

# 基于小波能谱系数的风力机疲劳裂纹特征\*

赵新光<sup>1</sup>, 甘晓晔<sup>1</sup>, 谷泉<sup>1</sup>, 周勃<sup>2</sup>, 陈长征<sup>2</sup>

(1. 辽宁科技学院机械工程学院 本溪, 117004) (2. 辽宁省振动噪声控制技术工程研究中心 沈阳, 110870)

**摘要** 提出了风力机叶片裂纹扩展声发射信号的优化小波重分配尺度谱及小波能谱系数相结合的分析法。基于 Shannon 熵理论计算裂纹扩展声发射信号的重分配尺度谱小波基函数带宽参数, 得到最适合裂纹声发射信号的 Morlet 小波基函数。用优化后的小波基函数计算重分配尺度谱, 获得裂纹扩展特征成分在时间尺度平面的高幅值能量分布, 利用特征能谱系数表征其重分配尺度谱的特征。实验结果表明, 该方法有良好的时频聚集性和抗噪能力, 实现了风力机叶片裂纹扩展声发射信号的时频特征提取, 得到了能谱系数作为特征向量表示信号特征。该方法可用来实现风力机叶片在复杂环境中的模式识别。

**关键词** 风力机叶片; 重分配尺度谱; 疲劳裂纹; 特征能谱系数

**中图分类号** TH165; TK83

## 引言

叶片是风力机中唯一用来捕获风能的部件, 其安全性关系着风力机的正常运转, 叶片的早期裂纹、失稳扩展和断裂都会影响风力机的安全运转。检测风力机叶片运转状况, 准确诊断初期裂纹故障, 是监测风力机叶片健康状态的关键问题<sup>[1-3]</sup>。准确地判断裂纹扩展特征状态的关键就是在强大的噪声干扰下有效提取叶片的特征信息, 这也一直是人们研究和解决的问题。

小波能谱系数方法广泛地应用于机械设备故障的识别中<sup>[4-7]</sup>, 但是对于应用于小波的重分配尺度谱, 并且对优化的重分配尺度谱中的研究较少。由于故障引发的声发射信号是一种非平稳时变信号, 因此用以揭示风力机叶片声发射源和其信号传播规律的信号处理方法应具有时频分析能力<sup>[8]</sup>。声发射信号(acoustic emission, 简称 AE)只有当能量积累到一定程度才会出现一个瞬态释放过程, 然后迅速衰减, 具有突发性, 且信号出现高幅值、不连贯状态, 呈现冲击性。信号的突发性和冲击性使信号特征提取时的时频分辨率很低。在外界载荷的作用下, 提取风力机叶片裂纹扩展特征的声发射信号受到噪声强烈干扰。可见, 信号的处理方法需要具有较强的时频聚集性和抑制噪声的能力, 以及有效的模式识

别方法。

小波尺度谱常用于非平稳信号分析。文献[9]利用小波尺度谱对碰磨声发射的时频特性、传播特性和频散特性等进行了详细分析, 但是没有针对故障信号进行小波尺度谱优化。文献[10]将小波重分配尺度谱方法用于声发射检测的滚动轴承损伤类型及部件的识别, 但是得到时频集中性较好尺度谱的方法不仅花费时间, 而且求得的值也不一定是最佳值。虽然小波重分配尺度谱能量集中在各局域重心上, 但是针对不同类型的声发射信号, 小波基函数的形状应该做出相应的调整, 这样才会得到最佳的时频聚集性。带宽参数是决定小波基函数形状的主要参数, 合理选择带宽参数可以获得强时频聚集性从而达到好的时频分辨率。文献[11]提出小波重分配尺度谱优化分析方法, 但是没有针对性地研究某种信号。

笔者针对风力机实验叶片裂纹扩展的声发射信号, 提出了风力机叶片裂纹声发射信号优化小波重分配尺度谱与能谱系数相结合的方法。通过最小 Shannon 熵优化小波基函数带宽参数, 克服小波重分配尺度谱的时频分辨率不能同时达到最佳的缺陷, 通过能谱系数区分噪声与特征信号。实验研究证明, 该方法可以有效提取风力机叶片疲劳裂纹扩展的信号特征并给出一组简便的特征向量。

\* 国家自然科学基金资助项目(50975180, 51005159); 辽宁省自然科学基金资助项目(201102093)  
收稿日期: 2012-05-07; 修回日期: 2012-12-08

## 1 优化小波重分配尺度谱方法的原理

### 1.1 小波基函数选取

针对不同阶段的风力机叶片裂纹声发射信号,小波基函数的选择对于小波尺度谱的结果起着重要作用。由于声发射信号在频域中具有类似高斯窗函数的外形,Morlet小波在频域也具有类似特征,且具备时频局部化特性和很好的时频紧支性<sup>[12]</sup>,因此采用Morlet小波可以与AE信号实现较好匹配,故笔者采用Morlet小波作为小波变换的母小波。

Morlet小波是高斯包络下的负指数函数

$$\psi(t) = \frac{1}{\sqrt{f_b}\pi} \exp(-t^2/f_b) \exp(i2\pi f_c t) \quad (1)$$

其中: $f_b$ 为控制小波形状的带宽参数,用于平衡小波的时频分辨率,决定波形振荡衰减的快慢程度; $f_c$ 为中心频率,决定了小波波形的振荡频率。

若 $f_c$ 取为常数,在一定范围内优化 $f_b$ ,可以得到最适合分析信号的小波基函数波形。

### 1.2 Shannon小波熵优化

利用Shannon熵的方法优化Morlet小波基函数的带宽参数 $f_b$ 。Shannon熵值的大小反映了概率分布的均匀性,最不均匀的概率分布具有最大的熵值<sup>[13]</sup>。把小波变换的系数处理成一个概率分布序列 $p_i$

$$p_i = \frac{|W_x(a_i, t)|}{\sum_{j=1}^M |W_x(a_j, t)|} \quad (2)$$

其中: $W_x(a, t)$ 为小波系数值; $M$ 为小波系数不同尺度数。

由 $p_i$ 算得的熵称为Shannon小波熵,定义为

$$H(p) = - \sum_{i=1}^n p_i \lg p_i \quad \text{且} \quad \sum_{i=1}^n p_i = 1 \quad (3)$$

当Shannon小波熵最小时,对应的小波基函数就是与AE信号特征成分最匹配的小波。

### 1.3 重分配小波尺度谱

设 $x(t)$ 为一有限能量函数,该函数的小波变换定义为以数族 $\psi_{a,b}(t)$ 为积分核的积分变换,即

$$W_x(a, b; \psi) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi_{a,b}(t) dt \quad (4)$$

由于小波变换没有损失任何信息,变换是能量守恒的<sup>[14]</sup>,因此下式成立

$$[x(t), x(t)] = \int |x(t)|^2 dt =$$

$$\frac{1}{C_\psi} \int a^{-2} da \int |W_x(a, b; \psi)|^2 db \quad (5)$$

受Heisenberg测不准原理的极限制约,把

$\frac{|W_x(a, b; \psi)|^2}{C_\psi a^2}$ 精确看做平面 $(a, b)$ 上某一点的能量

是没有意义的。根据式(4),可把它看做是平面上 $(a, b)$ 的能量密度函数,也就是说

$\frac{|W_x(a, b; \psi)|^2 \Delta a \Delta b}{C_\psi a^2}$ 给出了以尺度 $a$ 和时间 $b$ 为中心的、尺度间隔为 $\Delta a$ 、时间间隔为 $\Delta b$ 的能量。定义

$SG_x(a, b; \psi) = |W_x(a, b; \psi)|^2$ 为小波尺度谱,可看作一个有恒定相对带宽的谱图,能够反映信号的时频信息, $\psi(t)$ 中心角频率为 $\omega_0$ , $(\frac{\omega_0}{a_i, a_i t_c + b_i})$ 为

$SG_x(a, b; \psi)$ 在 $t_c$ 时刻的几何中心,代表了该局域能量密度的平均值。裂纹AE信号局域内能量分布并不是几何对称的,而该局域中能量重心为 $(\frac{\omega_0}{a_i, \hat{a}_i t_c + \hat{b}_i})$ ,能量重心比几何重心更好地代表这个局域的能量分布。

本研究采用重分配尺度谱 $RSG_x(\hat{a}, \hat{b}; \psi)$ 来描述能量重心

$$RSG_x(\hat{a}, \hat{b}; \psi) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} (\frac{\hat{a}}{a})^2 SG_x(a, b; \psi) \times \delta(\hat{b} - b'(a, b)) \delta(\hat{a} - a'(a, b)) da db \quad (6)$$

$$b'(a, b) = b - \text{Re}\{a \frac{W_x(a, b; \psi') W_x^*(a, b; \psi)}{|W_x(a, b; \psi)|^2}\} \quad (7)$$

$$\frac{\omega_0}{a'(a, b)} = \frac{\omega_0}{a} + \text{Im}\{\frac{W_x(a, b; \hat{\psi}) W_x^*(a, b; \psi)}{2\pi a |W_x(a, b; \psi)|^2}\} \quad (8)$$

$$\psi'(t) = t\psi(t) \hat{\psi}(t) = \frac{d\psi(t)}{dt} \quad (9)$$

当小波基函数 $\psi_{a,b}(t)$ 及 $f_b$ 选择合适时,重分配尺度谱中信号特征成分在时间尺度平面上某处会集结为高幅值的能量分布,而与小波基不相似的能量则发散到时间尺度平面上。

## 2 小波重分配特征能谱系数

本研究提出小波重分配尺度谱基础上结合能谱系数的方法,小波重分配特征能谱系数的物理意义就是表征信号的能量在小波重分配尺度计算后每个频率范围中的分布情况。

设裂纹扩展信号的小波重分配尺度谱的采样序列为 $f(n)$ ,按 $J$ 个尺度范围划分后,在形式上形成 $J+1$ 个频率范围的分量,但是总能量不变,即

$$f(n) = A_j f(n) + D_j f(n) + \dots + D_1 f(n) \quad (10)$$

其中:  $D_j f(n) = \sum_{n=2^j}^{2^{j+1}} f(n)$  ( $j = 1, 2, \dots, J$ ) 且有

$$E_j^A f(n) = \sum_{n=1}^N A_j f(n).$$

$$E_j^D f(n) = \sum_{n=1}^N D_j f(n) \quad (j = 1, 2, \dots, J)$$

其中:  $E_j^A f(n), E_j^D f(n)$  分别为信号在低频信号分量的能量及高频信号分量的能量。

信号的总能量定义为

$$E_f(n) = E_j^A f(n) + \sum_{j=1}^J E_j^D f(n) \quad (11)$$

为了表示小波重分配尺度谱不同频率段的分布状态,定义了每个频率段的能量与总能量的比值为小波重分配特征能谱系数,分别用参数  $P_j^A$  和  $P_j^D$  表示,即

$$P_j^A = \frac{E_j^A f(n)}{E_f(n)}$$

$$P_j^D = \frac{E_j^D f(n)}{E_f(n)} \quad (j = 1, 2, \dots, J)$$

### 3 实验研究

由于疲劳裂纹萌生后都要经过不断扩展、合体和干涉的过程,才能形成足够长度的裂纹使得叶片有横向断裂的可能,而刚萌生出的裂纹在长度上对叶片安全不造成威胁,所以裂纹的扩展是监测的关键点,裂纹的不断扩展可能导致断裂。在风力机运转中,叶片在所受风载和内应力的作用下,不断扩展的裂纹只是出现裂纹的一部分。实现对出现裂纹扩展部位的重点监测是实践叶片状态监测、避免重大事故的有效途径。

实验采用长为 10 m 的小叶片,图 1 为实验装置示意图,叶片根部由紧固装置装卡,叶尖处安装激振电机。使叶片持续挥舞摆动来模拟叶片上较为常见的载荷。声发射传感器由耦合剂和胶布固定在叶片裂纹发生处的周围。

本实验中检测的裂纹都是横向裂纹,裂纹在扩展到一定程度时会使叶片横向断裂。在激振电机的作用下诱发了疲劳裂纹的扩展行为,由此来模拟风力机叶片上的疲劳裂纹的扩展。

根据实验声发射仪器采集到的疲劳裂纹扩展信号如图 2 所示。图 2 中的信号是经过筛选的典型信号,表明在 2 048 个采样点上信号对应的电压幅值。由图 2 可以明显看到冲击成分,而且裂纹故障特征与噪声特征相混叠,因此难以判断裂纹扩展的真正特征。

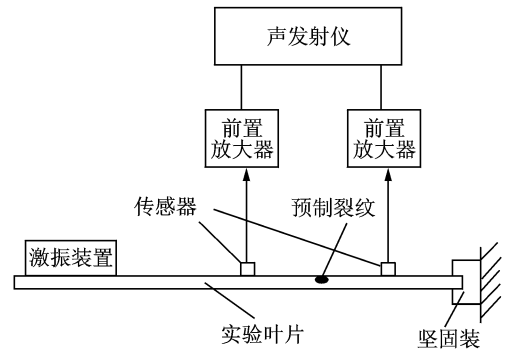


图 1 实验装置图

Fig. 1 The experiment device

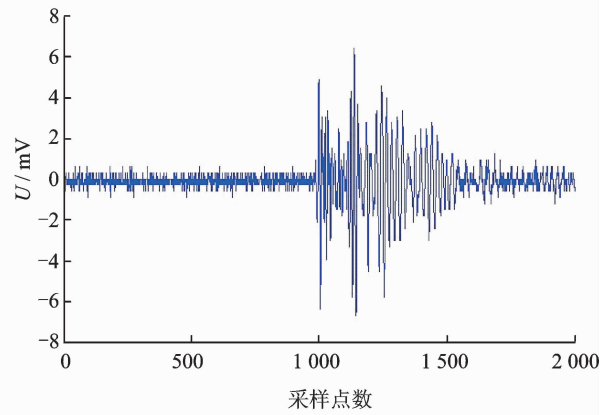


图 2 实验采集的声发射信号

Fig. 2 Experiment AE signal

### 4 结果分析

令  $f_c = 1$ , 应用式(5)优化小波尺度谱方法求得 Shannon 熵与带宽参数  $f_b$  的关系,如图 3 所示。可知,当 Shannon 小波熵最小时对应的母小波就是与特征成分最匹配的小波。因此,使得小波熵最小的  $f_b$  即为优化的 Morlet 小波形状参数。从图 3 可以得出当  $f_b = 5.1$  时具有最小的小波熵,得到优化 Morlet 基函数来计算裂纹扩展声发射信号的重分配小波尺度谱,如图 4 所示。图 5 为没有经过优化的重分配尺度谱。

图 4 与图 5 比较可见,优化带宽参数的重分配谱有更为明确的时间分布,准确显示出冲击信号的时频特征,具有很高的时频聚集性,准确地反映风力机叶片疲劳裂纹扩展声发射信号的时频参数。小波重分配尺度谱是提取声发射信号时频特征的方法,且优化小波基函数的带宽参数后,小波重分配谱具有时频聚集性好、时频范围表达准确的优势。可见,优化小波重分配尺度谱更适合提取风力机叶片裂纹损伤声发射信号的特征,以上分析得出的  $f_b$  值也可作为实际应用时的参考。

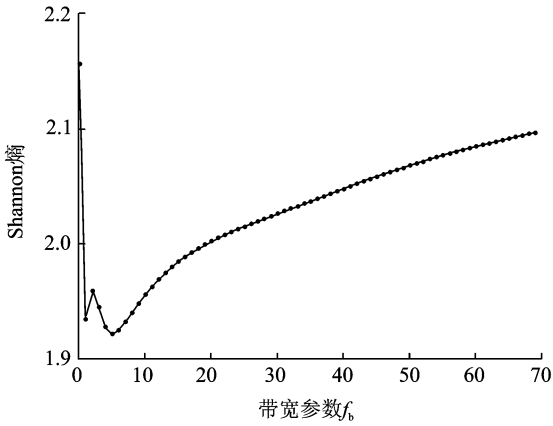


图 3 Shannon 熵与带宽参数的关系曲线

Fig. 3 The relation curves of bandwidth and Shannon entropy

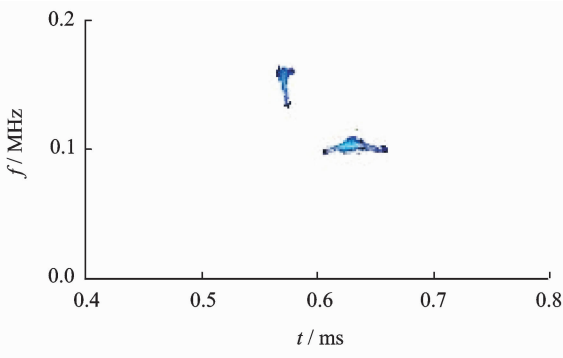


图 4 疲劳裂纹扩展声发射信号重分配尺度谱

Fig. 4 Reassigned scalogram

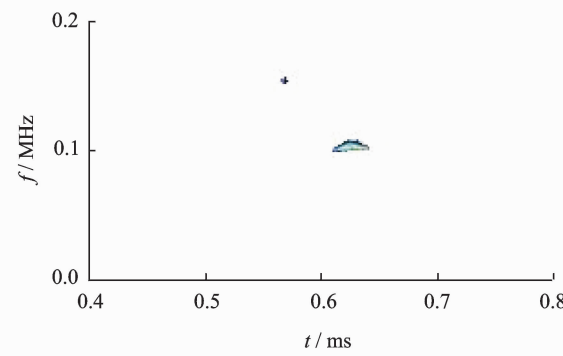


图 5 疲劳裂纹扩展声发射信号优化重分配尺度谱

Fig. 5 Optimization reassigned scalogram

由于信号中包含不同的信息,所以信号在不同频带上的能量分布不同。风力机裂纹扩展信号是由于裂纹扩展的声发射源的不同特征而造成的。笔者根据采样定理和 Mallat 算法,以实验中的采样频率为例,即  $f_s = 2\ 000\ \text{kHz}$ ,按照 Mallat 算法的分解尺度  $J$ ,把信号分为  $J + 1$  个频率段,各个频率范围的计算公式为

$$\left[0, \frac{f_s}{2^{j+1}}\right], \left[\frac{f_s}{2^{j+1}}, \frac{f_s}{2^j}\right], (j = 1, 2, \dots, J)$$

若进行 6 个尺度划分,对应的频率范围如表 1

表 1 按 Mallat 算法 6 次分解划分的频率范围

Tab. 1 Frequency range of six-scale decomposition

频率段	$a_6$	$d_1$	$d_2$	$d_3$	$d_4$	$d_5$	$d_6$
频率范围/kHz	0 ~ 15.6	500 ~ 1 000	250 ~ 500	125 ~ 250	62.5 ~ 125	31.2 ~ 62.5	15.6 ~ 31.2
功率谱分布对应关系	信号能量分布	噪声分布	信号能量分布				

所示。图 6 为风力机叶片疲劳裂纹扩展信号经过优化小波基函数的重分配尺度谱后,得到的特征能谱系数分布图。可以看出,波形具有瞬态冲击的特点,其能量在各频率段上不一致, $d_3$  频率段上具有最大的能量分布,这与图 5 中的时频分布谱图相吻合。 $d_2$  和  $d_4$  频率段为次能量分布。若取各频率段作为特征向量的分量,则可得到特征向量为  $[0.006\ 4, 0.015\ 4, 0.156\ 6, 0.698\ 8, 0.114\ 4, 0.005\ 8, 0.002\ 6]$ 。应用同样的方法对典型噪声信号(如图 7 所示)进行小波分解及其特征能谱系数提取,得到各分解尺度的特征能谱系数分布图,如图 8 所示。可

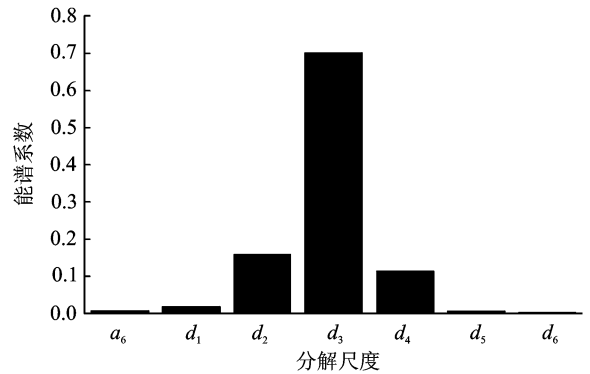


图 6 特征能谱系数分布图

Fig. 6 Characteristic spectrum coefficient profile

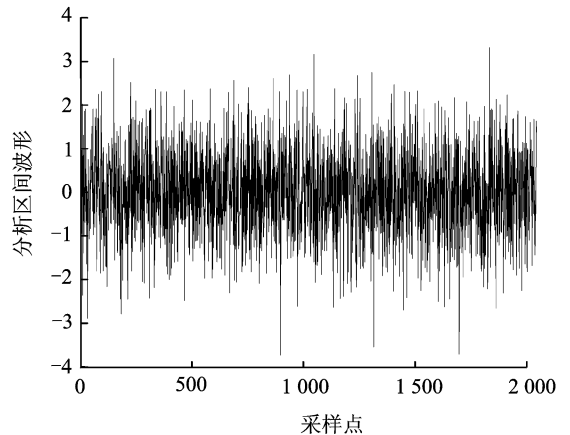


图 7 噪声信号的波形

Fig. 7 Noise signal waveform

以看出,此噪声能量在各层上大致平均分布,包含较宽频带的信息,能量在  $d_2$  和  $d_6$  两个尺度上的分布较为突出,与具有瞬态冲击性特点的疲劳裂纹扩展信号的特征能谱系数有明显区别。

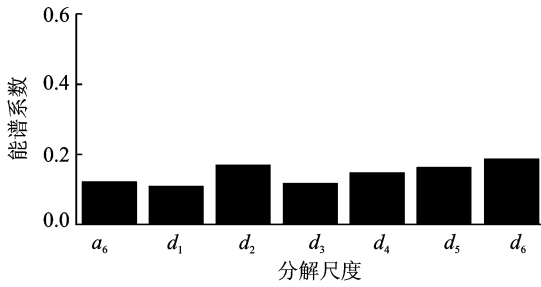


图8 噪声信号的特征能谱系数分布图

Fig. 8 Characteristic spectrum coefficient profile of noise

由此可见,风力机叶片的疲劳裂纹扩展声发射信号的不同特征可以通过特征能谱系数分析法得到体现。对特征的描述简单直观,也为风力机叶片疲劳裂纹信号的模式识别提供了一种有效的特征提取方法。

综上所述,笔者提出了一种优化小波重分配尺度结合小波特征能谱系数的多分辨率分析方法,能同时在时域和频域表征信号局部特征,且能细化时频局部特征,并通过量化的特征向量来区别噪声与信号。这对于分析含有瞬态现象的裂纹扩展信号是最适合的。

## 5 结 论

1) 根据研究信号本身的特征优化了小波基函数,使其在小波重分配尺度谱中清晰准确地描述信号特征。应用最小 Shannon 熵优化 Morlet 小波的带宽参数,对于风力机叶片疲劳裂纹扩展声发射信号  $f_b = 5.1$ ,从而实现小波基函数与风力机叶片裂纹信号特征的最佳匹配,提高了声发射裂纹扩展信号的时频分辨率。

2) 在基于优化的小波重分配尺度谱的基础上,为使之能与噪声的小波能谱系数比较,根据 Mallat 算法,计算了相应频率范围的能量分布,得到了裂纹扩展信号与噪声信号的不同特征简单直观的描述和区别方式。

3) 小波特征能谱系数能用较少的参数表示信号特征,可用于识别不同类型的裂纹信号和干扰信号,为风力机叶片疲劳裂纹扩展的模式识别打下基础。

## 参 考 文 献

- [1] Kirikera G R, Schulz M J, Sundaresan M J. Multiple damage identification on a wind turbine blade using a structural neural system [C] // Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering. San Diego: Sensor Systems and Networks, 2007.
- [2] Marín J C, Barroso A, Paris F, et al. Study of fatigue damage in wind turbine blades[J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(2): 656-668
- [3] Anastassopoulos A A, Kouroussis D A, Nikolaidis V N. Structural integrity evaluation of wind turbine blades using pattern recognition analysis on acoustic emission data[C] // The 25th European Conference on Acoustic Emission Testing. Prague: Czech Republic, 2002.
- [4] 艾延廷,费成巍. 转子振动故障的小波能谱熵 SVM 诊断方法[J]. 航空动力学报, 2011, 26(8): 1830-1835.  
Ai Yanting, Chen Chengwei. Rotor vibration fault diagnosis method based on wavelet energy spectrum entropy and SVM [J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(8): 1830-1835. (in Chinese)
- [5] 王小玲,陈进,从飞云. 基于时频的频带熵方法在滚动轴承故障识别中的应用[J]. 振动与冲击, 31(18): 29-33.  
Wang Xiaoling, Chen Jin, Cong Feiyun. Application of spectral band entropy(SBE) method in rolling bearing fault diagnosis based on time-frequency analysis [J]. Journal of Vibration and Shock, 31(18): 29-33. (in Chinese)
- [6] 戴光,徐海丰,龙飞飞,等. 2. 25Cr-1Mo 材料在拉伸过程中的声发射信号聚类分析[J]. 无损检测, 2012, 34(7): 6-10.  
Dai Guang, Xu Haifeng, Long Feifei, et al. Clustering of acoustic emission signals collected during tensile Tests on 2. 25Cr-1Mo [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(7): 6-10. (in Chinese)
- [7] 张景川,曾周末,赖平,等. 基于小波能谱和小波信息熵的管道异常振动事件识别方法[J]. 振动与冲击, 2010, 29(5): 1-4.  
Zhang Jingchuan, Zeng Zhoumo, Lai Ping, et al. A recognition method with wavelet energy spectrum and wavelet information entropy for abnormal vibration events of a petroleum pipeline [J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(5): 1-4. (in Chinese)
- [8] 朱忠奎,陈再良,王传洋. 基于小波尺度图重分配的轴

- 承瞬态特征检测与提取[J]. 数据采集与处理, 2005, 20(3):356-360.
- Zhu Zhongkui, Chen Zailiang, Wang Chuanyang. Bearing transient feature detection and extraction based on reassigned scalogram[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2005, 20(3):356-360. (in Chinese)
- [9] 彭志科, 何永勇, 卢青, 等. 用小波时频分析方法研究发电机碰摩故障特征[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5):75-79.
- Peng Zhike, He Yongyong, Lu Qing, et al. Using wavelet method to analyze feault features of rub rotor in generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 75-79. (in Chinese)
- [10] Joosse P A, Blanch M J, Dutton A G, et al. Acoustic emission monitoring of small wind turbine blades[J]. Journal of Solar Engineering, 2002, 124(4):446-454.
- [11] 廖传军, 李学军, 刘德顺. 小波再分配尺度谱在声发射信号特征提取中的应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(2):273-279.
- Liao Chuanjun, Li Xuejun, Liu Deshun. Application of reassigned wavelet scalogram in feature extraction based on acoustic emission signal[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2):273-279. (in Chinese)
- [12] 蒋永华, 汤宝平, 陈法法. 应用最优重分配小波尺度谱的小波脊线提取[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(1):62-66.
- Jiang Yonghua, Tang Baoping, Chen fafa. Wavelet ridge extraction method based on optimal reassigned wavelet scalogram[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(1):62-66. (in Chinese)
- [13] Stephane M. A wavelet tour of signal processing: The SparseWay, Third Edition[M]. Burington: Elsevier Inc, 2010:485-493.
- [14] He Ping, Li Pan, Sun Huiqi. Feature extraction of acoustic signals based on complex Morlet wavelet[J]. Procedia Engineering, 2011, 15:464-468.



**第一作者简介:**赵新光,女,1985年2月生,博士、讲师。主要研究方向为机械系统动力学及故障诊断。曾发表《Study on monitoring damage about material of blade in wind turbine based on acoustic emission》(《Advanced Materials Research》2011, Vol. 201-203)等论文。  
E-mail: zxguang\_0512@163.com

**通信作者简介:**陈长征,男,1964年9月生,教授、博士生导师。主要研究方向为机电设备故障诊断技术、振动噪声分析与控制等。  
E-mail: chenczsut@163.com