

移动荷载作用下基于时频能量熵的桥梁损伤识别

杨文甫

(广东盛翔交通工程检测有限公司, 广东 广州 511400)

摘要:为保障桥梁结构的安全运营,提出一种桥梁无参考损伤识别方法。采用有限元方法求解简支梁在不同重量的移动荷载作用下的结构动力响应,将不同重量移动荷载作用下结构加速度响应差的时频能量熵作为损伤识别指标进行损伤识别,并考虑了多损伤、损伤程度、移动荷载速度及噪声对识别结果的影响。结果表明:不同重量的移动荷载作用下,通过结构加速度响应差的时频能量熵峰值位置可以有效识别主梁损伤,实桥识别结果与静动载试验结果吻合较好。时频能量熵峭度随损伤程度的增加而增大,采用时频能量熵峭度作为评估指标可以有效评价主梁的损伤程度。基于时频能量熵的损伤指标受损伤位置和损伤数量影响较小,且具有较强的噪声鲁棒性,即使在信噪比为 5 dB 的强噪环境下,仍可以有效识别损伤。

关键词:桥梁;损伤识别;车致振动;时频能量熵

中图分类号: U446

文献标志码: A

在环境侵蚀和车辆荷载的反复作用下,桥梁结构极易出现材料老化及疲劳损伤,进而造成结构性能日益恶化。近年来,国内外发生了大量由于结构损伤造成桥梁在运营期间垮塌的事故^[1],造成了重大的人员财产损失和恶劣的社会影响。如何及时、有效地识别桥梁损伤,是保证桥梁结构正常运营的关键。

基于动力响应的结构损伤识别方法是桥梁损伤识别的重要发展方向之一^[2]。Hester 等^[3]基于车桥耦合有限元模型,采用加速度响应的小波变换进行损伤识别,进一步提高了小波系数的抗噪能力;Roveri 等^[4]通过改进 HHT,将第一瞬时频率用于损伤定位,通过数值分析与试验验证了该损伤识别方法具有较强的噪声鲁棒性能;Nematollahi 等^[5]将小波分析与神经网络结合成功识别出梁中的裂纹位置和深度;李忠献等^[6]对结构动力响应统计特征进行了损伤敏感性分析,并将动力响应统计特征作为识别指标,对三跨连续梁进行了损伤识别;丁幼亮等^[7-8]基于结构动力特性的虚拟脉冲响应函数,提出了结构在环境激励下的小波包能量谱损伤预警方法,并从理论上证明了小波包能量谱的损伤敏感性和噪声鲁棒性;余竹等^[9]基于小波包能量曲率差法进行了实桥梁体的损伤识别试验,验证了小波包能量的工程适用性,并分析了小波函数及分解层次对损伤识别的影响;李静辉等^[10]采用低阶振动参数计算柔度矩阵,将柔度矩阵对角线差指标和

曲率指标用于损伤识别,有效识别出自锚式悬索桥主梁损伤;闫宇智等^[11]将移动荷载作用下结构位移响应的小波相关性作为目标函数,提出了一种基于模型修正的损伤识别方法。众多研究成果表明:桥梁动力响应包含丰富的结构损伤信息,但大量研究仍需要结构损伤前的响应信息,且识别方法多基于数值分析和模型试验结果,实桥应用案例较少。

该文以简支梁为例,探讨移动荷载作用下基于时频能量熵的桥梁无参考损伤识别方法,分析多损伤、损伤程度、移动荷载速度及噪声对识别结果的影响。最后,采用该方法对某斜拉桥进行损伤识别,将损伤识别结果与实桥荷载试验结果进行对比。

1 损伤识别指标的建立

对于任意信号 $f(t) \in L(R)$ 的连续小波变换可以定义为:

$$W_f(a, b) = \int_R f(t) \cdot \overline{\psi_{a,b}(t)} dt \quad (1)$$

式中: $\overline{\psi_{a,b}(t)}$ 为基小波 $\psi_{a,b}(t)$ 的复共轭,基小波 $\psi_{a,b}(t)$ 由母小波 $\psi(t)$ 平移和伸缩得到,表示为:

$$\psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (2)$$

式中: a 为尺度因子; b 为时间因子。

收稿日期:2020-09-07

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(编号:科技-2017-02-015)

作者简介:杨文甫,男,硕士,高级工程师, E-mail:ccpa2020@163.com

母小波 $\psi(t)$ 必须满足允许性条件:

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi^*(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \tag{3}$$

式中: $\psi^*(\omega)$ 为 $\psi(t)$ 的傅里叶变换。

信号 $f(t)$ 经连续小波变换后得到的小波系数 $W_f(a, b)$ 可以表示为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_R f(t) \cdot \left[\psi_R\left(\frac{t-b}{a}\right) - i\psi_I\left(\frac{t-b}{a}\right) \right] dt \tag{4}$$

式(4)可以表示为:

$$W_f(a, b) = W_R(a, b) + W_I(a, b) \tag{5}$$

式中: $\psi_R(t)$ 、 $\psi_I(t)$ 分别为母小波 $\psi(t)$ 的实部、虚部; $W_R(a, b)$ 、 $W_I(a, b)$ 分别为小波系数 $W_f(a, b)$ 的实部、虚部。

则信号在任一时频处的能量密度 $M(a, b)$ 可以表示为:

$$M(a, b) = |W_f(a, b)|^2 = W_R^2(a, b) + W_I^2(a, b) \tag{6}$$

时频能量熵作为信号本身的固有特征,对信号特性的变化十分敏感,可以有效反映由于桥梁结构损伤而造成的振动信号改变。时频能量熵 H 可以定义为:

$$H = - \sum_{i=1}^j P_i \ln P_i \tag{7}$$

式中: $P_i = M(a, b) / \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 \frac{da db}{a^2}$ 为任一时频处能量所占总能量比重。

对不同重量移动荷载作用下的加速度响应残差

D 按照式(1)进行连续小波变换,得到其时频能量分布,由式(7)计算时频能量熵 H 作为损伤识别指标进行损伤识别。不同重量移动荷载作用下各吊杆加速度响应残差 D 定义为:

$$D = \{\ddot{y}(t)\}_{P_1} - \{\ddot{y}(t)\}_{P_2} \tag{8}$$

式中: $\{\ddot{y}(t)\}_{P_1}$ 、 $\{\ddot{y}(t)\}_{P_2}$ 分别为移动荷载重量为 P_1 、 P_2 时的结构加速度响应。

2 简支梁数值算例

2.1 数值模型建立

采用 Abaqus 求解移动荷载作用下简支梁的动力响应。简支梁跨径 $L = 18 \text{ m}$,主梁横截面为矩形,高 $h = 1.0 \text{ m}$,宽 $b = 0.5 \text{ m}$ 。材料弹性模量 $E = 3.25 \times 10^4 \text{ MPa}$,密度 $\rho = 2\,500 \text{ kg/m}^3$,泊松比 $\nu = 0.18$ 。沿跨度方向单元长度为 0.18 m ,共划分为 100 个单元,单元类型为 Beam31。主梁损伤采用弹性模量折减模拟,损伤程度 $N = E/E_0$, E_0 、 E 分别为损伤前后主梁的弹性模量。移动荷载作用下的简支梁模型如图 1 所示。

2.2 基于时频能量熵的损伤识别

采用 Morlet 小波对结构加速度响应差进行连续小波变换,得到不同损伤工况下各吊杆振动加速度响应差的时频能量分布,按照式(7)计算损伤识别指标 H ,移动荷载重量 P_1 、 P_2 分别为 5 kN、10 kN,移动荷载速度 $V = 10 \text{ m/s}$ 。损伤工况如表 1 所示,损伤识别结果如图 2 所示。

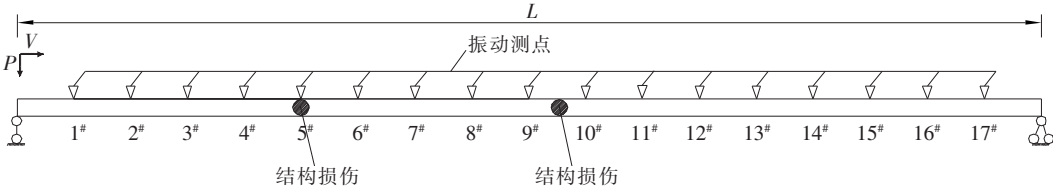


图 1 移动荷载作用下的简支梁计算模型

表 1 损伤工况

工况	主梁损伤位置	损伤程度/%	说明
1	5# 测点处	10	单损伤处
2	9# 和 10# 测点间	10	单损伤
3	5# 测点处、9# 和 10# 测点间	10	多损伤

由图 2 可知:对于单一损伤而言,当损伤位于测点处时,该测点识别指标 H 取最大值;当损伤位于测点之间时,靠近损伤处测点的识别指标 H 均较大。对于多损伤而言,识别指标 H 在损伤处取极大值。因此,通过比较各测点识别指标 H 可以有效识别损伤,识别指标受损伤位置、多损伤的影响较小。识别结果与实际损伤吻合较好,验证了该方法的有效性。在实际工

程中仅需采用不同重量加重车进行跑车试验,即可识别结构损伤,具有较高的实用性。

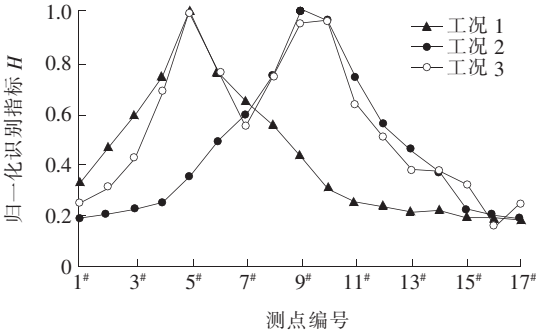


图2 损伤识别结果

3 影响因素分析

3.1 损伤程度的影响

以工况 2 为例,研究损伤程度对损伤识别结果的影响。移动荷载重量 P_1 、 P_2 分别为 5 kN、10 kN,移动荷载速度 $V=10$ m/s,损伤程度 N 不同时,各测点损伤识别指标如图 3 所示。

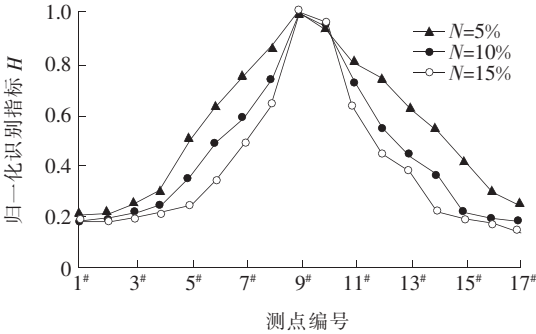


图3 损伤程度的影响

由图 3 可知:不同损伤程度下,各测点损伤识别指标 H 峰值均出现在损伤处。即使是 5% 的微小损伤,通过识别指标 H 的峰值位置仍可以有效识别。表明该识别方法精度较高,可有效识别桥梁微小损伤。

当损伤程度较小时,各测点识别指标 H 分布较为分散。随着损伤程度的上升, H 逐渐集中在损伤位置处。表明识别指标 H 的集中程度可以有效反映损伤程度。

峭度指标 K 是用于评价信号冲击特性的常见指标,可以有效表征信号的集中程度^[12]。因此,将各测点识别指标的峭度指标 K 作为损伤评估指标,用于评估损伤程度 N 。峭度指标 K 定义为:

$$K = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m (|H_n| - \bar{H})^4 / H_{rms}^4 \tag{9}$$

式中: H_{rms} 、 \bar{H} 为各测点时频能量熵 H 的均方值、平均值; m 为测点数量。

峭度指标 K 与损伤程度 N 的变化规律见图 4。

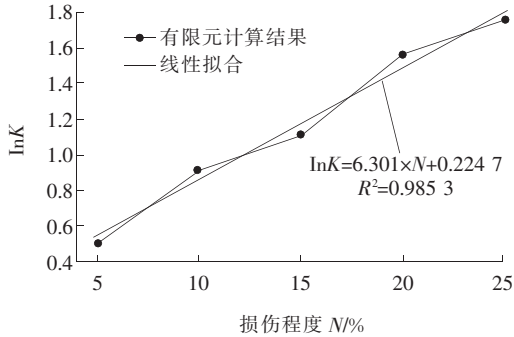


图4 时频能量熵峭度 K 与损伤程度 N 的关系

由图 4 可知:峭度指标 K 随损伤程度 N 的增加逐渐上升。采用最小二乘法回归分析峭度指标 K 与损伤程度 N 的数学模型,拟合的曲线方程为: $\ln K = 6.301N + 0.022 47$,确定系数达到 0.985 3,表明该拟合曲线与计算结果吻合较好,采用各测点识别指标的峭度指标 K 作为损伤评估指标可以有效反映损伤程度。

3.2 移动荷载速度的影响

以工况 1 为例,研究移动荷载速度对损伤识别结果的影响,移动荷载重量 P_1 、 P_2 分别为 5 kN、10 kN,不同速度移动荷载作用下识别结果如图 5 所示。

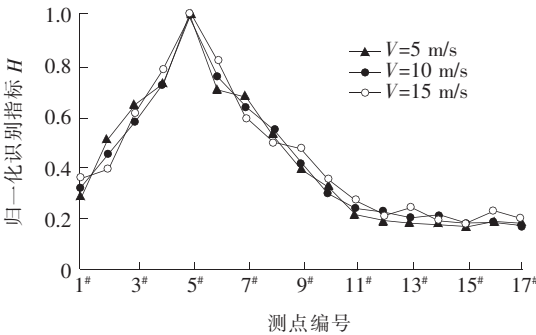


图5 移动荷载速度的影响

由图 5 可知:不同速度的移动荷载作用下,各测点加速度响应差的时频能量熵 H 几乎一致,最大值均出现在损伤位置处,识别效果均较好。表明该损伤识别方法受移动荷载速度的影响较小。

3.3 噪声的影响

在实际现场进行损伤识别时,往往伴随着较强的

噪声干扰。为验证该损伤识别方法和评估指标的噪声鲁棒性能,针对工况 1,在吊杆加速度响应中加入不同强度的高斯白噪声,移动荷载重量 P_1 、 P_2 分别为 5 kN、10 kN,移动荷载速度 $V=10$ m/s。噪声强度采用信噪比 R_{SNR} 表示,如式(10)所示:

$$R_{\text{SNR}}=10\lg(\sigma_s^2/\sigma_N^2)$$
 (10)

式中: σ_s^2 、 σ_N^2 分别为加速度响应残差、噪声的方差。

加入不同强度噪声后的损伤识别结果见图 6。

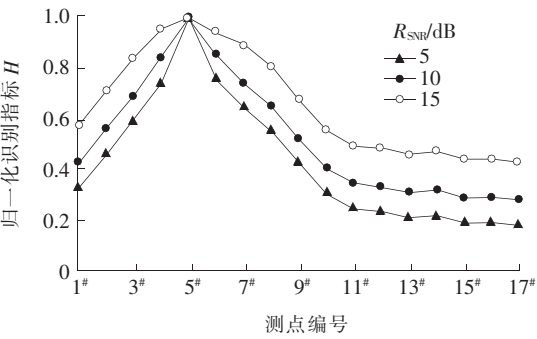


图 6 噪声的影响

由图 6 可知:不同信噪比条件下,识别指标 H 均在损伤处出现最大值。随着噪声强度的增加,无损伤区域测点的识别指标 H 逐渐上升,对识别效果造成一定干扰。但即使在信噪比 $R_{\text{SNR}}=5$ dB 的强噪声环境下,通过该识别指标 H 仍可以识别出损伤位置。因此,基于时频能量熵的识别指标 H 受噪声影响较小,即使在强噪声环境下,仍能较好地反映损伤位置,具有较高的工程应用价值。

4 工程应用

4.1 工程概况

某跨长江斜拉桥为主跨 920 m 的双塔七跨连续不对称混合梁斜拉桥,结构体系采用纵向约束七跨连续半漂浮体系。主跨和南边跨采用钢箱梁,北边跨采用混凝土箱梁,主跨八分点布置有振动传感器。

为确保该桥的结构安全,采用该文提出的方法对该桥主跨进行损伤识别,并与该桥静动载试验结果进行对比。桥梁振动测点布置如图 7 所示。

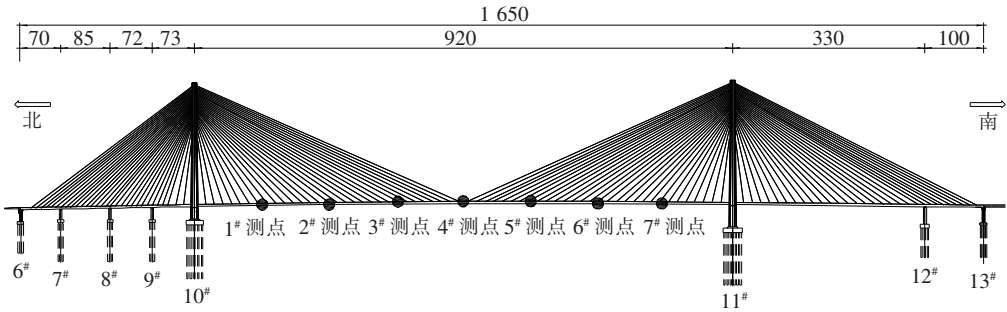


图 7 振动测点布置图(单位:m)

4.2 损伤识别结果

分别采用 2 辆加重车和 4 辆加重车进行跑车试验,获得不同重量移动荷载作用下的加速度响应残差,单辆加重车为 350 kN。按照式(7)计算不同移动荷载速度下的各测点损伤识别指标 H ,如图 8 所示。

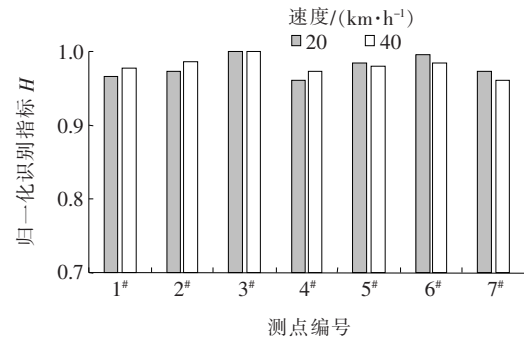


图 8 实测损伤识别指标

由图 8 可知:不同移动荷载速度下,各测点实测识别指标 H 基本一致,未见明显峰值。表明该桥主梁状况良好,无明显损伤。移动荷载速度对各测点实测识别指标 H 的影响较小,试验结果与数值分析结果一致,表明该损伤识别方法受移动荷载速度的影响较小。

该桥主跨钢箱梁动静载试验结果如表 2、3 所示。

表 2 动载试验结果

项目	自振频率/Hz			冲击系数
	1 阶竖向 对称弯曲	1 阶横向 对称弯曲	1 阶对 称扭转	
实测值	0.254	0.166	0.508	0.049
理论值	0.228	0.141	0.501	—

由表 2、3 可知:试验荷载作用下,挠度增量、挠度

表 3 静载试验结果

挠度			应力			
校验系数	最大实测 增量/mm	最大残余 变形/%	校验系数	最大实测增量		最大残余 变形/%
				拉应力/MPa	压应力/MPa	
0.88~0.99	746.2	13.25	0.70~0.99	35.02	-32.14	17.53

校验系数、应力校验系数、残余变形、残余应变、自振频率及冲击系数均满足规范要求。荷载试验过程中,桥梁结构反应平稳,无异常现象发生。表明该桥未见明显损伤,结构刚度、强度及动力响应均满足设计要求。荷载试验结果与识别指标识别结果一致,进一步验证了该方法的有效性。

5 结论

- (1) 不同重量的移动荷载作用下,通过结构加速度响应差的时频能量熵峰值位置可以有效识别主梁损伤,实桥识别结果与静动载试验结果吻合较好。
- (2) 时频能量熵峭度随损伤程度的增加而增大,对拟合的曲线方程进行统计误差分析,相关系数达到 0.985 3。采用时频能量熵峭度作为评估指标可以有效评价主梁的损伤程度。
- (3) 基于时频能量熵的损伤指标受损伤位置和损伤数量影响较小,且具有较强的噪声鲁棒性,即使在信噪比为 5 dB 的强噪环境下,仍可以有效识别损伤。
- (4) 目前,数值算例中损伤识别效果较好。但由于文中应用案例与考虑的影响因素有限,该方法在大跨度桥梁损伤识别中的应用仍需进一步研究。

参考文献:

[1] 韩乃杰,张浩,吴向飞,等. 基于应变模态的桥梁损伤识别方法研究进展[J]. 中外公路,2015,35(1):90-94.

[2] FAN Wei,QIAO Pizhong. Vibration-Based Damage Identification Methods:A Review and Comparative Study[J]. Structural Health Monitoring,2011,10(1):83-111.

[3] HESTER D,GONZÁLEZ A. A Wavelet-Based Damage Detection Algorithm Based on Bridge Acceleration Re-

sponse to a Vehicle[J]. Mechanical Systems & Signal Processing,2012,28:145-166.

[4] ROVERI N,CARCATERRA A. Damage Detection in Structures under Traveling Loads by Hilbert-Huang Transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2012,28:128-144.

[5] NEMATOLLAHI M A,FARID M,HEMATIYAN M R,et al. Crack Detection in Beam-Like Structures Using a Wavelet-Based Neural Network[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part G Journal of Aerospace Engineering,2012,226(G10):1 243-1 254

[6] 李忠献,杨晓明,丁阳. 基于结构响应统计特征的神经网络损伤识别方法[J]. 工程力学,2007,24(9):1-7.

[7] 丁幼亮,李爱群,缪长青. 环境激励下基于小波包分析的结构损伤预警方法研究[J]. 应用力学学报,2008,25(3):366-370

[8] DING Y L,LI A Q,SUN J,et al. Research on Seasonal Correlation of Wavelet Packet Energy Spectrum and Temperature of Runyang Suspension Bridge[J]. Science in China Series E: Technological Sciences,2009,52(6):1 776-1 785.

[9] 余竹,夏禾,GOICOLEA J M. 基于小波包能量曲率差法的桥梁损伤识别试验研究[J]. 振动与冲击,2013,32(5):20-25.

[10] 李静辉,马化目,孙全胜. 基于柔度矩阵的自锚式悬索桥主梁损伤识别研究[J]. 中外公路,2013,33(1):104-109.

[11] 闫宇智,战家旺,张楠,等. 基于小波相关性的简支梁桥损伤评估方法[J]. 振动与冲击,2018,37(12):67-74.

[12] 陶顺兴,周晓军,张志刚. 基于复 Morlet 小波和系数相关的齿轮故障特征提取[J]. 机械科学与技术,2010,29(5):642-645.