

基于小波包和传递比函数的桥梁结构在未知地震作用下的损伤识别

刘丽君*, 刘伟峰

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 基于结构动力响应进行损伤识别是目前结构健康监测常用的方法, 结构动力响应同时包含了结构自身和外激励的信息, 而实际工程中的外激励往往难以准确获得, 特别是地震作用. 因此, 仅利用未知地震作用下的结构动力响应进行桥梁结构损伤识别是一项富有挑战性的工作. 提出了一种仅基于结构振动响应的数据驱动方法, 将小波包能量和传递比函数相结合构建损伤特征指标, 实现桥梁结构在未知地震作用下的损伤定位识别. 该特征指标不仅对结构的局部损伤敏感, 同时可以消除外激励和频带的影响. 通过对简支梁桥和中承式钢拱桥在未知地震作用下的数值模拟算例, 验证了所提方法的可靠性.

关键词: 桥梁结构; 损伤识别; 地震作用; 小波包能量; 传递比函数

中图分类号: U 447

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2022)02-0308-06

桥梁结构作为大型交通工程, 有着几十年甚至上百年的设计使用年限^[1]. 在桥梁的服役期间, 由于受到环境侵蚀、材料老化等各种不利因素的影响, 在结构上会引起裂缝、疲劳、腐蚀和徐变等损伤状况, 导致结构性能逐步退化. 特别是在地震作用下, 桥梁可能会发生严重破坏, 影响其安全性能. 而地震往往是未知和难以测量的, 如何利用监测的动力响应对桥梁结构的地震损伤进行快速准确的评估是亟待解决的问题.

现阶段, 随着计算机计算能力的提升以及先进传感技术的发展, 桥梁损伤识别的相关研究主要是基于结构振动响应信号, 通过信号处理方法从中提取损伤特征, 以达到快速且准确地进行损伤识别的目的^[2-3]. 应用较为广泛的有: 基于结构振型的方法、基于结构固有频率的方法、基于频响函数的方法、基于振动传递率函数的方法、基于小波变换的方法等. 其中, 小波包变换对高频部分进行了更精细的分解, 提高了时频分辨率, 对局部损伤更为敏感, 有利于从结构振动响应信号中提取损伤信息^[4-5], 因此广泛应用于结构损

伤识别.

葛继平等^[6]提出了小波包能量累积变异指标, 应用于两跨连续梁实验模型的损伤识别. 余竹等^[7]利用实桥损伤实验验证了基于小波包能量曲率差指标进行结构损伤识别的有效性. 朱劲松等^[8]提出了小波包能量变化率平方和进行桥梁损伤识别, 刘习军等^[9]通过选取能量较大的小波包能量作为损伤指标进行损伤识别; 辛晨等^[10]构造小波包能量变化率作为指标, 将其应用于斜拉桥主梁的损伤识别中. 李红义^[11]提出了以小波包能量特征向量标准差相对偏差, 并运用于 IASC-ASCE 基准模型中的试验模型对框架结构的损伤进行识别, 但损伤前后的激励都为冲击荷载, 这在实际工程中难以实现. 在以上基于小波包分解的损伤识别方法中, 所构建的损伤指标和外激励都有着直接密切的关系, 激励的不同会影响小波包能量的分布, 从而影响损伤识别的结果.

近年来, 为了减小外激励的影响, 传递函数被应用于健康监测领域^[12]. Zhu 等^[13]提出一种基于响应传递函数的结构分散损伤检测的方法, 应用于脉冲激励

收稿日期: 2020-12-22 录用日期: 2021-05-20

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1500603)

* 通信作者: liulj214@xmu.edu.cn

引文格式: 刘丽君, 刘伟峰. 基于小波包和传递比函数的桥梁结构在未知地震作用下的损伤识别[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2022, 61(2): 308-313.

Citation: LIU L J, LIU W F. Damage identification of bridge structures under unknown seismic excitation based on wavelet packet energy and transmissibility function[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2022, 61(2): 308-313. (in Chinese)



下五层剪切框架中质量和刚度变化位置的识别. Li 等^[14]提出一种利用加权因子来增加谐振所占权重的新方法,相对于以往的方法有更好的效果.但以上几种方法都需要进行频率范围的选择. Chesné 等^[12]和 Yan 等^[15]在对基于传递函数的系统识别的文献综述中也指出了方法的局限性:损伤识别结果受频带范围选择的影响. 为避免频带的影响, Li 等^[16]提出一种小波变换和传递函数相结合的局部变异检测方法,通过有限元模拟对悬臂梁的损伤进行识别,但该方法需于损伤前后都在单点脉冲激励下进行损伤识别.

针对以上方法的局限性,本文将小波包能量与传递函数相结合,提出一种桥梁地震损伤识别新方法,能够消除外激励(地震)对桥梁结构损伤识别的影响,避免频带优选问题,实现桥梁结构地震损伤的快速定位. 通过简支梁桥和中承式钢拱桥在未知地震作用下的数值算例,验证了本文所提方法的有效性.

1 基于小波包能量传递比的损伤识别方法

1.1 小波包分析理论

小波包变换(wavelet packet transform, WPT)是基于多分辨率分析的基本思想,经过改进后的广义小波分析方法. WPT 用递归滤波操作将输出信号在由高到低的较宽频带上同步连续分解,根据频段的变化,自适应地确定信号分辨率的取值,形成既有低频又有高频的能量组成^[17].

一个时域信号或结构振动响应 $f(t)$ 经过 j 层小波包分解,可以表示为:

$$f(t) = \sum_{i=1}^{2^j} f_j^i(t), \tag{1}$$

其中, j 为分解层数, i 为组分序号.

小波包各频带的能量 E_j^i 可表示为:

$$E_j^i = \int_{-\infty}^{\infty} f_j^i(t)^2 dt. \tag{2}$$

丁幼亮等^[18]证明了结构动力响应的小波包能量谱能有效地描述结构损伤前后的动力特性变化,可敏感地表征结构损伤,但是与结构的外激励直接相关,方法的应用需要外激励是已知的或可测量的.

1.2 传递比函数

与频响函数反映动力系统输入-输出的关系不同,振动响应传递比函数反映的是系统输出-输出之间的关系^[19]. 振动响应传递比函数可以有效避免对系统输入的测量,近年来成为系统识别领域重要的分析

手段.

其中局部传递比:假定 $f_x(t)$ 和 $f_y(t)$ 分别为结构动力系统 x 和 y 两测点的响应信号,局部传递比定义为两测点快速傅里叶变换(FFT)系数之比,即:

$$T_{x,y}(\omega) = \frac{S_x(\omega)}{S_y(\omega)}, \tag{3}$$

式中, $s_x(\omega)$ 和 $s_y(\omega)$ 分别表示 $f_x(t)$ 和 $f_y(t)$ 的 FFT 系数.

当结构受到地震作用 $\ddot{x}_g(\omega)$ 时,响应传递比和频响函数之间存在以下关系:

$$T_{x,y}(\omega) = \frac{s_x(\omega)}{s_y(\omega)} = \frac{\sum_{p=1}^N H_{x,p}(\omega) \sum_{q=1}^N m_{p,q} I_q \ddot{x}_g(\omega)}{\sum_{p=1}^N H_{y,p}(\omega) \sum_{q=1}^N m_{p,q} I_q \ddot{x}_g(\omega)} = \frac{\sum_{p=1}^N H_{x,p}(\omega) \sum_{q=1}^N m_{p,q} I_q}{\sum_{p=1}^N H_{y,p}(\omega) \sum_{q=1}^N m_{p,q} I_q}, \tag{4}$$

式中, $H_{x,p}(\omega)$ 和 $H_{y,p}(\omega)$ 分别表示激励作用在 p 点时测点 x 和 y 的频响函数. 由式(4)可以看出 $T_{x,y}(\omega)$ 不受地震作用的影响,但是需要进行特定频带 ω 的选择.

1.3 小波包能量传递比

为了消除小波包能量与外激励的直接关系,减小传统传递比函数对频带选择的依赖性,本文将小波包能量与传递比函数相融合,提出小波包能量传递比. 首先,对结构振动响应进行 j 层小波包分解,原始信号被分解到不同的小波包频带内;再由式(2)计算得到各频带的小波包能量,表示结构振动响应在不同频率范围内的能量分布;利用各频带的小波包能量进行传递比计算:

$$T_{x,y}^{i,j} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} f_x^{i,j}(t)^2 dt}{\int_{-\infty}^{\infty} f_y^{i,j}(t)^2 dt} = \frac{E_j^i(x)}{E_j^i(y)}, (i = 1, \dots, 2^j), \tag{5}$$

式中, $E_j^i(x)$ 和 $E_j^i(y)$ 分别表示 x 和 y 两测点的结构响应 $f_x(t)$ 和 $f_y(t)$ 在 j 层小波包分解下,第 i 个节点的小波包能量. $T_{x,y}^{i,j}$ 描述的是 x 和 y 两测点的结构振动响应在各频带的能量之比,通过小波包能量来提取损伤信息和消除频带影响,通过计算两测点的能量传递比来减小外激励的影响.

1.4 构建损伤指标

当结构发生损伤时,损伤位置的动力响应时程(加速度、位移或应变等)会更加紊乱^[20]. 结构动力响应的小波包系数发生变化会导致小波包能量变化,损

伤位置处的小波包能量变化最大,反之未损伤处的小波总能量变化则相对较小^[9].因此,结构两测点的小波包能量传递比也会发生变化.故可将测点处小波包能量传递比在损伤前后的相对变化之和作为损伤指标来判定损伤的存在,并对损伤进行定位识别.因此构建损伤指标 D 为:

$$D_{k+1} = \sum_{i=1}^{2^j} [(T_{k+1,k}^{*i,j} - T_{k+1,k}^{i,j}) / (T_{k+1,k}^{i,j})], \quad (6)$$

式中, $T_{k+1,k}^{*i,j}$ 和 $T_{k+1,k}^{i,j}$ 分别为结构待识别状态和无损情况下相邻测点 $k+1$ 和 k 的小波包能量传递比. D_{k+1} 表征的是结构待识别状态与无损状态下,相邻测点 $k+1$ 和 k 的结构动力响应在各频带的小波包能量比相对变化之和. D_{k+1} 变化很小或为负值,表明结构在测点处没有发生损伤; D_{k+1} 变化相对较大,则说明在测点处发生了损伤,可以此判定损伤的位置.

2 有限元数值模型验证

为验证所提出方法的有效性,通过对简支梁桥和中承式钢拱桥模型在未知地震作用下的数值模拟进行验算.

2.1 简支梁桥有限元模型验证

如图 1 所示的简支梁桥模型,材料选用 Q235 钢材(弹性模量 $E=2.05 \times 10^5$ MPa,密度 $\rho=7.8$ kg/m³,长度 1 m,截面采用 50 mm×15 mm 的矩形截面),整根梁均分为 10 个单元,以单元的刚度折减表示结构损伤.损伤前后施加不同的外激励,损伤前为白噪声环境激励,损伤后为 EL-Centro 地震波(1940,美国).该算例主要考虑梁单元损伤,在服役阶段,梁主要受到竖向荷载的影响,且由于梁在纵桥向的应变受水平方向地震作用的影响较小,因此仅考虑竖向地震作用.采样频率为 50 Hz,采样时长为 30 s,振型阻尼为 0.01,观测应变响应,应变测点布置在每个单元的中点.需要说明的是,损伤前后不同的激励加载,只在正问题中用于产生结构振动响应,在损伤识别方法中无需外激励信息.

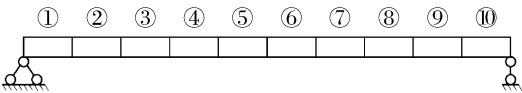


图 1 简支梁示意图

Fig. 1 Schematic diagram of simply supported beams

损伤工况设定为无损、单一单元损伤、两处单元损伤等工况进行损伤定位,如表 1 所示.

表 1 简支梁损伤工况

Tab. 1 Damage cases of simply supported beam

损伤工况	损伤单元位置	损伤程度/%
一	无损	
二	③	20
三	⑥	20
四	②、⑦	20(2)、10(7)

Daubechies 小波为有限紧支撑的正交小波,其时频域局部化能力较强^[21].本算例的小波包基函数采用 db8 小波(分解层次为 3)对应变响应信号进行小波包分解,得到 2³ 个小波包信号,利用式(2)计算不同测点的小波包能量,代入式(6)得到各测点的 D 值,根据 D 值的变化进行损伤定位判定.

由于实测过程中噪声是无法避免的,因此,通过对数值模拟动态响应信号施加了一个随机序列来模拟测量数据的噪音污染^[22],即:

$$x_i = x_i^a \times (1 + \epsilon R).$$

(7)

式中: x_i 是噪声污染的响应信号; x_i^a 是有限元模型的解析响应信号; R 是高斯分布随机变量,均值为 0,方差为 1; ϵ 是噪声强度水平.

为验证所提方法的抗噪性,应变响应中加入高斯白噪声,噪声水平为 5%.图 2 为 4 种工况的损伤定位识别结果.

为验证提出的方法与外激励的无关性,工况一为白噪声环境激励和 EL-Centro 地震波两种不同激励下的无损情况,从图 2(a)中可以看到各测点的 D 值都很小,接近于 0,表明结构在不同外激励加载情况下,小波包能量传递比基本上相等,几乎没有发生变化,说明结构处于无损的健康状态,同时证明了提出的方法与外激励无关.当结构发生损伤时,以工况二为例,单元 3 发生损伤时测点 3 的应变响应的小波包能量会增大,且增大的程度大于其他未损伤位置的小波包能量.计算损伤指标 D_3 时, $E(3)$ 位于分子, D_3 会增大(正值);计算 D_4 时, $E(3)$ 位于分母, D_4 会减小(负值),根据图 2(b)中 D 值左增大和右减小的位置或左正值和右负值的位置,即可判定单元 3 损伤,与工况二一致.依据图 2(c)中 D 值的变化可判定单元 6 损伤.对于同时发生两个位置损伤情况:工况四损伤位于单元 2 和 7, D_2 和 D_7 增大、 D_3 和 D_8 减小,从图 2(d)的损伤指标可以判断出单元 2 和 7 发生了损伤,与工况四的损伤位置一致,且损伤程度越大,损伤指标也越大.因此,由图 2 可知,损伤识别结果良好,具有较好的抗噪性.

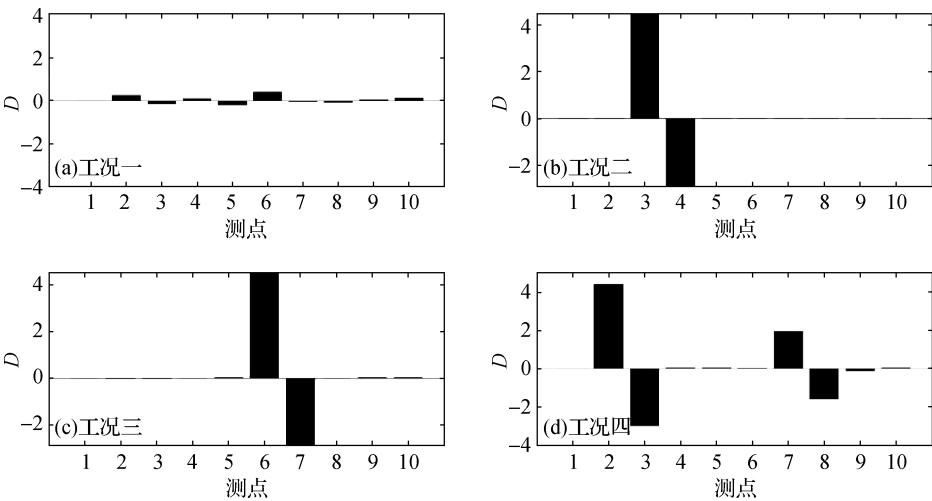


图 2 简支梁 4 种工况损伤识别结果

Fig. 2 Damage detection results of 4 damaged cases of simple supported beams

2.2 中承式钢拱桥数值模拟

中承式钢拱桥的计算跨径为 6 m,拱轴线形为抛物线,桥面宽度为 1.5 m,矢跨比为 1 : 4. 21,拱轴线方程为: $y=0.158x^2+0.9x$. 采用 ANSYS 有限元软件进行建模:模型的拱肋、纵梁、横梁、立柱、斜柱、风撑、拱上刚性横梁及斜柱横梁均采用 beam4 单元模拟,弹性模量为 2.05×10^5 MPa,密度为 7.8 kg/m^3 ;吊杆采用只受拉不受压的 link10 单元模拟,弹性模量为 2.05×10^5 MPa,密度为 7.8 kg/m^3 ;桥面板采用厚度为 3 mm 的 shell63 单元模拟,弹性模量为 2.05×10^5 MPa,密度为 7.8 kg/m^3 ;拱肋底部的边界条件为固支. 中承式钢拱桥模型如图 3 所示.

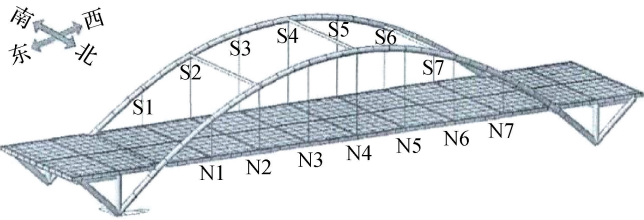


图 3 拱桥有限元模型

Fig. 3 Finite element model of arch bridge

北侧吊杆编号从东到西分别为 N1、N2、N3、N4、N5、N6、N7;南侧吊杆编号从东到西分别为 S1、S2、S3、S4、S5、S6、S7. 和简支梁桥的数值算例不同,测点布置在吊杆和桥面系的交接处,监测交接处的纵桥向应变响应. 采用减小吊杆横截面模拟吊杆的损伤. 吊杆损伤是只影响相邻吊杆处的索力分配,只需要在一侧布置传感器,即可进行吊杆的损伤识别^[23]. 本文以北侧吊杆为例进行损伤识别,损伤工况设置如表 2 所示.

表 2 拱桥吊杆损伤工况		
Tab. 2 Damage cases of suspender of arch bridge		
损伤工况	损伤吊杆编号	损伤程度/%
一	无损	
二	N4	30
三	N2、N7	30(2)、20(7)
四	N3、N6	30

无损工况施加 Kobe 地震波(1995,日本),损伤工况施加 Syl090 地震波(1994,美国),钢拱桥主要考虑吊杆的损伤,吊杆主要受到的是竖向荷载的影响,如自重、车辆荷载等,且由于吊杆和梁交接处的纵桥向应变受水平方向地震作用的影响较小,所以仅考虑竖向地震作用. 同样地,不同的地震作用只用于正问题产生结构振动响应,损伤定位识别无需外激励的信息. 监测北侧各吊杆和桥面板连接处的应变响应,采样频率 50 Hz,分析时长 30 s,振型阻尼 0.02,加噪 5%. 4 种损伤工况下的识别结构如图 4 所示.

类似地,工况一为不同激励下的无损工况,由图 4(a)可见,各测点的 D 值非常小、接近于零,说明吊杆没有发生损伤,证明提出的方法与外激励无关. 由图 4(b)可知,损伤指标分布情况为 D_4 增大,可以判断出吊杆 N4 发生了损伤. 从图 4(c) D_2 和 D_7 同时增大可判断 N2 和 N7 同时出现损伤,从图 4(d)中 D_3 和 D_6 同时增大可判断 N3 和 N6 同时出现损伤. 所有损伤定位结果与预设工况一致. 需要说明的是,由于受到噪声的影响,有些无损单元在计算 D 值时也会出现小幅增大(正值),但是此无损单元的小波包能量作为分母计算

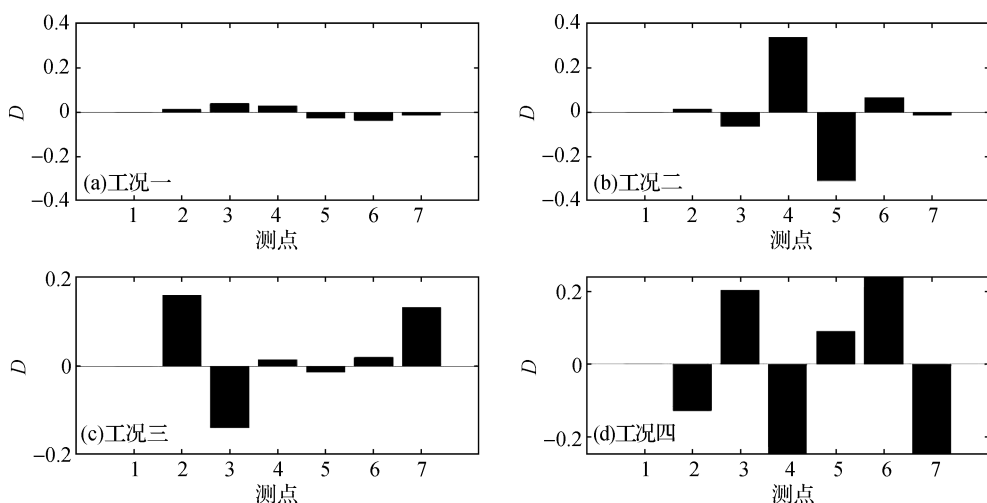


图4 吊杆的损伤识别结果

Fig. 4 Damage detection results of suspender

其右侧测点的 D 值时,并没有出现明显的负值或负值非常小,因此判定这些出现幅值较小的正的 D 值单元,并没有在相应单元发生真正的损伤。

3 结 论

本文提出一种仅利用结构动力响应,基于小波包能量和传递比函数相结合构建损伤敏感指标,对桥梁结构在未知地震作用下进行损伤识别的方法。传递比函数的应用可减小外激励的影响,小波包能量的应用可提取结构的局部损伤信息,同时消除传递比函数需要频带优选的问题。因此,根据提出损伤特征指标的变化,可对桥梁结构在未知地震作用下的损伤进行定位识别。简支梁桥和中承式拱桥在未知地震作用下的数值算例验证了所提方法的有效性和抗噪性。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国交通部. 公路桥涵设计通用规范: JTGD60—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [2] 单德山, 罗凌峰, 李乔. 桥梁健康监测 2019 年度研究进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2020, 42(5): 115-125.
- [3] 孙利民, 尚志强, 夏烨. 大数据背景下的桥梁结构健康监测研究现状与展望[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 1-20.
- [4] NOORI M, WANG H, ALTABEY W A, et al. A modified wavelet energy rate-based damage identification method for steel bridges[J]. Scientia Iranica, 2018, 25: 3210-3230.
- [5] REN W X, SUN Z S, XIA Y, et al. Damage identification of shear connectors with wavelet packet energy: laboratory

test study[J]. Journal of Structural Engineering, 2008, 134(5): 832-841.

- [6] 葛继平, 李胡生. 基于小波包能量累积变异的梁桥损伤识别试验[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1): 85-88, 131.
- [7] 余竹, 夏禾, GOICOLEA J M, 等. 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.
- [8] 朱劲松, 孙雅丹. 基于小波包能量的桥梁损伤识别指标[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(4): 715-721, 800.
- [9] 刘习军, 商开然, 张素侠, 等. 基于改进小波包能量的梁式结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2016, 35(13): 179-185, 200.
- [10] 辛晨, 周筱航, 周彪. 基于小波包能量变化率的斜拉桥损伤识别浅析[J]. 四川建筑, 2017, 37(5): 149-152, 156.
- [11] 李红义. 基于小波包能量的框架结构损伤识别方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- [12] CHESNÉ S, DERAEMAERKER A. Damage localization using transmissibility functions: a critical review[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 38(2): 569-584.
- [13] ZHU D P, YI X H, WANG Y. A local excitation and measurement approach for decentralized damage detection using transmissibility functions[J]. Structural Control and Health Monitoring, 2016, 23(3): 487-502.
- [14] LI X Z, PENG Z K, DONG X J, et al. A new transmissibility based indicator of local variation in structure and its application for damage detection[J]. Shock and Vibration, 2015, 2015: 1-18.
- [15] YAN W J, ZHAO M Y, SUN Q, et al. Transmissibility-based system identification for structural health monitoring: fundamentals, approaches, and applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2019,

- 117;453-482.
- [16] LI X Z, DONG X J, PENG Z K, et al. Local variation detection in MDOF system using wavelet based transmissibility and its application in cracked beam[J]. Journal of Vibration and Control, 2017, 23(14): 1-21.
- [17] STÉPHANE M. A wavelet tour of signal processing [M]. Pittsburgh: Elsevier, 1999.
- [18] 丁幼亮, 李爱群, 缪长青. 基于小波包能量谱的结构损伤预警方法研究[J]. 工程力学, 2006, 23(8): 42-48.
- [19] 颜王吉, 王朋朋, 孙倩, 等. 传递比函数的系统识别研究进展[J]. 工程力学, 2018, 35(5): 1-9, 26.
- [20] 项贻强, 郑亚坤. 基于小波总能量相对变化的结构损伤识别[J]. 振动与冲击, 2017, 36(14): 38-44.
- [21] 张敬一, 陈龙珠. 基于小波变换的反射波法基桩检测[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 179-183.
- [22] 姜绍飞, 胡春明. 基于模态指标与数据融合的钢管混凝土拱桥损伤识别[J]. 振动与冲击, 2009, 28(12): 91-95, 204-205.
- [23] 项贻强, 郑亚坤. 基于小波总能量相对变化的拱桥吊杆损伤识别[J]. 浙江大学学报(工学版), 2017, 51(5): 870-878.

Damage identification of bridge structures under unknown seismic excitation based on wavelet packet energy and transmissibility function

LIU Lijun*, LIU Weifeng

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: Damage detection based on structural dynamic response is a common method for structural health monitoring. The dynamic response contains both the information of the structure and the external excitation, but the external excitation is difficult to obtain accurately in practical engineering, especially the seismic excitation. Therefore, it is a challenging work to detect the damage of bridge structures only by using the structural dynamic response under unknown seismic excitation. In this paper, a data-driven method based only on structural vibration response is proposed, which combines wavelet packet energy and transmissibility function to construct damage indexes, and identify the damage location of bridge structures under unknown seismic excitation. The characteristic index is not only sensitive to local damage of the structure, but also can eliminate the influence of external excitation and frequency band. The reliability of the proposed method is verified by numerical simulation examples of simply supported beam bridge and medium supported steel arch bridge under unknown seismic excitation.

Keywords: bridge structure; damage identification; seismic excitation; wavelet packet energy; transmissibility function

(责任编辑: 汪 军)