

文章编号:1001-4888(2007)01-0038-05

基于 OAET 和 HHT 的 混凝土 AE 源损伤识别方法^{*}

刘红光, 骆英^{**}, 李忠芳, 顾建祖

(江苏大学 理学院, 镇江 212013)

摘要: 针对混凝土材料中所产生的声发射(AE)信号复杂的特点,采用正交异性声发射传感器(OAET)提取结构中特定方向的 AE 信号。运用 Hilbert-Huang 变换(HHT)对 AE 信号进行分析,通过循环应用经验模态分解的方法,将复杂的原始数据序列分解为有限数目的固有模态函数及一个残余项,进而采用 Hilbert 变换,得到以时间为自变量的信号幅度和瞬时频率函数。文章探讨了基于幅度和瞬时频率函数的损伤识别方法,形成了一种混凝土中复杂 AE 信号处理及损伤识别的新途径,有助于 AE 技术的发展与推广应用。

关键词: 声发射; 正交异性声发射传感器; Hilbert-Huang 变换; 损伤识别; 混凝土

中图分类号: TU528.07 **文献标识码:** A

0 引言

AE(Acoustic Emission, 简称 AE)是指材料或结构受外力或内力作用产生变形或断裂,以弹性波形式释放出应变能的现象^[1]。大量实验证明,由于混凝土内部含有多种不同性质的缺陷、裂纹及微观构造上的不均匀性,混凝土材料的 AE 信号往往是同时由多个 AE 源叠加形成,这对于混凝土结构中损伤源信号的捕捉和追踪造成了一定的困难。

OAET(Orthotropic Acoustic Emission Transducer, 简称 OAET)具有平面横观各向异性的特点,可以区分平面结构中的各个应力波分量,能够很好地减少侧面反射信号的影响,有利于提取来自结构主要破坏区域的信号。而 AE 作为实用诊断技术,每前进一步都是同信号处理技术发展分不开的, AE 技术发展史也就是 AE 信号处理技术的发展史^[2]。本文提出将新近出现的处理非线性非稳定信号的时频分析方法——HHT(Hilbert-Huang Transform, 简称 HHT)^[3-5]方法,应用到混凝土材料的 AE 分析中,为 AE 信号处理提供一种新途径。

本文通过在混凝土表面断铅来模拟产生 AE 源,用 OAET 获取目标信号,研究了 HHT 在 AE 信号分析中运用的可行性及相对于其它方法的优越性,有利于 AE 技术及相关损伤监测技术的发展与推广应用。

1 混凝土表面 AE 源模拟

本文设制的混凝土试件尺寸为 700mm×700mm×200mm(由于断铅产生的 AE 信号在混凝土中衰

* 收稿日期: 2006-08-15; 修订日期: 2006-12-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 50375069)和江苏省“六大人才高峰”项目《AE 技术在土木工程结构及重大灾害预警系统中的研究》共同资助

** 通讯作者: 骆英(1960—),男,博士、教授、博士生导师,现主要从事智能材料结构,传感器机理以及结构无损检测技术的研究。

E-mail: luoying@ujs.edu.cn

减很快,此尺寸可将混凝土块看为半无限大体),密度为 2452kg/m^3 ,质量配合比为水泥:石子:砂:水=1:2.86:1.25:0.49,石子最大粒径为16mm,龄期28d。断铅实验专用铅笔直径为0.5mm、伸长量为2.5mm,以 30° 角在预定测点断铅用断铅模拟AE源产生表面波。在混凝土表面,粘贴两个OAET片作为传感元件。两OAET片的中心位置相距32cm,在距离OAET2 10cm的位置断铅,用Agilent54820A型示波器采集断铅产生的信号,实验装置见图1。同时采集两通道的信号,并通过HHT确定AE信号特性,从而利用AE信号到达两个传感器的时差来确定AE源的位置。其中断铅AE信号波行速度为在相同实验条件下通过大量实验测得,大约为2103m/s。



图1 实验装置简图

Fig. 1 Sketch of the equipment for experiment

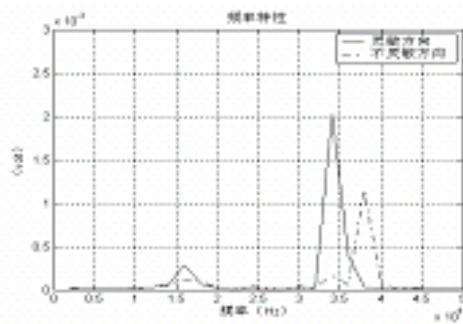


图2 OAET 在混凝土试块上模拟的频率响应曲线

Fig. 2 The curve of simulant frequency-voltage

2 OAET

针对混凝土材料构造上不均匀、多缺陷、多裂隙的特点,避免反射信号的干扰,精确地拾取目标信号,对于混凝土结构的无损检测将非常关键。OAET是一种自行研制的正交异性压电复合材料^[6],它具有压电横观各向异性的特性,可以很好地避免侧面信号的干扰,通过适当的布片形式可以有助于捕捉目标信号。图2所示为对混凝土构件进行谐响应分析中OAET两个方向的响应。混凝土构件长宽方向尺寸远大于厚度方向尺寸,布置OAET元件,分析频率 $20\text{kHz}\sim 500\text{kHz}$ 。可以看出对于相同的激励信号,在灵敏方向和不灵敏方向,响应特性具有明显差异,证实OAET的横观各向异性特性。

3 AE 信号分析

虽然OAET自身可实现正交解耦功能,避免了侧面信号的干扰,对信号进行了初步的过滤,但要实现对AE源精确的定性、定位,还需要运用更为适用于AE信号分析处理的技术。在目前使用的信号处理技术中,Fourier分析在对非线性、非平稳信号的处理上存在明显的不足缺乏应有的分辨率,小波变换虽然具有可变的时频窗,它对时频平面是一种机械式的划分,在工程实际中选择能反映信号特征的小波基不易,且一旦选定该小波基,在整个分析过程中就必须用同一个波。HHT信号处理方法是1998年由美国宇航局Norden E Huang等提出的,由经验模态分解(the Empirical Mode Decomposition,简称EMD)和Hilbert变换两部分组成,没有固定的先验基底,具有自适应功能,且吸取了小波变换多分辨率的优势,在处理非线性、非平稳信号方面具有强大优势。该方法应用于混凝土结构的AE分析中尚未见报道,本文将着重在该问题上进行探讨研究。

3.1 信号的EMD分析

EMD对损伤信号的筛选分析过程如图3所示。由OAET采集到的信号(图4(a))为电压随时间的变化,记作 $x(t)$,找出其所有极大点和极小点,用三次样条曲线分别拟合为 $x(t)$ 的上、下包络线 $U(t)$ 、 $L(t)$ 。记上、下包络线均值为平均包络线 $m_{11}(t)$,用 $x(t)$ 减去 $m_{11}(t)$ 可得到一个去掉低频的新数据列 $h_{11}(t)$,其式为:

$$h_{11}(t) = x(t) - m_{11}(t) \quad (1)$$

再将 $h_{11}(t)$ 看作 $x(t)$,重复以上过程 m 次,直到 $h_{1m}(t)$ 满足以下两条件:

- a. 对于一列数据,极值点和过零点数目必须相等或至多相差一点;

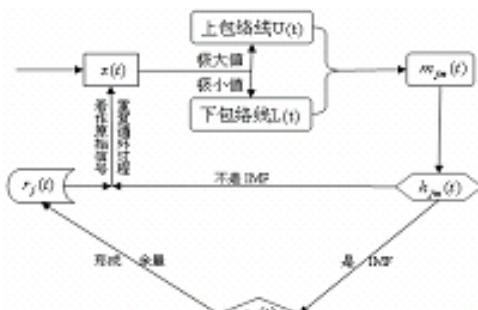


图3 EMD流程图

Fig. 3 Flow chart of EMD

b. 在任意时刻,由极大值点定义的上包络线和极小值点定义的下包络线的平均值为零。则认为 $h_{1m}(t)$ 是第一个固有模态函数(Intrinsic Mode Function,简称 IMF),记为 $c_1(t)$,它表示信号中的最高频部分。

从 $x(t)$ 中减去 $c_1(t)$ 将得到去掉高频成分的新数据列 $r_1(t)$,将 $r_1(t)$ 看作 $x(t)$,重复式(1)过程,依次得到频率由高到低的第二个 IMF c_2 ,第三个 IMF c_3 ,……。当 $r_n(t)$ 足够小或成为单调函数时,筛选过程终止。由此,原始数据列 $x(t)$ 可表示为一组 IMF 和一残余项 $r_n(t)$ 的和:

$$x(t) = \sum_{j=1}^n c_j(t) + r_n(t) \quad (2)$$

图4(b)所示为 AE 信号经过 EMD 后得到的 IMF 分量,其中左侧为 OAET1 采集到信号的 IMF 分量,右侧为 OAET2 的 IMF 分量。图4(c)为由各 IMF 重构的信号和实测信号之比较,由此可见,经过 EMD 后得到的 IMF 完整的保留了原始信号的特性。

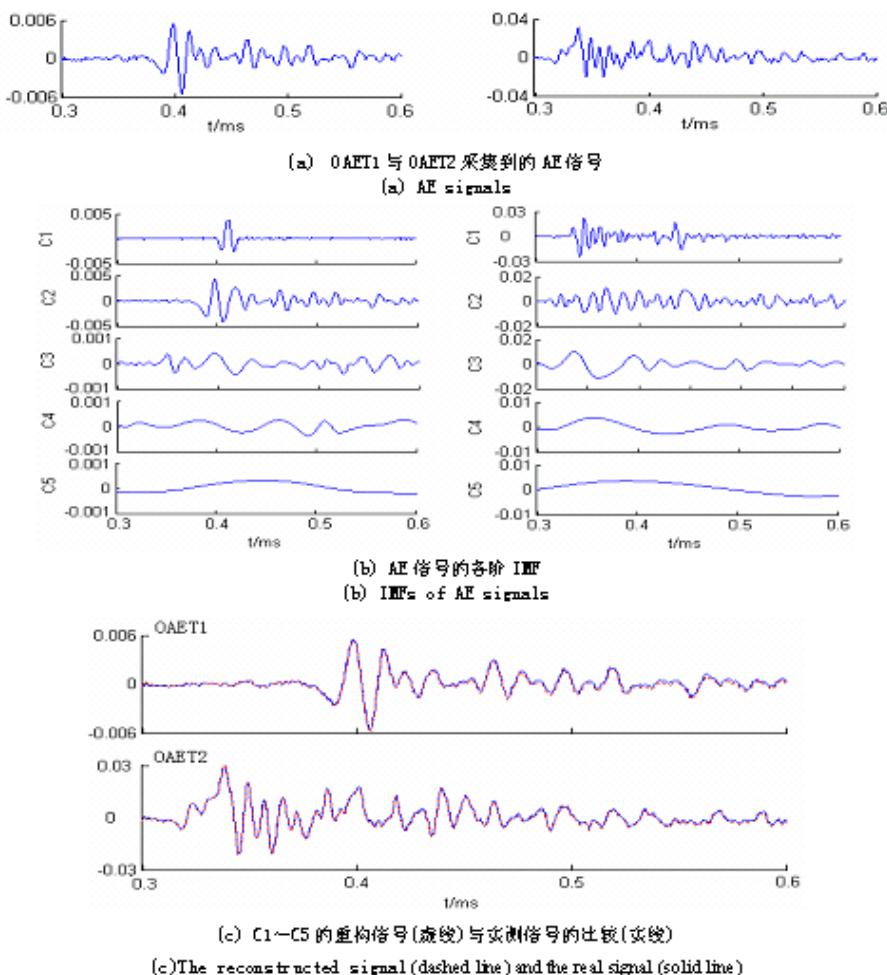


图4 AE信号、各IMF和重构信号(虚线)与实测信号(实线)

Fig. 4 AE signal, IMFs and the reconstructed signal (dashed line) and the real signal (solid line)

从图4(b)可以看出, c_1 是从信号中分离出来的最高频成分,依次下去各 IMF 频率逐渐降低。因此,若将原始信号减去前几个 IMF 分量,相当于把信号通过了一个自适应的低通滤波器,若减去后几个 IMF,则相当于将原始信号通过了一个自适应的高通滤波器。若保留中间几个 IMF 分量,就相当于把

信号通过了一个带通滤波器,去掉中间几个则相当于通过了一个带阻滤波器。而 IMF 中幅值(能量)较大的代表信号的主要成分,幅值较小的代表次要成分。从图 4(b)所示各 IMF 图中看以看出,无论是 OAET1 还是 OAET2 采集到的信号,信号的主要成分为前两阶 IMF,是分析研究的重点。其中 OAET1 的 c_2 和 OAET2 的 c_1 的波形符合 AE 信号的衰减传播规律,应为 AE 信号的有效部分。多次重复实验的分析结果显示:前者所在频段均低于后者,解释为信号高频部分的衰减所致。作者在相同实验条件下在玻璃纤维板上进行断铅实验,测得断铅信号的中心频率在 5kHz 以下,远远低于文中信号的主要频段(50kHz 以上),但波形一致,因此实际 AE 信号有效成分应主要根据分解得到的分量的波形特征选取。由 OAET1 的 c_2 和 OAET2 的 c_1 的峰值到达时间差,测得 AE 源到 OAET2 距离为 10.17cm,误差为 1.7%(该误差主要是由于采用手工断铅所引起的)。总之,EMD 是一种新的主要成分分析方法,对于消除信号干扰,基于 AE 的无损检测十分有用。

3.2 Hilbert-Huang 幅度谱

由 EMD 过程得到原始信号的所有 IMF 后,再分别对每一个 IMF 分量作 Hilbert 变换:

$$y_j(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_j(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (3)$$

以 $c_j(t)$ 为实部, $y_j(t)$ 为虚部构成解析信号: $z_j(t) = c_j(t) + iy_j(t) = a_j(t) e^{j\theta_j(t)}$ 。该解析信号的极坐标形式明确地表达了瞬时振幅 $a_j(t) = \sqrt{c_j^2(t) + y_j^2(t)}$ 和瞬时相位 $\theta_j(t) = \arctan[y_j(t)/c_j(t)]$, Hilbert 变换的物理含义是,通过一正弦曲线的频率和幅值调制以获得对信号局部的最佳逼近。根据瞬时频率的定义,每个 IMF 的瞬时频率为: $\omega_j(t) = d\theta_j(t)/dt$ 。从而原始数据序列可表示为如下形式(在此略去了残余项 $r_n(t)$,因为它只是一个单调函数(表示数据的总趋势)或是一个常数; $\text{Re}[\cdot]$ 表示取实部):

$$x(t) = \text{Re} \left[\sum_{j=1}^n a_j(t) e^{j \int \omega_j(\tau) d\tau} \right] \quad (4)$$

(4)式反映了信号幅值、时间和瞬时频率之间的关系。各 IMF 分量以时间—频率一幅值图的形式表现在灰度级数图上,即为 Hilbert 谱——信号的幅值表示为时间和瞬时频率的函数 $H(\omega, t)$,幅度大小用像点明暗表示,点越亮幅度越大;点越暗幅度越小。

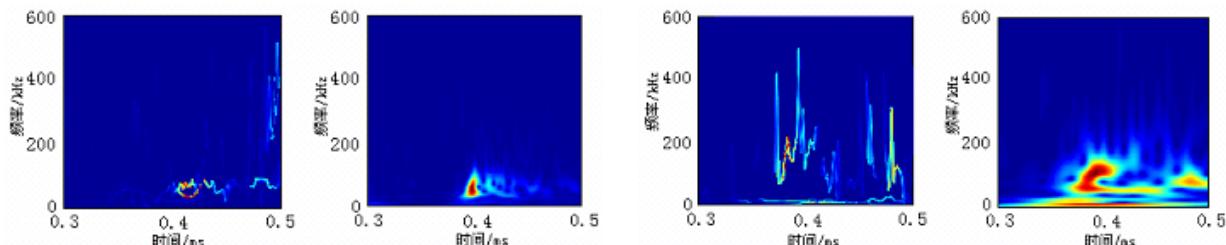


图 5 OAET1 的 Hilbert 谱与小波谱

Fig. 5 Hilbert spectrum and wavelet scalogram of OAET1

图 6 OAET2 的 Hilbert 谱与小波谱

Fig. 6 Hilbert spectrum and wavelet scalogram of OAET2

图 5(a)与图 6(a)所示是 0.3~0.5ms 间 AE 信号的 Hilbert 谱。可见,各 IMF 的频率不是一个定常数,而是围绕中心频率波动,且频率越高波动幅度越大,但波动范围有限,且相互间少有交叉重叠现象。该 AE 信号能量、频率主要分布在前两阶 IMF 上,瞬时频率从高到低分布范围很大,这反映了信号在结构特征复杂的混凝土材料中传播多有变化。而 OAET2 的 Hilbert 谱图中频率、幅值随时间的波动明显比 OAET1 的 Hilbert 谱图中频率、幅值随时间波动的大,这是由于高频信号衰减快,且 AE 信号在混凝土材料中传播能量衰减很快造成的(模拟 AE 源到 OAET1 的距离为其到 OAET2 距离两倍多),与实际情况相符。图 5、图 6(b)所示是基于 Gabor 小波变换的谱图,通过比较容易发现 Hilbert 谱清晰度高的优点,这是因为 Hilbert-Huang 谱分析中表示了瞬时频率的原因。

综合以上过程:各 IMF 分量包含了不同时间特征尺度,可用不同分辨率显示信号特征,且这种分辨率是自适应的,相对于小波的多分辨率分析,分辨力更高。而对于不同时间区段内傅氏功率谱不同的非平稳信号,Hilbert 谱可以清楚地刻画出瞬时频率与瞬时振幅(能量)的变化情况。HHT 是一种新的有效的处理非平稳非线性信号的时频分析方法。

4 结论

本文用 OAET 元件作为 AE 检测的传感器,将 HHT 技术应用到混凝土 AE 信号分析处理中,进行了初步研究并得到了以下结论:

(1) 具有横观各向异性特性的 OAET 传感元件能够很好地降低侧面信号的干扰,便于拾取目标信号,有较大的工程应用价值。

(2) AE 信号具有显著的随机性和复杂性,但 HHT 能很好地找出其随机变化范围和信号中相对主要的成分,且是自适应的。借助 IMF 的滤波(称为时间尺度滤波)能够解决传统频域滤波方法在处理非线性和非平稳信号时遇到的困难。

(3) 通过对基于 EMD 得到的各阶 IMF 的线性的 Hilbert 变换容易得到信号的瞬时幅度和瞬时频率,即得到信号的瞬时特性,可以很好地表征信号的局部特征。

参考文献:

- [1] 袁振明,马羽宽,何泽云. 声发射技术及其应用[M]. 北京:机械工业出版社,1985:1~4(Yuan Zhenming, Ma Yukuan, He Zeyuan. Acoustic emission technique and its application. Beijing: China Machine Press, 1985:1~4(in Chinese))
- [2] 耿荣生,沈功田,刘时风. 声发射信号处理和分析技术[J]. 无损检测,2002,24(1):23~28(Geng Rongsheng, Shen Gongtian, Liu Shifeng. Acoustic emission signal processing and analysis technique. Journal of Nondestructive Testing, 2002, 24(1):23~28(in Chinese))
- [3] Norden E. Huang, Zheng Shen. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proc Royal Society of London Series, 1998, 454:903~995.
- [4] Peng Z K, Peter W. Tse, Chu F L. A comparison study of improved Hilbert-Huang transform and wavelet transform: Application to fault diagnosis for rolling bearing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2005, 19:974~988.
- [5] Hongbo Xie, Zhizhong Wang. Mean frequency derived via Hilbert-Huang transform with application to fatigue EMG signal analysis[J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2006, 82:114~120.
- [6] Luo Ying, Tao Baoqi. The OPCM strain gauges for strain and stress measurement of orthotropic material structures [J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2000, 13(4):337~345.

New Damage Identification Method of AE Source in Concrete Structure Based on OAET

LIU Hong-guang, LUO Ying, LI Zhong-fang, GU Jian-zu

(Faculty of science, Jiangsu University, Zhengjiang 212013, China)

Abstract: The sensor of Orthotropic Acoustic Emission Wave Transducer is used to obtain the directional AE signal in order to deal with the complicated AE signal produced in concrete. Hilbert-Huang transform is applied in the signal processing. The complicated original data set is decomposed into a finite series of intrinsic mode function (IMF) and a residue by the empirical mode decomposition (EMD). The signal amplitudes and instantaneous frequency as function of time can be gained by using Hilbert transform to the IMF components. The damage identification method based on amplitudes and instantaneous frequency is discussed, and a new method for concrete AE signal processing and damage identification is proposed. It will be helpful for the development, popularization and application of AE signal.

Keywords: AE; Orthotropic acoustic emission transducer; Hilbert-Huang transform; damage identification; concrete