

魏玉明,张永志,王涛,等.基于小波包能量特征向量的结构动力响应损伤识别[J].地震工程学报,2017,39(6):1156-1160.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1156

WEI Yuming, ZHANG Yongzhi, WANG Tao, et al. Damage Identification Based on Structural Dynamic Responses Using Wavelet Packet Energy Eigenvector[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2017, 39(6): 1156-1160. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1156

基于小波包能量特征向量的结构动力响应损伤识别^①

魏玉明^{1,2}, 张永志¹, 王涛², 杨珍¹

(1. 长安大学地质与测绘学院, 陕西 西安, 710064; 2. 兰州理工大学土木工程学院, 甘肃 兰州, 730050)

摘要: 在结构动力响应监测中如何准确判断结构损伤状况是工程上的一大难题, 本文研究通过小波包能量特征向量提取结构损伤信息来识别结构损伤的方法, 并进行实验分析, 同时分析噪声对能量值的影响。实验发现: 小波包能量特征向量具有识别结构状态的能力, 并且不受噪声的影响, 相反, 对观测信号去噪后不利于能量特征向量的提取。

关键词: 结构监测; 结构动力响应; 损伤识别; 能量特征向量; 小波包

中图分类号: P315.975

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2017)06-1156-05

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2017.06.1156

Damage Identification Based on Structural Dynamic Responses Using Wavelet Packet Energy Eigenvector

WEI Yuming^{1,2}, ZHANG Yongzhi², WANG Tao², YANG Zhen¹

(1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. School of Civil Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China)

Abstract: Monitoring structural dynamic responses is an important factor in structural health monitoring. When a building is subjected to certain vibration excitations, the structure will produce certain vibration responses. Once a structure is damaged, variations occur in its natural frequencies, stiffness, and damping values. The accurate determination of structural damage is a difficult engineering problem in the monitoring of structural dynamic responses. In this paper, we propose a method for extracting structural damage information and identifying structural damage based on the wavelet packet energy eigenvector. Utilizing the decomposed energy eigenvalue of each frequency band as a structural dynamic parameter, we determined differences in the structural state by the observed variation in the energy value and obtained good results. We also analyzed the experimental data with respect to the influence of noise on energy values. In an experiment, we found that the energy eigenvector can be used to identify the structural state and was free of noise. However, it could not be used to extract the energy feature vector after de-noising the observation signal. Therefore, we propose a method for accurately determining situations

① 收稿日期: 2016-11-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(41374028, 40674001); 甘肃省科技计划资助(1508RJZA094); 建工七七基金(jk2015-29)

作者简介: 魏玉明(1974—), 男(汉族), 甘肃渭源人, 博士研究生, 讲师, 研究方向为大地测量与测量工程, 形变监测和数据处理。

E-mail: wymghh@163.com。

with structural damage, which is practical and can facilitate structural damage monitoring.

Key words: structure monitoring; structural dynamic response; damage identification; energy eigenvector; wavelet packet

0 引言

近年来,高层建筑物、大型桥梁和大坝等大型土木工程结构日益增多,各类建筑物在服役的过程中不免受到地震、台风等灾害性事件的影响,同时也由于人们长期对建筑物重建轻养思维的影响,对现有建筑物的养护不足,并且受到破坏性荷载等人为因素的影响,导致建筑物在服役期间结构存在损伤隐患。为了保障人民的生命和财产安全,对结构的健康监测十分重要^[1]。通过结构监测可以实时了解建筑物的安全状况,并及时进行整修和防护。结构动力响应监测是结构健康监测中的重要内容之一,所谓结构响应监测就是指结构各部件在环境和风震等动力响应发生时,监测结构各构件的局部内力变化。

在对现有建筑物进行结构响应监测时,结构现场实测数据精度低、结构模型存在不确定性以及结构的非线性和时变性等因素的影响,使得已有的损伤识别方法在实际工程应用中难以获得较好的识别效果^[2]。实际工程中很多的环节激励是非平稳的随机过程,响应信号的频率成分是随时间变化的。小波分析是近年来发展迅速的一种数学分析工具,其具有良好的局部分析功能。将小波分析引入建筑物结构损伤识别中,有利于提高损伤识别的精确性和准确性^[3]。本文研究将小波包分析应用于建筑物结构振动响应中的损伤识别,利用小波包更为精细的分解能力,以分解后各频带内结构响应的能量作为衡量结构状态的动力参数^[4],并实验结构在未损伤和损伤状态下的能量特征值,同时在不改变结构参数的情况下实验噪声对小波包能量特征提取的影响。

1 小波包分析

1.1 小波包分析理论

小波分析是将信号分解成低频 P_1 和高频 D_1 两个各占一半宽的频带,在分解中低频 P_1 中失去的信号将由高频 D_1 捕获,在下一层的分解中又将 P_1 分解成低频 P_2 和 高频 D_2 两部分各占 P_1 的一半频宽,低频 P_2 中失去的信号将由高频 D_2 捕获,并依次往下分解^[5]。小波包分解不但要对低频部分进行分解,而且对高频部分也进行分解,因此它是一种比小波分解更为精细的分解方法。小波包 3 层分

解结构图如图 1 所示。

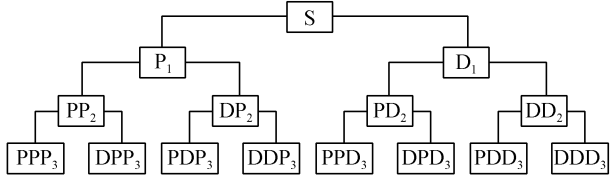


图 1 小波包 3 层分解示意图

Fig.1 Three layer structure chart of wavelet packet decomposition

1.2 小波包能量特征向量

用小波包分解技术可以将信号分解在任意精细的频带上,对信号 $x(t)$ 经进行小波包分解后得:

$$x(t)=\sum_{i=1}^{2^j}x_j^i(t) \tag{1}$$

这里

$$x_j^i(t)=\sum_k c_{j,k}^i \Psi_{j,k,i}(t) \tag{2}$$

$\Psi_{j,k,i}(t)$ 为具有尺度指标 j 、位置指标 k 和频率指标 i 的小波包,因为 $\Psi_{j,k,i}(t)$ 为一组标准正交基,当 $m \neq n$ 时,

$$\Psi_{j,k}^m(t)\Psi_{j,k}^n(t)=0 \tag{3}$$

此时信号的总能量为:

$$E_x=\int_{-\infty}^{\infty}x^2(t)dt=\sum_{m=1}^{2^j}\sum_{n=1}^{2^j}\int_{-\infty}^{\infty}x_j^m(t)x_j^n(t)dt \tag{4}$$

由小波包的正交性可得:

$$E_x=\sum_{i=1}^{2^j}E_j^i \tag{5}$$

这里

$$E_j^i=\int_{-\infty}^{\infty}[x_j^i(t)]^2dt \tag{6}$$

可以发现, E_j^i 即为第 i 频带内的信号能量,各频段内的信号能量之和等于信号的总能量^[2]。小波包分析就是将信号分解到不同频带的各个层次上,通过提取某一层上各频段信号的能量值,组成特征向量,以此作为判断结构损伤的特征参数^[6]。

1.3 小波包结构损伤识别原理

当建筑物承受一定的振动激励时,结构会产生某种振动响应。结构一旦受到破坏发生损伤时,会导致结构固有频率、刚度和阻尼的变化^[7],同时,损伤的程度不同结构的固有频率、刚度和阻尼变化量的大小也不同,进而影响结构的动力性能,也导致响

应信号中各频率成分的重新分布。当结构状态发生改变时,某些频带内信号的能量减少,而另一些频带内信号的能量增加。结构响应信号各频带的能量包含丰富的损伤信息,某个或几个频带上能量的改变代表了一种损伤的情况^[7]。

小波包能量特征向量通过某种变换有效地提取结构损伤特征信息,以各频带内结构响应的能量作为结构动力参数,从而形成适用于损伤识别的结构损伤特征向量。一般要求其满足两个基本条件:(1)对结构损伤要敏感;(2)抗噪声干扰能力强。由理论分析和数值计算可知,采用小波包分解结构动力响应时,观测噪声的能量均匀地分布在各个频带上,因此能量较小的频带易受噪声的干扰,在构造结构损伤特征向量时一般选用小波包能量较大的频带^[8]。

2 实验分析

2.1 未损伤状态下结构能量值分析

实验选取结构完好的钢筋混凝土板构件,在其中心施加正弦激励荷载,并通过传感器采集构件的正弦响应信号。实验时分别在上午和下午对构建作相同的测试,获取两次响应信号,并选取前 200 历元的信号进行实验分析。两次观测信号如图 2 所示。从图 2 中可以看出构建的振动表现为正弦状态下有规律的信号响应,两者观测信号整体规律表现一致,但仔细对比可以发现两者相同历元状态下观测值存在一定的差异,两者均受到一定的噪声影响。仅通过图 2 无法确定两者是否均为结构状态一致的结构构件,因此对其进行小波包能量分析。

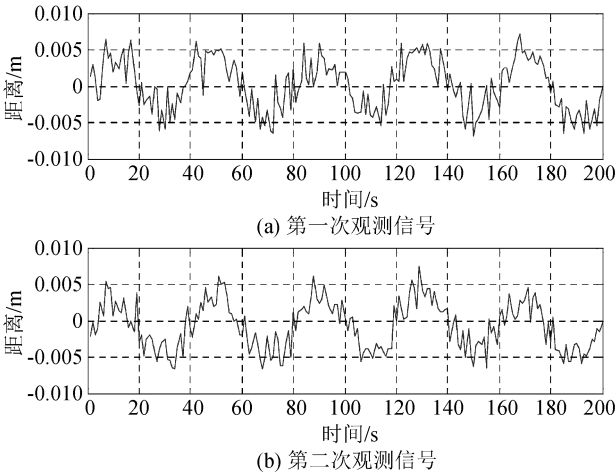


图 2 未损伤两次原始观测信号

Fig.2 Two original observation signals without damage

实验首先研究在结构未损伤状态下不同时段观测信号的小波包能量特征向量的差异,实验时选择

工程上常用的 db 小波函数系列,并依据 l^p 范数熵指标来确定小波函数阶数和分解层数^[9-11],结果发现对观测信号选择 db12 小波基并作 3 层小波分解时效果较好。两次小波包能量特征相对值分布如图 3 所示。经观察发现两者能量分布值主要集中在第一频段,说明激励响应频率主要被第一频段捕获,其他各段能量值约占据总能量的 30%,两者能量值基本相同。不同时段观测信号受到不同噪声的影响存在一定的差异,无法判断出两次观测结构状态的异同,但是其能量特征值基本相同,说明小波包能量特征向量能够识别结构未损伤状态下的观测信号。

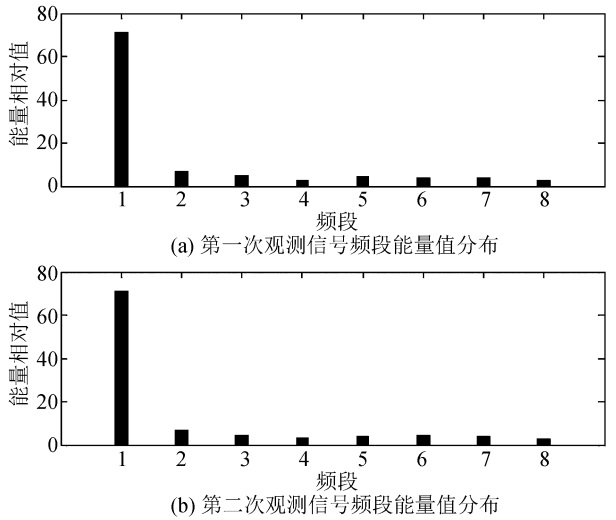


图 3 未损伤时信号小波包能量分布图

Fig.3 Wavelet packet energy distribution of signals without damage

2.2 损伤状态下的结构能量值分析

实验前,首先使钢筋混凝土板构件受到破坏性荷载的压力,发现右侧板面出现轻微裂痕,然后对其中心施加正弦激励荷载,并通过传感器采集构件的正弦响应信号,获得观测值序列如图 4 所示。从图中观测序列中无法判断其与损伤前存在的差异,无法直接确定构件是否存在损伤及损伤状况,对此进行小波包能量特征值分析。为了保证实验对比的一致性,小波包能量分析时采用参数和上述一致,获得能量相对值如图 5 所示。

从图 5 中可以发现,第一频带的能量相对值已超过 80%,其后各段能量值与图 3 相比整体都偏小,说明结构状态改变时能量值也产生了变化,并且变化主要集中在能量集中的第一频带内,可以据此进行结构损伤的判定。

2.3 噪声对结构损伤的影响

文献[12]提到观测噪声对小波包能量值分析的

影响是需要深入研究的课题,本文对此进行研究。实验选择未损伤时的第一次观测信号和损伤时的观测信号进行对比分析,发现两者均在观测过程中受到噪声的影响。实验的思路是对两观测信号进行去噪,获得不含噪声影响的观测信号,再进行小波包能量特征值分析。

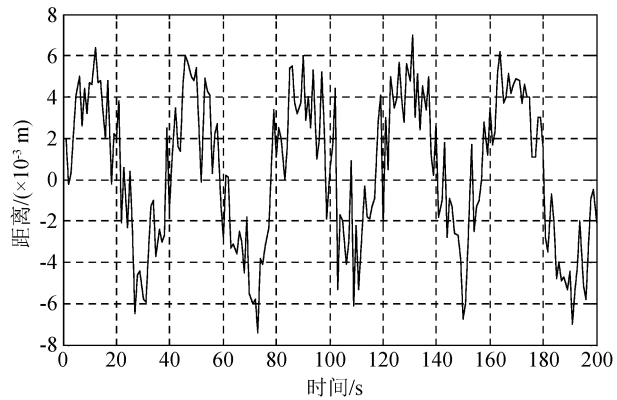


图 4 损伤后原始观测信号

Fig.4 The original observation signal after damage

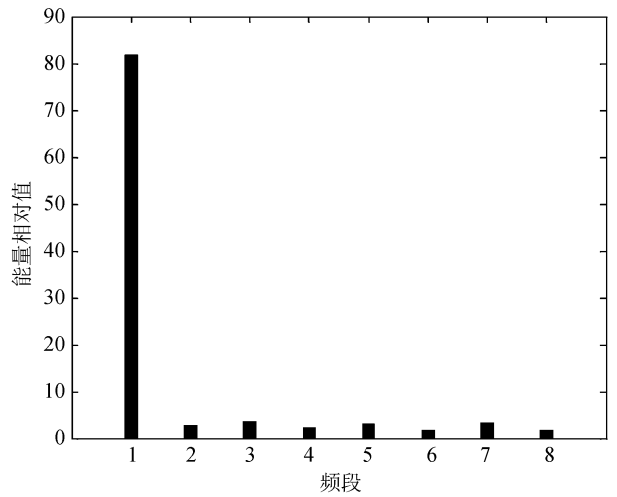


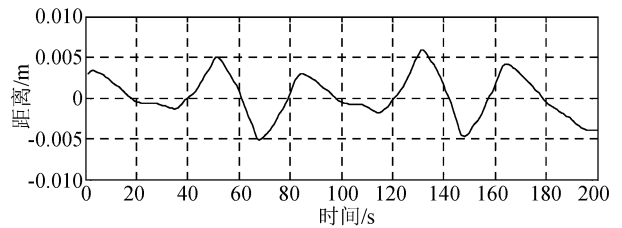
图 5 损伤时信号小波包能量分布图

Fig.5 Wavelet packet energy distribution of damage signals

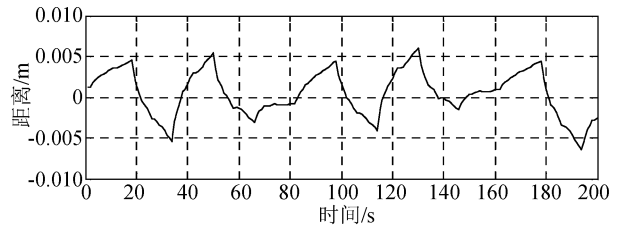
实验采用小波包去噪方法,去噪时选择去噪效果好的 sym4 小波基函数进行 4 层小波包分解,去噪结果如图 6 所示。可以看出观测信号基本消除了噪声的影响,获得的信号特征趋势无法判断两者结构状态的差异,此时对去噪后的信号进行小波包能量值分析,并与上述实验保持一致的参数,实验结果如图 7 所示。

从图 7 中可以发现,两者能量主要集中在第一频段,未损伤和损伤状态下能量相对值分别为 99.3%和 96.9%,说明去噪后去除了高频噪声的影响,获得了低频的观测序列,信号经小波包分解以后

的高频部分基本消失,可以认为在去噪过程中也消去了高频的振动信号,这对判断结构能量特征是不利的。经对比发现两者小波包能量值的低频部分仅存在微小差异,无法据此判断两者的差异是由于结构状态异常的影响还是观测误差的影响。



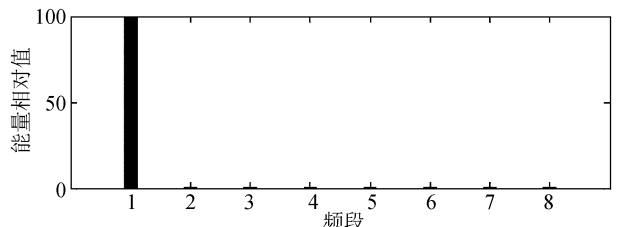
(a) 未损伤去噪结果图



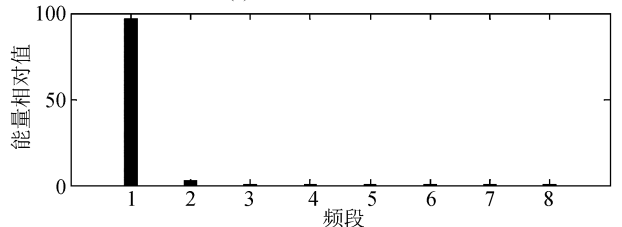
(b) 损伤去噪结果图

图 6 两种状态下去噪结果图

Fig.6 Denoising results in two states



(a) 未损伤信号能量值分布



(b) 损伤信号能量值分布

图 7 两种状态下小波包能量分布图

Fig.7 Wavelet packet energy distribution in two states

与上述实验结果进行对比发现,噪声的存在不会影响到能量特征值的提取。当对观测信号进行去噪处理时,可能由于过度去噪使得高频信号被消去,影响结构状态的判断,若观测信号中存在异常值,则要设法去除。

3 结束语

结构动力响应的监测是结构健康监测的重要部分。当建筑物承受一定的振动激励时结构会产生某

种振动响应,结构一旦受到破坏发生损伤时,会导致结构固有频率、刚度和阻尼的变化,如何处理监测数据获得结构损伤状况是结构监测的重要目的。本文利用小波包分析强大的信号分解能力,使用分解后各频带能量特征值作为结构动力参数,根据能量值的变化来判断结构状态的差异,取得了很好的效果。并且通过实验发现噪声的存在对能量特征提取影响不大,若对观测信号进行去噪处理可能会对能量特征值产生影响。小波包能量特征值存在的问题是,能量值的大小与外部激励直接相关,为准确判断能量变化需对所监测的建筑物在建成后进行动力响应测试,获得结构在健康状况下的能量特征值。

参考文献(References)

- [1] 李宏男,高东伟,伊廷华.土木工程结构健康监测系统的研究状况与进展[J].力学进展,2008,11(2):151-166.
LI Hongnan,GAO Dongwei,YI Tinghua.Advances in Structural Health Monitoring Systems in Civil Engineering[J].Advances in Mechanics,2008,11(2):151-166.
- [2] 任宜春.小波分析在土木工程结构损伤识别中的应用[M].长沙:湖南师范大学出版社,2010.
REN Yichun.Application of Wavelet Analytical Method to Civil Engineering Structure Damage Identification[M].Changsha:Hunan Normal University Press,2010.
- [3] 孙磊.小波分析在桥梁健康监测中的应用研究[D].西安:长安大学,2012.
SUN Lei.The Applied Research Based on Wavelet Analysis in Bridge Health Monitoring[D].Xi'an:Chang'an University,2012.
- [4] 郭健.基于小波分析的结构损伤识别方法研究[D].杭州:浙江大学,2004.
GUO Jian.Study of Structural Damage Identification Based on Wavelet Analysis[D].Hangzhou:Zhejiang University,2004.
- [5] 张德丰.MATLA 小波分析[M].北京:机械工业出版社,2009:158-161.
ZHANG Defeng.MATLA and Wavelet Analysis[M].Beijing:China Machine Press,2009:158-161.
- [6] 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.
DING Youliang,LI Aiqun,MIAO Changqing.Investigation on the Structural Damage Alarming Method Based on Wavelet Packet Energy Spectrum[J].Engineering Mechanics,2006,23(8):42-48.
- [7] 赵学风,段晨东,刘义艳.基于小波包变换的支持向量机损伤诊断方法[J].振动、测试与诊断,2008,28(2):104-107,178.
ZHAO Xuefeng,DUAN Chendong,LIU Yiyun.Diagnosis of Structure Damage by Support Vector Machine Based on Wavelet Packet Transform[J].Journal of Vibration,Measurement & Diagnosis,2008,28(2):104-107,178.
- [8] 信思金,舒丹,梁磊,等.损伤识别系统中小波包信号特征量的提取[J].河南科技大学学报:自然科学版,2006,27(2):29-32,6.
XIN Sijin,SHU Dan,LIANG Lei,et al.Drawing of the Wavelet Package Signal Energy Eigenvalue in Damage Recognition System[J].Journal of Henan University of Science and Technology:Natural Science,2006,27(2):29-32,6.
- [9] 刘涛,李爱群,丁幼亮.基于小波包能量谱的大跨斜拉桥拉索损伤预警方法[J].东南大学学报(自然科学版),2007,37(2):270-274.
LIU Tao,LI Aiqun,DING Youliang.Alarming Method for Cable Damage of Long Span Cable Stayed Bridges Based on Wavelet Packet Energy Spectrum[J].Journal of Southeast University(Natural Science Edition),2007,37(2):270-274.
- [10] 任宜春,张杰峰,刘哲峰.钢筋混凝土梁损伤的小波包识别方法[J].振动、测试与诊断,2011,31(5):605-609,665.
REN Yichun,ZHANG Jiefeng,LIU Zhefeng.Damage Identification of Reinforced Concrete Beam Based on Wavelet Packet[J].Journal of Vibration,Measurement & Diagnosis,2011,31(5):605-609,665.
- [11] 刘希强,周蕙兰,李红.基于小波包变换的地震数据时频分析方法[J].西北地震学报,2000,22(2):143-146.
LIU Xiqiang,ZHOU Huilan,LI Hong.The Time-frequency Analysis Method about Seismic Data Based on Wavelet Packet Transform[J].Northwestern Seismological Journal,2000,22(2):143-146.
- [12] 肖本林,郑建强,邓友生.基于小波包分析的结构损伤识别研究进展[J].公路工程,2011,36(1):36-40.
XIAO Benlin,ZHENG Jianqiang,DENG Yousheng.Review of Structure Damage Identification Based on Wavelet Packet Analysis[J].Highway Engineering,2011,36(1):36-40.