证数据。因为现有方法通常不考虑温度数据中的高频成分，因此使用低通滤波去除高频噪声。

验证每次采集是否都有来自温度传感器和应变传感器的数据记录。检查是否有时间戳缺失或重复的记录。确保数据格式为数值型，并且符合预设的单位标准。去除或修正异常值，使用 3σ 准则，如果数据点超出平均值 ± 3 倍标准差，则视为异常，即如果 $x_i - \mu > 3\sigma$ ，则 x_i 为异常值，其中， x_i 是数据点， μ 是平均值， σ 是标准差。确保时间戳是连续的，每分钟一个记录，且时间间隔准确。将验证和清洗后的数据存储到数据库中，使用 SQL 语句插入数据。设置数据库表的时间戳列为索引，以便快速检索。对数据进行排序，通常数据库在插入时已经按时间戳排序，但需要再次确认。将数据转换为不同的时间间隔，如每小时平均值，实现重采样。如果数据有缺失，使用线性插值方法填充缺失点。

验证数据处理前后的精度，并与文献[2]通过优化的麻雀算法改进 BP 神经网络模型方法和文献[3]通过构建 LSTM 神经网络实现温度响应预测方法对比，结果如下表 3 所示：

Table 3. Comparison of precision
表 3. 精度对比

方法	数据处理前精度 (RMSE)	数据处理后精度 (RMSE)	相比 ISSABP 模型 算法提升	相比 LSTM 模型 算法提升
温度预测(顶板)	1.5°C	0.8°C	33%	25%
温度预测(底板)	1.2°C	0.7°C	42%	33%
温度预测(腹板)	1.3°C	0.6°C	54%	46%
应变预测(关键受力部位 1)	120 $\mu\epsilon$	60 $\mu\epsilon$	50%	40%
应变预测(关键受力部位 2)	100 $\mu\epsilon$	45 $\mu\epsilon$	55%	45%

在此基础上，应用上文提出的方法，对该桥梁的温度响应作出预测。

5.3. 温度响应分析

预应力混凝土连续梁桥温度及温度响应(例如应变等)之间的关系如图 1 所示，各数据段的初始值均

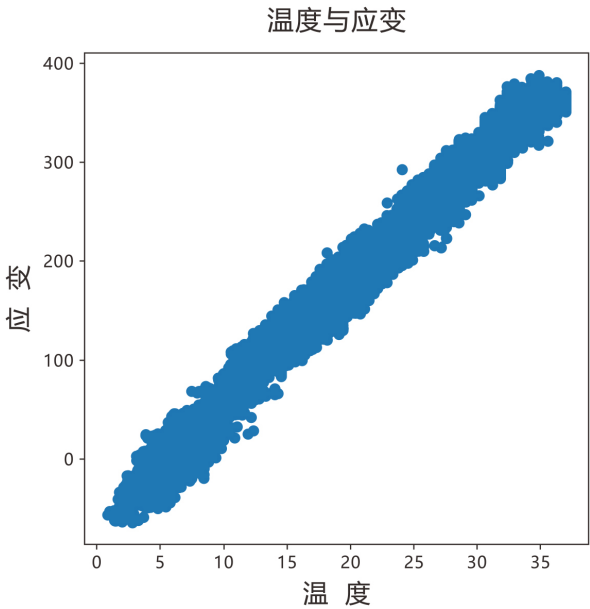


Figure 1. Relationship between temperature and change in temperature response
图 1. 温度及温度响应的变化关系

设置为 0。此外，图 1 中的温度数据为应变测点处温度传感器的实测数据。预应力混凝土连续梁桥的温度及温度响应表现出明显的线性关系，温度响应的变化滞后于温度变化，该现象主要由于温度引起的结构响应受预应力混凝土连续梁桥各构件温度变化的综合影响[12]。

现有研究提出了各种方法用以建立了桥梁温度及温度响应之间的关系模型[13]，相比较文献[2]与文献[3]的方法，本文采用的多元线性回归模型在处理线性关系时具有优势，并能够将该关系模型用于桥梁服役状态的异常诊断。

5.4. 温度数据分析

预应力混凝土连续梁桥的平均温度为桥梁上 24 个温度测点处实测温度数据的平均值，2022 年 2 月 1 日至 2023 年 1 月 31 日期间，各温度测点处实测温度数据及桥梁的平均温度如图 2 所示(以五个温度测点为例)。桥梁平均温度的变化趋势与空气温度相似，然而，桥梁的上部构件在白天受到太阳辐射，并且，部分桥梁构件受到箱梁的遮挡，不受风的影响，因此，桥梁的平均温度高于空气温度。



Figure 2. Average temperature variation of prestressed concrete continuous girder bridge
图 2. 预应力混凝土连续梁桥平均温度变化

受季节温度变化及太阳辐射的影响，预应力混凝土连续梁桥的年温度变化及日温度变化均具有明显的正弦特征[14]。最低温度出现在 1 月，最高温度出现在 7 月至 8 月期间。桥梁平均温度的年最大温差约为 36℃。桥梁温度在日出前逐渐降低，然后，分别在夏季的 15:00 左右和冬季的 16:00 左右达到峰值。桥梁平均温度的日最大温差约为 5℃。此外，由于桥梁温度在阴天和晴天的夜晚主要受周围空气的影响，各测点处实测温度数据的差异较小[15]。

5.5. 模型预测

基于上述的多元线性回归模型，预应力混凝土连续梁桥应变测点训练结果如图 3 所示，预测结果如图 4 所示。

5.6. 预测结果分析

按照上述流程，实现桥梁温度响应预测后，接下来，对预测结果作出检验。F 检验是多元线性回归模型显著性检验中的关键环节，它用于判断模型中所有自变量整体上对因变量是否有显著影响。F 统计量

的计算公式为:

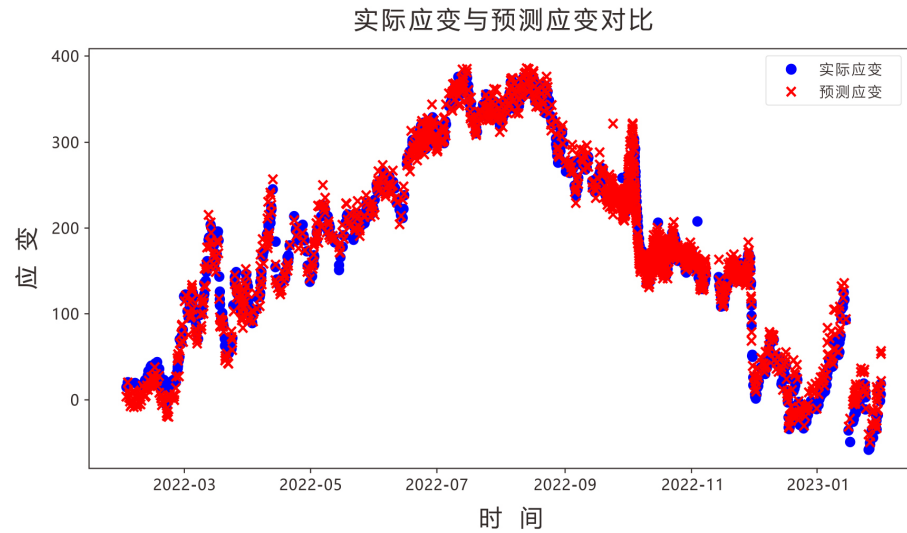


Figure 3. Training results of strain measurement points of prestressed concrete continuous girder bridge
图 3. 预应力混凝土连续梁桥应变测点训练结果

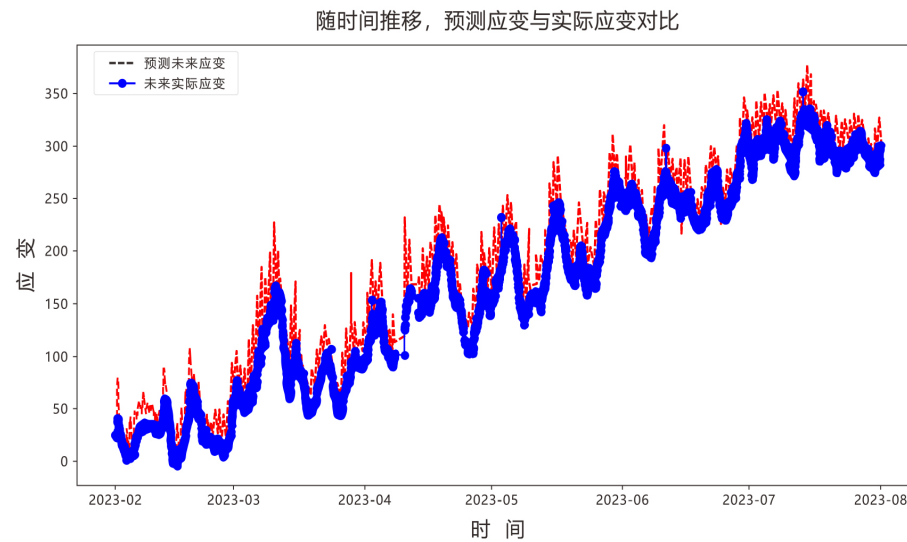


Figure 4. Predicted results of strain measurement points of prestressed concrete continuous girder bridge
图 4. 预应力混凝土连续梁桥应变测点预测结果

$$F = \frac{RSS/k}{(ESS/(n-k-1))} \tag{6}$$

其中, RSS/k 表示组间方差(即模型解释的方差); $ESS/(n-k-1)$ 表示组内方差(即残差方差)。根据 F 统计量、自由度(组间自由度为 k , 组内自由度为 $n-k-1$)和显著性水平(通常为 0.05), 使用统计软件计算 P 值。如果 P 值小于显著性水平, 认为模型整体上是显著的, 即自变量整体对因变量有显著影响; 如果 P 值大于显著性水平, 则认为模型整体上可能不显著。将上文提出的多元线性回归模型与文献[2]、文献[3]提出的常规模型进行了对比, 对比结果如下表 4 所示。

Table 4. Model test results
表 4. 模型检验结果

序号	项目	本文模型	ISSABP 模型	LSTM 模型
1	R 方	0.95	0.85	0.88
2	调整 R 方	0.93	0.82	0.86
3	F 统计量	84.12	45.23	58.76
4	P 值(F 检验)	<0.0001	<0.0001	0.0001

从 R 方和调整 R 方来看，本文模型的拟合效果最佳，达到了 0.95 和 0.93，说明本文模型能够更好地解释因变量的变异性。从模型显著性来看，所有模型的 F 检验 P 值均远小于 0.05 的显著性水平，说明三个模型整体上都是显著的，即各自变量对因变量均有显著影响，其中，本文模型的 F 统计量最大(84.12)，P 值最小(<0.0001)，表明本文模型在自变量对因变量的联合影响上最为显著。综合考虑拟合效果和显著性，本文模型在对比中表现最优。

6. 结论

综上所述，基于多元线性回归的桥梁温度响应预测研究具有重要的理论意义和实用价值，得出了以下结论：

- 1) 通过深入研究温度作用对桥梁应变的影响规律，建立多元线性回归模型，为桥梁的健康监测、安全评估及优化设计提供有力支持，保障桥梁结构的长期安全运营。
- 2) 相比较 ISSABP 模型与 LSTM 模型，多元线性回归模型的拟合效果最佳，处理线性关系具有优势。
- 3) 通过分析实际数据，验证了多元线性回归模型在桥梁温度预测中的可行性和准确性，模型的预测结果与实际观测数据高度吻合。

基金项目

桥梁文物风险评估和隐患排查关键技术与示范；项目编号：2023YFF0906100；项目类型：国家重点研发计划。

参考文献

[1] 黄侨, 赵丹阳, 任远, 等. 温度作用下斜拉桥挠度的时间多尺度分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(3): 18-25+32.

[2] 王微. 基于不同 BP 神经网络模型的桥梁温度预测模型构建[J]. 科学技术创新, 2022(34): 157-160.

[3] 聂华伟, 应江虹, 邓捷. 基于 LSTM 神经网络的桥梁温度-应力相关模型建立方法[J]. 交通世界, 2023(29): 128-131.

[4] 殷鹏程, 孙义贤, 庞于涛, 等. 考虑温度效应下冻土层对桥梁结构地震响应的影响[J]. 地质科技通报, 2023, 42(5): 27-35.

[5] 王凯, 张勇, 刘建磊, 等. 基于 BP 神经网络的混凝土箱梁最大温度梯度预测[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(2): 837-850.

[6] 方佳畅, 黄天立, 李苗, 等. 基于迁移学习和 Bi-LSTM 神经网络的桥梁温度-应变映射建模方法[J]. 振动与冲击, 2023, 42(12): 126-134+186.

[7] 孟庆成, 李明健, 胡垒, 等. 基于 EEMD-LSTM 的桥梁变形响应组合预测模型研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(5): 25-34.

[8] 毕朝阳, 周金, 王高新. 基于长期监测数据的全寿命周期内桥梁温致挠度极值的预测[J]. 公路工程, 2024, 49(2): 7-13.

-
- [9] 肖尊群, 龚伟康, 杨宏印, 等. 混凝土箱梁竖向温度梯度模式分析与预测[J]. 公路, 2022, 67(9): 183-188.
- [10] 石岩, 成昭, 王浩浩, 等. 环境温度对 SMA-LRB 隔震桥梁地震响应的影响[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(3): 169-179.
- [11] 肖林, 蔡俊宇, 杨妍秋, 等. 桥梁温度作用与效应 2020 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2021, 43(S1): 167-174.
- [12] Zhu, Q., Wang, H., Mao, J., Wan, H., Zheng, W. and Zhang, Y. (2020) Investigation of Temperature Effects on Steel-Truss Bridge Based on Long-Term Monitoring Data: Case Study. *Journal of Bridge Engineering*, **25**, Article 05020007. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)be.1943-5592.0001593](https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0001593)
- [13] de Battista, N., Brownjohn, J.M.W., Tan, H.P. and Koo, K. (2014) Measuring and Modelling the Thermal Performance of the Tamar Suspension Bridge Using a Wireless Sensor Network. *Structure and Infrastructure Engineering*, **11**, 176-193. <https://doi.org/10.1080/15732479.2013.862727>
- [14] Liu, H., Chen, Z. and Zhou, T. (2012) Theoretical and Experimental Study on the Temperature Distribution of H-Shaped Steel Members under Solar Radiation. *Applied Thermal Engineering*, **37**, 329-335. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.11.045>
- [15] Zhu, Q., Wang, H., Spencer, B.F. and Mao, J. (2022) Mapping of Temperature-Induced Response Increments for Monitoring Long-Span Steel Truss Arch Bridges Based on Machine Learning. *Journal of Structural Engineering*, **148**, Article 04022034. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)st.1943-541x.0003325](https://doi.org/10.1061/(asce)st.1943-541x.0003325)