

文章编号: 1001-4888(2017)04-0487-08

基于提升小波变换和互相关函数的梁式桥损伤检测*

王晓春, 刘习军, 张素侠

(天津大学 机械工程学院, 天津 300072)

摘要: 为了有效地提取梁式桥的损伤特征, 提出了一种将提升小波变换与互相关函数幅值向量相结合的损伤识别的方法。首先利用提升小波变换将车载作用下梁桥结构的加速度响应分解到单阶模态上, 再对提升重构后得到的第一阶响应进行互相关处理, 利用提出的损伤指标来进行损伤定位。通过数值仿真和模拟实验, 验证了方法的有效性, 讨论了噪声及测点稀疏对识别结果的影响, 结果表明该方法具有良好的噪声鲁棒性。另外, 在综合考虑经济性和识别结果准确性的情况下, 给出了合理的测点布置方式。

关键词: 梁式桥; 提升小波变换; 互相关函数幅值向量; 损伤识别

中图分类号: U447; TU317 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-16-169

0 引言

准确识别桥梁的损伤位置是对结构进行维修和加固的重要依据, 它能有效地避免桥梁事故的发生, 因此具有极其重要的工程意义。提升小波变换通过提升步骤自适应地构造与故障信息相匹配的小波函数, 不仅测试精度高而且运算速度快, 适用于结构的在线健康监测, 所以提升小波变换一经提出, 就在故障诊断领域得到了广泛的应用^[1-3]。

结构在频率成分一定的随机激励下, 其互相关函数幅值向量(CorV)可以看做结构的“固有特性”, 根据 CorV 的变化能够识别结构的损伤。于哲峰等^[4,5]用互相关函数幅值向量的置信度来标定 CorV 的变化, 以此来识别结构的损伤; 安宁等^[6]提出了一种利用互相关函数灵敏度识别桥梁损伤的方法, 并通过数值仿真验证了方法的有效性。本文提出的提升小波变换与 CorV 相结合的方法, 能够准确且明显地定位桥梁的损伤位置, 并具有良好的抗噪性。

1 提升小波变换的理论基础

提升小波变换由分解与重构两部分组成, 其中分解过程又包括分裂、预测和更新三个步骤^[7,8]。设 $\{x(n), n \in Z\}$ 为初始信号。

(1) 分裂。把初始信号 $\{x(n), n \in Z\}$ 分裂成相互关联的奇序列 $x_o(n)$ 和偶序列 $x_e(n)$:

$$x_o(n) = x(2n+1), n \in Z \quad (1)$$

$$x_e(n) = x(2n), n \in Z \quad (2)$$

(2) 预测。为了去除分裂后信号中的冗余信息, 将预测算子 $P(\cdot)$ 作用于偶序列来预测奇序列。

* 收稿日期: 2016-09-07; 修回日期: 2016-11-13

基金项目: 国家自然科学基金(51479136)资助

通讯作者: 刘习军(1956-), 男, 教授。主要研究领域: 结构的健康监测与监控。Email: lxijun@tju.edu.cn

预测误差定义为细节信号 d , 它反映了信号的高频信息。

$$d(n) = x_o(n) - P[x_c(n)], n \in Z \quad (3)$$

(3) 更新。为了保持原始信号的某些整体特性, 比如消失矩、均值等, 需要构造一个更新算子 $U(\cdot)$, 并将之作用于细节信号来更新偶样本。更新结果定义为近似信号 a , 它反映了信号的低频信息。

$$a(n) = x_c(n) + U[d(n)], n \in Z \quad (4)$$

以上三步实现了信号在一个尺度上的分解。提升小波变换的重构过程即为分解过程的逆过程, 包括恢复更新、恢复预测和合并三个步骤, 重构公式可由式(1)~(4)简单的变换得到, 这里就不再赘述。通过对初始信号进行 j 水平的提升小波变换, 能够得到 1 个低频信号 a_j 和 j 个高频信号 $d_1 \sim d_j$, 这些信号分量反映了原始信号的细节特征, 可以用来提取被淹没的故障信息。

2 损伤指标的构建

将移动荷载作用下桥梁结构 n 个测点的加速度响应进行提升小波分解并重构, 得到的信号向量表示为:

$$X = \{x_1^m(t), x_2^m(t), \dots, x_{n-1}^m(t), x_n^m(t)\}, m \in Z, n \in Z \quad (5)$$

$x_k^m(t)$ 指第 k 号测点的第 m 阶响应信息。则第 $k-1$ 与 k 号测点的加速度信号分量的互相关函数 $R_{k-1,k}^m(\tau)$ 为:

$$R_{k-1,k}^m(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_{k-1}^m(t) x_k^m(t+\tau) dt, m \in Z, k \in Z \quad (6)$$

式中, T 为加速度信号的时间长度, 设 $|R_{k-1,k}^m(\tau)|$ 在 $\tau = \tau_p$ 处取得最大值, 并记 $r_{k-1,k}^m = R_{k-1,k}^m(\tau_p)$, 则所有测点的互相关函数幅值 $r_{k-1,k}^m$ 所组成的向量称之为互相关函数幅值向量。为了消除外激励大小对损伤识别结果的影响, 对各测点的 $r_{k-1,k}^m$ 进行归一化:

$$\bar{r}_{k-1,k}^m = \frac{r_{k-1,k}^m}{\sum_{k=2}^n r_{k-1,k}^m} \quad (k = 2, 3, 4, \dots)$$

则互相关函数幅值向量 \mathbf{CorV}_m 表示为:

$$\mathbf{CorV}_m = [\bar{r}_{1,2}^m, \bar{r}_{2,3}^m, \bar{r}_{3,4}^m, \dots, \bar{r}_{n-1,n}^m] \quad (7)$$

在频率成分一定的外激励下, \mathbf{CorV}_m 中的各分量 $(\bar{r}_{1,2}^m, \bar{r}_{2,3}^m, \dots)$ 之间具有固定的比例关系, 即 \mathbf{CorV}_m 具有固定的形态, 因此互相关函数幅值向量可以看做结构的一种“固有特性”^[4]。当桥梁结构发生损伤时, 这种“固有特性”会随之发生改变, 表现为各分量 $\bar{r}_{k-1,k}^m$ 的改变, 其中与损伤位置相邻的左右两测点间的 $\bar{r}_{k-1,k}^m$ 变化最明显。为了进一步凸显损伤位置, 根据二阶差分原理构造损伤指标。相邻测点间 $\bar{r}_{k-1,k}^m$ 的二阶差分表示为:

$$\Delta_k^m = \bar{r}_{k-2,k-1}^m - 2\bar{r}_{k-1,k}^m + \bar{r}_{k,k+1}^m, k = 3, 4, n-2, n-1 \quad (8)$$

定义损伤指标 D_k^m :

$$D_k^m = |(\Delta_k^m)_z - (\Delta_k^m)_u|, k = 3, 4, \dots, n-2, n-1 \quad (9)$$

式中, 下标 z 和 u 分别表示结构的损伤和完好状态。若第 k 号测点的损伤指标 D_k^m 明显大于其他测点, 说明结构损伤前后第 $k-1$ 与 k 号测点之间的互相关函数幅值变化最大, 则第 $k-1$ 和 k 号测点之间可能存在损伤。

3 数值仿真

3.1 损伤位置的识别

以图 1 所示的等截面简支梁为计算模型, 梁长 $l=10\text{m}$, 抗弯刚度 $EI=1.13 \times 10^9 \text{kN} \cdot \text{m}^2$, 密度 $\rho=7800 \text{kg/m}^3$, 泊松比 $\mu=0.2$, 桥长方向共划分 50 个单元, 并均匀设置 24 个观测点; 以弹簧-质量模型模拟汽车荷载, 质量块重 1t, 弹簧的劲度系数为 10^7N/m , 汽车以 10m/s 的速度在桥面上行驶^[9]。共设置三种损伤工况, 如表 1 所示。

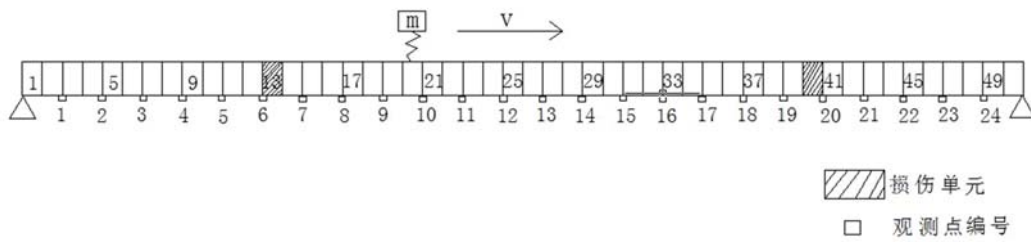
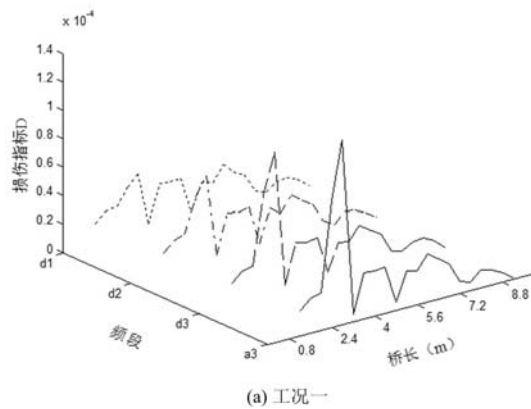
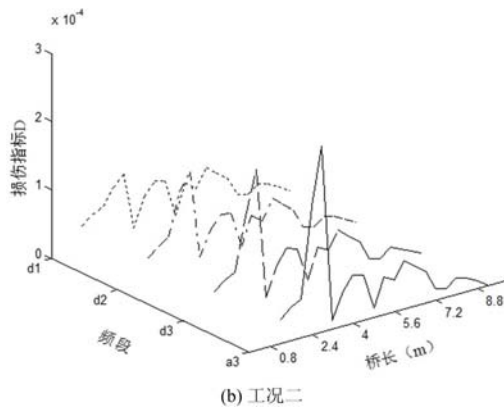


图 1 简支梁及加载方式示意图

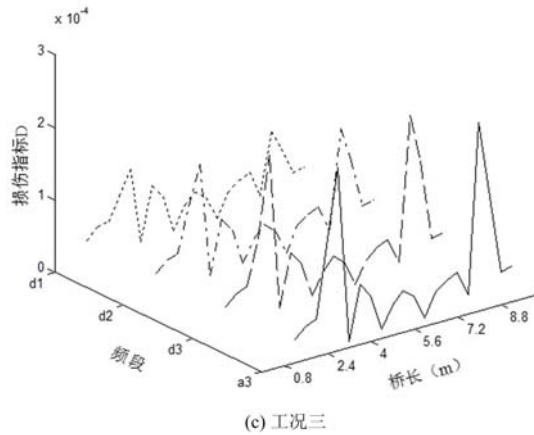
Fig. 1 Sketch of the simply-supported bridge and loading mode



(a) 工况一



(b) 工况二



(c) 工况三

图 2 各工况在不同频段下的识别结果

Fig. 2 Identification results of different working conditions in different bandwidth

用 Db4 小波分别对损伤前后 24 个观测点的加速度响应进行 3 水平的提升小波分解并重构,共得到 a_3 、 d_3 、 d_2 、 d_1 四个频带的信号分量,这四个信号分量分别对应了结构的前四阶模态。将各阶信号分量分别代入式(6)~(9)进行互相关处理,得到各工况在不同频带下的损伤指标 D_k^n ,计算结果如图 2 所示。可见,工况一与工况二在 2.8m 位置处具有明显的奇异性,说明在 2.4m 和 2.8m 两观测点之间可能存在损伤;工况三在 2.8m 和 8.0m 处显示出较大的奇异性,说明在 2.4m 和 2.8m 两观测点之间以及 7.6m 和 8.0m 两观测点之间均可能存在损伤。该识别结果与损伤工况完全吻合。

识别结果表明,桥梁损伤前后损伤位置左右两侧观测点的 $\bar{r}_{k-1,k}$ 变化最明显,因此可以作为判断损伤的依据;对任意一种损伤工况,以 a_3 作为输入信号构造的损伤指标 $D_k^{a_3}$ 对损伤信息最敏感,其原因是 a_3 对应桥梁结构基频的第一阶响应,包含了结构振动响应的主要能量,因此可以只根据提升变换得到的第一阶振动信号来识别损伤。

为了验证本文方法的优越性,分别将未经提升变换的加速度信号和经提升变换得到的一阶信号 a_3

表 1 数值仿真的损伤工况

Tab. 1 Damage cases of numerical simulation

工况编号	损伤位置(m)	损伤程度
1	2.4	5%
2	2.4	10%
3	2.4, 7.8	10%, 10%

代入式(6)~(9)计算损伤指标 D , 计算结果如图 3 所示。可见, 对第一阶响应信号进行互相关处理的识别效果明显优于直接对加速度信号进行互相关处理的识别效果, 其原因是通过对结构振动响应信号进行提升小波变换后, 结构的故障信息被放大, 从而提高了损伤指标对损伤信息的敏感性, 使损伤识别效果更佳。

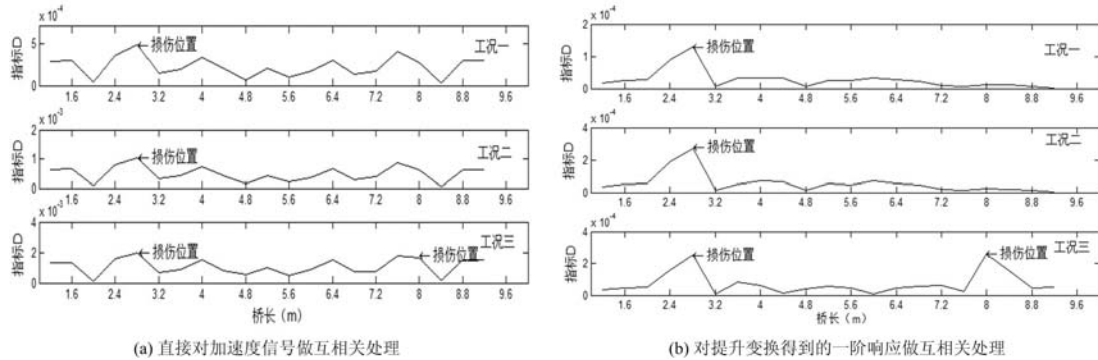


图 3 不同输入信号下的识别结果

Fig. 3 Recognition results under different input signals

3.2 损伤指标的抗噪性能分析

在工程实际中, 由于受到桥面不平顺及其他因素的影响, 结构的振动响应信号中往往会掺杂部分噪声信号, 即使经过滤波降噪处理也不可能将噪声完全消除, 这些噪声的存在可能会淹没故障信息, 从而影响损伤识别结果的准确性, 因此研究损伤指标的噪声鲁棒性是十分必要的。

为了研究本文方法的抗噪能力, 分别在各观测点的加速度响应中加入 8dB、10dB 和 12dB 的高斯白噪声, 首先对含有白噪声的加速度信号进行提升小波变换, 然后对变换后得到的第一阶响应进行互相关处理来识别损伤, 识别结果如图 4。可见, 当信噪比为 8dB 时, 噪声对损伤识别结果的影响较大, 在该水平的噪声影响下无法明显地判断损伤位置; 当信噪比超过 10dB 时, 识别结果不再受噪声的影响。一方面, 提升小波变换之后的信号分量保留了原信号的主要成分, 提高了信噪比(SNR), 从而降低了噪声的干扰; 另一方面, 由噪声所引起的相邻测点间的互相关函数不随桥梁工况的改变而改变, 所以由损伤前后互相关函数的改变量构造的损伤指标可以消除部分噪声的影响^[10]。因此将提升小波变换与 CorV 相结合的方法具有良好的抗噪性, 更适用于工程实际。

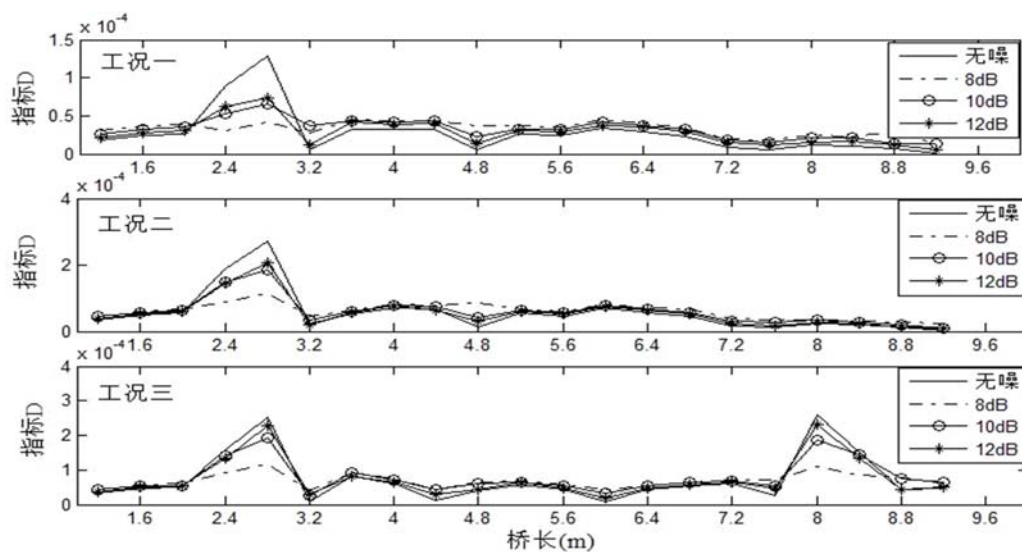


图 4 不同信噪比下的识别结果

Fig. 4 Recognition results under different SNR

3.3 测点稀疏的影响

测点布置越紧密,所获得的结构信息越详细,识别精度也就越高,但是传感器数目越多,测试成本也会越高。因此,在保证识别精度的前提下,探究合理的测点布置方式来降低经济成本是十分必要的。

分别将观测点间距由 0.4m 增大至 0.8m 和 1.0m,测试步骤和识别方法与 3.2 节相同,损伤指标 D 的计算结果如图 5 所示。可见,当测点间距增大至 0.8m 时,指标 D 在工况一与工况二的 2.8m 位置处的值较大,说明此时简支梁在 2.0m 和 2.8m 之间可能存在损伤;工况三状态下,损伤指标 D 的值在 2.8m 和 8.4m 位置均较大,说明该工况下简支梁在 2.0m 和 2.8m 之间以及 7.6m 和 8.4m 之间均可能存在损伤,此识别结果与损伤工况相吻合。当测点间距增大至 1.0m 时,工况一状态下各测点损伤指标的值无较明显的变化,工况二与工况三可以大致地识别出损伤,这说明当测点间距增大至 1.0m 时,损伤程度较小的识别结果会受到一定程度的影响。因此,该方法在实际应用中,相邻测点的间距应该略小于 $l/10$,这样既能保证识别结果的准确性,又可以减少经济成本。

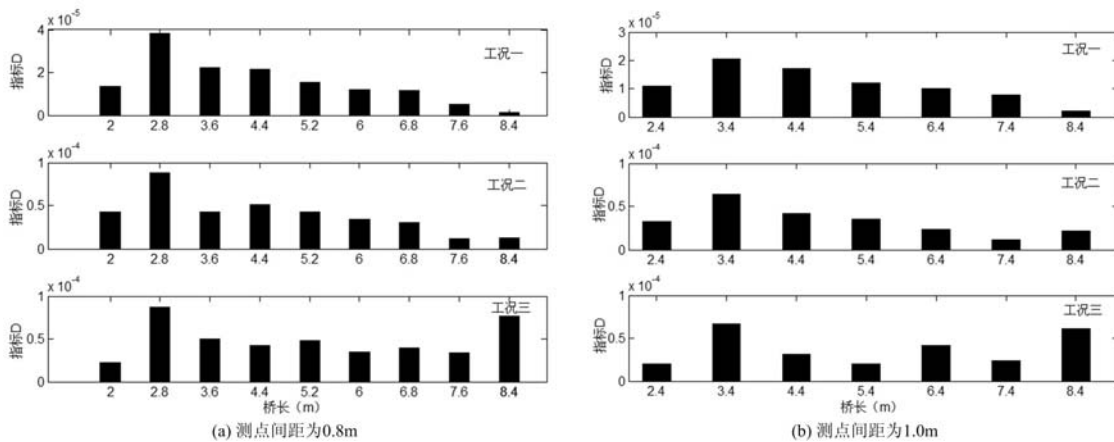


图 5 不同测点间距下的计算结果

Fig. 5 Calculation results under different testpoint spacing

4 实验验证

根据理论模型与结构原型之间的相似关系来设计实验模型,以验证仿真结果的正确性。简支梁模型如图 6 所示,梁长为 1m,抗弯刚度为 $5.65 \times 10^3 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$,模型材料为 PVC 板,密度为 1210 kg/m^3 。汽车重量约 0.5kg,其移动速度为 1m/s。梁上每隔 7cm 布置一个加速度传感器。沿梁宽方向做对称切口来模拟简支梁的损伤,并将切口深度与桥宽之比定义为损伤程度。在该实验模拟中一共设置三种损伤工况,如表 2 所示。

表 2 实验模型的损伤工况

Tab. 2 Damage cases of experiments

工况编号	损伤位置 (cm)	损伤程度
1	24	5%
2	24	10%
3	24, 78	10%, 10%

测试完毕后依次提取各测点的加速度信号进行提升小波变换,并对变换后得到的第一阶响应进行互相关处理,得到各工况的损伤指标 D (图 7)。工况一与工况二在 28cm 位置处出现尖峰,说明在 21cm 和 28cm 两测点之间可能存在损伤;工况三在 28cm 和 84cm 处出现尖峰,说明在 21cm 和 28cm 两测点之间以及 77cm 和 84cm 两测点之间均可能存在损伤。



图 6 简支梁模型

Fig. 6 Simply-supported beam model

该识别结果与损伤工况完全吻合。实验结果表明,根据 CorV 构造的损伤指标能够准确且明显地识别损伤的位置,说明该识别方法是科学可行的。

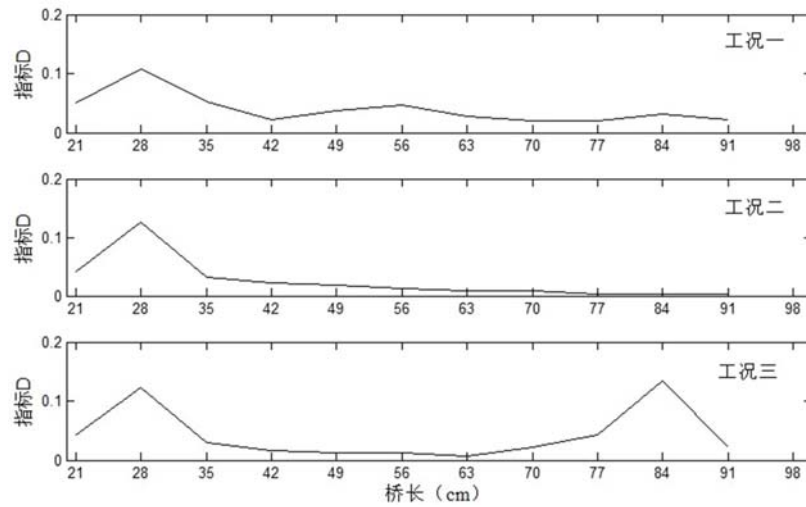


图7 损伤指标为 D 的模型实验结果

Fig. 7 The model experiment results of damage index for D

在实际测试中,如果仅根据单次测试结果来判断桥梁的工作状态,可能会引起损伤位置的误判,因此应进行多组测试以提高识别结果的准确性。在损伤指标 D 的基础上,定义能够反映多次测试结果平均水平的损伤指标 B_k :

$$B_k = \left| \frac{\bar{\mu}_{z(k)} - \bar{\mu}_{u(k)}}{\sqrt{\bar{\sigma}_{z(k)}^2 + \bar{\sigma}_{u(k)}^2}} \right|, \quad k = 3, 4, \dots, n-2, n-1 \quad (10)$$

式中, $\bar{\mu}_{z(k)}$ ($\bar{\sigma}_{z(k)}^2$) 与 $\bar{\mu}_{u(k)}$ ($\bar{\sigma}_{u(k)}^2$) 分别表示结构损伤前后第 k 号测点在多次测试下,相邻测点间互相关函数幅值 $\bar{r}_{k-1,k}$ 二阶差分的均值(方差)。 B_k 越大,说明结构损伤前后第 $k-1$ 与 k 号测点间互相关函数幅值差异越大,两测点之间存在损伤的可能性也就越大。

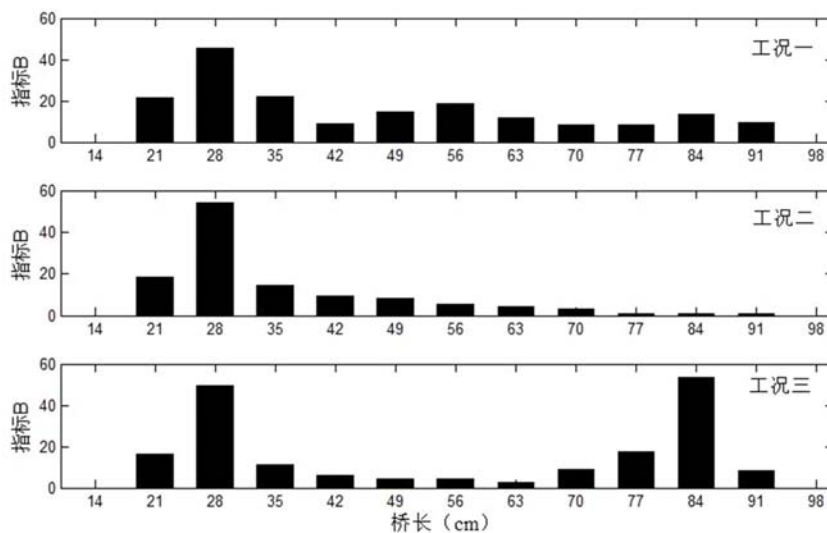


图8 损伤指标为 B 的模型实验结果

Fig. 8 The model experiment results of damage index for B

每种损伤工况分别进行 20 次测试实验,将各次测试的加速度信号分别代入式(1)~(8),得到各工况相邻测点间 $\bar{r}_{k-1,k}$ 的二阶差分值,并将 20 次测试下 $\bar{r}_{k-1,k}$ 的二阶差分的均值和方差代入式(10),得到各工况下的损伤指标 B_k ,计算结果如图 8 所示。可见,指标 B_k 准确地识别出了结构的损伤位置。该指标反映了多次测试结果的平均水平,避免了偶然误差引起的识别结果的误判,更适用于工程实际。

5 结论

提出了一种将提升小波变换与互相关函数幅值向量相结合的梁式桥结构的损伤识别方法,并通过数值仿真和模拟实验对方法的有效性进行了验证,结果表明:

(1) 不同阶次的模态响应中会包含结构不同的振动信息,其中第一阶响应中包含了结构振动响应的主要能量,因此,在梁式桥的损伤识别中以第一阶响应作为互相关处理的输入信号的识别效果最佳,且其识别效果明显优于直接对加速度响应进行互相关处理的识别效果。

(2) 一方面提升小波变换能够提高信号的信噪比,另一方面由 CorV 构造的损伤指标可以消除部分噪声的影响,因此本文提出的提升小波变换与 CorV 相结合的方法具有良好的抗噪性能,能够有效地提取淹没在噪声中的故障信息。

(3) 研究了测点稀疏对损伤识别结果的影响,结果表明,当相邻测点的间距大于 $l/10$ 时,损伤识别的精度会受到一定程度的影响。因此在综合考虑经济性和识别结果的准确性的条件下,建议相邻测点的间距略小于 $l/10$ 。

(4) 在模拟实验中,由 CorV 构造的反映多次测试平均水平的损伤指标,明显且准确地识别出了结构的损伤位置。该指标能够有效地避免偶然误差,提高了测试结果的准确性,适用于工程实际。

参考文献:

- [1] 段晨东,何正嘉.一种基于提升小波变换的故障特征提取方法及其应用[J].振动与冲击,2007,26(2):10-13 (DUAN Chendong, HE Zhengjia. Fault feature extraction method based on lifting wavelet transform and its application[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 26(2):10-13 (in Chinese))
- [2] Duan C D, He Z J, Jiang H K. A sliding window feature extraction method for rotating machinery based on the lifting scheme[J]. Journal of Sound and Vibration, 2007, 299(4):774-785.
- [3] Li Z, He Z J, Zi Y Y, et al. Rotating machinery fault diagnosis using signal-adapted lifting scheme[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008, 22(3):542-556.
- [4] 于哲峰,杨智春.相关函数幅值向量及其在结构损伤检测中的应用[J].机械科学与技术,2006,25(1):24-27 (YU Zhefeng, YANG Zhichun. Correlation function amplitude vector and its application to structural damage detection[J]. Mechanical Science and Technology, 2006, 25(1):24-27 (in Chinese))
- [5] 于哲峰,杨智春.基于互相关函数幅值向量的结构损伤定位方法研究[J].振动与冲击,2006,25(3):77-80 (YU Zhefeng, YANG Zhichun. Research on the method of structural damage localization based on the amplitude vector of cross correlation function[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 25(3):77-80 (in Chinese))
- [6] 安宁,夏禾,战家旺.一种利用车激桥梁响应的互相关函数识别桥梁损伤的方法[J].北京交通大学学报,2012,36(6):74-78 (AN Ning, XIA He, ZHAN Jiawang. A identification method for bridge damage using cross-correlation function of responses induced by vehicles[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2012, 36(6):74-78 (in Chinese))
- [7] Sweldens W. The lifting scheme: A construction of second generation wavelets [J]. SIAM Journal on Mathematical Analysis, 1998, 29(2):511-546.
- [8] Wim S. The construction and application of wavelets in numerical analysis[D]. Belgium: Department of Computer Science, Katholieke Universiteit Lenven, 1995.
- [9] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M].北京:人民交通出版社,2007:536-540 (WANG Xinmin. Numerical analysis of ANSYS engineering structure[M]. Beijing: China Communications Press, 2007 (in Chinese))
- [10] 邓永懋,雷鹰.基于平稳随机激励下相关函数的结构损伤识别[C]//第24届全国结构工程学术会议论文集(第II册),2015 (DENG Yongmao, LEI Ying. Structural damage identification based on correlation function of stationary random excitation [C] // Proceedings of the Twenty-Fourth National Conference on Structural Engineering (Part II), 2015 (in Chinese))

On the Beam Bridge Damage Detection Based on Lifting Wavelet Transform and Cross Correlation Function

WANG Xiao-chun, LIU Xi-jun, ZHANG Su-xia

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to effectively extract the damage features of beam bridge, a damage identification method is proposed in this paper, based on the combination of lifting wavelet transform and cross correlation function amplitude vector. Firstly, the acceleration response of beam bridge under vehicle Loading was decomposed to single mode by lifting wavelet transform; secondly, the first order response of lifted reconstruction was processed by cross-correlation to obtain damage index, which was used to damage localization. Through numerical simulation and simulation experiments, the effectiveness of this method was verified, and the influence of noise and sparse measurement points on identification results is discussed. Results show that this method has good noise robustness. In addition, reasonable arrangement of measuring points is provided in this paper, under conditions of comprehensively considering the cost and accuracy of identification results.

Keywords: beam bridge; lifting wavelet transform; cross correlation function amplitude vector (CorV); damage identification