

# 基于广义 S 变换的声发射信号分析及定位

全惠敏<sup>1</sup>,戴瑜兴<sup>1</sup>,王鹏人<sup>2</sup>

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082; 2. 中南大学, 湖南长沙 410083)

**摘要:** 针对声发射信号分析和声源定位问题,提出了基于广义 S 变换的声发射信号分析方法和三维空间定位方法,推导出了广义 S 变换的实现过程,使用广义 S 逆变换对信号进行去噪重构.为保证各传感器时差的准确性,本文利用广义 S 变换分析声发射信号,提取其主频带能量序列曲线上峰值所对应的时间进行时差计算,然后结合三维空间定位方法对声发射源进行精确定位.仿真实验结果表明该算法能够实现声发射信号的特征提取和准确定位,且误差小,可靠性好.

**关键词:** 声发射; 广义 S 变换; 声源定位

**中图分类号:** TP274, TU459.3

**文献标识码:** A

**文章编号:** 0372-2112 (2010) 02-0371-05

## Acoustic Emission Analysis and Location Based on Generalized S-Transform

QUAN Hui-min<sup>1</sup>, DAI Yu-xing<sup>1</sup>, WANG Peng-ren<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Information, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China;

2. Central South University, Changsha, Hunan 410083 China)

**Abstract:** To solve the analysis and location of acoustic emission (AE), an approach combining generalized S-transform (GST) and three - dimension location was proposed, implementation process of GST was derived, and AE signal was de-noised by inverse generalized S-transform. GST was introduced in acoustic emission signals analysis to ensure the accuracy of time differences, the peak time on the main frequency energy serials was extracted to compute time difference, then the sound source was located combing three-dimension location method. The results show that the method could extract effective features of acoustic emission and give accurate location with little error and good reliability.

**Key words:** acoustic emission; generalized S - transform; source location

### 1 引言

声发射技术是检测材料损伤的无损检测工具,也是对岩体或其它材料进行动态监测的重要方法.岩体在外载荷的作用下产生微破裂时其内部储存的应变能以弹性波的形式释放出来,称为岩体的声发射(acoustic emission, 简成 AE)<sup>[1]</sup>.岩体声发射信号是一种声音信号,经声发射监测系统后变成电信号,它由多模式波组成,而每种模式又是由宽带频率成分波组成,具有瞬态性和多样性的特点,属于典型的非平稳随机信号<sup>[2]</sup>.AE 信号处理的目的是从采集到的宽频信号中找出最能代表 AE 发射源特征的信号,并对发射源进行精确定位.目前大部分声发射监测系统都采用了傅立叶变换或者小波变换<sup>[3~5]</sup>等波形分析法进行信号的去噪和特征提取,然后采用 SRP-PHAT 法<sup>[6]</sup>或时差定位法来进行声源的定

位.傅立叶变换属于全局变换,只能分别从时域或频域分析信号,无法满足对具有暂态、突变等特性的非平稳信号进行分析的要求.小波变换是一种时频分析方法,适合于分析暂态、突变信号,在 AE 监测系统中得到了广泛的应用,但对于低频 AE 信号其时域分辨率较低,且结果缺乏直观性.S 变换(S-Transform)作为小波变换的一种扩展,已经引起了人们的兴趣,并已经被应用于电能质量和地震信号的检测中<sup>[7,8]</sup>.然而由于 S 变换中的基本小波是固定的,这使其在使用中受到限制,高静怀等对 S 变换进行了推广,提出广义 S 变换(generalized S-transform, GST)并应用于地震反射面的检测<sup>[9,10]</sup>.本文提出将 GST 应用于 AE 信号的分析,提取声发射信号的特征参数用以 AE 信号的判断,并结合三维空间定位法进行声源定位.

## 2 广义 S 变换及实现

S 变换(S-Transform)是由 Stockwell 等学者于 1996 首次提出的<sup>[11]</sup>, S 变换定义如下:

$$S_0(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w_0(\tau - t) \exp(-2\pi ift) dt$$

$$w_0(\tau - t) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{f^2(\tau - t)^2}{2}\right] \quad (1)$$

其中,  $w_0(\tau - t, f)$  为高斯窗口,  $\tau$  为控制高斯窗口在时间  $t$  轴位置的参数,  $f$  为频率,  $i$  为虚数. S 变换中的高斯窗宽度随频率成反比变化, 在低频段的时窗较宽, 从而获得较高的频率分辨率, 而高频段的时窗较窄可以获得较高的时间分辨率. 但岩体声发射信号的分析中低频成分对时间的分辨率要求比较高, 这就希望对 S 变换的窗函数进行改进, 根据实际信号的频率分布特点和时频分析的侧重点, 加快或调慢时窗宽度随频率变化的速度. 广义 S 变换的表达式为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) w(\tau - t) \exp(-2\pi ift) dt$$

$$w(t) = \lambda \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\lambda^2(f t - \beta)^2}{2}\right] \quad (2)$$

其中  $\lambda$  为调节因子,  $\lambda > 0$ , 如  $\lambda > 1$  则时窗宽度随信号频率呈反比变换的速度加快,  $\lambda < 1$  则减慢,  $\beta$  为能量延迟时间.

在式(2)中令  $h_1(t, f) = x(t) \exp(-2\pi ift)$ , 则

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t, f) w(\tau - t, f) dt \quad (3)$$

对式(3)两边同时进行傅立叶变换得

$$\hat{S}(\tau, f) = \hat{h}_1(t, f) \cdot \hat{w}(t, f) \quad (4)$$

$$\hat{h}_1(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h_1(t, f) \exp(-2\pi if_1 t) dt = X(f + f_1) \quad (5)$$

$$\hat{w}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} w(t, f) \exp(-2\pi if_1 t) dt$$

$$= \exp\left(\frac{-2\pi^2 f_1^2}{\lambda^2 f^2}\right) \exp\left(\frac{-i2\pi f_1 \beta}{f}\right) \quad (6)$$

对式(4)做傅立叶反变换即得

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f + f_1) \cdot \hat{w}(t, f) \exp(i2\pi \tau f_1) df_1 \quad (7)$$

其中  $X(f)$  是信号  $x(t)$  的傅立叶变换,  $\hat{w}(t, f)$  是窗函数的傅立叶变换. 令  $f \rightarrow n/NT$ ,  $\tau \rightarrow jT$  则得一维离散广义 S 变换为

$$S(jT, \frac{n}{NT}) = \sum_{m=0}^{N-1} X\left(\frac{m+n}{NT}\right) \cdot G(m, n) \cdot \exp\left(\frac{i2\pi mj}{N}\right)$$

$$G(m, n) = \exp\left(-\frac{2\pi^2 m^2}{\lambda^2 n^2} - \frac{i2\pi m\beta}{n}\right) \quad (8)$$

其中  $X(n/NT)$  是信号  $x(t)$  的离散傅立叶变换,  $G(m, n)$  是窗函数  $w(t)$  的离散傅立叶变换, 由式(8)可见广义 S 变换可利用 FFT 实现快速运算, 变换后结果是一个复时频矩阵, 记为 GST 矩阵. 而一维离散 S 变换的计算式为:

$$S_0\left[jT, \frac{n}{NT}\right] = \sum_{m=0}^{N-1} X\left[\frac{m+n}{NT}\right] \exp\left(-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}\right) \exp\left(\frac{i2\pi mj}{N}\right) \quad (9)$$

由上面的式(8)、(9)对比可知广义 S 变换与 S 变换的计算相似, 只需要将 S 变换计算中调用窗函数部分改成式(8)中的  $G(m, n)$  即可. 本文取  $\beta$  为 0, 则广义 S 变换与 S 变换的区别就是  $\lambda$  可根据信号分析对时间频率的偏重不同而灵活调节.

## 3 基于广义 S 变换的声发射信号分析

### 3.1 岩体声发射信号特点

岩体声发射信号是由多模式波组成, 具有瞬态性和多样性的特点. 不同材料和不同声发射产生机理, AE 信号频率范围不一样. 矿山等深层岩体的 AE 信号按频率大致可分为高频和低频两类. 高频类 AE 信号能量小, 与岩体晶粒破裂对应, 持续时间仅有十几毫秒, 主频在 8~15kHz, 衰减快, 传播范围小, 在实际监测中只有距离近的传感器能接收到; 低频类 AE 信号能量大, 是岩体垮塌的前兆, 持续时间可达 100~300ms, 主频在 100~800Hz, 衰减慢, 传播范围大, 可被多个通道传感器接收到. 因为现场能采集到的 AE 信号几乎都是低频类信号, 故本文研究的 AE 信号主频范围为 100~1kHz.

### 3.2 基于广义 S 变换的声发射信号去噪

实际采集到的岩体声发射信号受地下各种情况的影响不可避免的夹杂有噪声成分, 他们包括检测仪器产生的白噪声和地下水流噪声及矿山机械振动噪声等. 因白噪声可以通过采用性能好的检测仪器而消除, 故岩体声发射信号的去噪主要是消除具有一定频谱的水流噪声和机械振动噪声. 本文采用的广义 S 变换去噪的方法是: 把带有噪声的 AE 信号进行分解, 得到 GST 矩阵, 对矩阵的每个元素求模, 得到 GST 模矩阵, 其列向量表示信号某时刻的幅值随频率变化的分布, 其行向量表示信号某一频率处的幅值随时间变化的分布; 计算各行的能量值, 找出能量值最大的那行记为信号的主频, 在主频附近开窗, 窗宽约为 60Hz, 其他行所代表的频率均被认为是噪声信号频谱, 故这些行中的元素被置为零; 对处理后的 GST 矩阵进行广义 S 逆变换即得去噪后的声发射信号.

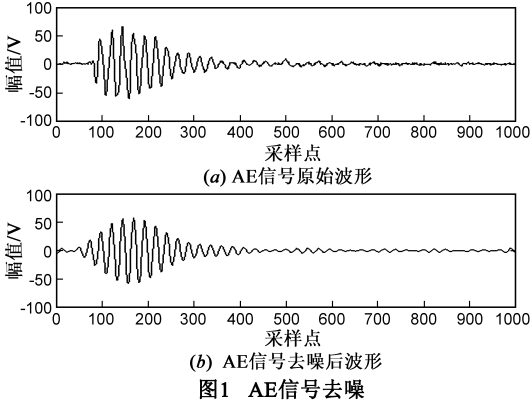
注意到广义 S 变换与信号  $x(t)$  的傅立叶变换  $X(f)$  存在如下关系

$$\int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau = X(f)$$

所以和 S 变换一样可以推导出离散广义 S 逆变换为:

$$h(KT) = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=0}^{N-1} S(jT, \frac{n}{NT}) \right\} \exp(\frac{i2\pi nk}{N}) \quad (10)$$

图 1 即是用上述去噪方法对含噪声发射信号处理的对比图.图 1(a)是来源于广西某铜矿的实际信号,图 1(b)是去噪后的 AE 信号波形.



### 3.3 AE 信号分析及特征提取

AE 信号处理中最重要的是要找出最能代表声发射源特征的参数或波形.为此先定义如下函数:

(1) GST 模矩阵频谱

$$B(f) = \max(A(t, f))$$

其中  $A(t, f)$  为信号 GST 变换模矩阵.

(2) 主频带能量序列

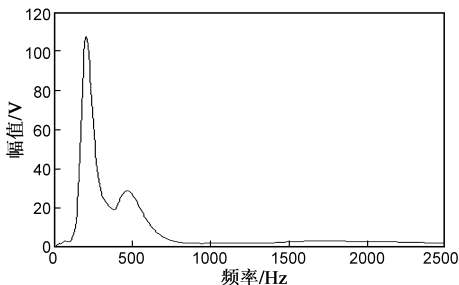
令  $B(f_0) = \max(B(f))$ ,  $f_0$  称为主频率, 则主频带为  $f_0 \pm 10$ , 主频带能量序列定义为:

$$E(t) = \sum_{k=-10}^{k=10} A^2(t, f_0 + k)$$

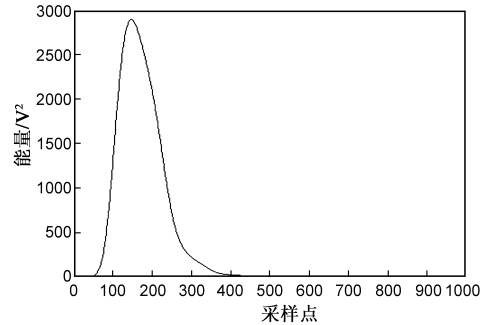
采用主频带能量序列来代替主频率能量序列是为了克服多个传感器接收 AE 信号频率的差异影响.

在 Matlab 中对声发射监测系统采集到的原始声发射信号用广义 S 变换去噪后求取上面 2 个函数的值并绘制曲线, 见图 2 和图 3.

通过对岩体声发射信号广义 S 变换的检测结果进行数据分析并结合矿山技术人员所提需求, 本文提取



以下几种特征量用于支持岩体声发射信号的判定和声发射源的定位.



(1) 主频率  $f_0$

(2) 频带幅值比: GST 模矩阵各行的最大幅值与主频率所在行的最大幅值之比.

(3) 主频带最大能量值: 主频带能量序列的最大值.

(4) 波达时间: 主频带能量序列曲线上峰值所对应的时间定为波达时间. 该时间主要用于声源定位.

(5) 起跳时间和终止时间: 在主频带能量序列曲线上从波达时间往前、后搜索, 找到第一个和最后一个超过设定阈值的时间点, 这 2 个点分别是起跳时间和终止时间, 二者的差即声发射信号持续时间.

使用以上 5 个特征结合去噪后的声发射信号上波形参数, 矿山技术人员即可掌握 AE 信号声源信息.

### 3.4 基于广义 S 变换的声发射源定位

确定声发射源的部位是声发射检测的主要目的之一, 可以有效帮助矿山技术人员找到安全隐患所在. 目前声源定位使用较多的有 SRP-PHAT 方法<sup>[12]</sup>和时差定位法, 时差定位法定出来的声源为一确定点, 可靠性高, 定位准确度取决于不同传感器时差的计算和几何关系的计算方法. 本文提出一种基于广义 S 变换的三维声源定位算法, 该算法也是一种时差定位方法, 只要通过现场测出波速  $V$ , 利用广义 S 变换后得到的各传感器波达时间就可以实现准确的实时声源定位.

设个数为  $n$  ( $n > 4$ ) 的传感器任意放置在监测区域, 传感器坐标已知, 分别为  $O_1(X_1, Y_1, Z_1)$ ,  $O_2(X_2, Y_2, Z_2)$ ,  $\dots$ ,  $O_n(X_n, Y_n, Z_n)$ , 当测量区域内任意点  $(X, Y, Z)$  处有 AE 信号时,  $n$  个传感器同时触发将接收到的信号上传到主机进行广义 S 变换, 得到各传感器的波达时间分别为  $t_1, t_2, \dots, t_n$ , 取其中任意一个时刻为基准时刻, 假定取  $t_1$ , 则其它波达时间与  $t_1$  有一个时间差分别为  $\tau_2, \tau_3, \dots, \tau_n$ , 于是可得如下方程组:

$$\begin{cases} (X - X_1)^2 + (Y - Y_1)^2 + (Z - Z_1)^2 = V^2(t_1 + 0)^2 \\ (X - X_2)^2 + (Y - Y_2)^2 + (Z - Z_2)^2 = V^2(t_1 + \tau_2)^2 \\ \vdots \\ (X - X_n)^2 + (Y - Y_n)^2 + (Z - Z_n)^2 = V^2(t_1 + \tau_n)^2 \end{cases} \quad (11)$$

这是一个高次非线性方程组,对方程式(11)中的每个方程左右展开移动可得一个通式为

$$X_i X + Y_i Y + Z_i Z + V^2 t_1 \tau_i = \frac{X^2 + Y^2 + Z^2 - V^2 t_1^2}{2} + \frac{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 - V^2 \tau_i^2}{2}$$

记  $L(i) = \frac{X_i^2 + Y_i^2 + Z_i^2 - V^2 \tau_i^2}{2}$ , 对方程式(11)中的相邻方程两两相减并写成矩阵形式为

$$A(i,1)X + A(i,2)Y + A(i,3)Z = V^2 B(i)t_1 + C(i) \quad (12)$$

其中  $A(i,1) = X_i - X_j$ ,  $A(i,2) = Y_i - Y_j$ ,

$A(i,3) = Z_i - Z_j$ ,  $B(i) = \tau_j - \tau_i$ ,

$C(i) = L(i) - L(j)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n, j = i + 1$ .

考虑到多个传感器可能同时接收到信号,即他们的时间差为0,则可设  $B(i)$  中有  $m$  个值为0,将这  $m$  个  $B(i) = 0$  的方程在方程组中调整位置,则式(12)可写成

$$\begin{cases} A(1,1)X + A(1,2)Y + A(1,3)Z = C(1) \\ \vdots \\ A(m,1)X + A(m,2)Y + A(m,3)Z = C(m) \\ A(m+1,1)X + A(m+1,2)Y + A(m+1,3)Z \\ = V^2 B(m+1)t_1 + C(m+1) \\ \vdots \\ A(n,1)X + A(n,2)Y + A(n,3)Z = V^2 B(n)t_1 + C(n) \end{cases} \quad (13)$$

对式(13)的第  $(m+1)$  行至  $n$  行进行消  $t_1$  操作,得

$D(i,1)X + D(i,2)Y + D(i,3)Z = G(i)$ ,

式中  $D(i,r) = A(i,r)B(j) - A(j,r)B(i)$ ,

$G(i) = C(i)B(j) - C(j)B(i)$

$i = m+1, m+2, \dots, n; j = i+1, r = 1, 2, 3$ .

对式(13)中的前  $m$  行,令  $D(i,r) = A(i,r)$ ,  $G(i) = C(i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, m, r = 1, 2, 3$ , 则整个方程组用矩阵表示为

$$D\bar{X} = G \quad (14)$$

其中  $D$  为  $n \times 3$  的矩阵,  $G$  为  $n \times 1$  的矩阵,  $\bar{X} = [X \ Y \ Z]^T$ , 通过以上处理,高次非线性方程组就转化成了线性方程组. 根据矩阵论知识可知式(14)所表示的方程组的唯一极小范数最小二乘解为  $\bar{X} = D^+ G$ ,  $D^+$  是  $D$  的 Moore-Penrose 广义逆矩阵.

从上面定位算法的推导可知找出多个传感器之间的准确时间差是整个定位系统精度的关键. 而从声发射源发出的信号经过岩层等传输介质到达传感器的声

波可能是纵波、横波等不同模式不同频率的波,他们的群速度与波的频率有关,频率高的波传播速度快,频率低传播速度较慢. 这样各个传感器检测到的波形信号对应性不是很好,用传统的参数分析得到的波达时间可能并不是同一个模式波上的同一个点. 所以本文采用广义 S 变换找到同一频率的波到达不同传感器的时差,广义 S 变换后各传感器的波达时间为主频带能量序列曲线上最大值所对应的时间,这样就保证了所有定位传感器波达时间都是基于相同速度的同一模式波上的同一个点,从而给出准确的时间差并最终实现真正意义的精确定位.

#### 4 仿真实验结果

本文用长沙矿山研究院研制的 ST-12 岩体监测系统采集 AE 信号,在 MATLAB 环境下用广义 S 变换去噪和特征提取及定位仿真. 因为本文使用的定位算法中对频率分析要求略低,而对时间的分辨率要求比较高,且岩体声发射信号基本是低频类信号,故需要根据主频高低灵活调整广义 S 变换中调节因子  $\lambda$ , 使  $0 < \lambda < 1$ , 本文采用  $\lambda = 1/\sqrt{5}$ . 实验中固定好各传感器的坐标,使他们尽量不在空间中对称放置,以免造成定位算法中的  $D$  不满秩,现场测定速度  $V = 4500\text{m/s}$ , 监测系统采样频率为  $20\text{kHz}$ , 广义 S 变换中选取 12 个传感器触发后的前 1000 个点进行分析. 实验中 12 个传感器的坐标分别为  $(0, 0, 0)$ ,  $(-9, 10, -7)$ ,  $(20, -3, -9)$ ,  $(120, 180, 10)$ ,  $(18, 18, 5)$ ,  $(0, 50, -50)$ ,  $(70, 0, 90)$ ,  $(200, 200, 100)$ ,  $(200, -50, 50)$ ,  $(150, 120, 50)$ ,  $(90, -80, 80)$ ,  $(200, 20, 80)$ , 不断改变实际声源坐标,用广义 S 变换提取各个传感器的波达时间及时间差,然后用本文的三维空间定位算法进行声源坐标估计. 表 1 列出了 3 组声源实际坐标  $(X_0, Y_0, Z_0)$ 、理论时间差  $\tau_0$  和估计坐标  $(X, Y, Z)$ 、广义 S 变换估计时间差  $\tau_i$  的对比 ( $i = 1, 2, \dots, 12$ ).

从表 1 可以看出声源实际坐标和估计坐标基本吻合. 实验共获取 100 组实验数据,经统计,坐标误差在  $2m$  以内的点占 98%, 误差在  $0.5m$  以内的点占 90%, 误差在  $0.1m$  以内的占 81%, 定位准确度完全可以满足矿山等大范围区域安全监测的定位需求,且该误差还可以通过提高底层 ST-12 岩体监测系统的信号采样率而得到减小.

表 1 声源实际坐标、 $\tau_0$  和估计坐标、 $\tau_i$  的对比

组号	$\tau_0$	$\tau_i$	$(X_0, Y_0, Z_0)$	$(X, Y, Z)$
1	0, 1.59, -4.233, 13.323, -4.277, 2.276, 0. 473, 28.94, 7.3, 5.26, 6.95, 6.87	0, 1.6, -4.25, 13.3, -4.25, 2.25, 0.45, 28. 95, 7.35, 5.3, 7.0, 6.9	(100, 20, -8)	(99.81, 20.04, -7.92)

续表 1-1

0, -0.339, 2.533, 30.105, -2.699, 6.805,	0, -0.35, 2.5, 30.1, -2.7, 6.8, 11.2, 47.85,	(0, 40, 30)	(-0.03, 40.25, 30.13)
2 11.222, 47.893, 37.828, 26.927, 24.0253, 34.916	37.85, 26.9, 24.05, 34.9		
0, -0.218, -2.61, 11.178, -5.052, -4.	0, -0.25, -2.6, 11.15, -5.05, -4.3, 8.50,	(60, 60, -20)	(59.89, 60.07, -19.88)
3 301.8.56, 32.075, 23.141, 9.258, 19.437, 19.879	32.05, 23.15, 9.25, 19.45, 19.9		

## 5 结论

本文提出了基于广义 S 变换的岩体声发射信号分析方法和三维空间声源定位方法,推导出了广义 S 变换的实现过程,通过 Matlab 仿真对 AE 信号进行了 GST 分析和滤噪,并使用 GST 提取的波达时间用于 AE 信号源定位.仿真实验结果表明,所提算法简洁有效,能够提供足够的 AE 特征参数给矿山安全人员使用,源定位算法准确度高,速度快,且该方法为其他声音信号的处理和定位提供了一定的参考.

### 参考文献:

- [1] 王学滨. 缺陷数目对岩样声发射及应变能降低的影响[J]. 中国有色金属学报, 2008, 18(8): 1541 - 1549.  
Wang Xue-bin. Influence of imperfection number on acoustic emissions and elastic strain energy decrease of rock specimens with initially random imperfections[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2008, 18(8): 1541 - 1549. (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 - 26.  
Geng Rong-sheng, Shen Gong-tian, Liu Shi-fen. An overview on the development of acoustic emissionsignal processing and analysis technique[J]. NDT, 2002, 24(1): 23 - 26. (in Chinese)
- [3] 孙立瑛, 李一博. 基于小波包和 HHT 变换的声发射信号分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(8): 1577 - 1581.  
Sun Li-ying, Li Yi-bo. Acoustic emission signal processing method based on wavelet package and HHT transform[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(8): 1577 - 1581. (in Chinese)
- [4] LEE J K, Lee J H. Study on damage mechanism of pipe using ultrasonic wave and acoustic emission technique[J]. Key Engineering Materials, 2007, 353(4): 2415 - 2418.
- [5] Sinha S Routh P S. Spectral decomposition of seismic data with continuous-wavelet transform[J]. Geophysics, 2005, 70(6): 9 - 25.
- [6] 金乃高, 殷富亮, 陈 ■. 基于分层采样粒子滤波的麦克风阵列说话人跟踪方法[J]. 电子学报, 2008, 36(1): 194 - 198.  
Jin Nai-gao, Yin Fu-liang, Chen Zhe. Microphone array speaker tracking using layered sampling particle filtering[J]. Acta Electronica Sinica, 2008, 36(1): 194 - 198. (in Chinese).

- [7] Shin Y J, Powers E J, Grady M, et al. Power quality indices for transient disturbances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 253 - 261.
- [8] Chilukuri M V, Dash P K. Time-frequency based pattern recognition technique for detection and classification of power quality disturbances[A]. IEEE Region 10 Annual International Conference, Proceedings/TENCON C, Chiang Mai, Thailand; Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc[C]. Chiang Mai, 2004. C260 - C263.
- [9] 高静怀, 满蔚仕. 广义 S 变换域有色噪声与信号识别方法[J]. 地球物理学报, 2004, 47(5): 869 - 875.  
Gao Jing-huai, Man Wei-shi. Recognition of signals from colored noise background in generalized S-transformation domain[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(5): 869 - 875. (in Chinese)
- [10] 陈学华, 贺振华, 黄德济. 时频域高分辨地震层序识别[J]. 吉林大学学报, 地球科学版, 2008, 38(1): 52 - 54.  
Chen Xue-hua, He Zhen-hua, Huang De-ji. Seismic sequence identifying with high resolution in time-frequency domain[J]. Journal of Jilin University, Earth Science Edition, 2008, 38(1): 52 - 54. (in Chinese)
- [11] Stockwell R G, Mansina L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum: The S transform[J]. IEEE Trans. on Signal Process, 1996, 44: 998 - 1001.

### 作者简介:



全惠敏 女. 1971 年出生于湖北省钟祥市, 现为湖南大学副教授、在读博士生, 主要研究方向为: 数字信号处理和电能质量分析.  
E-mail: hmquan123@163.com

戴瑜兴 男. 1956 年出生于湖南省浏阳市, 工学博士, 现任湖南大学电气与信息工程学院教授、博导、学科带头人. 目前主要研究领域为: 数字化系统设计理论与应用, 现代网络与通信技术, 数字化电源技术、数控技术及应用. E-mail: daiyx@hnu.cn

王鹏人 男. 1982 年出生于陕西城固, 中南大学硕士研究生, 研究方向为结构与算法、实时计算.