

小波尺度谱在 AE 信号特征提取中的应用

肖思文, 廖传军, 李学军

(湖南科技大学湖南省机械设备健康维护重点实验室, 湖南湘潭 411201)

[摘要] 通过分析典型声发射信号及其特征提取, 将小波尺度谱引入到声发射故障诊断领域, 首次提出了声发射信号的小波尺度谱分析法。给出了小波基函数及其参数的选取, 克服了声发射信号小波尺度谱的时、频分辨率不能同时达到最好的缺陷。将小波尺度谱用于声发射检测的滚动轴承损伤类型及部件的识别, 诊断结果十分直观、清晰、准确。仿真分析和实验研究均表明小波尺度谱能有效应用于基于声发射技术的状态监测与故障诊断。

[关键词] 小波尺度谱; 声发射; 特征提取; 故障诊断; 滚动轴承

[中图分类号] TG115.28; TH113 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2008)11-0069-07

1 前言

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), 用仪器检测、记录和分析 AE 信号以及利用 AE 信号推断声发射源的技术称为声发射检测技术^[1]。目前声发射技术作为一种成熟的无损检测方法, 已得到了广泛应用。受信号采集和处理的限制, 早期的声发射仪器很少具备对 AE 信号进行瞬态波形捕捉和实时处理的能力, 因此信号分析主要采用参数分析法。近年来随着全波形声发射检测仪器的问世和不断改进, 使得利用现代信号处理手段进行 AE 信号的波形分析成为可能, 并已成为促进声发射检测技术发展的重要途径^[2]。

由机械故障或损伤引发的 AE 信号由一系列频率和模式丰富的信号组成, 是一种非平稳时变信号, 因此用以揭示声发射源和 AE 信号传播规律的信号处理方法应具有时频分析能力。小波变换通过伸缩和平移运算对信号进行多尺度细化分析, 是一种多分辨率时频分析方法, 在时、频两域都具有表征信号局部特征的能力, 能够有效地从信号中提取时频信

息^[3]。小波变换的尺度谱与傅立叶变换中的功率谱相对应, 在机械故障诊断中常被用于信号的时频特征提取、奇异性检测和去噪处理。小波尺度谱可看作是一个有恒定带宽的谱图, 不仅能够显示信号的时频特征, 而且能够很好地表现信号中一些能量较小的分量, 利于提取早期故障特征^[4]。

将小波尺度谱应用于 AE 信号的故障特征提取, 通过分析典型 AE 信号及其特征提取, 说明了小波尺度谱适于提取该类型 AE 信号的故障特征。

2 小波尺度谱与 AE 信号特征提取

2.1 小波尺度谱

对于所有 $x(t)$, $\psi(t) \in L^2(R)$, $\psi(t)$ 为一平方可积函数, $L^2(R)$ 为平方可积函数空间, $x(t)$ 的连续小波逆变换可表示为

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \iint a^{-2} W_x(a, b; \psi) \psi_{a,b}(t) da db \quad (1)$$

其中 $C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty$ 为对 $\psi(t)$ 提出的容许条件, W_x 为小波变换系数, a 为伸缩因子, b 为平移因子, $\psi_{a,b}(t)$ 为依赖于参数 a, b 的小波基函数。

[收稿日期] 2007-12-19; 修回日期 2008-04-17

[基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50675066); 湖南省科技计划资助项目(2007FJ3025)

[作者简介] 肖思文(1968-), 女, 湖南娄底市人, 硕士, 湖南科技大学高级工程师, 主要从事设备故障诊断和信号处理的研究工作; 廖传军(1979-), 男, 湖南澧县人, 硕士, 湖南科技大学讲师, 主要从事声发射检测技术及信号处理的科研工作

由式(1)可知,小波变换没有损失任何信息,变换是能量守恒的,因此有

$$[x(t), x(t)] = \int |x(t)|^2 dt = \frac{1}{C_\psi} \int a^{-2} da \int |W_x(a, b; \psi)|^2 db \quad (2)$$

受 Heisenberg 测不准原理的极限制约,把 $|W_x(a, b; \psi)|^2 / C_\psi a^2$ 看作平面 (a, b) 上某一点的能量是没有意义的,根据式(2),可把它看作平面 (a, b) 上的能量密度函数,即 $|W_x(a, b; \psi)|^2 \Delta a \Delta b / C_\psi a^2$ 给出了以尺度 a 和时间 b 为中心的、尺度间隔为 Δa 、时间间隔为 Δb 的能量。与短时傅立叶变换的谱图定义类似,小波尺度谱 $WS_x(a, b; \psi)$ 可表示为

$$SG_x(a, b; \psi) = |W_x(a, b; \psi)|^2 \quad (3)$$

小波尺度谱可看作是一个有恒定相对带宽的谱图,能够反映信号的时频信息,在非平稳信号的分析中有着广泛的应用^[5]。

2.2 AE 信号的小波尺度谱分析法

无损检测领域所研究的由缺陷或损伤产生的声发射现象,其本质是材料在载荷作用下产生了形变、断裂等过程,部分形变能量以应力波的形式释放到材料中,其实质为瞬态波形信号^[6]。由机械故障或损伤引发的声发射过程均为突发过程,其典型的 AE 信号如图 1 所示:上升时比较迅速,下降时呈现指数衰减振荡现象,其包络线呈现一个三角形形态。声发射源的一次突发性发射实际上是一个突发脉冲,由于脉冲在频域的宽带性质,损伤越小,产生的脉冲宽度越小,损伤越大,产生的脉冲宽度越大。这样,就把损伤的大小同激起的突发脉冲的数目以及强弱联系起来。因此如果能够采取有效方法把信号的各个脉冲分离出来并加以分析,那么就有可能把设备或元件的所有损伤及其严重程度检测出来^[7]。

基于上述分析,将小波变换尺度谱用于提取机械故障或损伤引发的 AE 信号的故障特征,主要可以发挥以下几个方面的优势:

1) 小波变换能够自适应地调整窗函数,小波中心频率和带宽的比值为一个常数,在分析 AE 信号这样的高频非平稳信号时,时间窗口会自动变窄,频率窗口会自动变宽^[8]。

2) 利用小波尺度谱分析 AE 信号时,选择了合适的小波基函数及其参数,即使在较低的信噪比条件下也有相当好的检测和分析效果,与只用小波变换相比,尺度谱图法的适应性更强,其二维谱图和三

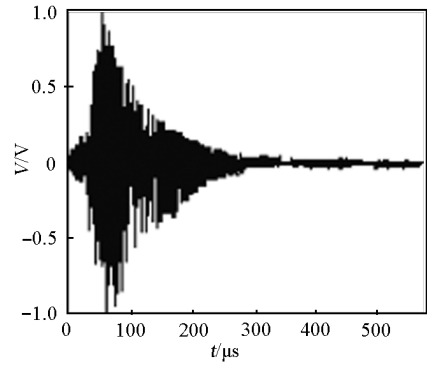


图 1 典型突发型 AE 信号

Fig. 1 Typical AE signal of burst type

维谱图能够非常直观、准确地表征信号多个参数的信息^[9]。

3) 小波尺度谱可把 AE 信号的小波变换模平方值在时间-尺度空间上表现出来,它是信号在时间-尺度平面上的一种能量分布,由此可以确定 AE 信号中每个脉冲的到达时间及频率组成,可为计算 AE 信号脉冲周期及对声发射源进行时差定位等提供准确的信息^[10]。

由此可知,小波尺度谱能准确描述机械故障或损伤引发的声发射事件,非常直观地表现信号中各个脉冲的数目、强度、在时频面上的分布及频率组成等,为有效判断损伤的类型、位置程度、发展趋势等提供准确的信息。

3 仿真研究

小波尺度谱的时间和频率分辨率同所分析的信号频率有关,所分析信号的频率越高,小波变换的频率分辨率也越高。受 Heisenberg 测不准原理的极限制约,小波尺度谱在时域和频域不能同时保持良好的集中性,这是小波尺度谱在应用中的主要缺陷^[11]。对于具体类型的信号,如果合理选择了小波基函数及其参数,则可同时获得良好的时间分辨率和频率分辨率。机械故障或损伤引发的 AE 信号的上述特点及特征提取原理,为确定小波基函数及其参数提供了充分的依据,从而能克服小波尺度谱应用上的主要缺陷。

3.1 小波基函数的选择

小波基函数的选择对于小波尺度谱的结果起着重要的作用,实际应用时需要针对不同的信号和不同的处理目的来确定小波基函数的选择。基于以下研究结果,将一种改进的复值 Morlet 小波作为小波

尺度谱分析 AE 信号的小波基函数。

1) 采用复 Morlet 小波和连续小波变换得到的小波尺度谱不仅能反映 AE 信号的全貌,而且能提取 AE 信号中的脉冲冲击成分,可同时确定脉冲信号的到达时间、频率成分及幅值等^[8]。

2) Morlet 小波是连续小波,由特斯拉函数经余弦调制而生成,在时域和频域里具有良好的局部化特性,不仅克服了离散小波在时间域上对信号离散化所造成的特征信息遗漏现象,也克服了二进小波变换在尺度空间上二进分割过于粗糙的情况,适合于在有限空间上提取和识别频率丰富的实测 AE 信号中的特征成分^[12]。

3) Morlet 小波在时域中为振荡衰减信号,而在频域中具有高斯窗函数的外形,与 AE 信号有类似特征,能通过 Morlet 小波变换将隐藏于噪声信号中的 AE 脉冲冲击信号提取出来^[13]。

4) Morlet 小波是对特斯拉函数调制产生的函数族,具备了特斯拉函数良好时频正则性的优点。用特斯拉函数分析 AE 信号主要有以下两个优势:AE 信号是一种高频突发脉冲信号,可用高频突发分量和长周期准平稳分量表示,特斯拉函数特别适于描述此类型信号的频率特征^[14];AE 信号的能量集中在一定的时间间隔和一定的频率间隔内,特斯拉函数对于 AE 信号中能量较少的时间和频率间隔处,其变换结果则接近于零,这对提取 AE 信号中的特征信号非常有用^[15]。

根据上述分析,通过附加一个限制窗函数宽度的参数 σ ,对传统 Morlet 小波加以修正,改进后的 Morlet 小波为

$$\psi(t) = \pi^{-1/4} \exp(-i\omega_0 t) \exp(-t^2/2\sigma^2) \quad \omega_0 \geq 5 \quad (4)$$

选择较小的 σ 值,小波尺度谱的时间分辨率将得到改善;选择较大的 σ 值,则频率分辨率得到改善。根据文献[16]提出的 AE 信号仿真模型,用三个指数衰减信号模拟 AE 信号,其表达式为:

$$x(t) = 2[\exp(-2\pi((t-t_1)/\beta_1)^2)] \sin(2\pi f_1(t-t_1)) + 2[\exp(-2\pi((t-t_2)/\beta_2)^2)] \sin(2\pi f_2(t-t_2)) + 2[\exp(-2\pi(t-t_3)/\beta_3)^2)] \sin(2\pi f_3(t-t_3)) \quad (5)$$

信号由三个脉冲组成, f_1, f_2, f_3 分别是 3 个谐波信号的频率,并分别以时间 t_1, t_2, t_3 为中心。各参数取值为: $f_1 = 60 \text{ kHz}, f_2 = 70 \text{ kHz}, f_3 =$

$80 \text{ kHz}, t_1 = 0.8 \text{ ms}, t_2 = 0.9 \text{ ms}, t_3 = 1.0 \text{ ms}, \beta_1 = 0.0001, \beta_2 = 0.00015, \beta_3 = 0.0002$,采样频率为 500 kHz ,所得 AE 仿真信号如图 2 所示。

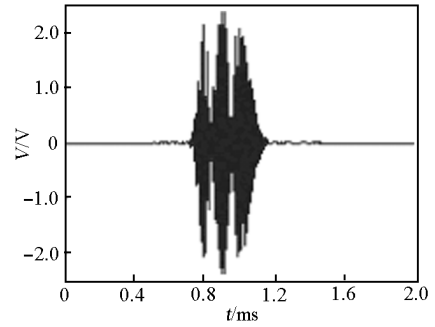


图 2 AE 仿真信号
Fig. 2 Simulation AE signal

利用小波尺度谱对仿真信号进行分析,根据 AE 信号的高频特性,取 $\sigma = 3.0$,其二维时频图如图 3 所示。

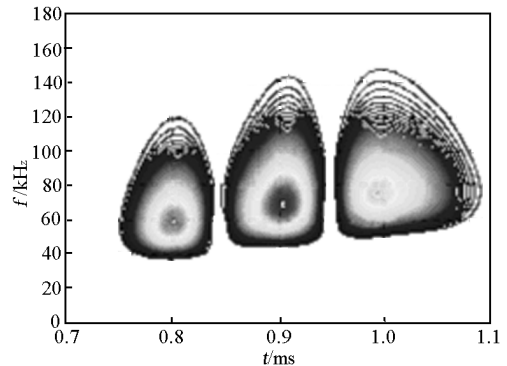


图 3 仿真信号的小波尺度谱
Fig. 3 Wavelet scalogram of the simulation signal

从图 3 可以明显看出仿真信号三个脉冲分量,在时间-频率轴上分别以 $(0.8 \text{ ms}, 60 \text{ kHz}), (0.9 \text{ ms}, 70 \text{ kHz}), (1 \text{ ms}, 80 \text{ kHz})$ 为中心的等高线图表示,与表达式完全吻合,且没有影响其物理解释的因素存在,说明了以此 Morlet 小波为基函数的小波尺度谱能有效分离 AE 信号中的各个脉冲分量,准确直观地描述 AE 信号的特征。

3.2 小波基函数的参数选择

小波基函数相关参数的选择同样对小波尺度谱的结果起着重要作用,在此主要指 σ 。机械故障或损伤引发的 AE 信号的频率一般在 20 kHz 以上,所以选取的 σ 值应较小。仍以上述仿真信号为研究对象,获得了 σ 值为 $1.9, 1.8, 3.8, 3.9$ 时的小波尺度谱仿真图,分别如图 4 至图 7 所示。

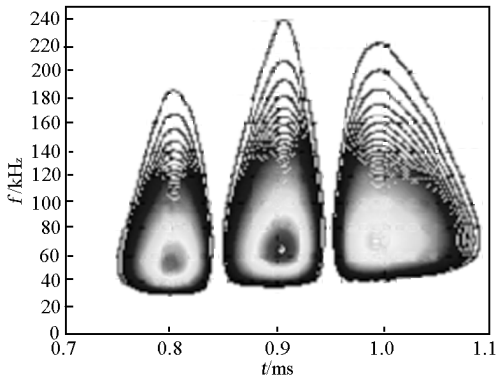


图4 $\sigma = 1.9$ 的小波尺度谱
Fig. 4 Wavelet scalogram ($\sigma = 1.9$)

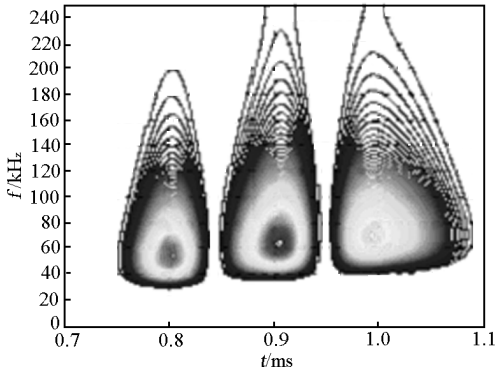


图5 $\sigma = 1.8$ 的小波尺度谱
Fig. 5 Wavelet scalogram ($\sigma = 1.8$)

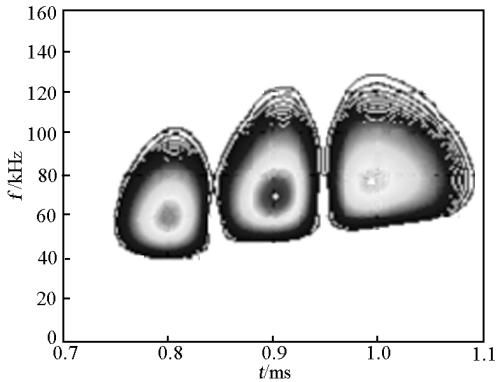


图6 $\sigma = 3.8$ 的小波尺度谱
Fig. 6 Wavelet scalogram ($\sigma = 3.8$)

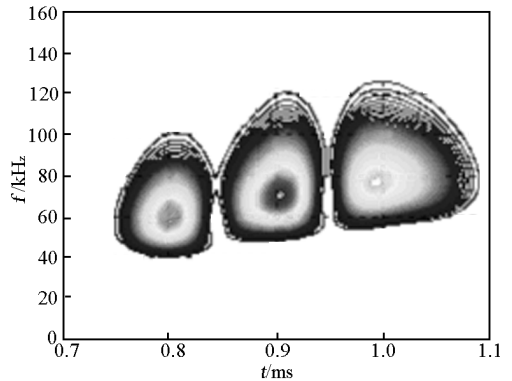


图7 $\sigma = 3.9$ 的小波尺度谱
Fig. 7 Wavelet scalogram ($\sigma = 3.9$)

能完全分离开,因而对于 $\sigma > 3.8$ 的小波尺度谱,其时间分辨率将不能满足分析要求。因此,利用小波尺度谱对仿真信号进行分析时, σ 应在 $1.9 \sim 3.8$ 之间取值,此时的时间分辨率和频率分辨率能同时达到较好效果。

3.3 抑噪能力

实测 AE 信号中总会掺杂有各种噪声信号,往往会将表征故障的信号淹没,造成从 AE 信号中提取故障特征非常困难。因此,要求所用的 AE 信号分析工具具有较强的抑噪能力。由于噪声能量在时间-尺度空间上分布比较均匀,故小波变换的尺度谱图将没有特别大的突出峰,故其对 AE 信号的小波尺度谱图的影响不大。仍以上述 AE 仿真信号为研究对象,在该信号中加入一随机宽带多普勒强噪声信号,采样频率为 500 kHz ,信噪比为 3 dB 。其波形如图 8 所示。加入了该多普勒噪声信号后的仿真信号如图 9 所示。用小波尺度谱对加噪后的仿真信号进行分析, $\sigma = 3$,仿真图如图 10 所示。

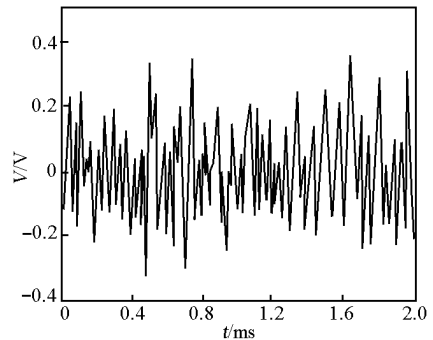


图8 多普勒噪声信号
Fig. 8 Noise signal of Doppler

从图 3、图 4 和图 5 可知,随着 σ 值的减小,频率分辨率越来越低, σ 值为 1.8 时, 70 kHz 和 80 kHz 的脉冲分量出现了频率泄漏,因而对于 $\sigma < 1.9$ 的小波尺度谱,其频率分辨率将不能满足分析要求。从图 3、图 6 和图 7 可知,随着 σ 的增大,时间分辨率越来越低, $\sigma = 3.9$ 时,第一和第二个脉冲未

比较图 10 和图 2 可知,虽然仿真信号的小波尺

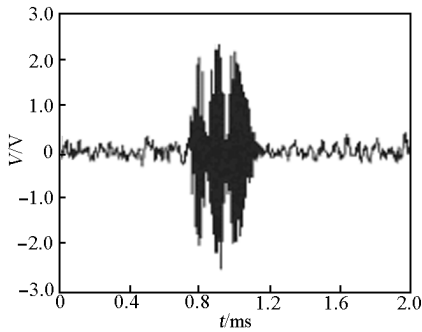


图9 加噪后的仿真信号
Fig.9 Simulation signal after adding noise signal

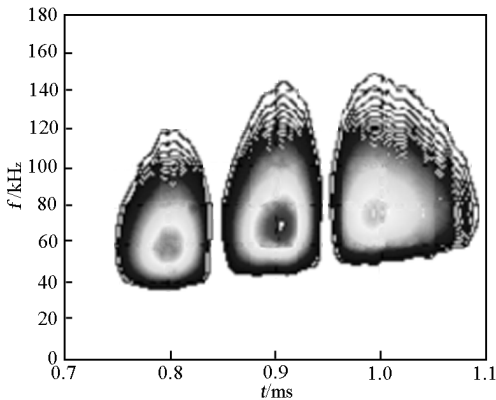


图10 加噪后仿真信号的小波尺度谱
Fig.10 Wavelet scalogram of the simulation signal after adding noise signal

用声发射检测设备对一外环有损伤的 6220 滚动轴承进行了实时检测与诊断。该轴承的基本参数为接触角 $\alpha = 0^\circ$, 滚动体个数 $z = 11$, 滚动体直径 $d = 22.8 \text{ mm}$, 节径 $D = 148 \text{ mm}$ 。选用的检测设备是 SWAES 全波形声发射检测仪, 其组成如下: 谐振频率为 150 kHz、灵敏度 $> 65 \text{ dB}$ 的 SR15 声发射传感器, 20 MHz 同步 4 通道模拟量输入的 9812 数据采集卡, 频率带宽为 0.02 ~ 2.0 MHz、增益为 40 dB 的 PAI 前置放大器, 频率范围为 20 ~ 400 kHz、输入阻抗 $> 50 \text{ M}\Omega$ 的 SA4 主放大器。图 11 所拾取的是在转速为 220 转/min、径向承载为 300 N、采样频率为 500 kHz 条件下实验轴承的 AE 信号。实验轴承在上述实验条件下的故障特征频率 f_0 可由计算公式^[17]得出, 经计算得 $f_0 = 17.0594 \text{ Hz}$ 。

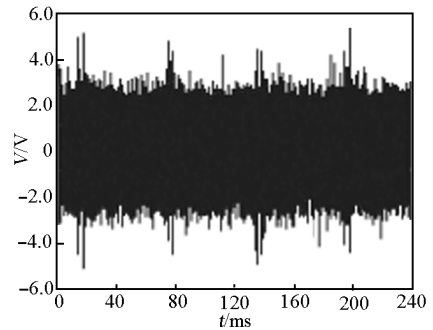


图11 实验轴承外环损伤的 AE 信号
Fig.11 AE signal of outer ring damage of the experimental bearing

度谱受到了噪声干扰,但是受噪声的影响较小,且不影响小波尺度谱对仿真信号的物理解释,说明小波尺度谱抑制 AE 信号中噪声干扰的能力较强。

综合上述仿真研究可知,小波尺度谱是提取 AE 信号特征的有力工具。当小波尺度谱用于提取机械故障或损伤引发的 AE 信号的故障特征时,所改进的 Morlet 复小波是较理想的小波基函数。 σ 的可选范围较小,具体值应根据信号的预处理情况、脉冲间隔及频率组成等综合选定,上述仿真分析得出的结果可作为实际应用时的参考。

4 实验研究

当滚动轴承的某一元件发生局部故障或损伤时,会在受载运行过程中与轴承其他元件发生撞击,从而使所拾取的 AE 信号表现为高频周期性的指数衰减脉冲信号的迭加,而这些脉冲信号的周期正对应于滚动轴承的故障特征频率。在工况环境下,利

实测 AE 信号中往往会出现奇异项和趋势项,并混杂有周期性干扰和噪声干扰,传感器也可能出现零位漂移,因此,首先作了去除均值和趋势项的预处理。原始信号的数据长度为 120 000 点,由于数据量过大而造成有些运算无法进行,因此接着对信号进行了包络抽样,最后的信号长度为 1 200 点。取 $\sigma = 2.5$,得到了信号小波尺度的三维谱图和二维谱图,分别如图 12 和图 13 所示。

由于存在大量的噪声干扰,图 11 所示的实验信号时域波形未显示明显的故障信息。图 12 所示的实验信号的三维谱图形象地描述了实验轴承的故障特征,能够非常直观地看出每个声发射事件的发生时间、频率组成及幅值大小。图 13 所示的实验信号的频谱分布图准确地描述了实验轴承故障的具体数据,可以看出实验轴承分别在 20, 80, 140, 200 ms 处各发生了一次脉冲冲击,即发生了 4 次声发射事件,每次声发射事件发生的时间间隔 t 为 60 ms,即

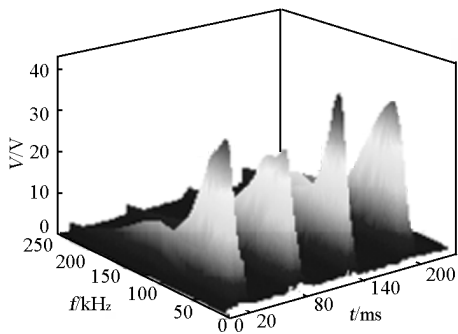


图 12 实验信号的三维小波尺度谱图
Fig. 12 Three - dimensional wavelet scalogram of the experimental signal

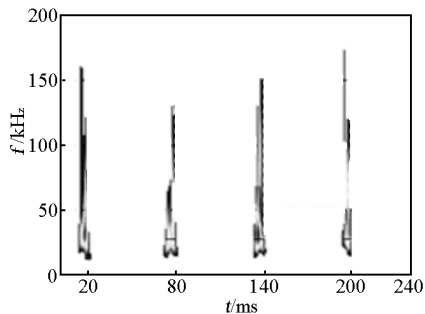


图 13 实验信号的二维小波尺度谱图
Fig. 13 Two - dimensional wavelet scalogram of the experimental signal

实验信号的脉冲周期为 60 ms,从而可以计算出该轴承的故障特征频率,即为时间间隔 t 的倒数,计算结果为 16.666 7 Hz,与实验轴承在该实验条件下计算得出的故障特征频率 $f_0 = 17.059 4$ Hz 相近,从而说明了小波尺度谱从 AE 信号中有效提取了实验轴承的故障特征,清晰、直观、准确地实现了对实验轴承外环损伤的精确诊断。

上述实验表明,小波尺度谱用于声发射检测的滚动轴承故障诊断是一种直观、有效、实用的方法。

5 结语

机械故障和损伤引发的声发射信号由多个不同能量大小的宽频突发脉冲组成。小波尺度谱用于提取 AE 信号的特征,能直观地描述机械故障和损伤引发的 AE 信号各个脉冲的数目、强度、在时频面上的分布及频率组成等,从而为判断故障元件的类型、位置、损伤程度及其发展趋势提供准确的信息。提

出声发射信号的小波尺度谱分析法,选取限制窗函数宽度的参数 σ ,对 Morlet 小波加以修改,使小波尺度谱的时间分辨率和频率分辨率能同时达到最好的效果。实验结果表明,该方法是有用的,小波尺度谱在声发射故障诊断领域有广泛的应用前景,下一步是将其投入实际使用,并进一步对 AE 信号小波尺度谱分析法做深入研究。

参考文献

- [1] 沈功田,戴光,刘时风. 中国声发射检测技术进展[J]. 无损检测, 2003, 25(6): 302-307
- [2] Ohue Yuji, Yoshida A. New evaluation method on gear dynamics using continuous and discrete wavelet transforms [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2003, 125(7): 274-281
- [3] 杨建国. 小波分析及其工程应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
- [4] 彭志科,何永勇,褚福磊. 小波尺度谱在振动信号分析中的应用研究[J]. 机械工程学报, 2002, 38(3): 122-126
- [5] 彭志科. 小波分析在旋转设备故障诊断中的应用[D]. 北京: 清华大学, 2002
- [6] Struzik Z R. Wavelet methods in (financial) time - series processing [J]. Physica A: Statistical Mechanics and its Application, 2001, 296(1-2): 307-319
- [7] 姜长泓,王龙山,尤文,等. 基于平移不变小波的声发射信号去噪研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 607-610
- [8] 冉启文,谭立英. 小波分析与分数傅立叶变换及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003
- [9] 林坚,沈志广,虞宗炜. 应用小波变换尺度谱检测行波暂态信号[J]. 上海交通大学学报, 1999, 33(9): 1182-1185
- [10] Peng Y H, Yam R, Tse P W. Wavelet analysis and envelope detection for rolling element bearing fault diagnosis—their effectiveness and flexibilities [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2001, 123(7): 303-310
- [11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1995
- [12] 刘崇春,裴正定. 一种基于 Morlet 小波的振动信号包络提取方法[J]. 电路与系统学报, 2000, 5(1): 68-71
- [13] Shi D F, Wang W J, Qu L S. Defect detection for bearings using envelope spectra of wavelet transform [J]. Journal of Vibration and Acoustics, 2004, 126(10): 567-573
- [14] 何正嘉,菅艳阳,孟庆风,等. 机械设备非平稳信号的故障诊断原理及应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [15] 李建伟,许宝杰. 机电系统非平稳振动信号分析方法的研究[J]. 北京机械工业学院学报, 2004, 19(3): 1-6
- [16] Mittrakovic D, Grabec I, Sedmak S. Simulation of AE signals and signal analysis systems [J]. Ultrasonic, 1985, 23(9): 227-232
- [17] 梅宏斌. 滚动轴承振动监测与诊断[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996

Application of wavelet scalogram in feature extraction of acoustic emission signal

Xiao Siwen, Liao Chuanjun, Li Xuejun

(Key Lab of Health Maintenance for Mechanical Equipment of Hunan Province, Hunan Science and Technology University, Xiangtan, Hunan 411201, China)

[**Abstract**] Acoustic emission (AE) signals initiated by mechanical faults or damages is composed of two types of signals; high frequency burst impulse signal and long period quasi-stationary noise signal. Wavelet scalogram has a particular time-frequency localization, which helps it to be well used for describing the time-frequency characteristics of AE signals. By analyzing the characteristics and feature extraction of typical AE signals, the paper applies wavelet scalogram for fault diagnosis based on AE technique, and presents the wavelet scalogram analysis method of AE signal for the first time. By theoretical analysis and simulation, the wavelet basis function and parameter related to the function are defined. So the limitation that best time resolution and frequency resolution of wavelet scalogram cannot get at the same time is overcome effectively. When applying wavelet scalogram for fault diagnosis of rolling bearings based on AE techniques, the results are quite visualized, clear and accurate. Both simulations and experimental research prove that wavelet scalogram can be used for condition monitoring and fault diagnosis based on AE detection well.

[**Key words**] wavelets scalogram; acoustic emission; feature extraction; fault diagnosis; rolling bearing