

基于局域波近似熵的声发射信号处理

林 丽*, 赵 德 有

(大连理工大学 船舶工程学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 将近期发展的局域波法和近似熵法相结合应用于声发射信号的特征提取中. 首先, 将声发射信号进行局域波分解, 得到自适应的基本模式分量; 然后对各基本模式分量计算近似熵, 描述各基本模式分量的复杂程度, 监测声发射信号的发生和发展, 量化声发射信号的特征. 通过预制裂纹钢管静载实验, 分析计算了钢管裂纹声发射信号的各基本模式分量的近似熵, 表明局域波法与近似熵相结合的方法可以有效地提取声发射信号的特征, 从而为声发射信号特征提取提供了一种新方法.

关键词: 局域波; 近似熵; 声发射; 信号处理

中图分类号: TH7 **文献标志码:** A

0 引 言

材料中局域源快速释放能量产生瞬态弹性波的现象称为声发射(acoustic emission, AE)^[1]. 所测得的声发射信号波形由于介质的传播特性和传感器频响特性之影响而变得非常复杂, 实际结构中, 波的衰减机制很复杂, 难以用理论计算. 并且声发射源信号具有多样性、突发性、不确定性. 从而, 声发射信号在检测过程中, 其动力学特性往往呈现出复杂性和非线性, 检测到的声发射信号具有非平稳性和时变性. 声发射信号处理是识别声发射源性质的必要途径.

局域波时频分析方法是一种新的具有自适应的广义时频分析方法, 它是在 1998 年美国学者 Huang 等^[2]提出的基于经验模式分解方法的基础上由马孝江等^[3]发展起来的, 目的是对非线性、非平稳时变信号进行正确的描述. 1991 年由 Pincus 提出的近似熵(approximate entropy, ApEn)非线性动力学参数分析方法^[4]是用一个非负数来表示一个时间序列的复杂性, 具有计算所需数据短、抗噪及抗野点能力强的特点.

本文提出将局域波时频分析方法与近似熵分析方法相结合用于分析复杂的声发射信号, 以期

为声发射信号处理提供一种有效的新方法.

1 局域波法基本原理

局域波法^[3]源于瞬时频率的概念. 它能把动态信号的局部特征正确地在时频域内予以描述. 瞬时频率对于研究瞬态和非平稳现象非常重要, 能够反映非平稳信号的时变性. 为了使瞬时频率变得有意义, 把复杂的非平稳随机信号分解成有限个基本模式分量, 从而把动态信号的局部特征正确地在时频域内予以描述, 这些基本模式分量称为内蕴模式函数. 它满足如下条件:

(a) 在整个数据序列中, 极值点的数量与过零点的数量必须相等, 或最多相差不能多于一个;

(b) 在任何时间点上, 被它的局部最大值与局部最小值定义的包络的均值必须是零.

对于一时间信号 $X(t)$, 其局域波法分解步骤如下:

(1) 提取信号 $X(t)$ 的极大值点和极小值点 $\max(t)$ 、 $\min(t)$, $t \in [0, T]$;

(2) 用三次样条插值法求取信号的上下包络 $e_{\max}(t)$ 、 $e_{\min}(t)$;

(3) 计算局部均值 $m(t) = (e_{\max}(t) + e_{\min}(t))/2$;

(4) 提取基本模式分量 $h(t) = X(t) - m(t)$;

(5) 对 $m(t)$ 重复以上操作.

在实际操作中,需要经过几次均值提取才可以得到一个基本模式分量,即把第一次提取的 h_1 看做待处理数据:

$$h_1 - m_{11} = h_{11}$$

重复步骤(1)~(4) k 次

$$h_{1(k-1)} - m_{1k} = h_{1k}$$

直到满足一定的终止标准后,得到第一个基本模式分量 C_1 ,

$$C_1 = h_{1k}$$

把 C_1 从原始信号中分离出来,

$$X(t) - C_1 = r_1$$

把 r_1 当做新的待处理数据进行处理,余下类推:

$$r_1 - C_2 = r_2$$

$$r_2 - C_3 = r_3$$

$$\vdots$$

$$r_{n-1} - C_n = r_n$$

当极值点数(极大值点数与极小值点数之和)不多于两个时,停止分解,此时认为 r_n 已不可再分.最后得

$$X(t) = \sum_{i=1}^n C_i(t) + r_n(t) \quad (1)$$

于是,把原始数据分解成 n 个基本模式分量 $C_i(t)$ 及一个剩余分量 r_n ,该剩余分量或者是一个平均趋势或者是一个常数.并对每个基本模式分量 $C_i(t)$ 进行 Hilbert 变换,得到

$$X(t) = \sum_{i=1}^n A_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (2)$$

然后计算出每个基本模式分量对应的瞬时频率.最后把原始信号的幅度在 Hilbert 空间中表示为时间与瞬时频率的函数 $J(\omega, t)$,则 $J(\omega, t)$ 称为局域波时频函数,其数学表达式为

$$J(\omega, t) = \sum_{i=1}^n b_i A_i(t) e^{j\omega_i(t)t} \quad (3)$$

局域波法把信号分解成满足条件的基本内蕴模式函数分量,从信号分解基函数的理论角度来说,内蕴模式函数作为局域波法信号分析的基函数是不固定的,对于不同的信号具有不同的内蕴模式函数,且是自适应的.它完全不同于由一系列恒定幅度与恒定频率的正余弦波组成的傅里叶分析基函数.

2 近似熵基本原理

设采集到的原始数据为 $x(1), x(2), \dots,$

$x(N)$,共 N 点数据^[4,5].

(1) 按序号连续顺序组成一组 m 维矢量:

$$\mathbf{X}(i) = (x(i) \ x(i+1) \ \cdots \ x(i+m-1));$$

$$i = 1, 2, \dots, (N-m+1) \quad (4)$$

(2) 定义 $\mathbf{X}(i)$ 与 $\mathbf{X}(j)$ 间的距离 $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)]$ 为两者对应元素中差值最大的一个,即

$$d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] = \max_{k=0,1,\dots,(m-1)} [|x(i+k) - x(j+k)|] \quad (5)$$

(此时 $\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)$ 中其他对应元素间差值自然都小于 d).并对每一个 i 计算 $\mathbf{X}(i)$ 与其余矢量 $\mathbf{X}(j)$ ($j = 1, 2, \dots, (N-m+1)$,但 $j \neq i$) 间的距离 $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)]$.

(3) 给定阈值 r ,对每一个 i 统计 $d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)]$ 小于 r 的数目及此数目与距离总数 $N-m$ 的比值,记做 $C_i^m(r)$.即

$$C_i^m(r) = \frac{1}{N-m} \{ [d[\mathbf{X}(i), \mathbf{X}(j)] < r] \text{ 的数目} \};$$

$$i = 1, 2, \dots, (N-m+1) \quad (6)$$

(4) 先将 $C_i^m(r)$ 取对数,再求其对所有 i 的平均值,记做 $\phi^m(r)$,即

$$\phi^m(r) = \frac{1}{N-m+1} \sum_{i=1}^{N-m+1} \ln C_i^m(r) \quad (7)$$

(5) 再把维数加 1,变成 $m+1$,重复步骤(1)~(4),得 $C_i^{m+1}(r)$ 和 $\phi^{m+1}(r)$.

(6) 理论上此序列的近似熵为

$$ApEn(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} [\phi^m(r) - \phi^{m+1}(r)] \quad (8)$$

一般言之,此极限以概率 1 存在^[6].实际工作时 N 不可能为 ∞ .当 N 为有限值时按上述步骤得出的是序列长度为 N 时 $ApEn$ 的估计值,记做

$$ApEn(m, r, N) = \phi^m(r) - \phi^{m+1}(r) \quad (9)$$

$ApEn$ 的值显然与 m, r 的取值有关. Pincus 根据实践,建议取 $m = 2, r = (0.1 \sim 0.2)SD_x$ (SD_x 是原始数据 $x(i), i = 1, 2, \dots, N$ 的标准差).

近似熵^[7]有较好的抗瞬态干扰能力;包含时间模式的信息,反映时间新模式发生率随维数而增减的情况,因而反映数据在结构上的复杂性;对随机过程和确定性过程都适用;只用较短的数据可以得到稳健的估计.

3 声发射检测系统

实验示意图如图 1 所示.

实验材料:钢管直径 50 mm,长 2 000 mm,静力加载为压铁(每块 10 kg)及尼龙绳,钢管两端支撑用的三角形钢架简化为简支梁(见图 1),管

与支撑间加橡皮,以防摩擦产生噪音。

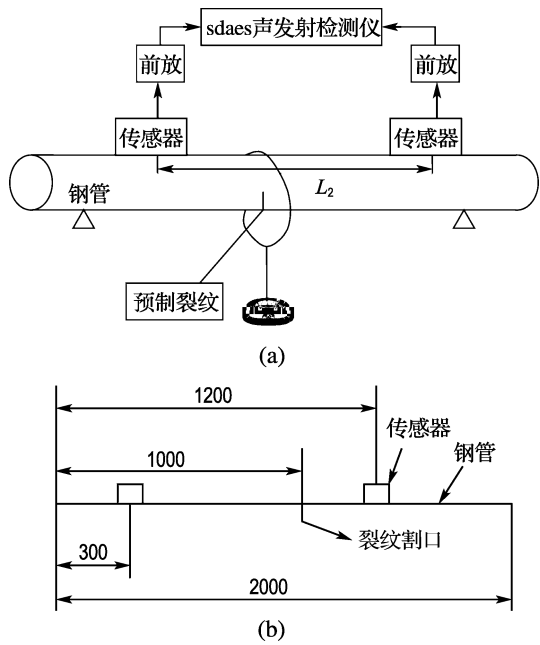


图1 实验示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental set-up

预制裂纹位置:如图1(a)所示,在钢管的支撑点之跨中位置沿圆管周向预制裂纹割口,然后与管轴线垂直向下施加静荷载。

采集设备:采用北京声华兴业科技有限公司的 sdaes 数字声发射检测仪,包括谐振频率为 150 kHz 的 SR150A 传感器、PAI 前置放大器、SDAE-5 采集卡,设定采样频率 2.5 MHz,采样点数 2 048,前置放大器增益为 40 dB,主放大器增益为 0 dB,实验设定阈值值为 40 dB。

实验环境:在半消声室进行,本底噪声小于 20 dBA,噪声不强烈。

实验过程:将传感器一个(1号)放在距钢管一边 300 mm 处,另一个(2号)放在 1 200 mm 处,裂纹割口在 1 000 mm 处,位置如图1(b)所示。在裂纹处用尼龙绳吊一铁盒(质量约 15 kg),将压铁(每块 10 kg)一个个缓慢放入铁盒,直至钢管预制裂纹位置处发生裂纹扩展,发生声发射为止。

4 声发射信号的局域波分解和近似熵计算分析

本次实验对钢管预制裂纹加载,获得的信号如图2所示。图2(a)为声发射信号前的波形 A1,图2(b)为声发射时的信号 AE2,图2(c)为声发射

信号衰减波形 AE3,图2(d)为声发射信号继续衰减波形 AE4。分别对这些信号进行局域波分解,计算结果如图3~6所示。

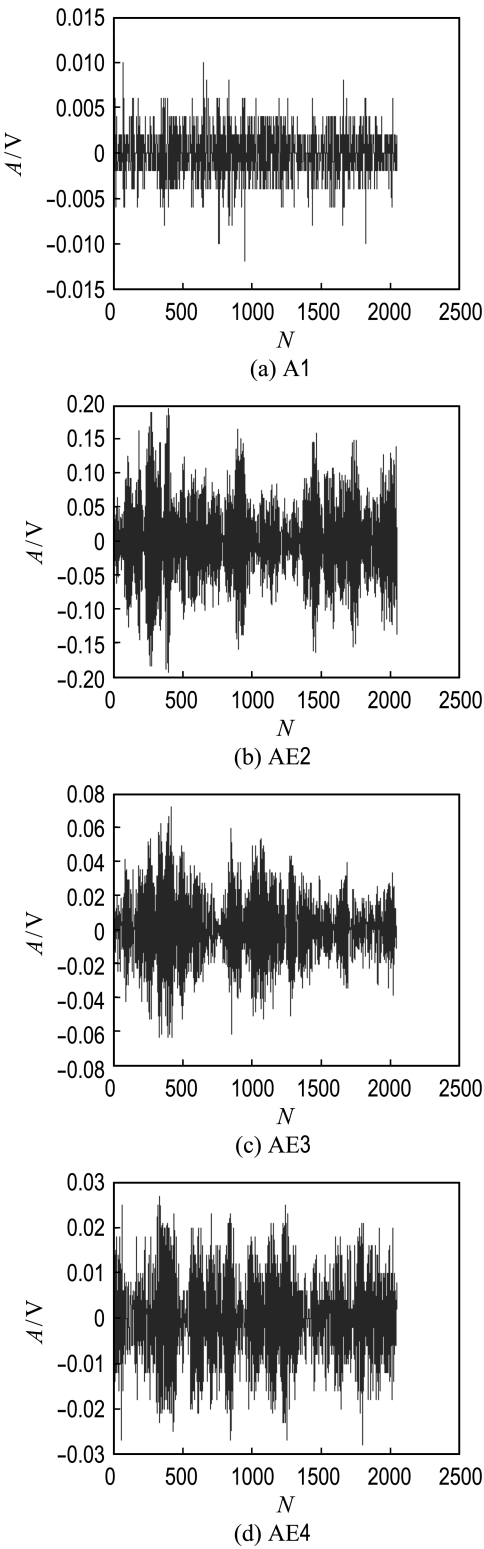


图2 信号波形

Fig. 2 Signal waveforms

信号 A1 局域波^[8]分解后为 10 个基本模式分量及 1 个剩余分量,信号 AE2 局域波分解后为 8 个基本模式分量及 1 个剩余分量,信号 AE3 局域波分解后为 8 个基本模式分量及 1 个剩余分量,信号 AE4 局域波分解后为 9 个基本模式分量及 1 个剩余分量. 为了便于近似熵^[9]计算分析比

较,取每个信号的前 5 个基本模式分量,其余分量相加为第 6 个分量. 将信号 A1、AE2、AE3、AE4 的基本模式分量分别进行近似熵计算,结果如表 1 所示. 其中 C1~C5 为基本模式分量,C6 为其余基本模式分量及剩余分量的叠加. 表 1 中也给出了进行局域波分解之前各原信号的近似熵值.

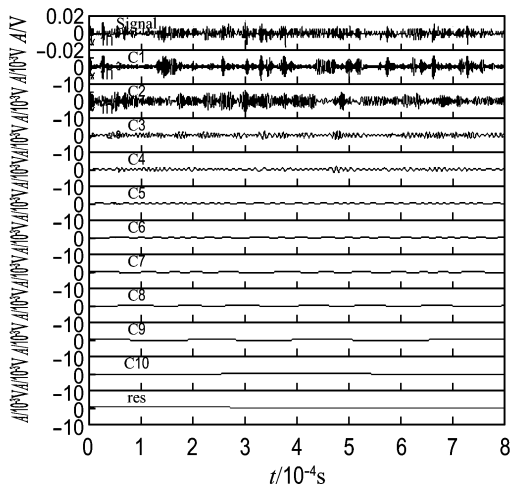


图 3 信号 A1 局域波分解

Fig. 3 Local wave decomposition of signal A1

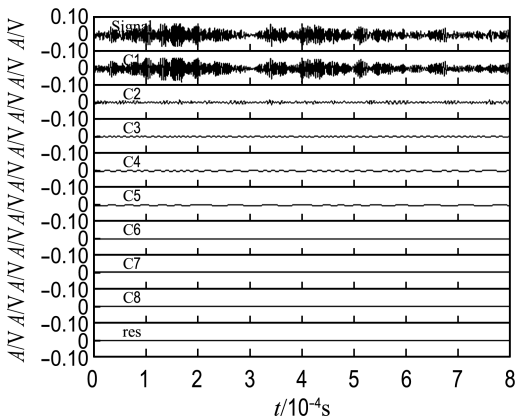


图 5 信号 AE3 局域波分解

Fig. 5 Local wave decomposition of signal AE3

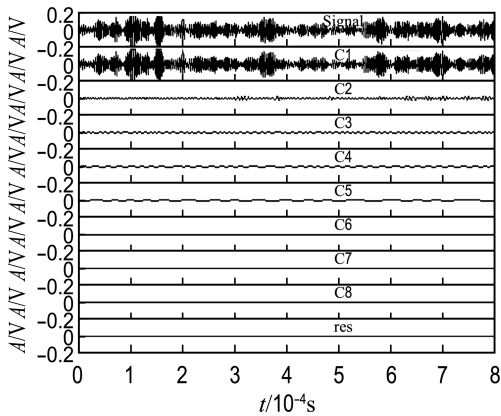


图 4 信号 AE2 局域波分解

Fig. 4 Local wave decomposition of signal AE2

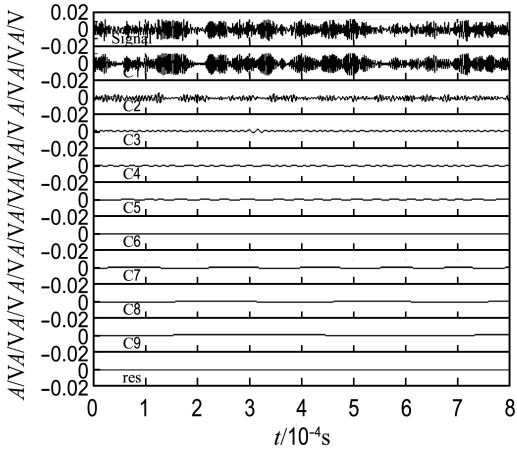


图 6 信号 AE4 局域波分解

Fig. 6 Local wave decomposition of signal AE4

表 1 声发射信号及各基本模式分量近似熵

Tab. 1 ApEn values of the AE and IMFs

信号	原信号	C1	C2	C3	C4	C5	C6
A1	1.025 7	1.132 9	0.824 9	0.629 7	0.606 4	0.500 8	0.151 4
AE2	0.526 8	0.496 7	0.606 3	0.593 7	0.466 6	0.180 6	0.053 9
AE3	0.566 6	0.551 0	0.617 9	0.617 0	0.458 3	0.200 0	0.063 1
AE4	1.019 2	0.692 4	0.638 0	0.593 5	0.447 6	0.249 0	0.088 3

如表 1 所示, A1 信号的近似熵大于其他信号的近似熵, A1 信号的基本模式分量的近似熵也大于其余信号基本模式分量的近似熵, 其中基本模式分量 C1 的近似熵差值最大, AE2、AE3、AE4 的近似熵逐渐增大, 基本模式分量 C1 的近似熵变化也是最明显的. 观察表中数据还会发现, AE4 与 A1 原信号的近似熵差别不大, 但各基本模式分量的近似熵却有明显差别, 特别是在基本模式分量 C1 处的近似熵有很大的不同.

为了更清楚寻找不同的原因, 对这些信号的基本模式分量 C1 进行局域波时频谱分析. 各信号的基本模式分量 C1 的局域波时频谱如图 7 所示.

从图 7(a)~(d)中可以看出 AE2、AE3、AE4 信号的基本模式分量 C1 集中在 300 kHz 左右, 而 A1 信号频率分布较分散, 并且 A1 信号正好出现在信号 AE2 之前, 说明 AE2 处出现了突发的声发射信号且频率较集中, 在 300 kHz 左右, 声发射信号的出现引起了近似熵的下降, 明显表现在 C1 分量处; 随着声发射信号的衰减, 从 AE2、AE3、AE4 波形图上可看到明显的幅值衰减, 各基本模式分量 C1 处的局域波时频谱图有少许衰减, 不很明显, 但是经过局域波分解后, AE2、AE3、AE4 的基本模式分量 C1 近似熵逐渐增加, 表现明显, 描述了声发射信号在特征频带的衰减; 尽管 A1 与 AE4 原信号的近似熵值相近, 但 AE4 的 C1 近似熵明显小于 A1 的 C1 近似熵, 区分了声发射衰减信号与无声发射信号.

因此, 声发射信号经过局域波分解后计算的近似熵对声发射信号的发生及发展表现出很敏感的特点. 通过对不同基本模式分量的近似熵比较, 提取出声发射信号的特征频带, 描述从无声发射信号到出现强声发射信号到衰减的过程, 从而有效地表现了声发射信号的变化特征.

局域波时频分析法具有良好的时频分析能力, 能够较好地反映声发射信号的时频特征; 近似熵是一个很好的非线性动力学参数, 可确定一个时间序列在模式上的自相似性、不规则性和复杂性. 由上述实验结果可见, 在声发射信号的发生和发展过程中, 仅用局域波法进行分析, 能够提取出声发射信号的特征频率, 但不能描述声发射信号发展变化的复杂性. 如果仅用近似熵法, 能够了解声发射信号发展变化的复杂性、不规则性、自相似性, 但不能提取出特征频率. 将局域波法与近似熵

法相结合, 可以从声发射信号特征频率近似熵的细微变化了解声发射信号的变化, 效果明显.

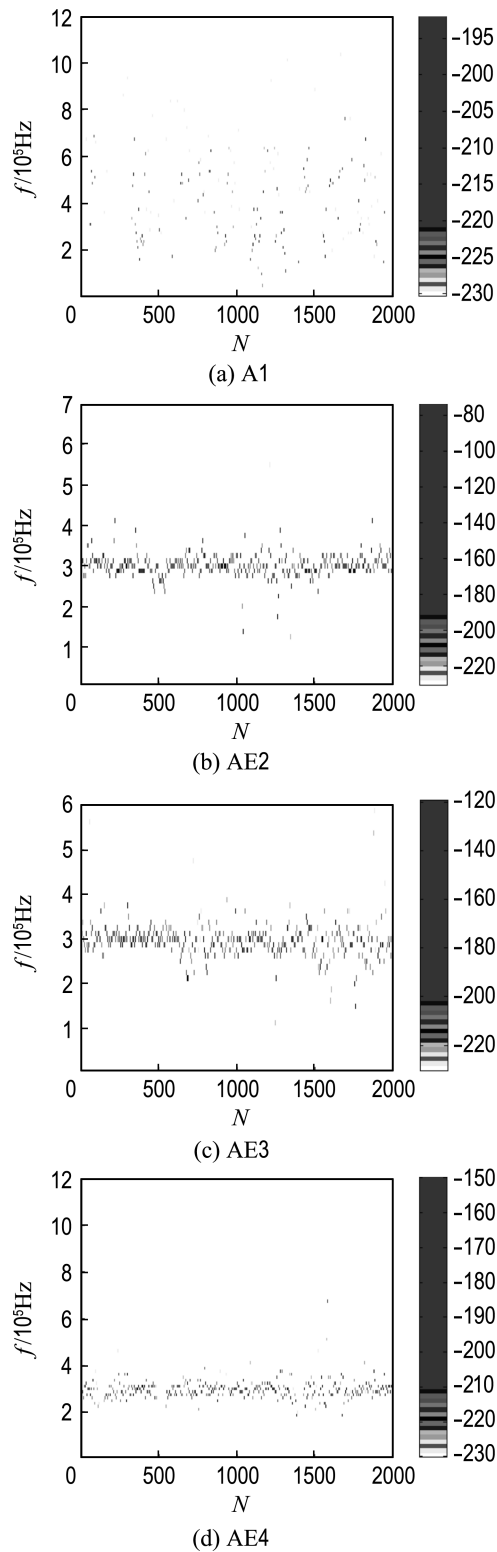


图 7 信号的 C1 局域波时频谱
Fig. 7 Local wave time-frequency spectrum for the C1

5 结 论

本文将非线性动力学中近似熵分析方法和非平稳时频分析方法——局域波法相结合引入到对声发射信号的研究中,为声发射信号的分析研究开辟了一条新思路.

由实验分析可以看出,局域波近似熵方法在表征声发射信号的特征频率各段复杂性、自相似性方面具有明显的效果,量化了声发射信号变化特征,是进行声发射识别的一个有效方法.

参考文献:

- [1] 王祖萌. 声发射技术基础[M]. 济南:山东科学技术出版社, 1990
- [2] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. **Proceedings of the Royal Society of London Series A — Mathematical Physical and Engineering Sciences**, 1998, **454**(1971): 903-995
- [3] 马孝江, 余 泊, 张志新, 等. 一种新的时频分析方法

——局域波法[J]. 振动工程学报, 2000, **13**(5): 219-224

- [4] PINCUS S M. Approximate entropy as a measure of system complexity [J]. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, 1991, **88**(6): 2297-2301
- [5] 胡红英, 马孝江. 局域波近似熵及其在机械故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击, 2006, **25**(4): 38-45
- [6] 杨福生, 廖旺才. 近似熵: 一种适用于短数据的复杂性度量[J]. 中国医疗器械杂志, 1997, **21**(5): 283-286
- [7] 胥永刚, 李凌均, 何正嘉. 近似熵及其在机械设备故障诊断中的应用[J]. 信息与控制, 2002, **31**(6): 547-551
- [8] LIN Li, ZHAO De-you. Research on the identification of acoustic emission signals based on local wave [C] // **ISTM2007/7th International Symposium on Test and Measurement**. Beijing: [s n], 2007: 4168-4178
- [9] 林 丽, 赵德有. 近似熵在声发射信号处理中的应用[J]. 振动与冲击, 2008, **27**(2): 99-102

Acoustic emission signal processing based on local wave and approximate entropy

LIN Li*, ZHAO De-you

(Department of Naval Architecture, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A new approach of combining the recently developed local wave method with the approximate entropy (ApEn) is presented to characterize the acoustic emission (AE) signals. Firstly, local wave method is used to decompose the acoustic emission signal into a number of intrinsic mode functions (IMFs), and then the ApEn of IMFs is calculated to describe their complexity, detect the occurrence and the development and quantify the characteristics of the acoustic emission signals. The effectiveness of the proposed approach is demonstrated by using the acoustic emission signals from the steel tube cracking during a quasi-static loadings test. The experimental results show that the proposed approach can effectively capture the significant information reflecting the acoustic emission, and thus has good potential in the field of acoustic emission signal feature extraction.

Key words: local wave; approximate entropy; acoustic emission; signal processing