

一种桥梁温度响应统计映射异常预警方法

范 霄, 任亭旭, 肖 剑

上海理工大学环境与建筑学院, 上海

收稿日期: 2025年3月8日; 录用日期: 2025年4月1日; 发布日期: 2025年4月10日

摘 要

桥梁温度变化对其结构性能有重大影响, 但现有监测系统准确性不足。本研究提出基于温度响应统计参数映射模型的桥梁服役状态异常预警方法, 通过提取温度数据统计参数, 结合多项式回归模型和遗传算法, 构建了创新的桥梁健康监测技术框架。研究以典型夏季桥梁为例, 模拟结果揭示了温度变化的复杂梯度和时滞特性。该方法为基础设施长期安全监测提供了新的技术思路, 有望显著提高桥梁健康监测系统的可靠性。

关键词

桥梁健康监测, 温度响应映射, 统计参数, 异常检测

A Statistical Mapping and Anomaly Warning Method for Bridge Temperature Response

Xiao Fan, Tingxu Ren, Jian Xiao

School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Mar. 8th, 2025; accepted: Apr. 1st, 2025; published: Apr. 10th, 2025

Abstract

Temperature variations significantly impact bridge structural performance, yet existing monitoring systems lack accuracy. This study proposes an anomaly early warning method for bridge service conditions based on a temperature response statistical parameter mapping model. By extracting temperature data statistical parameters and combining polynomial regression and genetic algorithms, an innovative bridge health monitoring technology framework is constructed. Taking a typical summer bridge as an example, simulation results reveal the complex temperature gradient and time-lag characteristics. The method provides a new technical approach for long-term infrastructure safety monitoring and is expected to significantly improve the reliability of bridge health monitoring systems.

Keywords

Bridge Health Monitoring, Temperature Response Mapping, Statistical Parameters, Anomaly Detection

Copyright © 2025 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

桥梁作为重要的交通基础设施，其结构安全性直接关系到交通运输的安全与效率[1]。温度变化对桥梁结构性能的影响不容忽视[2]。近年来，随着桥梁健康监测技术的快速发展，温度效应对桥梁结构性能的影响逐渐成为研究热点。研究表明，温度变化不仅会引起桥梁几何形状的变形和内部应力的重新分布[3]，还可能导致材料劣化、疲劳损伤加剧以及动态特性改变，进而影响桥梁的长期性能和使用寿命[4] [5]。

现有的桥梁监测系统主要依赖于直接采集和分析位移数据来评估桥梁的健康状况[5]。然而，这种方法往往忽略了温度变化对桥梁结构的深远影响，导致预测结果的准确性和可靠性不足。尽管部分系统开始采集温度数据进行综合分析，但多采用直接拟合原始温度和响应数据的方法，面临着数据量巨大、异常值和缺失值频繁出现等问题[6]。此外，瞬时温度波动也会显著影响拟合效果，增加误报和漏报的风险。因此，亟需一种更为精确的预测方法，以有效提高桥梁健康监测系统的可靠性和预警能力。

针对上述问题，本研究提出了一种基于温度 - 温度响应统计参数映射模型的桥梁服役状态异常预警方法。该方法通过提取温度数据的均值、方差、峰度和偏度等统计参数，有效平滑了原始数据中的噪声和波动，简化了数据处理过程[7]。与现有方法相比，本方法具有以下优势：首先，统计参数能够更好地反映温度变化的整体趋势和波动特性，提高了模型的鲁棒性；其次，采用多项式回归模型与遗传算法优化相结合的方式，进一步提升了预测精度和计算效率；最后，通过设计多层次的异常检测规则，实现了对结构异常的精准识别，减少了误报和漏报的发生[8]。

本研究的主要贡献如下：首先，在方法创新方面，提出了一种基于温度统计参数的桥梁温度响应预测方法，通过提取均值、方差、峰度和偏度等统计参数，显著提升了模型的鲁棒性和预测准确性。其次，在模型优化方面，采用遗传算法对多项式回归模型进行参数优化，进一步提高了模型的拟合能力和预测性能。此外，在异常检测方面，设计了多层次的异常检测规则，能够有效识别不同类型的结构异常，减少误报和漏报的发生。最后，在实时更新方面，实现了模型的动态更新机制，确保预警系统能够适应桥梁运行状态的实时变化，保持高水平的预警准确性[9] [10]。

2. 研究方法

本研究的方法主要包括基于桥梁数值模型的温度测点布置、温度响应测点布置、数据预处理、模型建立与优化、异常预警以及模型更新在这些步骤中，首先通过基于桥梁数值模型进行温度测点的布置来奠定整个研究的基础。为了精确分析桥梁温度场的变化，我们收集了桥梁的几何参数和材料参数，其中几何参数包括桥面宽度、厚度、跨距、构件长度等，材料参数则涵盖热膨胀系数等，这些参数对于模拟桥梁温度响应至关重要。基于这些数据，我们利用有限元分析软件建立了桥梁的数值模型，并对模型进行了精细的网格划分，确保温度场和应力响应的计算精度。在此过程中，我们还通过实际的桥梁环境温度和负载数据对模型进行校准，验证模型的准确性和可靠性，从而为温度测点布置提供了科学依据。接

下来, 我们进一步设定了季节和时间分段的光照条件, 以准确模拟不同季节和时段对桥梁温度的影响。具体来说, 考虑到桥梁所在的地理纬度, 我们将模拟分为春、夏、冬三季, 并在每个季节内设定早晨、中午和下午三个时段, 以反映一天中不同时间的光照强度和角度变化。通过考虑太阳高度角和辐射强度的变化, 确保模拟的光照条件与桥梁所在地的实际情况相符, 从而捕捉温度随日照变化的动态响应。

在光照条件设定完成后, 我们引入了热传导方程, 以精确模拟桥梁在光照作用下的温度响应。应用瞬态热传导方程, 我们在模型中考虑了导热系数、比热容、密度等材料参数, 以及单位体积内由光照引起的热源项。具体的热传导方程如下:

$$\rho \cdot c_p \cdot \partial T / \partial t = k \cdot \nabla^2 T + q \quad (1)$$

其中, T 表示温度, ρ 为材料密度, c_p 为比热容, k 为导热系数, q 为光照引起的单位体积热源项。通过引入对流和辐射的边界条件, 模拟了空气流动和桥梁表面散热的实际情况, 以确保模型能够更真实地反映桥梁的温度分布。通过对热传导方程的数值求解, 我们得以模拟不同构件在不同光照条件下的温度场分布, 并进一步识别温度变化剧烈的区域。基于这些模拟结果, 我们分析了不同光照条件下的温度场分布, 并确定了温度响应测点的位置。

最后, 在模型建立与优化的基础上, 我们进行了异常预警和模型更新。首先, 通过前述步骤建立的桥梁温度响应模型, 在数值模型的优化过程中, 我们采用了如遗传算法或粒子群优化算法等优化技术, 以提升模型的预测精度和计算效率。在优化过程中, 除了优化模型的基本参数外, 我们还考虑了模型在不同环境条件下的适应性, 确保模型能够在实际应用中长期有效。在模型优化的同时, 我们还设置了异常预警机制, 一旦温度数据出现异常波动, 系统能够及时发出警报, 提醒可能的结构问题或外部环境影响。

3. 数据预处理与模型建立

3.1. 模型建立与预测

3.1.1. 模型的建立过程

模型建立了两种关键边界条件以模拟桥梁与环境的热交换:

上表面边界条件(综合考虑对流和辐射热交换):

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = h_{\text{conv}} (T_{\text{surf}} - T_{\text{air}}) + \alpha q_{\text{solar}} \quad (2)$$

下表面边界条件(仅考虑对流热交换):

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=L} = h_{\text{conv}} (T_{\text{surf}} - T_{\text{air}}) \quad (3)$$

其中 h_{conv} 是对流换热系数($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$), T_{air} 为环境气温($^{\circ}\text{C}$), α 为表面吸收率; q_{solar} 为太阳辐射热流密度(W/m^2)。

环境温度表太阳辐射强度同样采用正弦函数模拟日变化: 采用正弦函数模拟日温度变化规律:

$$T_{\text{air}}(t) = T_{\text{mean}} + T_{\text{amp}} \cdot \sin\left(\pi \frac{h-8}{12}\right) \quad (4)$$

其中 T_{mean} 为平均气温($^{\circ}\text{C}$); T_{amp} 为日温差幅度($^{\circ}\text{C}$); h 为一天中的小时数(0~24)。

太阳辐射强度同样采用正弦函数模拟日变化:

$$q_{\text{solar}}(h) = q_{\text{max}} \cdot \sin\left(\pi \frac{h-6}{12}\right), \text{ if } 6 \leq h \leq 18 \quad (5)$$

其中, q_{\max} 为最大辐射强度, h 为一天中的小时数。

采用显式有限差分法将偏微分方程离散化为代数方程组:

$$T_i^{n+1} = T_i^n + \frac{k \cdot \Delta t}{\rho c_p \cdot \Delta x^2} (T_{i+1}^n - 2T_i^n + T_{i-1}^n) + \frac{\Delta t}{\rho c_p} q_i^n \quad (6)$$

其中, 上标 n 表示时间层, 下标 i 表示空间网格点。

建立桥梁温度与结构响应(如变形)之间的统计映射关系:

$$R(t) = R_0 + \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot \Delta T_i(t - \tau) \quad (7)$$

其中 $R(t)$ 为结构响应, R_0 为基准响应值, ΔT_i 为第 i 个测点的温度变化, τ 为响应滞后时间, β_i 为回归系数。

3.1.2. 模型应用

本研究基于温度响应统计参数映射模型, 对某地区典型夏季条件下的桥梁温度响应进行了数值模拟。模拟采用钢筋混凝土桥梁(导热系数 $1.5 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, 密度 2400 kg/m^3 , 比热容 $880 \text{ J/(kg}\cdot\text{K)}$, 表面吸收率 0.7), 在环境参数方面考虑了夏季平均气温 29.7°C 、日温差约 7.3°C 、最大太阳辐射强度 950 W/m^2 、日出时间 $5:00$ 、日落时间 $19:00$ 等因素。模拟结果表明, 桥面温度在一天内呈现明显的周期性变化, 最高表面温度达 38.6°C (出现在 $18:00$ 左右), 最低表面温度为 29.3°C (出现在 $6:00$ 左右), 日温差高达 9.3°C , 与环境气温的日变化幅度(约 7.3°C)接近, 表明桥梁结构对环境温度变化具有一定的“响应效应”(如图 1 所示)。桥面与环境平均温差为 $+2.5^\circ\text{C}$, 且桥面温度最高值出现时间比环境温度最高值滞后约 1.5 小时。在深度方向上, 温度传导呈现明显的梯度和时滞特性, 表面温度振幅最大, 而随着深度增加, 温度振幅迅速减小并出现相位滞后, 表明桥梁内部存在显著的“热惯性”(如图 1 所示)。温度变化率分析显示, 最大升温速率为 1.0°C/小时 , 最大降温速率为 -0.5°C/小时 , 这种不均匀的温度变化是引起桥梁热应力的主要原因。基于温度 - 响应映射模型的结构响应分析表明, 桥梁挠度最大值为 10 mm (出现在 $18:00$ 左右), 最小值为 0.35 mm (出现在 $7:00$ 左右)(如图 2 所示)。本模拟研究的关键发现包括: 桥面温度具有温度响应特征, 温度峰值存在一定滞后, 深度方向存在复杂温度梯度, 以及结构响应与温度变化间存在约 2 小时的滞后关系。

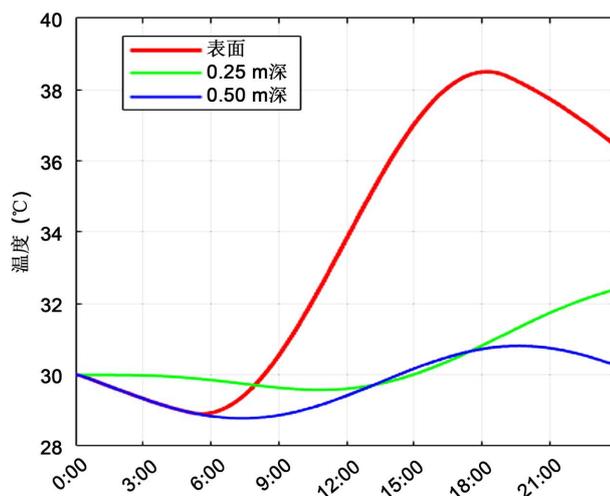


Figure 1. Relationship of temperature and different depth
图 1. 温度与不同深度关系

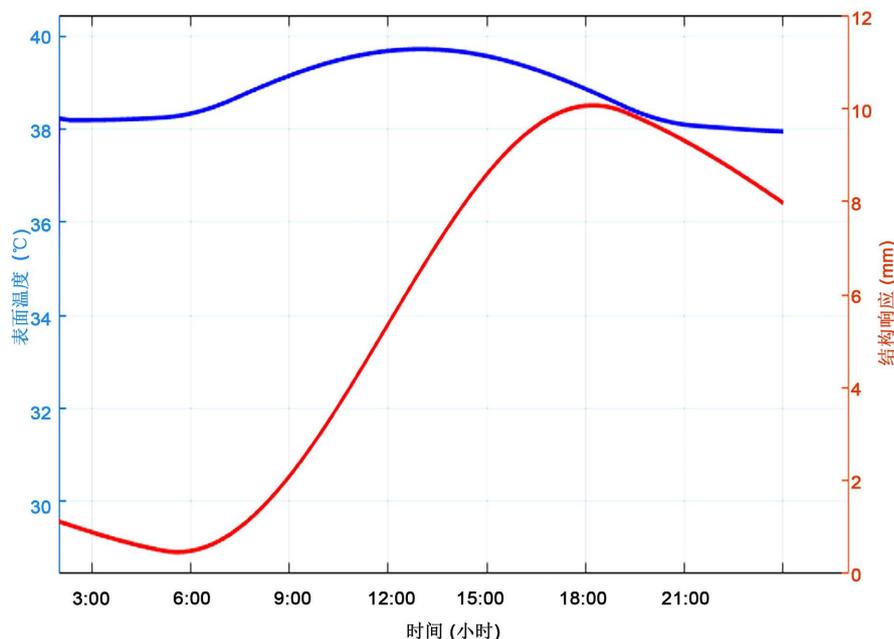


Figure 2. Relationship of temperature and structural response

图 2. 温度与结构响应关系

4. 结论

本研究通过系统性的方法论步骤，不仅构建了一个桥梁温度响应监测技术框架，还为基础设施长期健康状态评估提供了一种全新的技术范式。本研究提出的方法的价值在于能够多维度、高精度地捕捉和解析桥梁温度变化的复杂内在机制，为基础设施安全运行监测提供了更为全面和深入的技术支持。

基于本研究的关键发现提出了面向实践的监测系统优化建议：1) 在桥梁结构的不同深度部署多点温度传感器，建立精细化的温度响应数据补偿机制；2) 根据季节性温度变化特征动态调整预警阈值，提高监测系统的适应性；3) 选择温度相对稳定的清晨时段进行桥梁定期检查。

参考文献

- [1] 林婵华. 加强公路桥梁养护与维修加固的措施研究[J]. 时代汽车, 2024(23): 184-186.
- [2] 胡小辉. 大跨度 PC 高速铁路连续梁桥施工控制技术研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 华东交通大学, 2013.
- [3] 江佳. 摆式加速度传感器及无线桥梁振动监测应用研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2023.
- [4] 刘钦振. 大跨径钢箱梁在温度影响下的振型分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2013, 19(1): 34-37.
- [5] 莫向前, 杨永斌, 史康, 等. 考虑薄壁箱梁阻尼下的车-桥耦合振动解析理论与应用[J]. 中国公路学报, 2024, 37(8): 1-16.
- [6] 左光升. 极端波浪作用下近海箱梁桥上部结构受力研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉科技大学, 2021.
- [7] 陈丝璐. 基于深度学习和图像分类的桥梁缺陷检测方法设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- [8] 张彪, 马德才, 刘跃进, 等. 基于 FBG 传感的瀛洲大桥结构健康监测系统设计[J]. 特种结构, 2009, 26(1): 78-82.
- [9] 张洪. 公路桥梁试验检测与信息工程结合在桥梁健康监测中的应用研究[J]. 信息系统工程, 2024(4): 56-59.
- [10] 孙丽华. 非线性 Lamb 波的测量与定量表征[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2015.