

基于 Gabor 小波和阈值分析的声发射源定位方法

张 萍, 朱 佳

(山东省商业职业技术学院 信息技术学院, 山东 济南 250103)

摘 要:针对声发射信号多模态特性和信噪比低的特点,提出了一种将小波变换和阈值分析相结合的声发射源定位方法。对采集到的声发射信号进行信号频谱分析,提取信号主要频率成分之一的小波变换幅值,得到含有多峰值的时域波形。为消除多峰值的影响,将小波变换最大幅值的 80% 设为阈值。在时频空间下,确定声发射信号中同一频率下同种模态的波到达传感器的时间差,并测量该模态波在板面传播的群速度,实现声发射源定位。在大理石板上进行声发射两点定位实验,结果证实该方法的确能提高声发射源定位精度,是一种有效的声发射源定位方法。

关键词:计量学;声发射;时差定位;小波变换;阈值分析

中图分类号:TN253;TU311.41;TB95 **文献标识码:**A

A Novel Acoustic Emission Source Localization Algorithm Based on Gabor Wavelet Transform and Threshold Analysis

ZHANG Ping, ZHU Jia

(School of Information technology, Shandong Vocational Institute of Commerce and Technology, Jinan 250103, China)

Abstract: A novel AE (acoustic emission) source localization algorithm by combining wavelet transform and threshold analysis together is presented aiming at the features of AE signals' multi-modes and low SNR (signal noise ratio). The signal spectral analysis of the collected acoustic emission signals is carried out to extract the wavelet transforms amplitude which is one of the main frequency components, and the time-domain waveform containing multiple peaks is gotten. 80% of the maximum amplitude of the wavelet transforms is set as the threshold to eliminate the influence of the multiple peaks. Thus, through getting the time difference of the same wave mode under the same frequency of the AE signal arriving different sensors the time difference of the AE signal arriving different sensors is achieved. After measuring the group velocity of the wave mode, AE source localization is realized. Experiments of the location of AE source between two points on a marble slab are carried out. Results show that the method is an effective method for locating the AE source and can improve the accuracy of AE source localization.

Key words: metrology; acoustic emission; time difference localization method; wavelet transform; threshold analysis

0 引言

声发射技术是根据材料或结构内部发出的应力波来判断结构内部损伤程度的一种动态无损检测方法,声源位置的判定是声发射检测的主要任务之一,其位置的判定对进一步的损伤评估和及时修复工作具有重要的意义。目前在声发射源定位中普遍采用时差定位法,通过确定同一声源信号到达不同传感器的时差来确定声源位置^[1]。

基于模态声发射理论,声发射信号是多频多模式波,每单一频率成分的声发射信号中包含多种模态波,不同模态的波在同一频率下波速不同,同一模态的波在不同频率下波速也不同。此外,声发射信

号在传播过程中的反射、折射及在材料界面、耦合剂和传感器接触处发生波形转换及环境和系统噪声等原因都可使获取的声发射信号更复杂。小波分析法通过提取声发射信号中单一频率或某一窄带频段的信号,根据该频段下同种模态波到达不同传感器的时间确定时差^[2]。但在实际检测中,由于单一频段下的声发射信号成分仍含有多种模态波且混合各种噪声,小波变换的结果会出现多个峰值,从而获取多个波达时间,难以分辨同种模态的波在单一频率下到达传感器的时刻。阈值法也是常用的时差定位法之一。在阈值分析法中,根据材料特性及经验数值

收稿日期:2014-01-02

作者简介:张萍(1983-),女,山东东营人,硕士,讲师,主要从事声发射检测技术和信号处理技术的研究。E-mail: sictzhangping@163.com。

预先设定阈值,将信号跨过阈值对应的时刻作为声发射信号达到传感器的时间。此种方法虽简便易行,但当信噪比较低时,所设阈值稍有偏差便会引起很大误差^[3]。

考虑声发射信号多模态特性及信噪比不高的特点,提出了一种将小波变换和阈值分析法相结合的时差定位方法。利用 Gabor 小波变换提取出声发射信号某单一频段的信号,根据 Gabor 小波变换结果设置声发射信号中某一特定模态波的阈值,将小波变换结果跨过该阈值的第一个峰值所对应的时刻作为该模态波到达传感器的时刻。实验结果表明,这一方法可有效确定声发射信号到达不同传感器的时差,解决了声发射信号信噪比较低及小波变换结果出现多峰值结果带来的问题。

1 定位算法

1.1 基于 Gabor 函数的小波变换

设有小波序列

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (1)$$

且 $\psi(t) \in L^2(R)$, 其傅里叶变换 $\hat{\psi}(\omega)$ 满足容许性条件 $\int_{-\infty}^{\infty} |\omega|^{-1} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty$ 。

式中: $a, b \in R$, a 为伸缩因子, 且 $a \neq 0$; b 为平移因子, $\psi(t)$ 为母小波。则定义

$$(Wf)(b, a) = |a|^{-1/2} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (2)$$

为关于基小波 $\psi_{a,b}(t)$ 的连续小波变换。其中, $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$ 为对 $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 取共轭。

由于 Gabor 函数具有最佳时频分辨率, 且已被多次证实在分辨 AE 信号的模态波时具有较好的效果^[4-6], 在此选用 Gabor 小波作为母小波。Gabor 函数可表达为

$$\psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\omega_0}{\gamma}\right)^2}{2} t^2\right] \exp(i\omega_0 t) \quad (3)$$

其傅里叶变换为

$$\hat{\psi}_g(\omega) = \frac{\sqrt{2\pi}}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\gamma}{\omega_0}} \exp\left[-\frac{\left(\frac{\gamma}{\omega_0}\right)^2}{2} (\omega - \omega_0)^2\right] \quad (4)$$

其中, 设 $\gamma = \pi \sqrt{2/\ln 2} \approx 5.336$, 可使 Gabor 函数满足实际使用条件。

Gabor 函数可看作中心在 $t=0$ 处的高斯窗函

数, 其傅里叶变换可看作中心在 $\omega = \omega_0$ 的窗函数。这样, $\psi_g[(t-b)/a]$ 可看作中心在 $t=b$ 处的窗函数, 其傅里叶变换 $[a \exp(-ib\omega) \hat{\psi}_g(a\omega)]$ 可看作中心在 $\omega = \omega_0/a$ 处的窗函数。因此, 基于 Gabor 函数的连续小波变换就表达了函数 $f(t)$ 在 $t=b$ 及 $\omega = \omega_0/a$ 处的时频特性。设定 $\omega_0 = 2\pi$, 则 $1/a = \omega/2\pi = f$ 。

假设平板中沿 x 方向传播的某单位幅度声发射信号由 ω_1, ω_2 两种频率成分组成, ω_1, ω_2 有微小差别, 则该信号为

$$u(x, t) = e^{-i(k_1 x - \omega_1 t)} + e^{-i(k_2 x - \omega_2 t)} \quad (5)$$

式中 k_1, k_2 分别为在 ω_1, ω_2 频率下该模态导波的波数, 引入:

$$(k_1 + k_2)/2 = k_c \quad (6)$$

$$(\omega_1 + \omega_2)/2 = \omega_c \quad (7)$$

$$(k_1 - k_2)/2 = \Delta k \quad (8)$$

$$(\omega_1 - \omega_2)k = \Delta\omega \quad (9)$$

则式(6)~(9)可写成:

$$u(x, t) = 2 \cos(\Delta k x - \Delta\omega t) e^{-i(k_c x - \omega_c t)} \quad (10)$$

由式(10)看出, 声发射信号包括指数和 $\cos$ 项两部分。其中, 指数部分为以相速度 $c_p = \omega_c/k_c$ 传播的载波; 当 $\Delta k \rightarrow 0$ 时, $\cos$ 项为以群速度 $c_g = d\omega/dk$ 传播的调制信号。在声发射源定位研究中, 由于需确定的是波群在板面传播过程中到达传感器的时刻, 因此声发射波的传播速度即为此处的群波速。

该声发射信号的连续小波变换为

$$(Wu)(x, a, b) = \sqrt{a} \{ e^{-i(k_1 x - \omega_1 b)} \overline{\hat{\psi}(a\omega_1)} + e^{-i(k_2 x - \omega_2 b)} \overline{\hat{\psi}(a\omega_2)} \} \quad (11)$$

其连续小波变换的幅值为

$$|(Wu)(x, a, b)| = \sqrt{a} \{ [\hat{\psi}_g(a\omega_1)]^2 + [\hat{\psi}_g(a\omega_2)]^2 + 2\hat{\psi}_g(a\omega_1)\hat{\psi}_g(a\omega_2) \cos(2\Delta k x - 2\Delta\omega b) \}^{1/2} \quad (12)$$

若 $\Delta\omega$ 足够小, 可得到

$$\hat{\psi}_g(a\omega_1) \approx \hat{\psi}_g(a\omega_2) \approx \hat{\psi}_g(a\omega_c) \quad (13)$$

则该声发射信号连续小波变换的幅值可表示为

$$|(Wu)(x, a, b)| \approx \sqrt{2a} |\hat{\psi}_g(a\omega_c)| [1 + \cos(2\Delta k x - 2\Delta\omega b)]^{1/2} \quad (14)$$

当 $a = \omega_0/\omega_c$ 且 $b = (\Delta k/\Delta\omega) x = x/c_g$ 时, $|(Wu)(x, a, b)|$ 取得极大值。此时, 信号 $u(x, t)$ 中同尺度 a 对应的频率成分与 $\psi_g(t)$ 最相似, 此时的 b 值就对应于信号 $u(x, t)$ 到达传感器的时间^[7-8]。

1.2 阈值分析法

基于以上原理,对声发射源信号作 Gabor 小波变换处理后,提取出尺度 a 对应的频率成分,找出该频率成分下小波变换幅值中的极大值,该极大值对应的时刻就是该频率下信号达到传感器的时刻。但在实际检测中,往往会得到多个极大值点。这主要由以下两个原因造成:

1) 单一频率下的声发射信号仍含有不同模态的波,每种模态的波到达传感器时都会引起对应小波变换幅值中的一个峰值,且当不同模态的波到达传感器的时差较小时,二者引起的峰值可能重叠,难以分辨。

2) 由于波在板面的反射、叠加等原因,声发射信号达到传感器后可能会产生多个峰值。为了在多个极大值点中选取合适对应的点,以保证准确识别同一模态的波到达不同传感器的时间,引入阈值分析法滤除其他不合适的极值点。

在绝大多数 AE 检测情况下,仅有最低阶模式 S_0 和 A_0 存在。 S_0 是零阶对称波,又称为伸缩波, A_0 是反对称波,又称为弯曲波^[9-10]。在低频段, S_0 模态波的波速比 A_0 的波速快,衰减快,幅值小; A_0 模态波波速较慢,衰减小,幅值大。在此,选用 A_0 模态波到达传感器的时间作为声发射信号到达传感器的时间。通过引入阈值法,即将信号小波变换幅值的某一阈值设为信号在该频率下 A_0 模态波的幅值阈值,得到不同通道信号的 A_0 模态波到达传感器的时间。

1.3 算法实现

实验构件选择尺寸为 $700\text{ mm} \times 700\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ 的大理石板,采用美国 PAC 公司的差分式宽带声发射传感器(WD, $125 \sim 1\,000\text{ kHz}$)采集声发射信号,经过 Mistras2/4/6 前置放大器对信号进行 40 dB 放大,然后对信号进行模拟带通滤波、高速采样和 A/D 转换,并将结果存储为实验数据。按照国家标准 GB/T18182-2000 要求,采用断铅信号作为模拟声发射信号,即采用直径 $\varnothing 0.5\text{ mm}$,硬度为 HB 的铅笔芯,铅笔芯伸长 2.5 mm,与构件表面成 30° 夹角折断。为分析声发射源不同距离的信号特征,选择 2 个传感器分别置于断铅点的近点和远点。将传感器 1 置于距断铅点 60 mm(近点),传感器 2 置于距断铅点 400 mm(远点)。图 1 为传感器 1 采集到的声发射信号及其傅里叶变换。图 2 为传感器

2 采集到的声发射信号及其傅里叶变换。

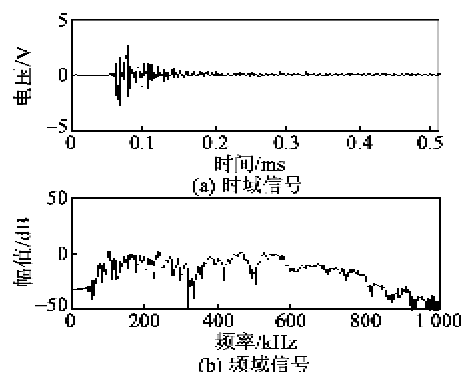


图 1 传感器 1 声发射信号

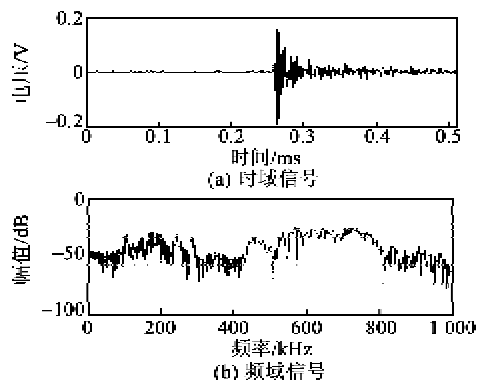


图 2 传感器 2 声发射信号

由图 1(b)和图 2(b)可知,100 kHz 是该声发射信号主要频率成分之一。对这两列声发射信号分别作小波变换(见图 3、4),并分别提取其中 100 kHz 小波变换幅值(见图 5、6)。

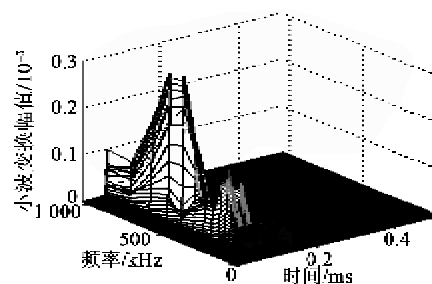


图 3 传感器 1 的信号小波变换时间-频率-幅值图

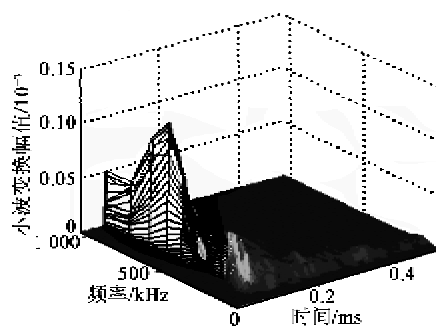


图 4 传感器 2 的信号小波变换时间-频率-幅值图

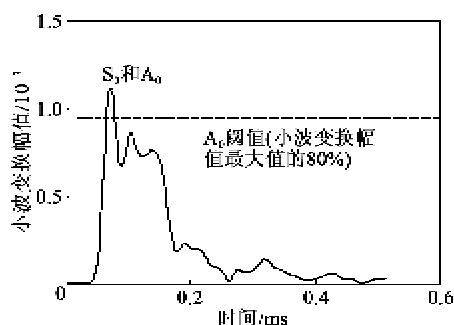


图5 传感器1的100 kHz信号小波变换幅值图

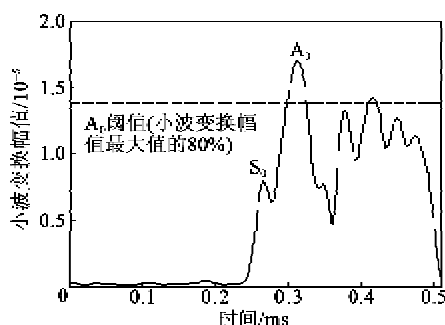


图6 传感器2的100 kHz信号小波变换幅值图

图5中,由于传感器距声发射源较近, S_0 模态的波和 A_0 模态的波到达传感器的时间差很小,2个峰值几乎重叠。图6中,由于声发射传感器距声发射源较远, S_0 模态波先到达传感器,经过一段明显时间间隔后, A_0 模态波才到达传感器,且 A_0 模态波的峰值明显大于 S_0 模态波的峰值。

通过实验测得,在实验室环境下,将阈值设为小波变换结果最大幅值的80%能较稳定地滤除 S_0 模态波的峰值及由于波形反射、噪声影响等其他干扰带来的多重峰值影响。因此,将声发射信号中100 kHz频率分量小波变换幅值最大值的80%作为阈值,则超过阈值的第一个峰值所对应的时刻100 kHz声发射信号 A_0 模态的波到达传感器的时间,如图5、6所示,也即信号到达声发射传感器的时间。获得信号到达不同声发射传感器的时差后,通过测定 A_0 模态波在100 kHz下的波速,即可准确对声发射源进行定位。

可见,通过基于Gabor函数的小波变换及阈值分析法结合,可快速准确地获取声发射信号波达时间,进而确定时差并根据波速进行声发射源定位,能有效避免以往因错误选取极值点带来的定位误差。

2 实验和分析

为进一步检验基于Gabor小波变换和阈值分析在声发射源信号定位中的效果,在尺寸为

700 mm×700 mm×5 mm的大理石板上,设传感器1的坐标原点为(0,0),传感器2的坐标原点为(600,0),两个传感器相距600 mm。

首先确定声发射信号 A_0 模态波在实验所用大理石板上100 kHz时的群速度。在(230,0)处做10次断铅实验。将所得数据用小波变换和阈值分析结合法进行处理,得到10组断铅信号时差的平均值为 -5.96×10^{-5} s,则声发射信号在大理石板上传播的群波速为

$$\frac{0.2-0.4}{-5.96 \times 10^{-5}} = 3\,355.7 \text{ m/s.}$$

选择坐标点(230,0)进行定位实验,在该点进行100次断铅激励,利用基于小波变换的阈值分析法获取时差,并结合波速进行线定位。统计实验结果可得,有86组实验定位结果误差在10 mm以内。其他14组实验中,有9组定位结果误差在20 mm以内,余下5组实验误差在30 mm以内。误差原因主要有:

1) 由于所设阈值为小波变换幅值最大值的80%,部分实验中,声发射信号 A_0 模态波第一个波峰峰值在所设阈值下,被错误滤除(共出现在8组实验中)。

2) 部分实验中,由于噪声较大,在 A_0 模态波的第一个峰值到达之前信号小波变换幅值已越过所设阈值,从而引起错误定位(共出现在6组实验中)。

3 结束语

在分析基于Gabor小波的小波变换声发射源定位法的基础上提出了一种基于Gabor小波变换的阈值声发射定位方法。采用断铅作为声发射信号源,通过2个传感器采集了声发射源在不同位置的声发射信号,采用基于Gabor小波变换的阈值算法求出声源到两个传感器的时间差,结合声发射信号在大理石板中传播的速度计算出声源的位置,并对误差原因进行了具体分析。线定位实验结果表明采用基于Gabor小波变换的阈值法能够对声发射源进行较精确的定位,为利用声发射技术实现材料或结构早期缺陷提供了理论和实验基础。

参考文献:

- [1] 龚仁荣,顾建祖,骆英,等. Gabor小波时频分析在声发射信号处理中的应用[J]. 中国测试技术, 2006, 32(1): 76-79.
- GONG Renrong, GU Jianzu, LUO Ying, et al. Application of Gabor wavelet time-frequency analysis in signal processing of acoustic emission[J]. China Measurement Technology, 2006, 32(1): 76-79.

(下转第537页)