

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2022.02.009

基于监测数据的悬索桥关键约束装置状态评估方法

黄 侨¹,李维珍¹,任 远¹,李 冲²,樊梓元¹

(1.东南大学交通学院,江苏 南京 210096; 2.中交公路长大桥梁建设国家工程研究中心有限公司,北京 100120)

摘要:为更准确地评估大跨径悬索桥的伸缩功能,及时发现病害,在现阶段基于监测数据的伸缩缝、支座状态评估通用方法的基础上,将伸缩缝和支座状态评估相结合,提出了基于监测数据的悬索桥关键约束装置状态评估方法。该方法采用小波分离法对位移数据进行波形分离,通过温度-位移一致性分析并根据数据细节变化幅度分析桥梁伸缩异常阻力及其对应的病害,对自然日进行合理分段,以每一连续时段为单位,分别进行温度和位移的相关性及波折分析。以某大型悬索桥为例,采用该评估方法对关键约束装置状态进行评估,并将评估结果与同期专项检查结果进行对比,结果表明,该评估方法合理可行,可辅助悬索桥关键约束装置状态评估。

关键词:大跨径悬索桥;关键约束装置;伸缩缝;支座;监测数据;状态评估

中图分类号:TU122 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2022)02-0061-08

Status assessment method of key restraint devices for long span suspension bridge based on monitoring data

HUANG Qiao¹, LI Weizhen¹, REN Yuan¹, LI Chong², FAN Ziyuan¹

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing Jiangsu 210096, China;

2. CCCC Highway Bridges National Engineering Research Centre CO., Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: For long-span suspension bridge, in order to evaluate the expansion function of bridge more accurately and discover the disease in time, based on the general evaluation method of expansion joint and bearing status based on monitoring data, the evaluation of expansion joint and bearing are integrated, and a status evaluation method based on the monitoring data for key restraint devices of suspension bridge is proposed. Wavelet separation method is used to separate the displacement data. The consistency of temperature displacement and the variation range of data details of suspension bridge are analyzed. After segmenting the natural day reasonably, the correlation analysis and break analysis of temperature and displacement are carried out in each continuous period. The method is used to evaluate a large suspension bridge, and the evaluation results are compared with the results of special inspection in the same period. The results show that the evaluation method is reasonable and feasible, which can assist the status evaluation of key restraint devices of suspension bridge.

Key words: long span suspension bridge; key restraint devices; expansion joint; bearing; monitoring data; status assessment

桥梁伸缩缝和支座是满足桥梁变形需求、传递荷载变形的重要部件。在实际工程中,由于桥梁伸缩缝和支座长期暴露在自然环境中,破损的情况时有发生,成为桥梁部分功能不能充分发挥甚至可能失效的重要原因之一。现阶段桥梁伸缩缝和支座状态评估,除了检查外观的明显病害外,还在于评定主梁运动形态是否平滑、顺畅。普遍观点认为,虽然车辆和噪声对桥梁伸缩量日波动曲线的细节变化有不可忽视的影响,但温度变化对桥梁伸缩量整体变化趋势起主导作用^[1-2],由此,基于梁体温度、梁端纵向位移监测数据的桥梁伸缩缝状态评估方法应运而生^[3-4]。国外学者曾基于长期监测数据对大跨径桥梁约束装置服役状态进行评估^[5-6]。国内张宇峰^[7-8]等建立了大桥主梁温度-位移线性相关性模型,并针对江阴长江大桥进行了分析,丁幼亮

基金项目:江苏省自然科学基金面上项目(BK20181278);中交集团院士专项科研经费项目(YSZX-03-2020-01-B,YSZX-03-2021-02-B);江苏省交通运输科技项目(2020Y19-(1))

作者简介:黄侨(1958—),男,教授,主要从事大型桥梁的养护、管理与评估理论研究。E-mail:quhuanhit@126.com

通信作者:任远(1981—),女,副教授,博士,主要从事桥梁养护、管理与评估理论研究。E-mail:magren@126.com

引用本文:黄侨,李维珍,任远,等.基于监测数据的悬索桥关键约束装置状态评估方法[J].河海大学学报(自然科学版),2022,50(2):61-68.
HUANG Qiao,LI Weizhen,REN Yuan,et al. Condition assessment of key restraint devices for long span suspension bridge based on monitoring data[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2022,50(2):61-68.

等^[9-11]也分别针对苏通大桥、润扬长江大桥展开研究。其他相关问题诸如位移波形分离、过度累计位移等^[12-14]的研究也在逐步推进。

目前伸缩缝与支座状况评估方法是相互独立的,与悬索桥自身特性相结合的桥梁伸缩状态相关研究不多见,评估方法大多以月、季为单位而存在准确性、即时性欠佳等问题。本文对现有评估方法进行完善与深入研究:将支座、伸缩缝合称为关键约束装置进行状态评估;对梁端位移数据进行较细致的波形分离;针对悬索桥相关评估不足的问题,通过数据细节变化幅度分析桥梁伸缩异常阻力及其对应的病害;针对准确性、及时性不足等问题,将自然日合理划分为多个连续时段分别展开分析。最后以某大跨径悬索桥为例,对该桥关键约束装置状态进行评估分析,并将评估结果与大桥同期专项检查结果进行比对,以验证本文方法的可行性。

1 大跨径悬索桥关键约束装置状态评估方法

对于支座、伸缩缝状态评估方法相互独立的问题,鉴于桥梁伸缩缝、支座位置相近,且其共同作用保证了桥梁的正常伸缩,而一旦二者卡死,阻塞在监测数据上的反应也较为相近,因此将二者合称为关键约束装置,进而提出大跨径悬索桥关键约束装置状态评估方法。方法框架如图1所示,可分为4个主要部分。

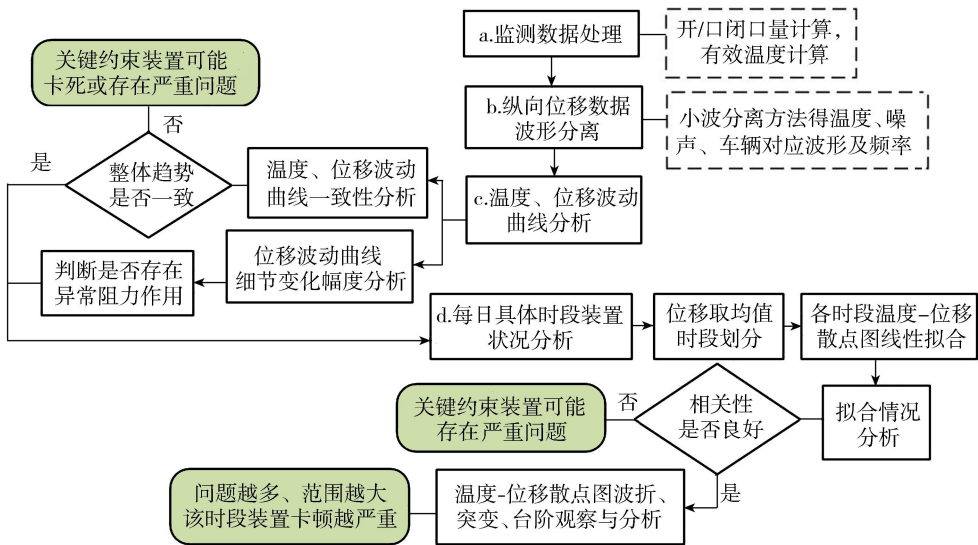


图1 评估方法流程
Fig.1 Flow chart of evaluation method

- a. 监测数据处理:梁端纵向位移数据和梁体温度数据预处理。
- b. 纵向位移数据波形分离。
- c. 温度、位移波动曲线分析。主要包括两部分:①通过二者一致性特性分析大桥关键约束装置是否卡死;②针对悬索桥,通过位移波动曲线的细节变化幅度分析关键约束装置是否受异常摩阻力作用。
- d. 每日具体时段关键约束装置状态分析。在一定周期内取均值,消除车辆、噪声波形影响,并将每日划分为多个连续时段,以各时段为单位,通过温度-位移散点图线性拟合,进行更及时、准确的判断,由相关系数判断相关性,进而判断对应时段关键约束装置是否发生严重卡住、停滞状况,而后通过图像波折,分析对应时段的卡顿现象。

该方法以每日连续时段为单位进行分析,结果更为准确、及时;在此基础上,可促进长期监测系统与专项检查的衔接与融合,从而更及时地发现问题并进行检测维修。

2 案例验证

背景桥为主跨近千米的大跨径悬索桥,见图2。大桥主梁A、B塔侧各设置一个减隔震转轴模数式伸缩缝;竖向支座包括竖向拉

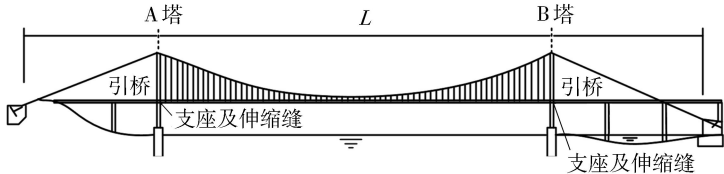


图2 背景桥示意图
Fig.2 Schematic diagram of background bridge

压支座和竖向盆式支座,均为滚轮式结构,支座滑板及侧滑板(聚四氟乙烯板)与主梁连接,滚轮及座体固定于主塔下横梁上。

大桥温度传感器分别设于梁体内 3 点;纵向位移传感器分别设于大桥 A、B 塔上下游,传感器一端固定于主塔下横梁上部,另一端越过伸缩缝固定于主梁端部。

选取该桥 2021 年 1 月共计 31 d 采样频率为 0.003 Hz 的温度实测数据和采样频率为 1 Hz 的梁端纵向位移数据。测量桥纵向 $L/4$ 、 $L/2$ 、 $3L/4$ 的温度,每个截面测点设于顶底板轴线处,按面积权重法计算梁体有效温度;由初始值减去实时测量值得到梁端纵向位移有效数据,以此为源数据进行后续分析。

2.1 纵向位移数据波形分离

采用小波分离法分别对背景桥 A、B 塔上下游侧梁端纵向位移源监测数据进行波形分离^[13]。小波变换以傅里叶变换为基础,利用有限长或快衰减波(即小波基函数)重构信号,具有多分辨率分析的特点,可在时频两域表征信号的局部特征。将母小波 $y(t)$ 进行伸缩和平移,得到一个小波序列。对于连续的情况:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\psi(\frac{t-b}{a}) \quad (a,b \in \mathbf{R}; a \neq 0)$$
 (1)

式中: a 为伸缩因子; b 为平移因子。则任意函数 $f(t)$ 的连续小波变换为

$$W_f^{\psi}(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \psi^*(\frac{t-b}{a}) dt$$
 (2)

通过多分辨率分析将所研究的信号 $x(n)$ 转换成近似项和细节项。粗分辨率子空间(即近似子空间)包含低频分解的信息,保留了原始信号的主要特征;细分分辨率子空间(即细节子空间)保留了高频分量的信息,反映了原始信号的细节特征:

$$x(n) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} a_{M,k} \varphi_{M,k}(n) + \sum_{j=1}^M \sum_{k=-\infty}^{\infty} d_{j,k} \psi_{j,k}(n)$$
 (3)

式中: n 为时间序列; $a_{M,k}$ 为近似系数; $\varphi_{M,k}(n)$ 为尺度函数; $d_{j,k}$ 为第 j 阶分辨率的系数; $\psi_{j,k}(n)$ 为小波函数。

根据上述方法可分离出长周期与短周期波动等多个波形,图 3 为 2021 年 1 月 20 日 A 塔下游侧波形分离图,图 3(a) 为温度荷载引起的长周期波动,图 3(b)(c) 分别为噪声和车辆荷载引起的短周期波动^[14-15](在 0—6 时,图 3(b) 波形较其他时刻幅度较小,图 3(c) 波形明显偏小,与凌晨时段人员活动很少相符)。由图 3 可见,噪声和车辆荷载引起的短周期波形频率明显高于温度荷载引起的波形频率,因此,可将源数据在较低频率内取平均值,以消除风和车辆冲击等短周期因素的影响^[7],同时最大限度保留异常因素造成的影响。

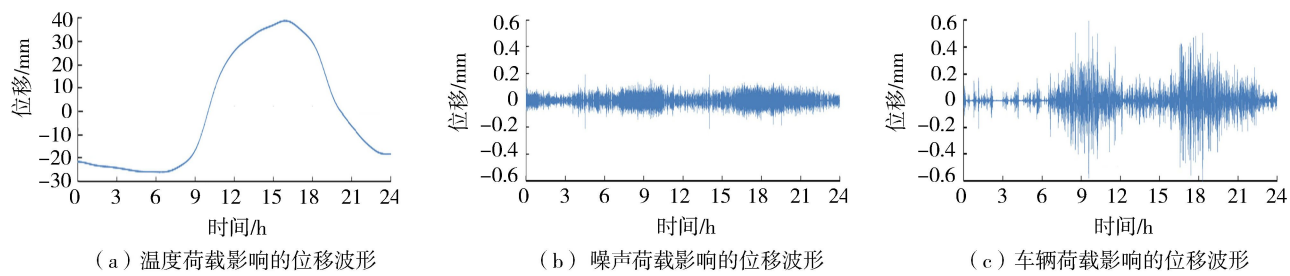


图 3 梁端纵向位移波形分离

Fig. 3 Waveform separation diagram of longitudinal displacement at beam end

2.2 温度-位移波动曲线分析

2.2.1 温度-位移数据日波动曲线整体一致性分析

采用 1 Hz 的梁端纵向位移源数据,及每 0.003 Hz 的梁体温度源数据,绘制随时间改变的梁体温度、梁端纵向位移双纵轴日波动走势图,图 4 为 2021 年 1 月 20 日数据。

由图 4 分析温度-位移数据变化长周期波动的整体趋势^[16-19],剔除时间滞后效应后,背景桥各侧温度与梁端位移随时间变化的趋势均具有较好的一致性,认为大桥关键约束装置未出现完全卡死等严重问题。但是,位移波动曲线显然并不光滑,可认为背景桥梁端纵向位移存在较频繁的短暂滞涩、卡顿情况。

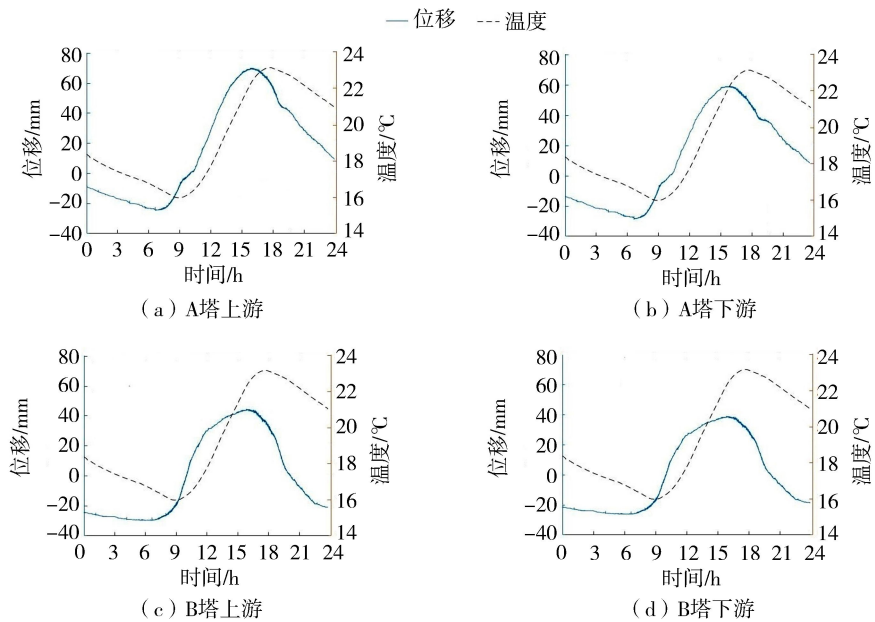


图 4 梁体温度-梁端纵向位移的双纵轴日波动走势

Fig. 4 Diurnal fluctuation trend of temperature and longitudinal displacement of beam end

2.2.2 位移日波动曲线细节变化幅度(毛刺)分析

悬索桥吊索方向垂直,不对梁体提供纵向约束力。故与斜拉桥^[4,20]相比,悬索桥在车辆、噪声等因素作用下,其梁端位移波动曲线细节处高频波动幅度较大(毛刺明显),尤其是大跨径悬索桥,细节波动幅度一般在 10 cm 左右,如图 5(b)所示,为江阴大桥高频波动图^[8]。

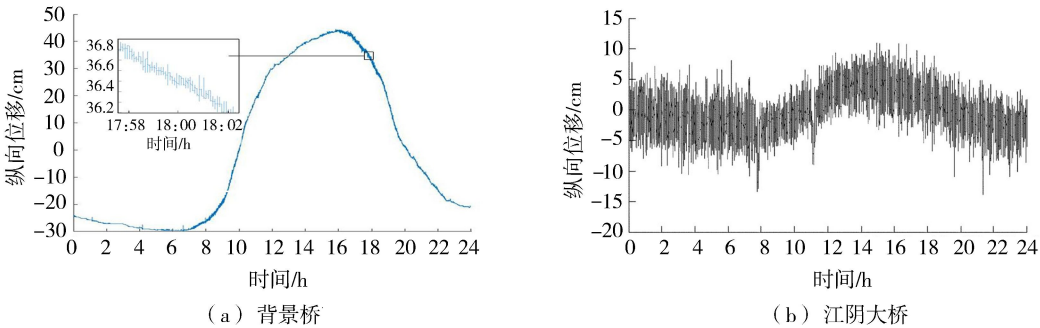


图 5 背景桥与其他悬索桥高频波动细节变化幅度(毛刺)的对比

Fig. 5 Comparison of the variation range of details between background bridge and other suspension bridges

但是,如图 5(a)中背景桥位移波形局部放大图及图 3(c)分离后车辆荷载影响的位移波形图所示,背景桥细节高频波动幅度为 0.1 cm 左右,仅为正常状态悬索桥波动幅度的百分之一,明显过小,这与悬索桥自身特性相悖。由此判断,桥梁关键约束装置受异常因素的影响,桥梁正常伸缩受到持续性的阻碍与摩阻力的作用。

2.3 具体时段温度-梁端纵向位移相关性分析

基于监测数据波形分离分析,背景桥梁端纵向位移数据在 0.003 Hz 对应的周期内取平均值,进而提取相同时间对应的温度、位移数据,绘制散点图。图 6(a)为 2021 年 1 月 20 日 A 塔上游的温度-位移散点图,并与图 6(b)中同日 A 塔上游对应的温度-位移日波动走势图的分段说明对应。

如图 6(a)所示,对于因日出日落等外界因素或温度传感器和位移传感器响应速度的差异及时间滞后效应产生的无效数据(框选区域),通过分析处理取平均后的位移波形图与温度变化曲线,针对日出、日落时段,准确剔除温度、位移曲线整体趋势不一致的区段。进而,考虑日照等其他因素的影响,将剩余时间分割为凌晨(D1,0—6 时)、正午(D2,9—15 时)、夜晚(D3,19—24 时)3 个连续时段,如图 6(b)所示,由此对主梁温度 T -梁端纵向向位移 u 进行最小二乘线性拟合,并进行后续相关性分析:

$$u = \beta_1 T + \beta_0 \tag{4}$$

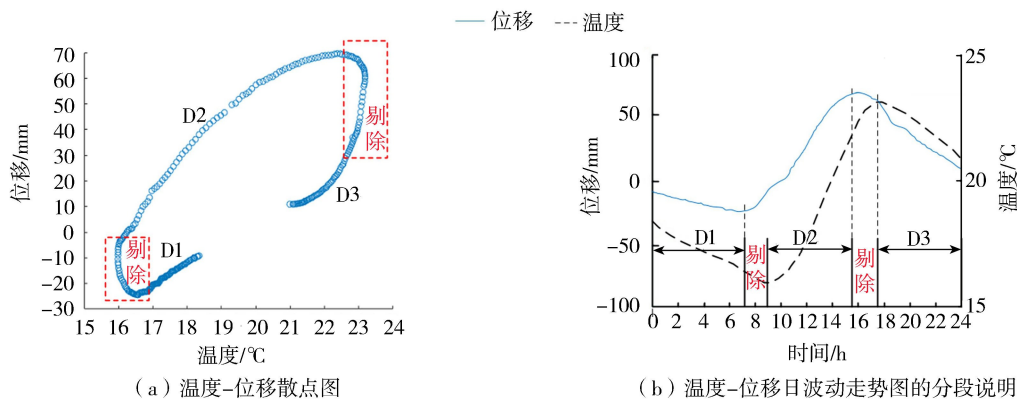


图 6 大桥温度-位移散点图及时段划分说明

Fig. 6 Explanation of temperature displacement scatter diagram and time segment division end

最小二乘拟合原理为

$$\begin{aligned}\beta_1 &= S_{dT}/S_{TT} \\ \beta_0 &= \bar{U} - \beta_1 \bar{T}\end{aligned}\tag{5}$$

式中: S_{dT} 为位移和温度数据的协方差; S_{TT} 为温度数据的方差; $\bar{U}$ 、 $\bar{T}$ 为对应范围位移和温度数据的均值。
由上述参数的计算结果可求取拟合的相关系数 R ,并此进行关键约束装置状态的评估:

$$R = \frac{S_{dT}}{\sqrt{S_{dd}S_{TT}}}\tag{6}$$

式中 S_{dd} 为位移数据方差。

以上述各时段为单位,对背景桥关键约束装置状态进行分析。首先,根据式(4)~(6),对 1 月数据进行拟合分析,由 R 判断相关性强弱的标准为: $0 < |R| \leq 0.3$ 为微弱相关, $0.3 < |R| \leq 0.5$ 为低度相关, $0.5 < |R| \leq 0.8$ 为显著相关, $0.8 < |R| < 1$ 为高度相关。

以 2021 年 1 月 20 日、21 日为例,图 7、图 8 分别为 1 月 20 日 D1、D3 时段温度-位移散点拟合图,表 1 为各时段回归分析参数统计。

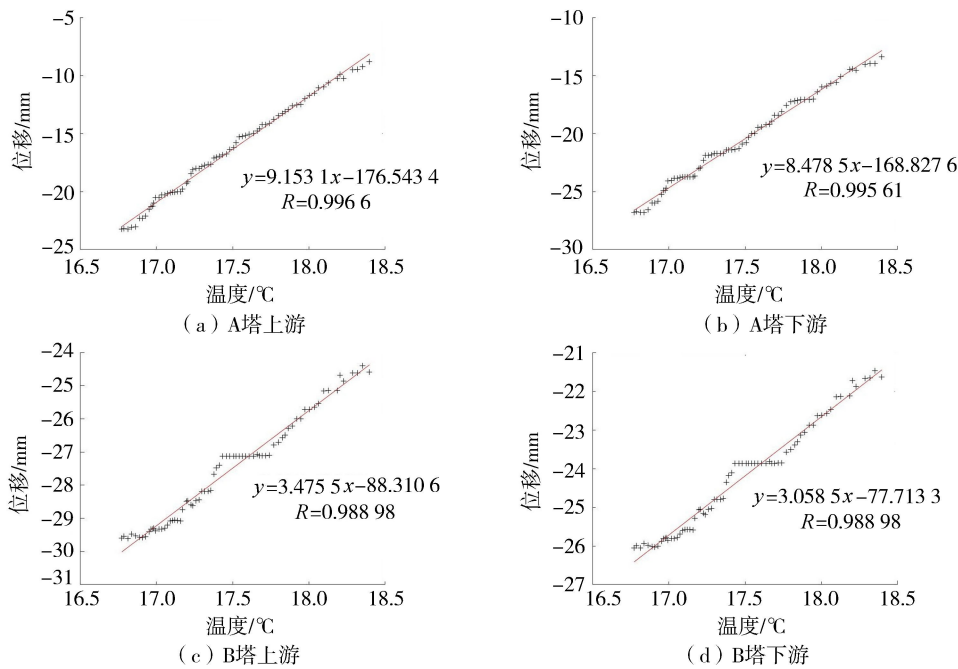


图 7 1 月 20 日 D1 时段温度-位移散点拟合

Fig. 7 Fitting of D1 temperature displacement scatter on January 20

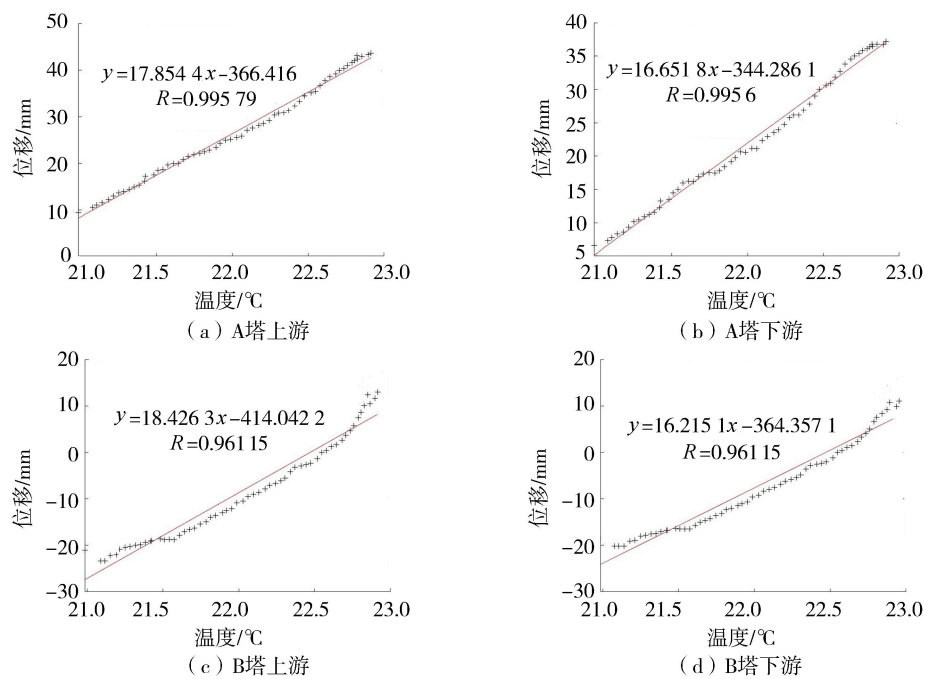


图8 1月20日D3时段温度-位移散点拟合

Fig.8 Fitting of D3 temperature displacement scatter on January 20

表1 各时段回归分析参数汇总

Table 1 Summary of regression analysis parameters in each period

时间	位置	β_1			β_0			R		
		D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3	D_1	D_2	D_3
1月20日	A塔上游	9.153	13.451	17.854	-176.543	-213.412	-366.416	0.997	0.987	0.996
	A塔下游	8.479	11.416	16.652	-168.828	-178.826	-344.286	0.996	0.976	0.996
	B塔上游	3.476	6.582	18.426	-88.311	-92.841	-414.042	0.989	0.917	0.961
	B塔下游	3.059	5.792	16.215	-77.713	-81.700	-364.357	0.989	0.917	0.961
1月21日	A塔上游	9.127	16.111	13.512	-182.260	-278.843	-293.153	0.999	0.962	0.950
	A塔下游	8.295	14.423	12.570	-167.982	-246.175	-274.270	0.999	0.955	0.950
	B塔上游	2.952	5.626	4.148	-82.800	-85.502	-113.223	0.995	0.876	0.868
	B塔下游	2.597	4.951	3.651	-72.865	-75.242	-99.637	0.995	0.876	0.868

结果显示,1月共计31d各时段 R 均大于0.80,且图线无剧烈突变,说明伸缩缝位移与梁体温度变化趋势高度线性相关,初步判断关键约束装置在各时段均未发生严重堵塞、卡死。同时,A塔侧相关性均略高于B塔侧,粗略判断A塔侧装置状况相比B塔侧略好。

此后关注温度-位移散点图中的波折情况,如图7、图8中实线框内节段,图7(c)(d)中大范围近乎于水平的台阶尤为典型。在1月各天的3个时段图中,较明显的波折与突变频繁出现,尤其以B塔侧波折更多、范围更大,可认为背景桥关键约束装置存在卡顿问题,B塔侧尤为严重。

2.4 大桥关键约束装置状态评估结果

基于上述评估可以认为包括桥梁伸缩缝、支座在内的大桥关键约束装置整体状况不佳:①A、B塔侧关键约束装置尚未发生严重堵塞、完全卡死的情况;②大桥关键约束装置持续性受到较强摩阻力的作用,需关注背景桥关键约束装置的锈蚀、杂物,或背景桥关键约束装置具体部件中存在伸缩缝凹凸不平、缝隙不均匀或支座聚四氟乙烯板存在磨损等问题,有针对性地进行检测和维修;③1月共计31d每日各时段内,A、B塔侧关键约束装置滞涩、磕绊与卡顿情况频发,B塔侧问题尤为严重,大桥关键约束装置服役状态欠佳,需及时进行检测与维修。

2.5 人工检查结果

基于背景桥关键约束装置同期专项检查结果,根据JTG/T H21—2011《公路桥梁技术状况评定标准》的要求,分别对A、B塔侧的伸缩缝、竖向盆式支座进行评估,结果如表2、表3所示,以总分100分计,大桥伸缩

缝和竖向支座评估得分分别为 49.8 和 33.4。

2.6 状态评估方法验证

根据大桥关键约束装置的专项检查结果,可以认为背景桥关键约束装置虽未完全卡死,但整体状况欠佳,得分均在 60 分以下,B 塔侧装置分值尤其偏低。其中,伸缩缝变形、杂物、锈蚀等问题严重,盆式支座的杂物、积水、位移超限严重,可能导致桥梁伸缩过程中的卡顿和阻滞问题,与图中频繁的波折问题相一致;而盆式支座聚四氟乙烯板的严重磨损,会对桥梁伸缩持续产生摩阻作用,与梁端位移日波动细节幅度不明显一致。专项检查结果与基于监测数据的评估结果基本一致,认为评估方法可行,可以之辅助桥梁关键约束装置的状态评估。

表 2 大桥伸缩缝人工检查评估结果

Table 2 Evaluation results of manual inspection of bridge expansion joints

位置	病害	扣分	权重扣分	得分
A 侧	伸缩缝支座松动、开裂、变形、外鼓、耐磨材料被挤出	10	10.0	74.9
	橡胶密封带开裂、损坏,土屑、铁屑、杂物等	10	6.4	
	中梁、横梁锈蚀	10	4.8	
	中梁弯曲变形	10	3.9	
B 侧	伸缩缝支座松动、开裂、变形、外鼓、耐磨材料被挤出	25	25.0	62.4
	橡胶密封带开裂、损坏,土屑、铁屑、杂物等	10	5.3	
	中梁、横梁锈蚀	10	4.0	
	中梁弯曲变形	10	3.3	

表 3 大桥竖向支座人工检查评估结果

Table 3 Evaluation results of manual inspection for vertical bearing of bridge

位置		滑板磨损		位移转角超限		杂物积水		得分
		扣分	权重扣分	扣分	权重扣分	扣分	权重扣分	
A 塔	上游盆式支座	40	40.0	40	17.0	10	2.5	40.5
	下游盆式支座	25	10.6	40	40.0	10	2.9	46.5
B 塔	上游盆式支座	50	50.0	40	14.1	10	2.1	33.8
	下游盆式支座	40	40.0	40	17.0	10	2.5	40.5

3 结 论

- a. 概念上,将原有的大跨径悬索桥伸缩缝、支座的 状态评估整合为关键约束装置的状态评估。
- b. 采用小波分离方法,对梁端位移数据进行较细致的分离。
- c. 提出利用位移波动曲线细节变化幅度(毛刺)的大小,判断大跨径悬索桥关键约束装置是否持续受到异常因素摩阻力的作用,提出面对该类问题,需重点检查的内容。
- d. 提出依照昼夜等外部因素将每一自然日进行时段划分,在每一连续时段内对温度-梁端纵向位移数据进行拟合与分析,以此辅助实际工程中大桥关键约束装置更准确、及时的状态评估。
- e. 基于本文方法,提出可将长期监测系统与专项检查相融合,使悬索桥关键约束装置的相关问题及病害处理更为及时、可靠。

参考文献:

[1] 中华人民共和国交通运输部.公路桥涵设计通用规范:JTG D60—2015[S].北京:人民交通出版社,2015.

[2] CUS U T. Aashto lrfd bridge design specifications[S].4th ed. Washington D. C. :AASHTO,2007.

[3] 黄侨,任远,许翔,等.大跨径缆索承重桥梁状态评估的研究现状与发展[J].哈尔滨工业大学学报,2017(9):1-9. (HUANG Qiao,REN Yuan,XU Xiang,et al. Research progress of condition evaluation for large span cable supported bridges [J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2017(9):1-9. (in Chinese))

[4] XIA Y,CHEN B,ZHOU X Q,et al. Field monitoring and numerical analysis of Tsing Ma Suspension Bridge temperature behavior [J]. Structural Control & Health Monitoring,2013,20(4):560-575.

[5] COELHO B Z,VERVUURT A,PEELEN W,et al. Dynamics of modular expansion joints:the Martinus Nijhoff Bridge[J]. Engineering Structures,2013,48:144-154.

[6] NI Y Q,HUA X G,WONGK 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.

[7] 张宇峰,承宇,傅斌,等.基于健康监测实测数据的江阴长江大桥伸缩缝状态分析与评定[C]//全国既有桥梁加固、改造与评价学术会议论文集.北京:交通运输部公路科学研究院,2008:253-258.

[8] 张宇峰,陈雄飞,张立涛,等. 大跨悬索桥伸缩缝状态分析与处理措施[J]. 桥梁建设,2013(5):49-54. (ZHANG Yufeng, CHEN Xiongfei,ZHANG Litao, et al. Condition analysis and handling measures for expansion joints of long span suspension bridges[J]. Bridge Construction,2013(5):49-54. (in Chinese))

[9] 丁幼亮,周凯,王高新,等. 苏通大桥斜拉桥伸缩缝位移的长期监测与分析[J]. 公路交通科技,2014(7): 60-71. (DING Youliang,ZHOU Kai,WANG Gaoxin,et al. Long-term monitoring and analysis of expansion joint displacement of Sutong Cable-stayed Bridge[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development,2014(7): 60-71. (in Chinese))

[10] 邓扬,李爱群,丁幼亮. 大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J]. 公路交通科技,2009,26(5):54-58. (DENG Yang, LI Aiqun, DING Youliang. Research and application of correlation between beam end displacement and temperature of long-span suspension bridge[J]. Journal of Highway and transportation Research and Development,2009,26(5): 54-58. (in Chinese))

[11] 邓扬,李爱群,丁幼亮,等. 基于长期监测数据的大跨桥梁结构伸缩缝损伤识别[J]. 东南大学学报(自然科学版),2011,41(2):336-341. (DENG Yang, LI Aiqun, DING Youliang, et al. Damage identification of expansion joints in long span bridge using long-term monitoring data[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2011, 41(2): 336-341. (in Chinese))

[12] 汪锋,承宇. 江阴大桥伸缩缝损坏原因分析及设计改进[J]. 现代交通技术,2010,7(2):64-66. (WANG Feng, CHENG Yu. Reasons analysis on the expansion joint damage and design improvement[J]. Modern Transportation Technology,2010,7(2): 64-66. (in Chinese))

[13] XU Xiang, REN Yuan, HUANG Qiao, et al. Thermal response separation for bridge long-term monitoring systems using multi-resolution wavelet-based methodologies[J]. Journal of Civil Structural Health Monitoring,2020,10:527-541.

[14] GUO Tong, LIU Jie, HUANG Lingyu. Investigation and control of excessive cumulative girder movements of long-span steel suspension bridges[J]. Engineering Structures,2016,125 :217-226.

[15] LI Guangling, HAN Wanshui, CHEN Xiao, et al. Wear evaluation on slide bearings in expansion joints based on cumulative displacement for long-span suspension bridge under monitored traffic flow[J]. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020,34(1):04019106.

[16] GUO Tong, LIU Jie, ZHANG Yufeng, et al. Displacement monitoring and analysis of expansion joints of long-span steel bridges with viscous dampers[J]. Journal of Bridge Engineering,2015,20(9):04014099.

[17] ZHOU Linren, XIA Yong, BROWNJOHN J M W, 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.

[18] ZHOU Yi, XIA Yong, CHEN Bo, et al. Analytical solution to temperature-induced deformation of suspension bridges[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2020,139:106568.

[19] 雷笑,王杰,章登精,等. 南京长江第四大桥钢箱梁铺装层温度影响系数分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2018,46(1):90-94. (LEI Xiao, WANG Jie, ZHANG Dengjing, et al. Analysis on the temperature influence coefficient of the Fourth Nanjing Yangtze Bridge pavement[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2018,46(1):90-94. (in Chinese))

[20] 赵晓晋,贺拴海,胡文亮,等. 独塔部分地锚式 PC 斜拉桥经济及设计参数研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2017,45(2):145-152. (ZHAO Xiaojin, HE Shuanhai, HU Wenliang, et al. Cost and design parameter of partially earth-anchored PC cable-stayed bridge with single pylon[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2017, 45(2): 145-152. (in Chinese))

(收稿日期:2021 - 04 - 22 编辑:胡新宇)