

基于静态趋势分离的桥墩倾斜动态预警方法

陈 凯¹ 郭博宇^{2,*} 牛再波² 孙洪瑞¹ 郭 进²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 石家庄铁道大学土木工程学院, 石家庄 050043)

摘 要 基于某桥梁健康监测系统提供的长期数据,发现桥墩倾斜主要受到环境温度和随机荷载的作用,且温度变化对桥墩倾角的影响更大。为了准确地监测并预警桥墩倾斜,建立了桥墩倾角与温度之间的线性关系,并将温致桥墩倾斜趋势分离,得到随机荷载作用下的桥墩倾角数据。同时对随机荷载作用下桥墩倾角进行概率统计分析,基于桥墩温致倾斜趋势分离后的倾角数据统计结果,建立了桥墩倾角的三级动态预警曲线。研究表明:引桥桥墩的倾角变化受温度影响大,而随机荷载对引桥桥墩倾角的影响幅度较小;温致桥墩倾斜趋势分离后的各桥墩倾角监测数据基本服从正态分布;温致桥墩倾斜趋势分离的三级动态预警曲线可以较好地桥墩结构的实时运营状态进行有效准确的预警。

关键词 桥梁工程, 静态趋势分离, 桥墩倾斜, 动态预警方法

中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A **DOI:** 10.15935/j.cnki.jggcs.202601.0004

Dynamic Early Warning Method for Bridge Pier Inclination Based on Static Trend Separation

CHEN Kai¹ GUO Boyu^{2,*} NIU Zaibo² SUN Hongrui¹ GUO Jin²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. School of Civil Engineering, Shijiazhuang TieDao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract Based on long-term data from a bridge health monitoring system, it is found that the inclination of bridge piers is mainly affected by environmental temperature and random loads, with temperature change having a greater influence on the inclination angle of the piers. To accurately monitor and warn against pier inclination, a linear relationship between the inclination angle of bridge piers and temperature was established. The temperature-induced inclination trend was separated to obtain inclination angle data under random loads. Meanwhile, probabilistic statistical analysis was conducted on the inclination angle of bridge piers under random loads. Based on the statistical results of the inclination angle data after separating the temperature-induced trend, a three-level dynamic early warning curve for the inclination angle of bridge piers was established. The research results show that the inclination angle of the approach bridge piers is significantly affected by temperature, while the influence of random loads on the inclination angle of the approach bridge piers is relatively small. The monitoring data of the inclination angles of each pier, after separating the temperature-induced trends, basically follow a normal distribution. The three-level dynamic early warning curve established after separating the temperature-induced inclination trend of bridge piers can effectively and accurately warn of the real-time operational status of the bridge pier.

收稿日期: 2025-03-06

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52178493), 河北省重点研发计划项目(21375402D), 河北省自然科学基金面上项目(E2022210028), 石家庄市科学技术局科研计划项目(231230025A)。

作者简介: 陈 凯, 男, 高级工程师, 主要从事岩土工程及结构健康监测等方向的研究。E-mail: chen kai5048@126.com

* 联系作者: 郭博宇, 女, 博士, 主要从事桥梁韧性抗震结构体系及结构健康监测等方向的研究。E-mail: guo boyu0322@163.com

Keywords bridge engineering, temperature caused tendency separation, tilt of pier, dynamic early warning method

0 引言

桥墩是桥梁下部结构的重要组成部分,承受上部结构荷载,并将其传递到地基;同时抵抗外部随机荷载的作用(风、地震、水流冲击等),以维持桥梁的整体稳定性^[1]。由于实际工程中可能存在缺陷、管理养护不佳且车辆超载情况严重,桥墩结构存在发生潜在危险的可能,因此迫切需要准确有效的方法对桥墩结构进行监测预警。

为了监测桥梁运营期间桥墩等结构的服役状态,诸多桥梁安装了结构健康监测系统^[2-4]。已有研究工作表明,桥梁结构正常运营状态下,当环境温度发生变化时,各种监测数据会发生大范围的波动,这将掩盖结构因损伤所造成结构损伤特征参数的真正改变^[5-9]。诸多学者对温度与结构变形进行了大量的研究工作^[10],Ni等^[11]建立了桥梁结构伸缩缝位移与温度的相关数学模型,并在此基础上对伸缩缝的损伤进行识别。Yang等^[12]通过分析相关性,研究了温度与桥塔位移间的关系。Yang等^[13]还研究了温度效应下的桥梁挠度变化。尽管上述研究在探索温度与桥梁结构响应的关系方面取得了重要进展,但仍缺乏对桥墩这一关键承重构件在温度作用下的变形响应特性及其规律的系统性研究。

本文基于某桥梁健康监测系统的长期监测数据,探究桥墩倾角数据的长期变化规律,根据凌晨时刻(静态荷载影响显著,动态荷载作用可忽略的时段)的监测数据发现背景桥梁引桥桥墩倾角与温度之间存在着显著的线性关系,在此基础上采用最小二乘法得到桥墩倾角与温度之间的线性表达式,并将其应用于繁忙时刻(动态荷载作用显著且频繁的时段)的桥墩倾角监测数据,有效分离了温度对桥墩倾角的影响,得到随机荷载作用下的桥墩倾角数据,这包含了桥梁运营期间所经历的各种动态荷载水平及组合(如不同交通流量、车型、风速等)的作用结果,并对其进行相应的正态统计分析,并据此建立桥墩倾角的动态三级预警曲线。依据历史时刻的倾角监测数据对其进行了可行性检验,结果表明该方法建立的预警曲线可以准确有效地预警桥墩结构的实时状态。

1 工程背景

本研究依托某混凝土连续梁桥,该桥配备了完善的健康监测系统,为了对桥墩结构进行实时的监测,其中引桥的L、M、N、O墩各布置1个倾角测点,在主跨的P23、P24墩同样也各布置了1个倾角测点,全桥倾角测点共6个,该桥的桥墩倾角监测布置如图1所示。

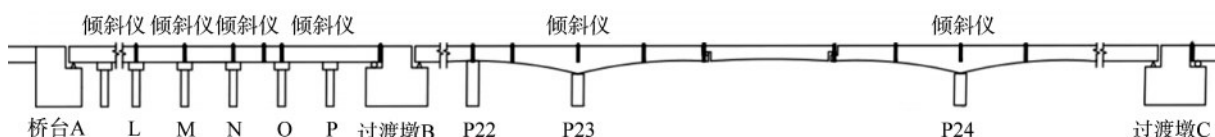


图1 倾角监测布置图

Fig.1 Inclination monitoring layout

2 桥墩倾角-温度相关性分析

研究表明^[14-15],空间温度场效应对桥梁结构温度响应至关重要,由于目前健康监测系统难以准确采集桥梁结构的温度场监测数据,而桥梁结构监测系统提供的具体位置温度在一定程度上可以反应结构温度,因此,在分析各桥墩倾角与混凝土温度之间的关系时,忽略空间温度场效应

对桥梁结构温度响应的影响,采用具体的温度进行研究。为了尽量消除动态荷载的影响,分析不同温度引起的桥墩倾角,选取2022年3月1日至2023年12月31日每天00:00时刻的监测数据作为研究对象,该时间段内桥墩所受动态荷载极低且稳定,倾角变化主要由梁体热胀冷缩长度变化引起,基本符合准静态过程。倾角仪的采样频率为10 Hz,因此取其平均值作为瞬时值,期间由于

断电等不可抗因素的影响,每个桥墩位置共获取 632 个温度和倾角数据。其中各桥墩倾角与混凝土

温度之间的长期关系如图 2 所示。

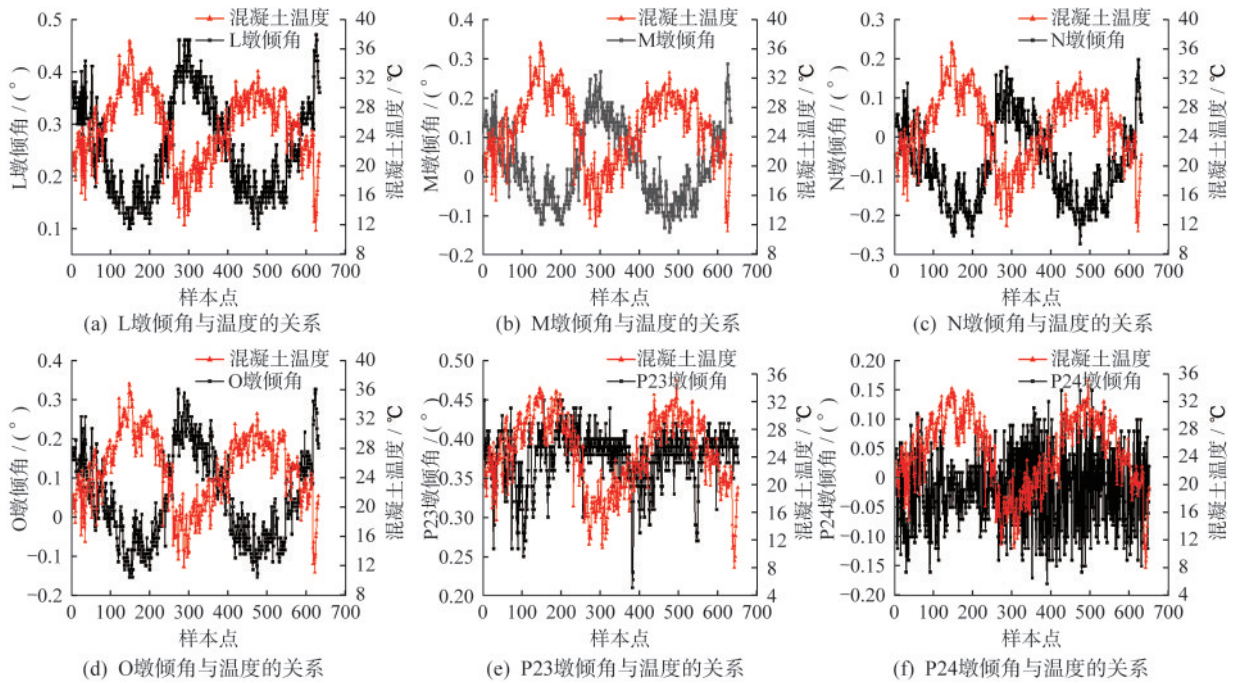


图 2 桥墩倾角与温度之间的相关性

Fig.2 Correlation between pier inclination angle and temperature

由上可知,引桥桥墩倾角与混凝土温度之间整体呈现出混凝土温度上升、引桥桥墩倾角变小,混凝土温度下降、引桥桥墩倾角变大的趋势,二者之间的线性关系显著;而主跨桥墩 P23 墩及 P24 墩与混凝土温度之间的线性关系不太显著。此外,从图中可以看出,温度和桥墩倾角具有明显的周期性,周期大致为一年。

在理想情况下,均匀温度作用下导致的连续梁桥的主梁伸缩变形会通过活动支座释放,不会导致桥墩倾斜。而在实际桥梁中,墩梁连接即使采用活动支座,也会不可避免出现或大或小的摩擦力,进而导致墩柱倾斜。这一现象在本论文所研究的背景桥梁的历史监测数据中体现得尤为明显,这也是由于墩梁之间采用简单的类似于油毛毡(服役多年后,摩擦力增大)的垫层连接所致。

3 桥墩倾角静态趋势分离

基于长期的监测数据统计发现,引桥桥墩的倾角与温度之间的线性关系显著,因此引桥桥墩倾角的计算模型可通过式(1)建立,而主跨桥墩的倾角与温度之间的线性关系并不显著,受温度影响的程度较小,可直接使用主跨桥墩的瞬时倾角

监测值。

$$\theta = \theta_T + \theta_t \quad (1)$$

式中: θ 为桥墩倾角值; θ_T 为静态荷载(温度)引起的桥墩倾角值; θ_t 为动态荷载(随机荷载,主要为车辆荷载)引起的桥墩倾角值。

由图 2 可知,引桥桥墩倾角与温度之间的线性关系显著。因此,选取背景桥梁 2022 年 3 月 1 日到 2023 年 12 月 31 日零时的引桥桥墩倾角和温度数据作为研究对象,即假设凌晨时刻桥梁结构仅受静态荷载作用,在建立桥墩倾角与温度之间的关系时采用最小二乘法进行线性拟合^[16],见式(2),以此实现桥墩温致倾角趋势的分离。

$$y = \beta_1 + \beta_2 x \quad (2)$$

式中: y 为引桥桥墩倾角; x 为温度; β_1 和 β_2 为模型参数。

设有 N 个监测数据,当各偏差的平方和 Q 最小时,回归方程的拟合效果最好。

$$Q = \sum_{i=1}^N [y_i - (\beta_1 + \beta_2 x_i)]^2 \quad (3)$$

根据极值原理,将式(3)分别对 β_1 和 β_2 求偏导数,令其等于 0,即可求得 β_1 和 β_2 。

$$\frac{\partial Q}{\partial \beta_1} = 0, \quad \frac{\partial Q}{\partial \beta_2} = 0 \quad (4)$$

为了评价引桥桥墩倾角与温度之间的线性模拟结果,在此使用检验系数 R^2 评价回归方程的有效性。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - y_i^*)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (5)$$

式中: N 为样本个数; y_i 为实际值; y_i^* 为预测值, \bar{y}_i 为平均值; R 越接近1,二者之间的线性关系越好。

根据大量凌晨时刻的监测数据,各引桥桥墩倾角与温度之间的线性关系模拟结果如表1所示,此外,根据式(4)计算的各引桥桥墩倾角与温度之间的线性拟合结果及根据式(1)将温致桥墩倾斜趋势分离前后的对比如图3所示。

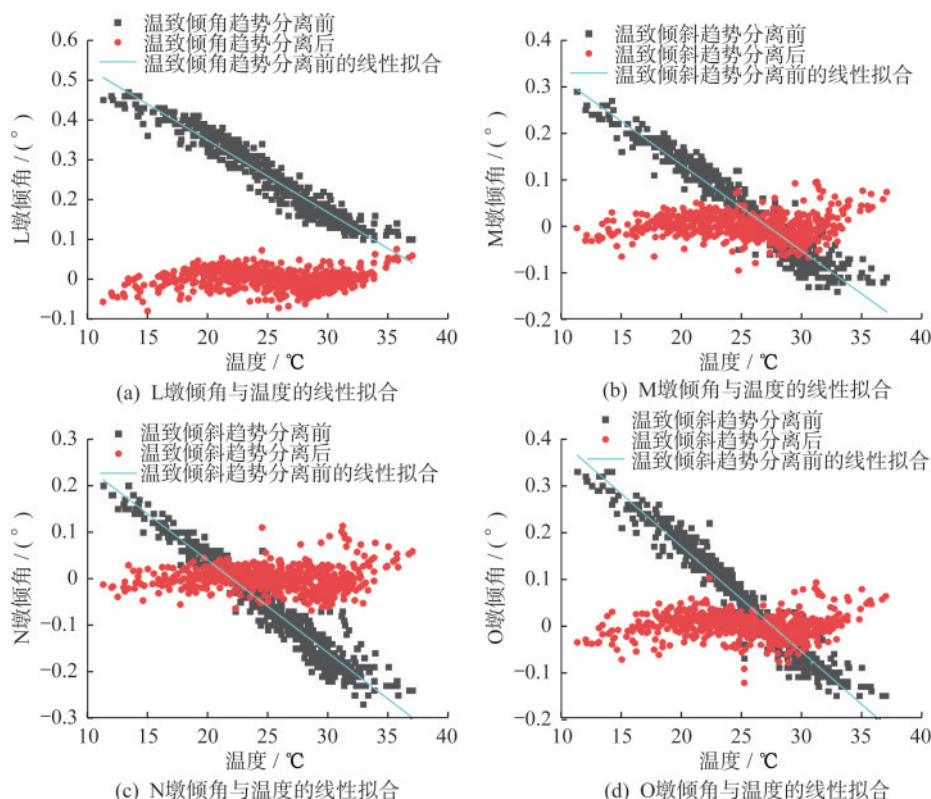


图3 各引桥桥墩的线性拟合结果及趋势分离前后对比

Fig.3 Linear fitting results of each pier and comparison before and after trend separation

表1 线性模拟结果

Table 1 Linear simulation results

倾角监测位置	β_1	β_2	趋势分离前 R^2
L墩	0.716 4	-0.018 13	0.93427
M墩	0.503 8	-0.018 58	0.92423
N墩	0.437 7	-0.019 91	0.93593
O墩	0.620 1	-0.022 53	0.94709

由图3可以看出,引桥桥墩倾角和混凝土温度的数据基本分布在回归方程的两侧,各桥墩计算所得的检验系数 R^2 均在0.92以上,二者之间具有很好的线性关系。温致倾斜趋势分离后的倾角数据与分离前相比分布较为集中,基本分布在 0° 附近,较好地分离了温度对引桥倾角的影响。

4 动态预警曲线的建立

4.1 随机荷载作用下倾角数据分析

由图3可以看出桥墩温致倾斜趋势分离后的倾角与温度之间的线性相关性显著降低。桥墩温致倾斜趋势分离后,桥墩倾角总体分布在 0° 附近,总体符合正态分布的特征,需进一步进行正态性检验。以2022年3月1日至2023年12月31日,每日繁忙时刻去除温度效应后的桥墩倾角作为统计参数,求得其均值(μ_i)、标准差(σ_i)、偏度及峰度,并分析其概率分布类型,计算结果如表2所示,去除桥墩温致倾斜后的概率分布如图4所示。

由表2可知,去除温致桥墩倾斜后的引桥桥墩倾角均值、标准差、偏度基本均分布在0附近,

峰度为负值,表示其数据分布比正态分布更平坦。去除温致桥墩倾斜后的引桥桥墩倾角数据整体上符合正态分布;主跨桥墩未进行温致倾斜趋势分离,其均值分布较离散,标准差均分布在 0.04 附近。同样由图 4 可以看出去除温致桥墩倾斜趋势后的桥墩倾角数据的高斯拟合曲线基本对称,检验系数 R^2 均在 0.96 以上,总体上呈“钟形”曲线形态,满足正态分布。

表 2 随机荷载作用下的桥墩倾角概率统计结果

Table 2 Statistical results of pier inclination probability under random loads

位置名称	均值 μ_i	标准差 σ_i	偏度	峰度
L墩	-0.003 86	0.056 09	-0.044	-2.799
M墩	-0.004 38	0.057 88	-0.045	-2.671
N墩	-0.003 34	0.058 70	-0.102	-2.576
O墩	-0.003 42	0.060 93	-0.144	-2.567
P23墩	0.394 10	0.043 52	-1.392	0.523
P24墩	-0.015 15	0.040 32	-0.138	3.596

4.2 基于置信区间的动态预警曲线的建立

《大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标

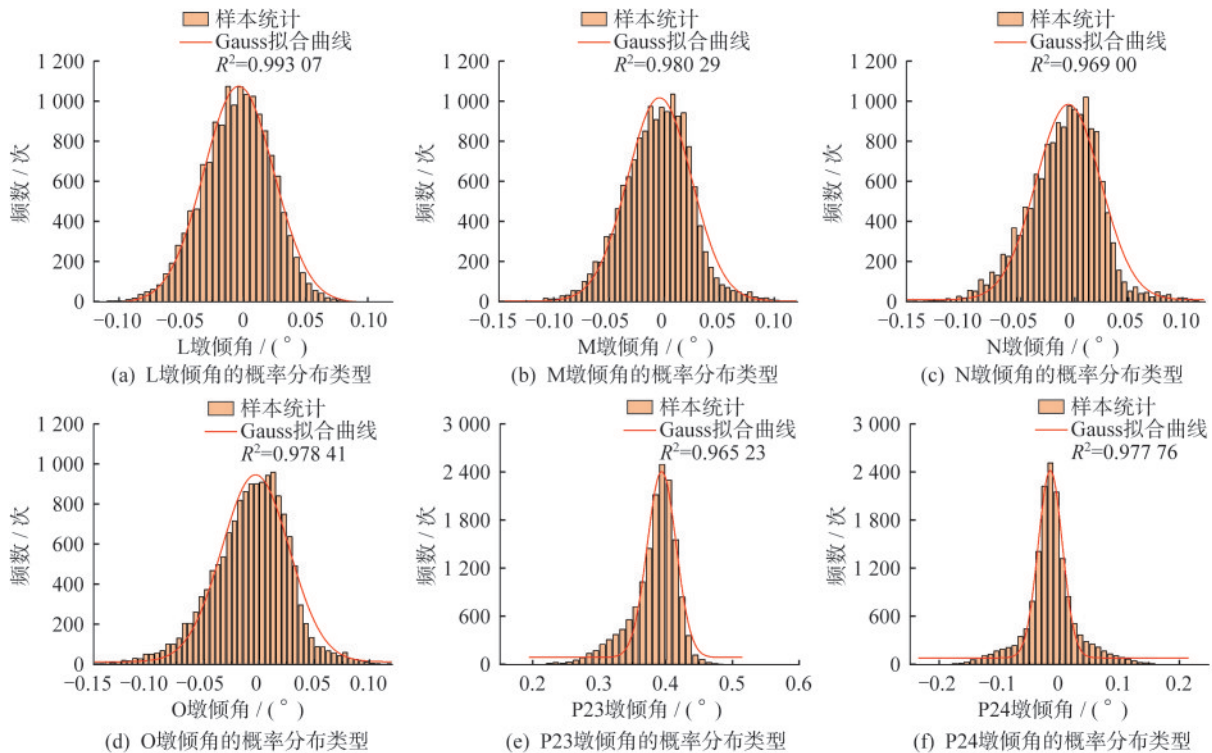


图 4 随机荷载作用下桥墩倾角的概率分布图

Fig.4 Probability distribution of pier inclination angle under random loads

由图 5 可知,繁忙时刻的桥墩倾角数据基本均落在了三级动态预警曲线的区间内,表明繁忙

时刻大多数情况下桥墩的状态均在正常的范围内;同样可以看出有少量的实测倾角数据超出了

$$UCL = x_i + \bar{x} + n\sigma$$

$$LCL = x_i + \bar{x} - n\sigma \tag{6}$$

式中: UCL 为预警上限; LCL 为预警下限; x_i 为温度引起的桥墩倾角值; \bar{x} 为去除温度效应的倾角数据均值; n 为常数(不同的置信区间对应不同的常数值); σ 为标准差。

选取 2023 年 6 月 1 日至 6 月 7 日每天繁忙时刻 8—20 点每分钟的桥墩倾角数据进行了检验,设定 $n=3$ 。此时超出 $\mu \pm 3\sigma$ 界限的可能性仅占不到 0.3%,属于小概率事件,预示着荷载异常、结构性能退化或其他非正常状态。具体如图 5 所示。

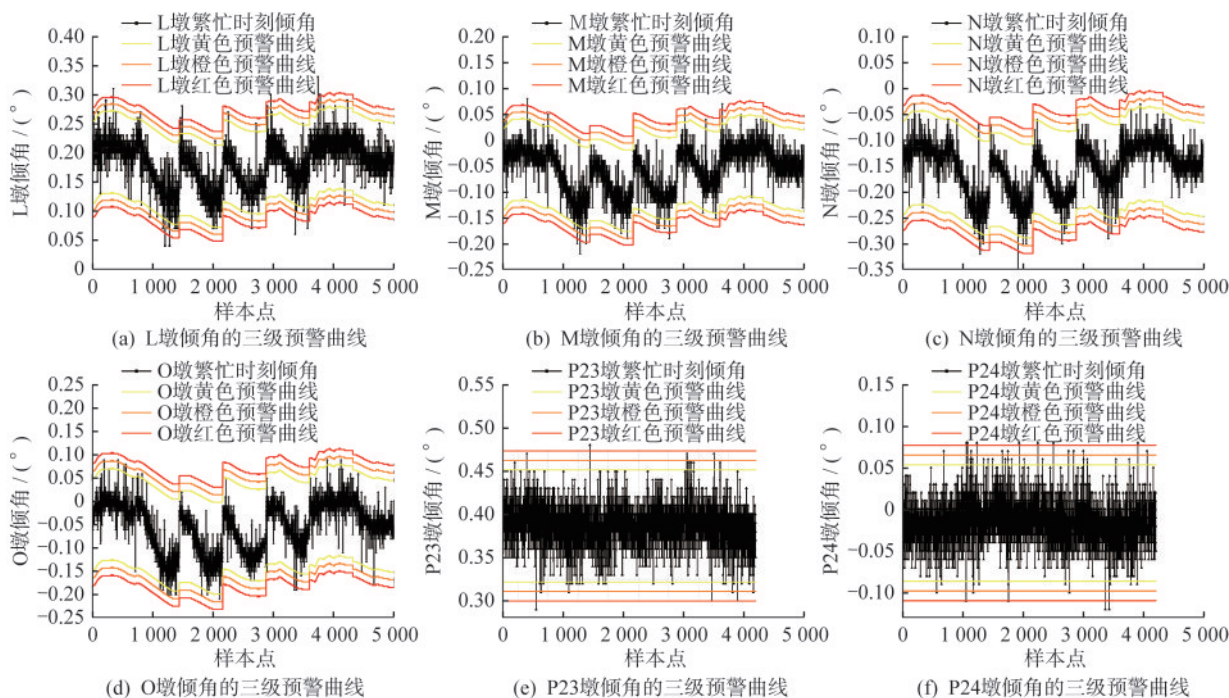


图5 各桥墩倾角的三级预警曲线

Fig.5 Three-level warning curve for the inclination angle of each pier

预警曲线,说明基于温致倾斜趋势分离的三级动态预警曲线可以有效准确地预警桥墩结构的实时状态。

5 结论

(1) 基于海量的监测数据发现,引桥桥墩倾角与温度之间具有显著的线性关系,整体呈现出温度升高、桥墩倾角变小,温度降低、桥墩倾角变大的趋势。基于大量凌晨时刻(无车辆荷载作用)的温度和倾角的监测数据,建立了二者之间的线性模型,且检验系数 R^2 均在0.92以上。

(2) 基于温度与引桥桥墩倾角之间的线性关系,将桥墩倾角数据进行了静态趋势分离,得到随机荷载作用下的桥墩倾角数据,并进行了相应的数据统计。结果表明,随机荷载作用下的桥墩倾角数据分布范围大大缩小,随机荷载作用下各桥墩倾角监测数据的高斯拟合曲线检验系数 R^2 均在0.96之上,且根据各桥墩倾角的偏度及峰度统计值可以发现:随机荷载作用下的桥墩倾角数据基本服从正态分布。

(3) 基于温致桥墩倾斜趋势分离的倾角数据统计结果,依据不同的置信区间建立了桥墩倾角的三级动态预警曲线。根据历史繁忙时刻的桥墩监测数据检验表明,温致桥墩倾斜趋势分离的三

级动态预警曲线可以初步对桥墩结构的实时运营状态进行有效准确的预警。

参 考 文 献

- [1] 蒋丽忠,李伟,江力强.复杂地形处高速铁路轨道-桥梁系统地震响应放大效应[J].铁道科学与工程学报,2025,22(9):3809-3820.
JIANG Lizhong, LI Wei, JIANG Liqiang. Amplification effects of seismic response in high-speed railway track-bridge systems on complex topographic [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2025, 22(9): 3809-3820. (in Chinese)
- [2] DU Y L, YI T H, LI X J, et al. Advances in intellectualization of transportation infrastructures [J]. Engineering, 2023, 23(4): 239-252.
- [3] 赵楷林,宗海,祝青鑫,等.基于长期实测的南京栖霞山长江大桥车辆荷载分析[J].东南大学学报(自然科学版),2021,51(6):979-985.
ZHAO Kailin, ZONG Hai, ZHU Qingxin, et al. Analysis on vehicle loads on Nanjing Qixiashan Yangtze River Bridge based on long-term field measurement [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2021, 51(6): 979-985. (in Chinese)
- [4] 李春生,朱德庆,陆久飞,等.中小跨径桥梁加固后健康监测方案设计[J].建筑结构,2022,52(S2): 1917-1923.
LI Chunsheng, ZHU Deqing, LU Jiufei, et al. Design of

- health monitoring scheme for medium and small span bridges after reinforcement [J]. *Building Structure*, 2022, 52(S2): 1917-1923. (in Chinese)
- [5] KO J M, NI Y Q. Technology developments in structural health monitoring of large-scale bridges [J]. *Engineering Structures*, 2005, 27(12): 1715-1725.
- [6] 孙君, 李爱群, 丁幼亮, 等. 润扬大桥悬索桥模态频率-温度的季节相关性研究及其应用[J]. *工程力学*, 2009, 26(9): 50-55.
- SUN Jun, LI Aiqun, DING Youliang, et al. Research on correlation of modal frequency and season temperature of RunYang suspension bridge [J]. *Engineering Mechanics*, 2009, 26(9): 50-55. (in Chinese)
- [7] SOHN H, WORDEN K, FARRAR C R. Statistical damage classification under changing environmental and operational conditions [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2002, 13(9): 561-574.
- [8] BROWN JOHN J M W, DE STEFANO A, XU Y L, et al. Vibration-based monitoring of civil infrastructure: Challenges and successes [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2011, 1(3): 79-95.
- [9] 郝常顺, 刘保东, 孙武鹏, 等. 大跨度铁路桥梁健康监测技术研究与应用综述[J]. *铁道科学与工程学报*, 2025, 22(4): 1662-1685.
- HAO Changshun, LIU Baodong, SUN Wupeng, et al. Review on research and application of health monitoring technology for long-span railway bridges [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2025, 22(4): 1662-1685. (in Chinese)
- [10] XU Y L, CHEN B, NG C L, et al. Monitoring temperature effect on a long suspension bridge [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2010, 17(6): 632-653.
- [11] NI Y Q, HUA X G, WONG K Y, et al. Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement and temperature measurement [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2007, 21(2): 143-151.
- [12] YANG D H, YI T H, LI H N, et al. Monitoring and analysis of thermal effect on tower displacement in cable-stayed bridge [J]. *Measurement*, 2018, 115: 249-257.
- [13] YANG D H, YI T H, LI H N, et al. Correlation-based estimation method for cable-stayed bridge girder deflection variability under thermal action [J]. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 2018, 32(5): 04018070.
- [14] ZHU Qingxin, WANG Hao, SPENCER B F, et al. Mapping of temperature-induced response increments for monitoring long-span steel truss arch bridges based on machine learning [J]. *Journal of Structural Engineering*, 2022, 148(5): 04022034.
- [15] ZHU Qingxin, WANG Hao, SPENCER B F. Investigation on the mapping for temperature-induced responses of a long-span steel truss arch bridge [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2022: 232-249.
- [16] MONTGOMERY D C, PECK E A, VINING G G. Introduction to linear regression analysis [M]. John Wiley & Sons, 2021.
- [17] 大跨度桥梁结构健康监测系统预警阈值标准: T/CECS 529—2018 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- Early warning threshold standard for structural health monitoring system of long-span bridge: T/CECS 529—2018 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018. (in Chinese)