

基于小波阈值降噪的既有砌体承重墙基本频率识别

张玉梅¹, 彭 斌¹, 李佳蔓¹, 王卓琳²

(1. 上海理工大学 环境与建筑学院, 上海 200093; 2. 上海市建筑科学研究院(集团)有限公司, 上海 200032)

摘要: 识别既有砌体承重墙的基本频率对结构安全性评估有重要意义. 为了降低噪声对动力测试信号和基本频率识别结果的不利影响, 首先通过人工带噪信号分析获得小波阈值降噪方法的优化参数, 再通过拟静力试验在墙体模型中实现不同的损伤, 通过环境激励获取加速度信号. 分别基于原始加速度信号和小波阈值降噪处理后的加速度信号, 获得功率谱密度函数, 再运用峰值点法识别基本频率. 结果表明, 采用优化参数进行小波阈值降噪后, 基本频率识别结果的变异性更小. 所采用的方法可通过降低噪声影响来提高带损伤砌体承重墙的基本频率识别效率, 为既有砌体结构安全性评定提供基础数据.

关键词: 小波阈值降噪; 基本频率; 识别; 砌体墙; 既有结构

中图分类号: TU 362

文献标志码: A

Basic Frequency Identification for Existing Masonry Load-Bearing Walls Based on Wavelet Threshold De-noising

ZHANG Yumei¹, PENG Bin¹, LI Jiaman¹, WANG Zhuolin²

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. Shanghai Research Institute of Building Sciences (Group) Co., Ltd., Shanghai 200032, China)

Abstract: The basic frequency identification for existing masonry load-bearing walls is important for structural safety assessments. To mitigate the noise impacts on the dynamic test signals and the frequency identification results, artificial noised signals were adopted in the analysis, so as to obtain optimized parameters for the wavelet threshold de-noising method. Then pseudo-static tests were conducted on a wall specimen and the acceleration signals under ambient excitations were recorded. Moreover, the power spectrum density (PSD) functions of the original signals and wavelet threshold de-noised signals were calculated, and then the basic frequencies were identified respectively by using the peak-picking method. It is shown that the variability of the identified frequency decreases by the wavelet threshold de-noising with optimized parameters. By mitigating the noise impacts, the proposed method can improve the effectiveness of the frequency identification for masonry load-bearing walls with damages, and then give fundamental data for the safety assessment of existing masonry structures.

收稿日期: 2016-10-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208300)

第一作者: 张玉梅(1994-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 砌体结构. E-mail: 152561684@st.usst.edu.cn

通信作者: 彭斌(1977-), 男, 副研究员. 研究方向: 砌体结构. E-mail: BinPeng@usst.edu.cn

Keywords: wavelet threshold de-noising; basic frequency; identification; masonry wall; existing structure

基本频率是既有砌体结构整体稳定性和安全性评估中的重要参数,识别这一参数需要通过动力测试.但受现场条件的影响,动力测试获取的振动信号普遍存在噪声,可使基本频率识别失真,甚至失败^[1].降噪是既有砌体结构基本频率识别中的关键步骤.

与有用信号相比,噪声频率高、持时短、无规律,是在时域和频域上都有明显特征的随机信号^[2].因此,采用能进行时频域分析的小波变换来降噪具有明显的优势^[3-5].

小波阈值降噪方法通过在不同尺度下设置零法则,过滤具有噪声特点的频率成分^[6],其降噪效果受小波基、阈值门限和阈值函数的影响很大.研究表明,通过改进阈值函数,可以改善框架剪力墙模型的振动信号处理效果^[7].通过优选小波基、阈值门限和阈值函数等降噪参数,可以提高结构有损和无损工况的辨识度^[8].结合小波基、阈值门限和阈值函数改进小波降噪算法,可有效过滤大型结构动测信号中的白噪声^[9].

本文在既有砌体墙的基本频率识别中引入小波阈值降噪方法,以降低噪声影响,提高识别效率.首先通过处理人工带噪信号,分析参数选择对小波阈值降噪效果的影响,并确定优化参数.然后通过拟静力试验,在砌体承重墙体模型中实现不同的损伤,以模拟既有结构的真实状态.再基于小波阈值降噪方法识别墙体模型在5种损伤状态下的基本频率,并通过与不降噪直接识别的结果进行对比分析,表明该方法可提高既有砌体承重墙的基本频率识别效率.

1 人工带噪信号的频率识别

为了有效地应用小波阈值降噪方法,需要确定合理的小波基、阈值门限和阈值函数.为此,构造人工带噪信号:需要识别的信号为具有固定频率的简谐波,噪声信号用白噪声模拟并与简谐波叠加,叠加时考虑-22~-11 db等12个不同等级的信噪比(signal to noise ratio, SNR).图1为简谐波频率为40 Hz、信噪比等级为-22 db和-11 db的人工带噪

信号的构造过程.可以看出,在两种信噪比等级下,简谐波均已被噪声覆盖.

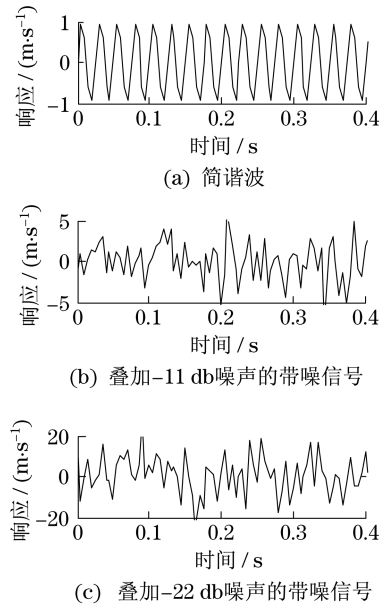


图1 人工带噪信号的构造

Fig.1 Construction of artificial noised signals

对于人工带噪信号,通过快速傅里叶变换(fast fourier transformation, FFT)得到其自功率谱密度函数后,可根据频域峰值点法(peak-picking method, PPM),通过自功率谱密度函数曲线的峰值确定对象的固有频率^[10].

1.1 直接识别

不进行降噪处理,采用频域峰值点法直接处理不同固有频率 f 的人工带噪信号,信噪比与识别结果的关系如图2所示.

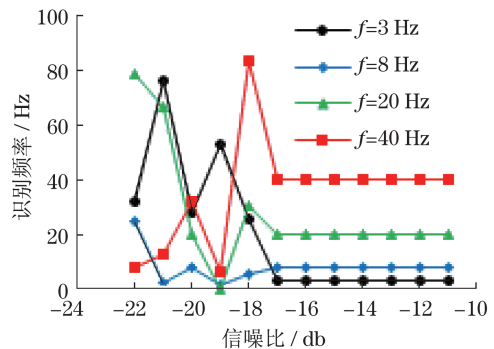


图2 信噪比与直接识别结果的关系

Fig.2 Relationship between SNRs and identification results

图2中,每一个固有频率对应一条曲线.可见每条曲线存在一个临界信噪比.当信噪比大于等于临界信噪比时,识别结果准确且集中;当信噪比小于临界信噪比时,识别结果发散.在包含一般既有砌体结构基本频率范围的3~40 Hz区间内,临界信噪比不随固有频率的改变而变化.这一现象说明,频域峰值点法(PPM)依赖于信噪比的大小,当信噪比小于临界信噪比时,有用信息完全淹没在噪声中,无法直接识别出固有频率.

直接由振动信号获得的功率谱多呈现锯齿状,通常采用加窗的方法对功率谱进行平滑,以更好地判断其峰值点的位置^[11].

对固有频率为40 Hz的人工带噪信号采用不同的窗函数进行平滑处理.窗长度取400,每段信号重叠点数取200,平滑后再识别的结果与信噪比的关系如图3所示.

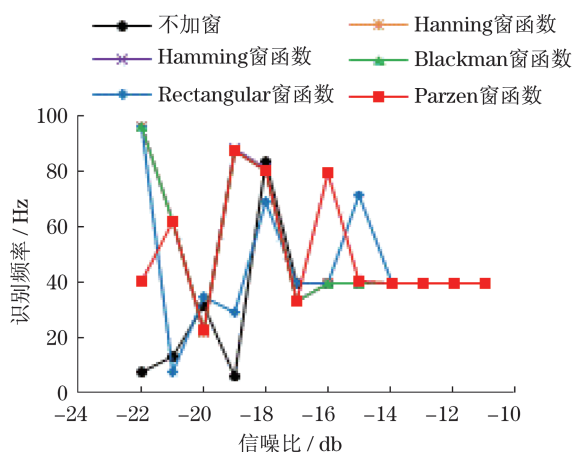


图3 信噪比与加窗平滑后识别结果的关系

Fig.3 Relationship between SNRs and identification results for smoothed signals

由图3可知,加窗平滑并未使临界信噪比减小,反而在采用Rectangular和Parzen这两种窗函数时增大了临界信噪比.这表明,加窗平滑仅在频域上对频谱进行了简单处理,不恰当的参数设置会使波形发生畸变,对效率识别并无实质性提高.图2已指出直接识别法的识别能力与固有频率的大小无关,因此,加窗平滑不能提高频率识别效率这一结论也适用其他固有频率的带噪信号.

1.2 小波阈值降噪后再识别

在时频域上对上述人工带噪信号进行小波分解,根据信号与噪声的特点收缩小波系数,重组后采用频域峰值点法(PPM)识别固有频率.对于固有频率为40 Hz的人工带噪信号,降噪效果与小波基、阈

值门限和阈值函数的关系如图4所示.

图4(a)和4(b)均采用硬阈值函数作为置零法则.可以发现,当选用不同小波基、不同阈值门限及硬阈值函数作小波阈值降噪处理后,各条曲线的水平段均向左延伸,即临界信噪比都有不同程度的减小.说明小波阈值降噪有利于提高固有频率的准确性,但当信噪比过小时,识别结果同样出现离散.由图4(a)可见,sym8小波基和soif5小波基的降噪效果最明显,但coif5小波基的紧支性大,降噪计算耗时更多,因此,选用sym8小波基效果较好.由图4(b)可见,Sqtwolog阈值门限降噪效果最好.

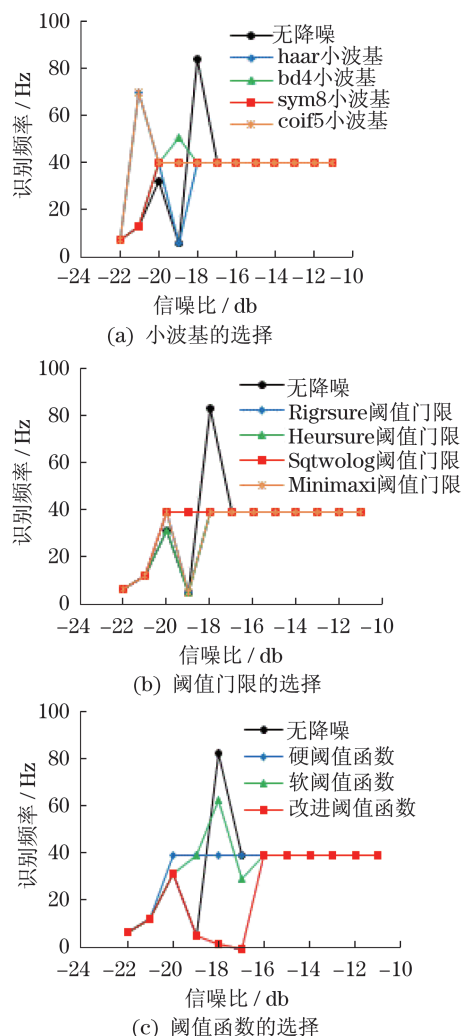


图4 信噪比与小波阈值降噪后识别结果的关系

Fig.4 Relationship between SNRs and identification results for wavelet threshold de-noised signals based on original signals

图4(c)为选取sym8小波基、Sqtwolog阈值门限及不同阈值函数进行降噪处理后的结果.其中,改进阈值函数为文献[7]所修正的阈值函数.可以发现,当使用软阈值函数和改进阈值函数时,反而增大

了信号的临界信噪比,更加不利于固有频率的识别.为了进一步探讨原因,统计出文献[7]中评判阈值函数优劣的两种指标——降噪后信号的信噪比和降噪误差,其结果如图5所示.

由图5(a)可见,3种阈值函数对信号的信噪比均有不同程度的提高,提高程度由大到小依次为软阈值函数、改进阈值函数和硬阈值函数.按常理,信噪比提高程度越大,说明滤去的噪声越多,从而降噪效果越好.但继续观察图5(b),可以发现信噪比提高程度与降噪误差成正比,这说明软阈值函数和改进阈值函数对信号信噪比的提高并不仅仅是因为滤去了更多本应去除的噪声,更大程度上是将本不应去除的有用信号误认为噪声而被滤去,导致了结果的不可信.但这并不代表文献[7]所修正的阈值函数

效果不佳,而是由于本文与文献[7]所考虑的学科领域及信号信噪比等级各异所造成的.一方面,本文选用的波为具有固有频率的正弦波,这反映了砌体结构的基本频率这一特性;而文献[7]选用的波为MATLAB中的 wnoise 命令生成的 Blocks, Bumps 和 Heavy-sine 信号,均为没有固有频率的波形.另一方面,文献[7]所研究信号的信噪比范围为5~20 dB,在该范围内,小波阈值降噪处理后能很好地还原未被噪声污染的原始信号;而本文所研究信噪比范围为-22~-11 dB,此时,噪声等级过大,有用信号已完全湮没于噪声中,经小波阈值降噪处理后不能还原出真实的原始信号,但能有效提高信号固有频率的识别效率,这正体现了本文研究砌体承重墙基本频率识别的初衷.

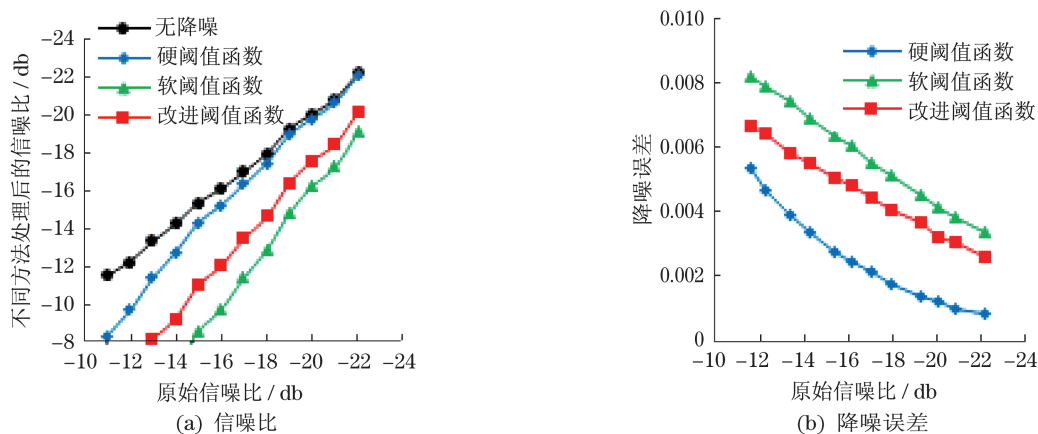


图5 使用不同阈值函数降噪后的信噪比和降噪误差的比较

Fig.5 Comparison of SNRs and errors using different threshold functions

2 砌体承重墙模型的拟静力试验

通过拟静力试验在砌体承重墙体模型中实现不同的损伤,以模拟既有结构的真实状态.

2.1 砌体承重墙模型

砌体墙模型的制作方法见文献[12],尺寸如图6所示.在墙体顶部设计一钢筋混凝土顶梁,以便施加水平荷载和竖向荷载,模拟带不同程度损伤的承重墙体的实际受力状态.在墙体四角位置预留混凝土块,防止水平加载时墙体与底梁或顶梁的接触面产生通缝破坏.按3层砌体房屋计算,水平反复加载过程中轴压比控制为0.3.

2.2 加载制度及损伤状态

水平荷载采用力-位移混合加载制度,开裂前采用力控制,每级荷载循环1周;开裂后采用位移控制,每级荷载循环2周,当荷载水平下降到峰值荷载的85%时停止试验.加载过程如图7(a)

所示.

2.3 有限元振型模拟及动测传感器布置

为了提高动力测试和频率识别过程中的信噪比,应在墙体模型动力响应较大的部位布置动测点,且所有动测点的分布应与振型相匹配.在环境激励下,可认为墙体模型的损伤状态不会发生改变,其振型可用有限元方法进行模拟.

将砌体作为连续介质考虑,选用8节点6面体单元进行离散.根据材料力学试验结果,计算参数(弹性模量 E 、泊松比 μ 和密度 ρ)如表1所示.墙底部结点所有自由度方向均约束,模拟地梁对墙的嵌固作用.墙体顶部的顶梁、钢梁、千斤顶的自重用5 kN/m的均布力代替.有限元模型如图7(b)所示.

用有限元模型进行振型分析,在状态1-1下基本频率为8.32 Hz,一阶振型如图7(c)所示.根据振型分析结果,动测点布置如图8所示(见下页).测点8布置在地梁上采集环境激励信号,其结果不用于频率识别.

对拟静力试验中带损伤的墙体模型进行动力测试;并根据人工带噪信号的处理结果,采用 sym8 小波基、sqtwolog 阈值门限和硬阈值函数,对振动信号进行降噪处理;然后识别墙体模型的基本频率.

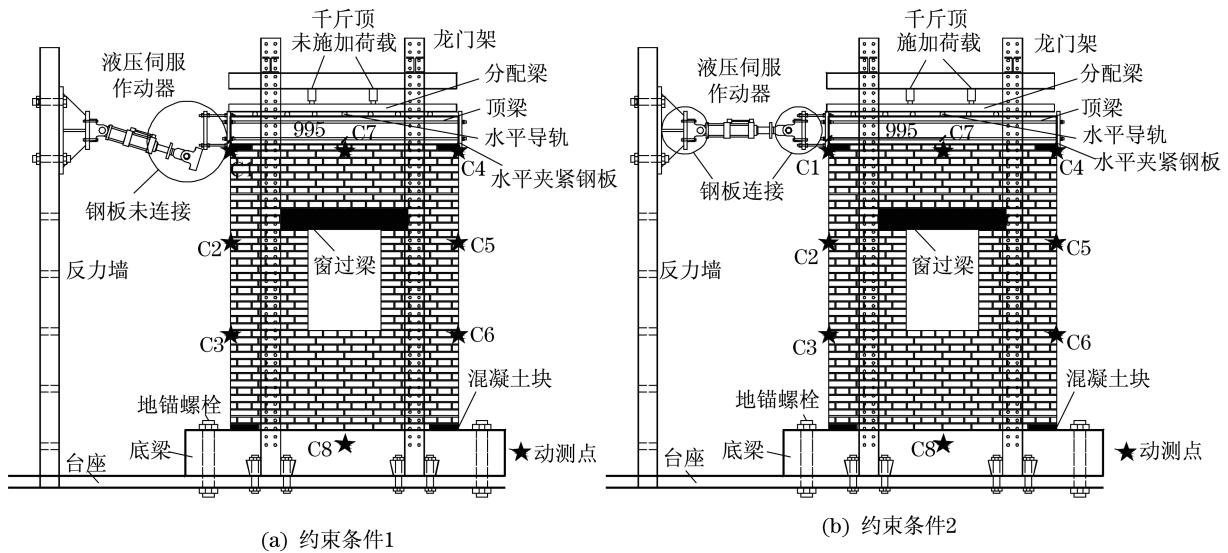


图8 墙体模型的两约束条件和动测点布置

Fig.8 Two kinds of boundary conditions of the wall specimen and the accelerometers layout

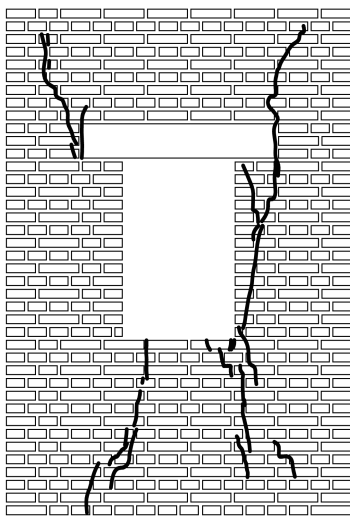


图9 墙体模型的裂缝分布模型

Fig.9 Cracks distribution on the wall specimen

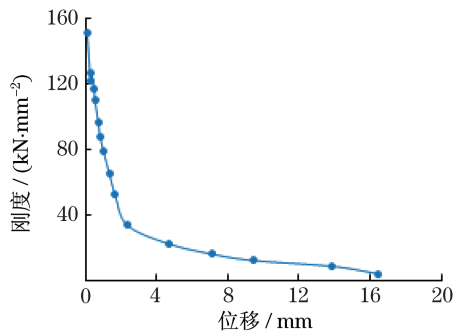


图10 墙体模型的刚度变化曲线

Fig.10 Stiffness change curves of the wall specimen

3.1 动测方案

动力测试在2种约束条件下进行. 条件1: 顶梁

承担钢梁、千斤顶自重,但千斤顶未施加竖向力,且顶梁未与水平作动器连接;条件2: 千斤顶施加恒定竖向力完成,且顶梁与作动器连接. 2种约束条件对应的墙体模型分别如图8(a)和8(b)所示. 约束条件1用于识别砌体墙在简单受力情况下的基本频率,可与有限元建模计算结果作对比,验证降噪效果;约束条件2用于探讨降噪效果与损伤严重程度的关系.

分别考虑5种不同的损伤状态,在环境激励下进行加速度采样: 约束条件1下采样2次(状态1-1, 状态1-2), 约束条件2下采样3次(状态2-1, 状态2-2, 状态2-3). 5种状态在加载过程中的对应点如图7(a)所示.

采样频率取200 Hz,远大于有限元计算的基本频率的两倍,可避免信号混叠^[13]. 每个测点每次采样长度均为 2^{17} 个点.

3.2 降噪前后识别结果比较

分别使用频域峰值点法和小波阈值降噪法处理上述5种状态下墙体模型的动测信号. 使用小波阈值降噪法处理时,选用sym8小波基对信号进行分解,并用Sqtwolog阈值门限计算每层高频信号的阈值门限,采用硬阈值函数对每层高频信号进行置零处理,最后小波逆变换重构各层信号.

2种方法的识别结果如图11所示,图11中横坐标各测点按信噪比由小到大排列,即按距墙底高度由小到大排列. 图11中每条曲线对应1个状态,根据其7个测点的结果,可得到相应状态下基本频率的均值 f_m 和变异系数 C . 图11(a)和图11(b)的对比说明,降噪后再识别的结果的离散性明显降低,各个状

态的曲线均趋于平缓.但状态2-2,2-3在信噪比较小的测点出现了离散点,说明该方法依赖于信噪比的大小,与人工带噪信号的分析相符.另外,根据墙体模

型的裂缝分布可知,测点 C3, C6 的附近存在局部损伤,局部损伤对附近测点的影响较大且存在随机性.离散点的识别结果在进一步分析时将剔除.

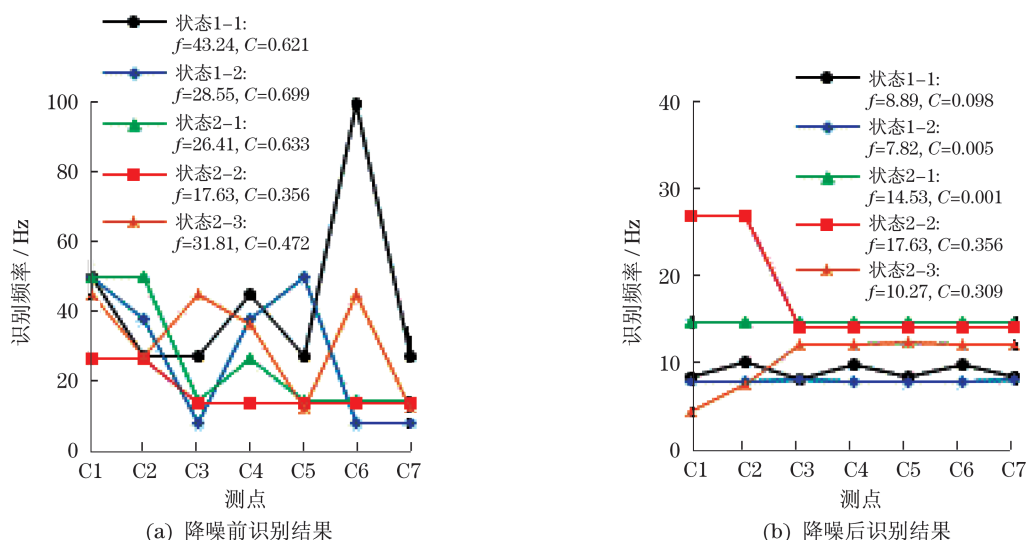


图 11 降噪前后识别结果比较

Fig. 11 Comparison of identification results for original signals and de-noised signals

3.3 识别结果分析

将图 11(b) 中的离散点剔除后,再统计每条曲线上 7 个测点的数字特征,可得到 5 个状态下新的均值和变异系数 C . 墙体模型基本频率的识别结果如表 2 所示.

表 2 降噪后识别结果汇总

Tab.2 Summary of the identification results after de-noising

状态	均值 f_m	变异系数 C
1-1	8.89	0.098
1-2	7.82	0.005
2-1	14.53	0.001
2-2	13.96	0.003
2-3	12.04	0.009

状态 1-1 均值为 8.89 Hz,与有限元模拟结果 8.32 Hz 十分接近.较状态 1-1,状态 1-2 砌体墙约束相同,但由于损伤导致刚度下降,识别的基本频率变小.状态 2-1 中墙刚度与状态 1-1 相同,但约束增强,识别的基本频率变大.状态 2-1,状态 2-2 和状态 2-3 中,砌体墙约束相同,刚度依次下降,识别结果依次减小.降噪后的识别结果定量反映了墙体在加载过程中的刚度和约束条件的变化情况,揭示了墙体损伤发展的趋势.

4 结 论

通过人工带噪信号的分析,确定小波阈值降噪

方法的优化参数,再通过拟静力试验在砌体承重墙体模型中实现不同的损伤,以模拟既有结构的真实情况.对拟静力试验过程中处于不同损伤状态的墙体进行动力测试、小波阈值降噪和基本频率识别,通过分析得出以下结论:

a. 使用频域峰值点法识别带噪信号的基本频率时,存在临界信噪比.当实际信噪比低于临界信噪比时,无法直接识别出带噪简谐信号的固有频率.

b. 在频域上,不恰当的加窗平滑可能增大临界信噪比,对基本频率识别效率并无实质性提高.

c. 小波阈值降噪的效果受小波基函数、阈值门限和阈值函数的影响显著.在包含一般既有砌体结构基本频率范围的 3~40 Hz 范围内,采用 sym8 小波基、Sqrtwolog 阈值门限和硬阈值函数时,可以获得较好的效果.

d. 在环境激励下,小波阈值降噪方法能提高既有砌体承重墙基本频率识别的效率,定量反应墙体损伤发展的趋势.

e. 本文方法的有效性受现场条件和墙体损伤程度的影响小,可用于识别具有不同约束条件和不同损伤状态的砌体承重墙的基本频率.

(下转第 306 页)

- [6] 赵多苍,吴相豪,胡聪.双掺粉煤灰和石灰粉对混凝土耐久性影响的试验研究[J].混凝土,2011(7):50-52.
- [7] FATHIFAZL G,ABBAS A,RAZAQPUR A G,et al. New mixture proportioning method for concrete made with coarse recycled concrete aggregate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2009, 21 (10): 601-611.
- [8] 陈爱玖,孙晓培,张敏,等.活性掺合料再生混凝土抗冻性能试验[J].混凝土,2014(6):20-23.
- [9] 解国梁,申向东,贾尚华.纤维粉煤灰混凝土抗冻性能试验研究[J].混凝土,2011(6):102-104.
- [10] HUDA S B, ALAM M S. Mechanical and freeze-thaw durability properties of recycled aggregate concrete made with recycled coarse aggregate [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27 (10): 04015003.
- [11] 何映平.试验设计与分析[M].北京:化学工业出版社,2013.
- [12] 陈爱玖,王静,杨粉,等.纤维再生混凝土的抗冻性能试验研究[J].混凝土,2013(2):1-4.
- [13] 李秋义,全洪珠,秦原.混凝土再生骨料[M].北京:中国建筑工业出版社,2011.
- [14] 陈改新,姜福田.大坝混凝土抗裂性影响因素的分析[C]//生态环境与混凝土技术国际学术研讨会论文集.乌鲁木齐:中国硅酸盐学会,2005:237-242.

(编辑:石 瑛)

(上接第281页)

参考文献:

- [1] 杜修力,何立志,侯伟.基于经验模态分解(EMD)的小波阈值降噪方法[J].北京工业大学学报,2007,33(3):265-272.
- [2] 李佳蔓,彭斌,付想平.小波阈值降噪在砌体基本频率识别中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(3):365-369.
- [3] 李洪泉,董亮,吕西林.基于小波变换的结构损伤识别与试验分析[J].土木工程学报,2003,36(5):52-57,75.
- [4] MA R P, FU H L. Smart active sensing technique using wavelet analysis method on damage detection of composite plate[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, 2004, 2: 773-777.
- [5] 王明,冯志刚.小波分析应用于预应力混凝土梁中的损伤诊断[J].工业建筑,2010,40(S):133-135,190.
- [6] DONOHO D L. De-noising by soft-thresholding [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1995, 41(3):613-627.
- [7] 赵晓燕,李宏男.一种改进的小波分析消噪方法及其在健康监测中的应用[J].振动与冲击,2007,26(10):137-139.
- [8] 周祥鑫,王小敏,杨扬,等.基于小波阈值的高速道岔振动信号降噪[J].振动与冲击,2014,33(23):200-206.
- [9] 严鹏,李乔,单德山.斜拉桥健康监测信号改进小波相关降噪[J].振动、测试与诊断,2012,32(2):317-322.
- [10] 曹树谦,张文德,萧龙翔.振动结构模态分析:理论、实验与应用[M].天津:天津大学出版社,2001.
- [11] 大崎顺彦.地震动的谱分析入门[M].田琪,译.2版.北京:地震出版社,2008.
- [12] 汪澜涯,彭斌.基于正交设计的砌体墙伪静力试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2015,48(S):108-111.
- [13] MITRA S K. Digital signal processing: a computer-based approach[M]. 3rd ed. New York: McGraw Hill, 2005.

(编辑:石 瑛)