

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.03.015

声发射信号降噪及在裂纹检测中的应用研究*

王兴路,上官望义,赵 坤

(西安航空学院 车辆工程学院,陕西 西安 710077)

摘要:针对采用声发射技术评估疲劳裂纹断裂状态时存在噪声干扰,以及采用小波包阈值降噪方法或集合经验模态分解降噪方法处理信号时会受到阈值选取、模态分量等因素的影响等问题,对上述两种降噪方法的工作原理进行了分析。提出了将两者相结合的声发射信号降噪方法,根据声发射信号处理流程可分为 IMF-WPT 降噪方法、WPT-EEMD 降噪方法和 EEMD-WPT 降噪方法;利用以上 3 种降噪方法对同一模拟含噪声疲劳断裂声发射信号进行了降噪处理,分别计算了降噪处理后信号的信噪比和失真度;分别进行了金属材料和焊接结构疲劳裂纹扩展试验,利用 WPT-EEMD 降噪方法对采集声发射信号进行了降噪处理。研究表明:WPT-EEMD 降噪方法降噪后的信号信噪比为 10.32,失真度为 0.31%,降噪效果最好;该方法可以有效去除高频噪声的干扰,提高分析结果的可靠性。

关键词:声发射信号;降噪;WPT-EEMD;疲劳裂纹扩展

中图分类号:TH871.3;TH140

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)03-0303-05

De-nosing of acoustic emission signal and its application in crack detection

WANG Xing-lu, SHANGGUAN Wang-yi, ZHAO Kun

(School of Vehicle Engineering, Xi'an Aeronautical University, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the problem of noise interference when using acoustic emission technology to evaluate the fatigue fracture state of crack propagation, the results are affected by the factors such as threshold selection and modal component when the signal is processed by WPT or EEMD, the working principle of the two de-nosing methods was analyzed. A new de-nosing method combined WPT and EEMD was proposed, the method includes IMF-WPT de-nosing method, WPD-EEMD de-nosing method and EEMD-WPT de-nosing method. A simulated fatigue fracture signal with noise was de-noised by three kinds of de-nosing methods, the signal-to-noise ratio and the distortion of the de-nosing signal were calculated. Fatigue crack propagation tests of metal materials and welding structures were carried out, acoustic emission of fatigue crack propagation was de-noised by WPT-EEMD de-nosing method. The results indicate that de-nosing signal with signal-to-noise ratio of 10.32 and distortion of 0.31% obtained by WPT-EEMD de-nosing method, the WPT-EEMD method has the best de-nosing effect. The high frequency noise can be removed effectively and the reliability of the analysis results can be improved.

Key words: acoustic emission signal; de-nosing; WPT-EEMD; fatigue crack propagation

0 引 言

机械结构运行时普遍承受交变载荷的共同作用,结构中危险位置易发生疲劳破坏而断裂,严重时将会引发安全事故^[1-2]。对机械结构进行疲劳断裂损伤过程检测,掌握其安全状态,制定合理的运行/维修决策

方案,可以减少甚至避免事故的发生。声发射技术作为一种动态无损检测方法,具有灵敏性高、操作简便等优点而被广泛采用^[3-4],声发射信号中包含了丰富的疲劳裂纹扩展信息,但其中也掺杂着摩擦、塑变等引起的噪声信号,信号分析时必须滤除采集信号中的噪声信号,提高信噪比,降低噪声对分析结果的影响。

收稿日期:2019-03-31

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究项目(2016JM5067);西安航空学院博士研究基金资助项目(2018KY0211);西安航空学院自然科学基金资助项目(2019KY1227)

作者简介:王兴路(1986-),男,江苏徐州人,博士,讲师,主要从事机械结构疲劳可靠性与检测方面的研究。E-mail:wangxinglu816@163.com

于金涛^[5]提出了将小波变换(WT)和经验模态分解(EMD)结合的声发射信号降噪方法,但小波变化对高频段信号成分频率分辨率较差,EMD在其处理信号时会存在频率混叠现象^[6],对处理结果产生较大影响。小波包变换(WPT)可同时对高频信号和低频信号分解,得到信号在任意频段上的频率成分,弥补了WT的不足^[7]。集合经验模态分解(EEMD)将噪声辅助分析应用于EMD分解,有效地解决了频率混叠问题^[8]。但在利用WPT和EEMD分别对信号进行降噪处理时,处理结果会受到阈值选取、模态分量等因素的影响。

本文在分析WPT降噪和EEMD降噪原理的基础上,基于两者的优点提出将两者相结合的降噪方法,分别利用模拟裂纹扩展声发射信号和疲劳裂纹扩展试验声发射信号进行验证。

1 常用降噪方法

1.1 WPT 降噪

WPT可以将信号的高频部分分解得更细,自适应地确定信号在不同频段的分辨率,该分解方法既无冗余也无遗漏,对包含大量中、高频信息的信号可以更好地进行时频局部化分析^[9]。

声发射信号的WPT降噪步骤:

(1)选择待分解的声发射信号,确定分解层次,对其进行小波包分解;

(2)依据给定的熵标准确定最优小波包基,计算最优小波包分解树;

(3)小波包分解系数的阈值量化,对于每一个小波包分解系数,选择一个恰当的阈值并对系数进行阈值量化。

(4)声发射信号的小波包重构,根据最低层的小波包分解系数和量化系数进行小波包重构,以达到降噪的目的。

在WPT降噪过程中,最重的步骤是阈值的选择和阈值量化,它直接影响信号的降噪效果;如果选择的阈值效果不理想,可以通过调整阈值进行再次试验,直到达到理想效果。

1.2 EEMD 降噪

为克服EMD分解过程中出现的模式混叠现象,WU等人^[10]提出了EEMD分解方法。多组白噪声信号在时域内求均值时各信号相互抵消,依据该现象,本研究在采集待分析信号中添加多组有限幅值白噪声信号,利用EMD对其分解,将相应的固有模式分量取均值,原始噪声在取均值时相互抵消。

EEMD分解步骤如下:

(1)在原始信号 $y(t)$ 中多次加入等长度正态分布白噪声 $n_i(t)$:

$$y_i(t) = y(t) + \sum n_i(t) \quad (1)$$

式中: $y_i(t)$ —第 i 次加入白噪声后的信号。

(2)分别对 $y_i(t)$ 进行EMD分解,得到IMF分量 $imf_{ij}(t)$ 和余项 $r_i(t)$:

$$y_i(t) = \sum imf_{ij}(t) + r_i(t) \quad (2)$$

(3)对所有的IMF分量 $imf_{ij}(t)$ 进行均值计算,消除多次加入 $n_i(t)$ 对真实IMF分量的影响,得到IMF分量 $imf_j(t)$ 和余项 $r(t)$:

$$imf_j(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N imf_{ij}(t) \quad (3)$$

$$r(t) = \frac{1}{N} r_i(t) \quad (4)$$

式中: $imf_j(t)$ —对信号 $y(t)$ 进行EEMD处理后的第 j 个IMF分量。

因此,经过EEMD方法分解后的 $y(t)$ 信号可以表示为:

$$y(t) = \sum imf_j(t) + r(t) \quad (5)$$

2 WPT 和 EEMD 结合降噪

WPT和EEMD在信号处理的应用中各具优点,现将两种方法进行结合,对复杂载荷状态下的裂纹扩展声发射信号进行处理。

根据信号处理方法的先后顺序,将WPT和EEMD结合降噪分为以下3种降噪方式:

(1)先对信号进行EEMD分解,得到IMF分量和残余项,利用小波包阈值降噪对各IMF分量降噪处理,最后对信号进行重构,称为IMF-WPT降噪方法;

(2)先对信号进行EEMD降噪,再对降噪后的信号进行小波包阈值降噪,称为EEMD-WPT降噪方法;

(3)先对信号进行小波包阈值降噪,再对降噪后的信号进行EEMD降噪,称为WPT-EEMD降噪方法。

3 声发射信号降噪试验及结果分析

为验证该降噪方法的有效性,笔者采用3种新方法对模拟含噪声发射信号进行降噪处理,降噪效果用信噪比进行量化,并计算信号处理后的失真度,确定最优声发射信号降噪方法。

本研究采用最优方法对采集疲劳裂纹扩展试验声发射信号进行降噪处理,验证降噪方法的有效性。

3.1 模拟声发射信号

依据裂纹扩展声发射信号的瞬时性、随机性特征,模拟裂纹扩展声发射信号由2个调制频率和到达时间均不相同的暂态信号组成^[11]。

模拟信号函数如下式所示:

$$s(t) = 0.4\exp(-2.5(t-2))\sin(56\pi(t-2)) + 0.9\exp(-0.7(t-3))\sin(20\pi(t-3)) \quad (6)$$

依据声发射信号函数模拟出裂纹扩展声发射信号波形图,模拟裂纹扩展声发射信号,如图1所示。

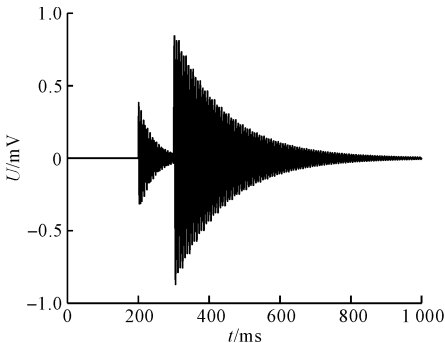


图1 模拟裂纹扩展声发射信号

在模拟声发射信号中添加随机白噪声信号,得到模拟含噪声裂纹扩展声发射信号,如图2所示。

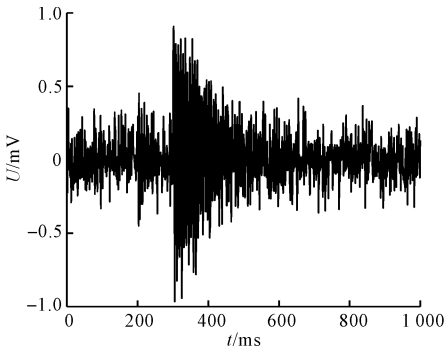


图2 模拟含噪声裂纹扩展声发射信号

笔者采用本文提出的3种WPT与EEMD联合降噪方法,分别对模拟声发射信号进行降噪处理。在Matlab软件中编写程序,程序选取db32小波基函数对信号进行3层分解,实现上述3种方法的降噪功能,将降噪效果与WPT方法直接降噪效果相比较。WPT与EEMD相结合的3种降噪方法均表现出了良好的降噪性能,保留了原始信号的瞬时性和随机性特征,信号中噪声部分幅值降低,保留了原始信号的幅值,实现了信号降噪。

为比较3种方法的降噪效果,本研究采用信噪比对降噪效果进行量化,分别计算3种方法降噪后的信噪比和WPT直接降噪后的信噪比。由于降噪方法的影响,处理后的信号将会产生一定的失真,故计算降噪后声发射信号的总谐波失真度,分析声发射信号的失

真程度。
信噪比和失真度计算结果如表1所示。

表1 信噪比和失真度计算结果

降噪方法	含噪信号 信噪比	降噪后 信噪比	失真度 /(%)
WPT 降噪方法	2.71	8.06	0.59
IMF-WPT 降噪方法	2.71	8.10	0.59
EEMD-WPT 降噪方法	2.71	9.27	0.63
WPT-EEMD 降噪方法	2.71	10.32	0.31

从表1中可以看出:WPT-EEMD降噪方法可以得到更高的信噪比,降噪效果优于WPT降噪方法、IMF-WPT降噪方法和EEMD-WPT降噪方法。WPT-EEMD降噪后的声发射信号失真度为0.31%。

因此,在笔者的后续研究中采用WPT-EEMD降噪方法对采集试验声发射信号进行降噪处理,提高裂纹扩展声发射信号的信噪比,降低噪声信号的干扰,有利于信号的特征提取。

3.2 金属材料疲劳裂纹扩展试验

本研究选用机械结构常用材料Q345,10 mm厚板材进行试件加工。在试件中心位置采用电火花加工长度8 mm、深度2 mm的半椭圆表面裂纹,裂纹方向垂直于试件长度方向。

金属材料试件如图3所示。

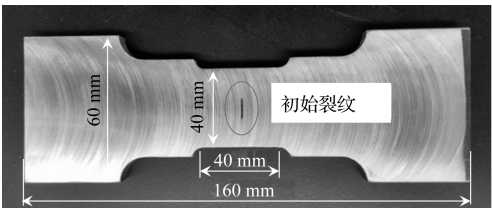


图3 金属材料试件

试验加载疲劳载荷形式:正弦载荷、应力比为0.1、平均值为11 kN、频率10 Hz,直至试件断裂。

本研究采用北京声华公司SAEU2S声发射检测系统采集试验过程中的声发射信号,传感器型号为SR150M,设置采样频率为1 500 kHz,在传感器表面涂凡士林,通过专用夹具固定在试件表面。

本研究将采集信号再现,依据声发射信号特征提取一段含疲劳裂纹扩展过程中的声发射信号。

提取的裂纹扩展声发射信号如图4所示。

本研究对提取声发射信号进行频谱分析,提取信号频谱分析结果,如图5所示。

从图5中可以看出:最大幅值对应的频率为96.32 kHz,疲劳断裂声发射信号频率一般处于70 kHz~180 kHz范围内,超过200 kHz的声发射信号被认为

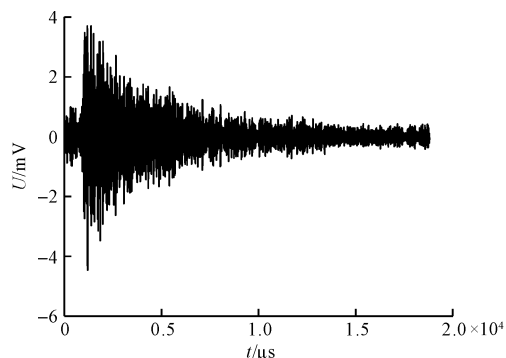


图 4 提取裂纹扩展声发射信号

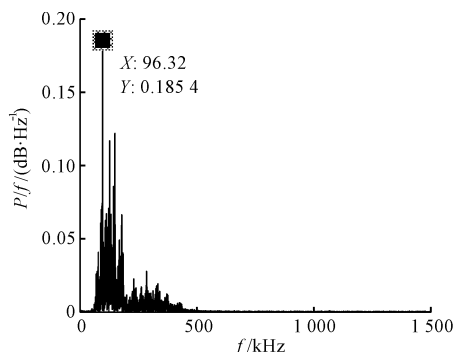


图 5 提取信号频谱分析结果

是高频噪声。

本研究采用 WPT-EEMD 降噪方法对采集声发射信号进行降噪处理,编写 Matlab 程序,小波包程序选取 db32 小波基函数对信号进行 3 层分解,实现降噪功能,并对降噪后声发射信号进行频谱分析。

采集裂纹扩展声发射信号经过降噪处理后,最大幅值对应的频率保持不变,大于 180 kHz 的高频噪声部分被有效去除,降噪后的金属裂纹扩展声发射信号频率主要集中在 70 kHz ~ 180 kHz 频带内。

3.3 焊接结构疲劳裂纹扩展试验

本研究选用机械结构常用材料 Q345,采用坡口电弧焊形式焊接成机械常用 T 型结构。在焊趾位置采用电火花加工长度 8 mm、深度 2 mm 的半椭圆表面裂纹,裂纹所在试件截面尺寸为 40 mm × 8 mm。

焊接结构试件如图 6 所示。

本研究采用上述试验相同的加载条件进行焊接结构疲劳裂纹扩展试验。采集一段含疲劳裂纹扩展声发射信号,并对采集声发射信号进行频谱分析。



图 6 焊接结构试件

焊接结构疲劳裂纹扩展试验中,声发射信号最大幅值对应的频率为 148.8 kHz。采用 WPT-EEMD 降噪方法对采集声发射信号进行降噪处理,小波包程序选取 db32 小波基函数对信号进行 3 层分解,得到降噪后的声发射信号,并对降噪后信号进行频谱分析。

采集裂纹扩展声发射信号经过降噪处理后,最大幅值对应的频率也保持不变,大于 180 kHz 的高频噪声部分被有效去除,降噪后的疲劳裂纹扩展声发射信号频率主要集中在 70 kHz ~ 180 kHz 频带内。

4 结束语

本文分析了 WPT 和 EEMD 降噪的优点,提出了将 WPT 与 EEMD 相结合的方法,对疲劳裂纹断裂声发射信号进行降噪处理。

(1)通过对模拟声发射信号的降噪处理与结果对比,WPT-EEMD 降噪方法降噪后信噪比为 10.32,失真度为 0.31%,降噪效果最优;

(2)进行了金属材料和焊接机械结构疲劳裂纹扩展试验,WPT-EEMD 降噪方法可以有效地滤除掉疲劳断裂声发射信号中频率高于 180 kHz 的噪声信号,为准确评估机械结构的疲劳损伤状态提供了可靠依据。

参考文献 (References):

- [1] 童水光,王相兵,魏超,等. 液压挖掘机臂杆结构疲劳寿命预测方法研究[J]. 中国机械工程,2014,25(16):2167-2172.
- [2] 朱兴海,张郅,陈传斌. 压力容器疲劳裂纹扩展的数值模拟进展[J]. 机械工程师,2015,47(1):74-76.
- [3] 郭力,霍可可. 断铅笔芯声发射试验信号研究[J]. 机电工程,2018,35(7):663-667.
- [4] 戴光,邱枫,张颖,等. 基于风险与声发射检测数据分析的储罐底板腐蚀剩余寿命预测方法研究[J]. 压力容器,2014,31(1):62-67.

(下转第 331 页)

本文引用格式:

王兴路,上官望义,赵坤. 声发射信号降噪及在裂纹检测中的应用研究[J]. 机电工程,2020,37(3):303-306,331.

WANG Xing-lu, SHANGGUAN Wang-yi, ZHAO Kun. De-noising of acoustic emission signal and its application in crack detection[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(3):303-306,331.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

[9]

LI Yang-yan. , BU Rui, SUN Ming-chao, et al. PointCNN: convolution on X-Transformed points [C]. Proceedings of the Neural Information Processing Systems, Montreal: NIPS, 2018.

[10]

MUSLIMIN, YOSHIOKA H , ZHU J , et al. Automatic segmentation and feature identification of laser scanning point cloud data for reverse engineering[C]. Proceedings of the International Symposium on Flexible Automation, Cleveland: IEEE ,2016.

[11]

JADERBERG M, SIMONYAN K, ZISSERMAN A, et al. Spatial transformer networks [C]. Proceedings of on Conference and Workshop on Neural Information Processing Systems, Montreal: NIPS, 2015.

[12]

NOH H, HONG S, HAN B. Learning deconvolution network for semantic segmentation [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (IC-CV) ,Santiago: IEEE, 2015.

[编辑:程浩]

本文引用格式:

陈境焕,李海艳,林景亮. 基于深度学习的零件点云分割算法研究[J]. 机电工程,2020,37(3):326-331.

CHEN Jing-huan, LI Hai-yan, LIN Jing-liang. Part point cloud segmentation algorithm based on deep learning[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(3):326-331.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn

(上接第306页)

[5]

于金涛,赵树延,王祁. 基于经验模态分解和小波变换声发射信号去噪[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2011, 43(10):88-92.

[6]

范博楠,王海斗,徐滨士,等. 强背景噪声下微弱声发射信号提取及处理现状[J]. 振动与冲击,2015,34(16):147-155.

[7]

钟孟春,张春林,李华,等. 改进的小波包能量分段阈值降噪方法[J]. 计算机工程与应用,2015,51(5):204-207.

[8]

LAW L, KIM J H, LIEW W Y H, et al. An approach based on wavelet packet decomposition and Hilbert-Huang transform (WPD-HHT) for spindle bearings condition monitoring [J]. **Mechanical Systems and Signal Processing**, 2012, 33(10):197-211.

[9]

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.

[10]

WU Z, HUANG N E. Ensemble empirical mode decomposition; a noise assisted data analysis method [J]. **Advances in Adaptive Data Analysis**, 2009, 1(1):1-41.

[11]

金鑫,施展. 基于小波的声发射信号参数提取方法[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):347-348.

[编辑:李辉]