

温度影响下基于曲率模态的梁式桥损伤识别

周奎, 申美玲

(上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093)

摘要: 利用曲率模态范数作为损伤特征参数,对简支梁桥模型进行损伤识别数值模拟。考虑了温度对损伤识别的影响,并采用主成份分析法给予剔除,进而实现简支梁桥模型的轻微损伤识别。首先,介绍温度影响的机理,数值模拟方式和剔除方法;然后针对简支梁在不同温度条件下存在不同程度的轻微损伤,利用曲率模态范数进行了温度影响剔除后的损伤识别,并得出以下结论:温度影响可能对梁式桥的损伤识别产生不良影响,甚至会造成误判;经主成份分析法剔除温度影响后的曲率模态范数,可对梁式桥的轻微损伤做出存在与否的准确判断并定量分析。

关键词: 损伤识别; 曲率模态; 温度影响; 主成份分析; 梁式桥

中图分类号: U446.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)03-0179-07

Damage identification of beam-type bridge under temperature variation based on modal curvature

ZHOU Kui, SHEN Meiling

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this study, numerical simulation of damage identification of simple supported beam bridge model is performed by using modal curvature norm as damage characteristic parameter. Considering the influence of temperature on damage identification, the principal component analysis method is used to remove the damage, and then the minor damage identification of the simple supported beam bridge model is realized. The mechanism of temperature effect, numerical simulation and elimination method of temperature influence are introduced at first; then in consideration of the various slight damage and different temperature conditions in the simple supported beam model, the results of damage identification using the modal curvature norms before and after eliminating the temperature effect were discussed. In the end, the conclusions are drawn as follows: temperature variation may adversely affect the damage identification of the members, even cause false recognition; modal curvature which is eliminated the influence of temperature by PCA, can provide accurate localization of the slight damage and the damage extent quantification.

Key words: damage identification; modal curvature; temperature effect; principal component analysis (PCA); beam-type bridge

近几十年来,随着我国的桥梁建设不断发展,桥梁的损伤检测和加固成为了工程界的热点之一。根据已有的研究结果可知,温度对桥梁损伤的影响是比较显著的。Alampalli^[1]的小型桥梁故障模拟试验说明:当温度变化范围足够大时,温度导致模态频率的变化比模拟故障大了一个数量级。许永吉等^[2]基于两跨钢-混凝土连续组合梁模型和刚架拱桥的环境振动测试,得到的结论是:环境温度的变化会引

起桥梁结构动力特性的显著变化。焦志钦等^[3]对吉昌特大桥的主桥和引桥进行动力响应和温度测试,得到箱梁桥前三阶模态频率和T型梁桥的第三阶模态频率与温度具有显著的负相关性的结论。樊可清等^[4]对香港汀九大桥长期振动和温度分布测试数据进行了分析研究,结果表明环境温度的波动会引起模态频率的变化,且两者之间呈明显非线性关系。

收稿日期:2016-09-22; 修回日期:2017-01-03

作者简介:周奎(1970-),男,安徽铜陵人,工学博士,副教授,主要从事结构健康监测研究。

通讯作者:申美玲(1993-),女,内蒙古通辽人,硕士研究生,主要从事结构健康监测研究。

1 曲率模态和温度影响

曲率模态这一概念是 Pandey 等^[5]提出的,其差分格式为:

$$\phi_j''(i) = \frac{\phi_j(i+1) - 2\phi_j(i) + \phi_j(i-1)}{l^2} \quad (1)$$

式中: $\phi_j''(i)$ 为梁的第 i 个节点在 j 阶模态数的曲率模态振型; $\phi_j(i)$ 为梁的第 i 个节点在 j 阶模态的振型; l 为梁单元节点间距。

温度对结构的影响主要包括两个方面:

(1) 温度的改变会导致结构材料的弹性模量发生变化。弹性模量变化也就代表着刚度发生变化,最终影响结构的模态参数。

(2) 温度的改变会引起结构热胀冷缩,使结构尺寸发生改变或使超静定结构产生预应力。对于超静定结构,由于存在过多的约束,使得温度应力得不到释放,那么结构的内力就会发生变化,由应力刚化理论可知,结构内力改变也会引起刚度的改变,进而对结构的模态参数造成影响。

此外,桥梁结构由于受到日照、结构材料等方面的影响,阳面和阴面存在温差,结构内部也存在温差,因此梁式桥的温度变化除了包含整体结构的温度改变外,还包括沿梁跨方向的温度梯度和沿梁跨垂直方向的温度梯度。

基于以上理论,侯立群等^[6]利用实桥的有限元模型进行了模拟研究,结果表明温度导致弹性模量的改变对桥梁模态频率的影响占主导地位,温度导致结构内力和桥型变化对桥梁模态频率的影响非常小。姚昌荣等^[7]在对某大跨度桥梁的健康监测过程中,发现模态频率主要与结构的整体温度改变相关,沿梁跨垂直方向的温度梯度对其影响较小。

剔除温度因素对结构损伤识别的影响主要有两种方法,一种是通过实测振动和温度数据,建立环境温度与损伤特征参数的相互关系来实现,如香港汀九大桥的支持向量机(SVM)的非线性回归模型,这些关系一般都是孤立温度因素然后拟合测试数据得到的,可能存在着一定的局限性^[8]。另一种方法则是直接将环境因素作为变量嵌入到损伤特征参数中,利用主成份分析法(PCA)来剔除环境因素对损伤特征参数的影响。李苗等^[9]以模态柔度二范数作为损伤特征参数,通过数值算例研究,结果表明若不考虑温度对模态柔度的影响,易对桥梁结构的健康状况做出误判,当运用主成份分析法将温度影响剔除后,模态柔度二范数有效地完成了结构的损伤

识别。吴森等^[10]利用主成份分析法消除了环境温度对动态响应的干扰,然后以小波包系数节点能量谱为损伤特征参数,实现了一钢结构平台数值试验的损伤识别。本文也将采用主成份分析法来消除环境温度的影响,并以曲率模态范数作为损伤特征参数,进行温度影响下基于曲率模态的梁式桥损伤识别数值研究。

主成份分析法(PCA)是一种通过降维技术把多个变量简化为几个主成份的综合变量的多元统计分析法,被广泛应用于众多领域。在结构健康监测和损伤识别中,可以先对结构动态响应或损伤特征参数进行主成份分析并提取出主要成份,通过求主成份分析结果的残差就可以进行剔除环境因素影响后的损伤识别。将 PCA 应用到温度影响下基于曲率模态的梁式桥损伤识别,具体可以这样理解:

假定梁式桥在 τ_k ($k = 1, 2, \dots, n, n$ 为样本数) 时刻的曲率模态范数为 $Q_k^{m \times 1}$ (m 为测量点数), 将 n 个时刻的曲率模态范数构建成矩阵 $Q^{m \times n}$ 。运用主成份分析法将 Q 从原来的空间降维至包含温度信息的空间 $P = T^T Q \in R^{r \times n}$ ($r < m$), 然后将降维得到的矩阵 P 投影回原向量空间得到矩阵 \hat{Q} , 其中的转换矩阵 $T \in R^{m \times r}$ 可以利用奇异值分解法求得, 对样本矩阵 Q 的协方差矩阵做奇异值分解:

$$QQ^T = U \sum^2 U^T \quad (2)$$

式中: U 是正交矩阵, 矩阵中第 i 个列向量定义 Q 的第 i 个主成份; $\sum = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_m)$ 是对角矩阵, $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_m \rightarrow 0$ 。实际应用中只用到 r 个主成份, 且要满足公式

$$\sum_{i=1}^r \sigma_i^2 / \sum_{j=1}^m \sigma_j^2 \geq e \quad (3)$$

式中: e 代表了主成份对整个数据样本集的贡献, 一般取 95%^[11]。

然后, 求转换矩阵 T, \hat{Q}

$$T = [u_1, u_2, \dots, u_r] \quad (4)$$

$$\hat{Q} = TT^T Q \in R^{m \times n} \quad (5)$$

式中: u_i ($i = 1, 2, \dots, r$) 为矩阵 U 的前 r 个列向量。

待得到 \hat{Q} 后, 即可计算样本向量 Q_k 的残差 I :

$$I = Q - \hat{Q} = Q - TT^T Q \quad (6)$$

至此, 即完成温度影响的剔除。

2 数值模拟

采用 ANSYS 有限元软件进行模拟, 混凝土简支

梁桥模型总长 2 m,划分为等长的 10 个单元,11 个节点,如图 1 所示(图中下排圆圈内的数字为单元编号,上排数字为节点编号)。梁截面面积为 0.037

m²,具体截面尺寸见图 2,材料的泊松比为 0.2,密度为 2 500 kg/m³,混凝土选用 C30,健康状态下混凝土材料在 20℃时的弹性模量为 30 GPa。

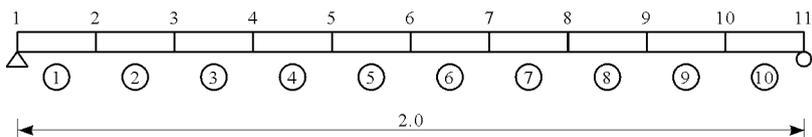


图 1 简支梁桥示意图 (单位:m)

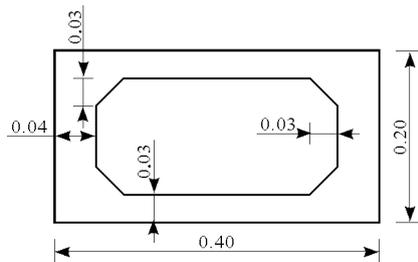


图 2 梁截面尺寸 (单位:m)

本文简支梁桥的温度影响将采用改变梁的弹性模量来进行模拟,温度变化考虑梁的整体温度改变和沿梁跨方向的温度梯度。根据文献[6]可知,常温小于 100℃时,温度升高 1℃混凝土的弹性模量则下降 0.45%;温度降低则反之。温度变化主要分成 3 种情况:(1)只考虑沿梁跨方向的温度梯度(不同的温度梯度);(2)考虑整体温差和变化,沿梁跨方向温度梯度不变;(3)考虑整体温差和变化,沿梁跨方向温度梯度变化。

梁跨方向出现大小不同的温度梯度时,这里将温度梯度较小且无损的这组采样数据暂作为参考数据,并把由这组数据计算得到的曲率模态范数作为基准,使之分别与(1)温度梯度较小且有损的曲率模态范数、(2)温度梯度较大且无损及(3)温度梯度较大,有损的曲率模态范数进行对比分析,对比结果分别见图 3、4 和 5。

选用曲率模态范数作为损伤特征参数,通过主成份分析法剔除温度影响完成基于曲率模态的梁式桥损伤识别(鉴于篇幅,只取前三阶的某一阶进行分析)。

由图 3 可以看出,当沿梁跨方向的温度梯度不同时,在温度影响剔除前,较大温度梯度一组的第一阶曲率模态范数均分别与较小温度梯度一组的第一阶曲率模态范数相差较大。而经过主成份分析法的温度影响剔除后,两组数据的曲率模态范数之间几乎都没有了差值,说明温度对曲率模态范数的影响已经被有效剔除。(第二、三阶模态与第一阶模态具有同样的结果,因此不再详细列出。)

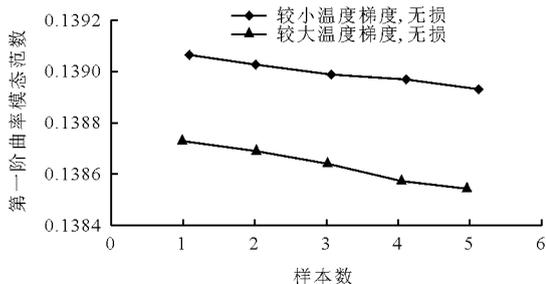
2.1 仅考虑沿梁跨方向的温度梯度改变

如表 1 所示,当梁式桥损伤检测中只需考虑沿

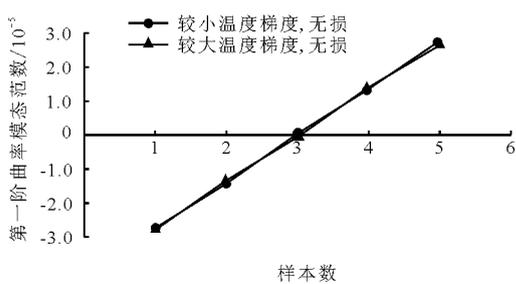
表 1 沿梁跨方向不同温度梯度影响下简支梁损伤工况

工况	梁单元刚度降低百分数	梁单元温度变化
A	单元 3 降低 5%	(1)较小的温度梯度,温度梯度为 4℃、4.5℃、5℃、5.5℃和 6℃,假定单元 1 为 20℃,单元
B	单元 3 降低 10%	10 分别为 24℃、24.5℃、25℃、25.5℃、26℃;
C	单元 3 降低 10%, 单元 6 降低 5%	(2)较大的温度梯度,温度梯度为 9℃、9.5℃、10℃、10.5℃和 11℃,假定单元 1 为 20℃,单元 10 分别为 29℃、29.5℃、30℃、30.5℃、31℃。

注:中间各梁单元的温度取两端已知梁单元温度的线性插值。



(a) 温度影响剔除前



(b) 温度影响剔除后

图 3 较小与较大温度梯度无损工况的曲率范数

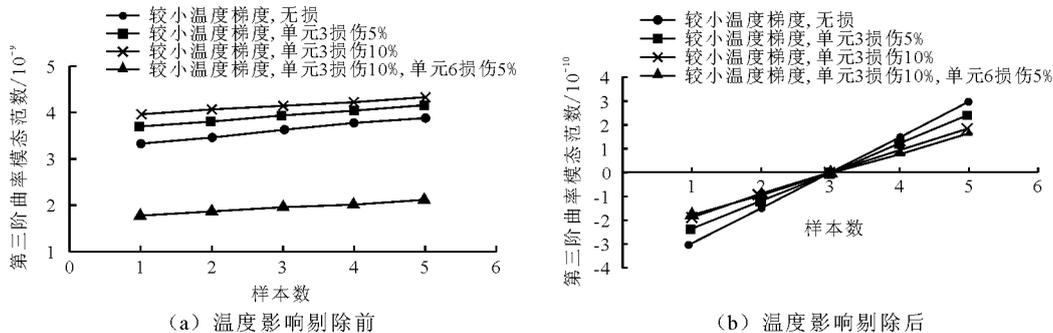


图4 较小温度梯度各损伤工况的曲率范数

从图4可以知道,当梁式桥沿梁跨方向的温度梯度相同时,在温度影响剔除前,有损各组的第三阶曲率模态范数均分别与无损一组的第三阶曲率模态范数有一定的差值,且各组差值的均值与损伤程度呈正相关性,即差值均值越大,损伤越严重(第一、二阶模态的结果与第三阶相同)。经过主成份分析法的温度影响剔除后,有损各组和无损一组的第三阶曲率模态范数之间还是存在着差值,但仍保持正相关性。这说明了当梁式桥损伤前后沿梁跨方向的温度梯度变化不大时,进行损伤识别可以不进行温度影响的剔除。

由图5可知,当梁式桥沿梁跨方向的温度梯度不同时,在温度影响剔除前,较大温度梯度一组的第三阶曲率模态范数均分别与较小温度梯度一组的第

三阶曲率模态范数有一定的差值,但这些差值的均值大小与损伤程度没有直接关系。经过温度影响剔除后,这些差值仍然存在,而且各组的差值均值大小与损伤程度呈正相关性。

2.2 沿梁跨梯度不变,梁整体温度改变

如表2所示,将整体温度的采样分为低温和高温两种,以简支梁桥左端节点为基准,低温的采样范围为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$,高温的采样范围为 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。无论低温或高温,每隔 5°C 进行一次数据采样,且沿梁跨方向的温度梯度均为 5°C 。将低温无损得到的这组曲率模态范数作为参考数据,使之与(1)低温有损的曲率模态范数和(2)高温无损及(3)高温有损的曲率模态范数进行对比分析,对比结果分别见图6、7和8。

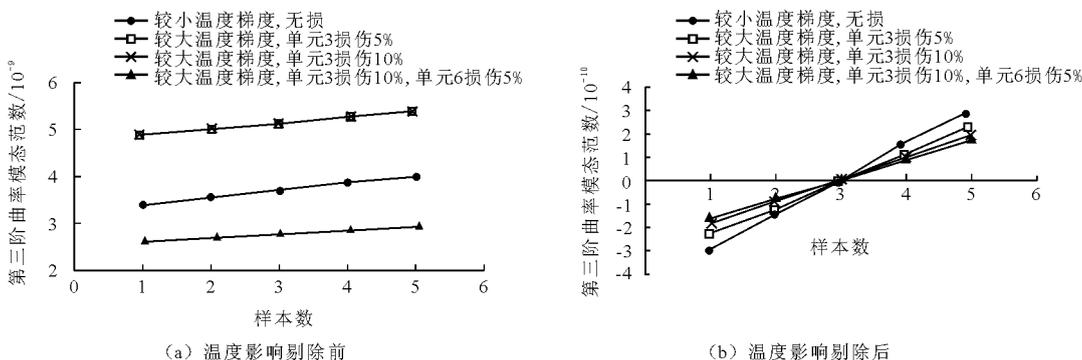


图5 较小无损与较大温度梯度有损工况的曲率范数

表2 整体温差和沿梁跨方向相同温度梯度影响下简支梁损伤工况

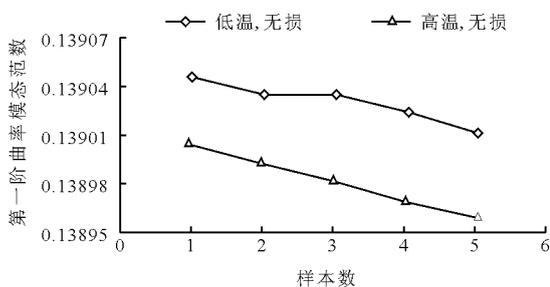
工况	梁单元刚度降低百分数	梁单元温度变化
A	单元3降低5%	(1)整体温度采样范围为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ (以左端为基准),每隔 5°C 进行一次数据采样,沿梁跨方向的温度梯度均为 5°C ,假定单元1依次为 -10°C 、 -5°C 、 0°C 、 5°C 和 10°C ,单元10相应为 -5°C 、 0°C 、 5°C 、 10°C 和 15°C ;
B	单元3降低10%	(2)整体温度采样范围为 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ (以左端为基准),每隔 5°C 进行一次数据采样,沿梁跨方向的温度梯度均为 5°C ,假定单元1依次为 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 和 40°C ,单元10相应为 25°C 、 30°C 、 35°C 、 40°C 和 45°C 。
C	单元3降低10%, 单元6降低5%	

注:中间各梁单元的温度取两端已知梁单元温度的线性插值。

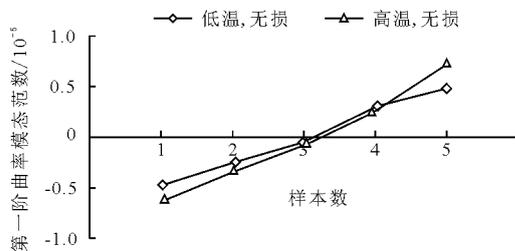
如图6所示,当梁式桥沿梁跨方向具有稳定的温度梯度而整体温度范围发生变化时,在温度影响剔除前,高温无损一组的第一阶曲率模态范数均分别与低温无损一组的第一阶曲率模态范数相差较大。经过主成份分析法的温度影响剔除后,它们的曲率模态范数之间的差值大大减小了。

由图7、8可以看出,当梁式桥沿梁跨方向具有稳定的温度梯度且整体温度范围也没有发生变化,

或是具有稳定的温度梯度而整体温度范围发生变化时,在温度影响剔除前,低温和高温有损各组的曲率模态范数分别与低温无损一组的第三阶曲率模态范数有一定的差值,但是这些差值均值的大小与损伤程度没有直接关系。在温度影响剔除后,低温和高温有损各组与无损一组的差值均值则同损伤程度呈正相关性。

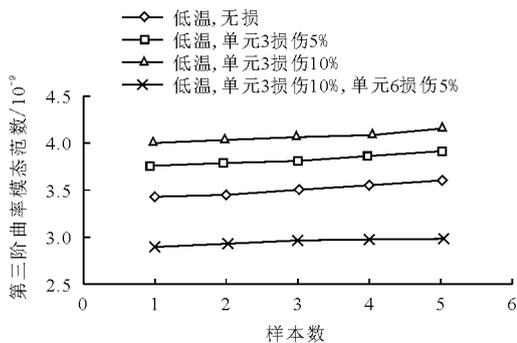


(a) 温度影响剔除前

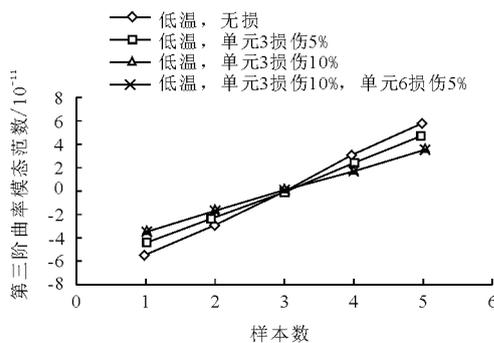


(b) 温度影响剔除后

图6 低温无损与高温无损工况的曲率范数

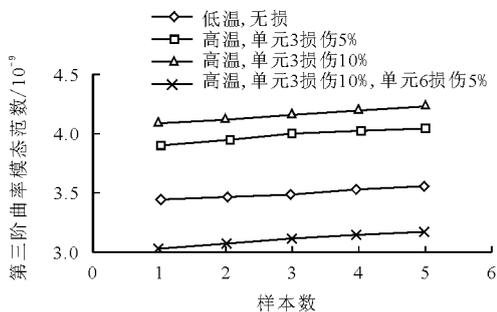


(a) 温度影响剔除前

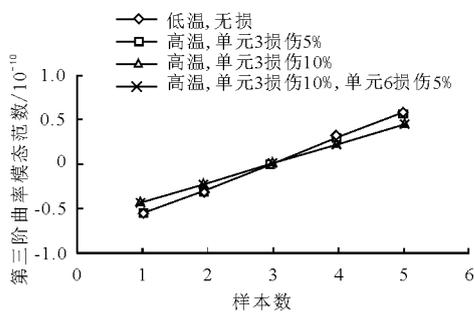


(b) 温度影响剔除后

图7 低温各损伤工况的曲率范数



(a) 温度影响剔除前



(b) 温度影响剔除后

图8 低温无损与高温有损工况的曲率范数

2.3 沿梁跨方向温度梯度改变,整体温度改变

如表3所示,将整体温度的采样分为低温和高温两种,以简支梁桥左端节点为基准,低温的采样范围为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$,高温的采样范围为 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 。无论低温或高温,每隔 5°C 进行一次数据采

样,沿梁跨方向的温度梯度都分别依次为 1°C 、 2°C 、 3°C 、 4°C 和 5°C 。将低温无损得到的这组曲率模态范数作为参考数据,使之与(1)低温有损的曲率模态范和(2)高温无损及(3)高温有损的曲率模态范数进行对比分析,对比结果分别见图9、10和11。

表3 整体温差和沿梁跨方向不同温度梯度影响下简支梁损伤工况

工况	梁单元刚度降低百分数	梁单元温度变化
A	单元3降低5%	(1)整体温度低温采样范围为 $-10^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ (以左端为基准),每隔 5°C 进行一次数据采样,沿梁跨方向的温度梯度分别为 1°C 、 2°C 、 3°C 、 4°C 和 5°C ,假定单元1依次为 -10°C 、 -5°C 、 0°C 、 5°C 和 10°C ,单元10相应为 -9°C 、 -3°C 、 3°C 、 9°C 和 15°C ;
B	单元3降低10%	
C	单元3降低10%, 单元6降低5%	(2)整体温度高温采样范围为 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ (以左端为基准),每隔 5°C 进行一次数据采样,沿梁跨方向的温度梯度分别为 1°C 、 2°C 、 3°C 、 4°C 和 5°C ,假定单元1依次为 20°C 、 25°C 、 30°C 、 35°C 和 40°C ,单元10相应为 21°C 、 27°C 、 33°C 、 39°C 和 45°C 。

注:中间各梁单元的温度取两端已知梁单元温度的线性插值。

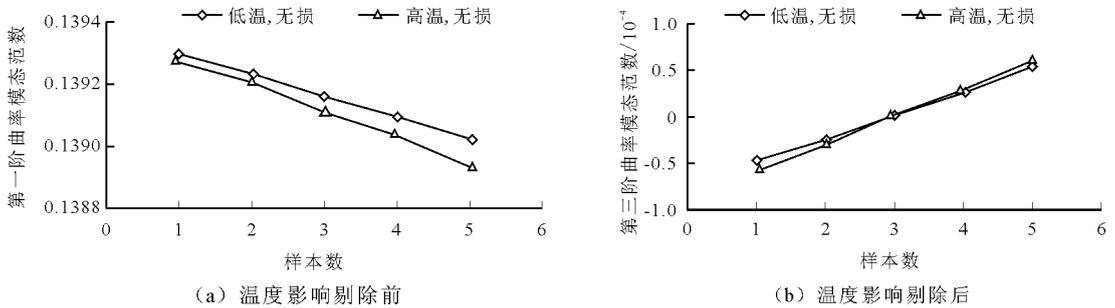


图9 低温无损与高温无损工况的曲率范数

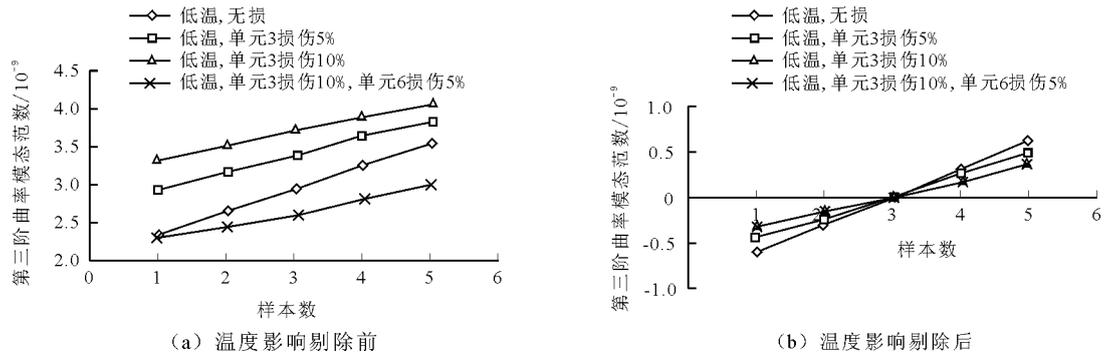


图10 低温各损伤工况曲率范数

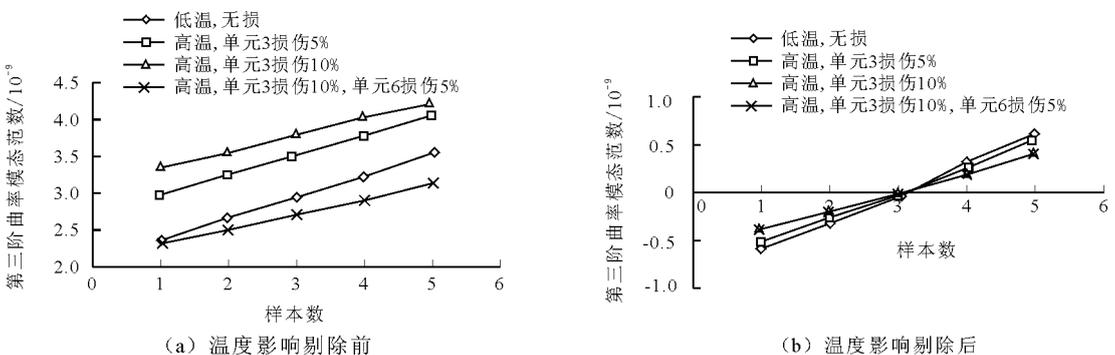


图11 低温无损与高温有损工况曲率范数

由图9可以看出,当梁式桥沿梁跨方向存在变化的温度梯度且整体温度范围发生变化时,在温度影响剔除前,高温无损一组的第一阶曲率模态范数,与低温无损一组的第一阶曲率模态范数有一定的差

值。在温度影响剔除后,高温无损和低温无损的曲率模态范数之间的差值明显减小。

由图10、11可以看出,当梁式桥沿梁跨方向存在变化的温度梯度而整体温度范围不变,或是存在

变化的温度梯度且整体温度范围发生变化时,在温度影响剔除前,低温和高温有损各组的第三阶曲率模态范数均分别与低温无损一组的第三阶曲率模态范数有一定的差值,但这些差值的均值大小与损伤程度没有直接关系。在温度影响剔除后,低温和高温有损各组与无损一组的差值均值大小同损伤程度呈正相关性。

3 结 论

通过分析温度影响剔除前后不同温度条件下和各种损伤工况下简支梁桥的曲率模态范数,可以得出以下结论:

(1)温度影响是梁式桥损伤识别过程中具有显著影响的因素之一。

(2)通过综合分析前三阶差值均值的大小,可以判断出梁式桥结构是否存在损伤。如果有不同损伤情况下的样本数据,经过温度影响剔除后对比它们的差值均值大小,在一定程度上能够进行相对损伤程度的判断。

本文研究的数值模型是比较简单的单箱型截面简支梁桥,没有考虑沿梁垂直方向的温度梯度,对于结构复杂的梁式桥,温度对模态参数的影响较为复杂,有待进一步的研究。

参考文献:

[1] Alampalli S. Influence of in-service environment on modal parameters[C]//. Proceeding of the 16th International Modal Analysis Conference (IMAC), Santa Barbara, 1998;

111-116.

- [2] 许永吉,朱三凡,宗周红. 环境温度对桥梁结构动力特性影响的试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2007, 27(6): 119-123.
- [3] 焦志钦,胡利平,韩大建. 温度对桥梁动力特性的影响研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(31): 7685-7689.
- [4] 樊可清,倪一清,高赞明. 大跨度桥梁模态频率识别中的温度影响研究[J]. 中国公路学报, 2006, 19(2): 67-73.
- [5] Pandey A K, Biswas M, Samman M M. Damage detection from changes in curvature mode shapes [J]. Journal of Sound and Vibration, 1991, 145(2): 321-332.
- [6] 侯立群,李宏伟,冷志鹏,等. 桥梁实测频率的温度影响分析[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 4-7.
- [7] 姚昌荣,李亚东. 大跨度桥梁健康监测过程中的温度影响研究[J]. 华东交通大学学报, 2008, 25(2): 25-28.
- [8] Kullaa J. Elimination of environmental influences from damage-sensitive features in a structural health monitoring systems [C] // . In: Fu-Kuo Chang (Ed.), Structural Health Monitoring - the demands and Challenges. Boca Raton, FL: CRC Press. 2001, 742-749.
- [9] 李苗,黄天立,任伟新. 温度影响下基于主成份分析和模态柔度的结构异常检测[J]. 振动与冲击, 2011, 30(5): 83-87.
- [10] 吴森,韦灼彬. 基于主成份残差的结构损伤识别方法[J]. 公路交通科技, 2011, 28(7): 113-117.
- [11] Deraemaeker A, Reynders E, De Roeck G, et al. Vibration based structural health monitoring using output-only measurement under changing environment [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(1): 34-56.

(上接第178页)

[16] Det Norske Veritas. Design of offshore wind turbine structures DNV-OS-J101[S]. Norway: DNV, 2011.

[17] Det Norske Veritas. Design against accidental loads DNV-RP-C204[S]. Norway: DNV, 2004.

[18] 王自力,蒋志勇,顾永宁. 船舶碰撞数值仿真的附加质量模型[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(4): 321-326.

[19] 姜华,王君杰,贺拴海. 钢筋混凝土梁桥船舶撞击连续倒塌数值模拟[J]. 振动与冲击, 2012, 31(10): 68-73.

[20] 郝二通,柳英洲,柳春光. 海上风机单柱基础受船舶撞击的数值研究[J]. 振动与冲击, 2015, 34(3): 7-13.

[21] Pelersen M J. Dynamics of ship collisions [J]. Ocean Engineering, 1980, 9(4): 295-329.

[22] 李艳贞,胡志强,邹早建. 海上风电站遭遇船舶侧向撞

击时的结构动力响应分析[J]. 振动与冲击, 2010, 29(10): 123-126.

- [23] Gladman B. LS-DYNA keyword user's manual [M]. Livermore: Livermore Software Technology Corporation, 2007.
- [24] 石少卿,康建功,王敏,等. ANSYS/LS-DYNA 在爆炸与冲击领域内的工程应用 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [25] 任年鑫. 海上风力机气动特性及新型浮式系统 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
- [26] 同济大学土木工程防灾国家重点实验室. 南京长江第四大桥船舶撞击动力分析研究 [R]. 上海: 同济大学, 2007.