

# 矿山微震信号小波分析与研究

唐礼忠, 陈资南, 张君, 高龙华

中南大学资源与安全工程学院, 长沙 410083

**摘要** 针对目前人工信号识别技术和傅里叶变换在分析识别矿山微震信号时的局限性, 提出 Matlab 小波工具箱分析方法。首先对矿山实际监测到的干扰矿震信号进行小波变换, 对小波分解之后的矿震信号进行频谱分析, 结果表明能够准确地观察到信号的突变点, 确定矿震信号 P 波初到时, 从而更加精确得出矿震震源的位置和能量大小; 其次对受干扰矿震信号进行小波消噪, 同时对小波分析的 4 种阈值降噪方法进行分析对比, 发现无偏似然估计阈值效果最好, 显示了小波分析的强大消噪功能。研究结果表明, 小波分析具有良好的矿震信号识别效果和消噪能力, 是矿震信号处理和分析的一种有效方法。

**关键词** 矿震信号; 小波变换; 小波消噪; P 波初到时

**中图分类号** TD76

**文献标志码** A

**DOI** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.32.004

## Research and Analysis on Wavelet of Mine Microseismic Signals

TANG Lizhong, CHEN Zinan, ZHANG Jun, GAO Longhua

School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

**Abstract** Due to the limitations of the present artificial signal recognition technology and Fourier transform in analyzing the mine microseismic signal, the Matlab wavelet toolbox analysis method was presented. Through the transformation of the microseismic signals monitored in mine, prior to the spectral analysis of transformation signals, the discontinuity of the signals were accurately observed and the first arrival time of P wave was determined. As a result, the accurate location and energy of mining shocks were concluded. Further, through the wavelet de-noising of signals and comparing the four kinds of de-noising methods, the unbiased estimate threshold method worked best and this showed the powerful function of the wavelet analysis in de-noising. Therefore, it is revealed that the wavelet analysis is an effective method of seismic signal processing and analysis as it is capable of seismic signal recognition and noise elimination.

**Keywords** mine microseismic signal; wavelet transformation; wavelet de-noising; first arrival times of P wave

### 0 引言

微震监测系统监测到的信号不仅包括岩体破坏产生的地震波, 还包括其他干扰信号, 尽管各种信号都有其分析价值, 但从研究矿震的角度出发, 微震监测系统<sup>[1]</sup>最终要获得的信号源是岩体破裂产生的地震信号, 因此如何有效地识别获取震源信号, 成为矿震活动分析的重要前提。目前矿山微震监测中大多采用人工识别方法, 直接从系统示波器窗口, 根据波形的特征来识别和区分信号。

人工识别的方法虽然实用, 但操作复杂、工作量大, 每天需要工作人员及时清理出有效的微震事件, 不是长久之计。目前研究如何识别复杂信号源及去噪降噪的理论, 有傅里叶变换识别和小波识别理论, 傅里叶变换基于频率成分, 获取信号的频谱特征, 对信号进行识别, 还能对原始波形进行滤波去噪处理<sup>[2]</sup>。但是地震波属于非稳态信号, 信号经过傅里叶

变换后丢失了时间信息, 它只能告诉人们信号有多少种频率成分, 而不能知道不同频率对应的发生时间, 对于地震和爆破等瞬态非平稳信号处理显得不足。

而小波分析方法正是一种窗口大小固定, 但时间窗和频率窗都可以改变的时频局域化分析方法, 它本质是一种对傅里叶变换进行加窗处理, 对于低频部分采用较长的时间窗, 对于高频部分采用较短的时间窗, 从而就可以知道不同频率对应的发生时间。因此, 小波分析是一种较为精细的识别技术, 也是目前的研究热点<sup>[3-9]</sup>。本文以 Matlab 软件为平台, 探讨矿震信号的小波分析。

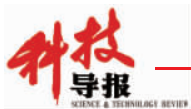
### 1 小波分析理论基础

小波变换中涉及到的函数属于  $L^2(R)$  函数, 即函数其平方可积<sup>[9-13]</sup>。如果函数  $\psi(t) \in L^2(R)$ , 函数  $\omega(t)$  的傅里叶变换  $\hat{\psi}$

收稿日期: 2013-06-03; 修回日期: 2013-10-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB732004)

作者简介: 唐礼忠, 教授, 研究方向为岩土工程结构稳定及工程地质灾害防治等, 电子信箱: lztang09@gmail.com



( $\omega$ ) 满足的容许条件为

$$C_\psi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{|\omega|} |\hat{\psi}(\omega)|^2 d\omega < \infty \quad (1)$$

则称  $\psi(t)$  为一个基小波或者一个母小波。从式(1)可看出,基小波函数为能量有限的函数,及具有围绕一点收敛集结的有限能量。

对基小波  $\psi(t)$  进行伸缩和平移后,得到一个小波系列:

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

式中,  $a, b \in R$ , 且  $a \neq 0$ 。其中  $a$  为伸缩因子, 也称尺度因子,  $b$  为平移因子。

因此, 对于原始波形信号  $x(t)$ , 可由式(3)给出

$$(W_\psi x)(a, b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)} dt \quad (3)$$

即是对信号  $x(t)$  基于母小波  $\psi(t)$  的连续小波变换, 其中  $\langle x,$

$\psi_{a,b} \rangle$  表示内积运算,  $\overline{\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)}$  是对  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  的共轭运算。

其逆变换公式为

$$x(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{a^2} W_\psi(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (4)$$

通过式(3)可以看出, 一维信号函数变成了二维信号函数, 这是基于尺度因子  $a$  和平移因子  $b$  的变化, 原始信号的频域和时域通过  $a, b$  变化既可以照顾到高频信号, 也可以照顾到低频信号, 同时对局部时间段的分析也可以得到体现。

在实际运用当中, 最终获取的是离散化信号, 因此有必要对连续小波变换做离散化处理, 假设  $a = a_0^j, b = j b_0 a_0^k, j, k \in Z$ , 那么基小波函数系列为

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a_0|^j}} \psi(a_0^j t - k b_0) \quad (5)$$

将基小波函数带入连续小波变换函数中, 得到离散小波变换的公式

$$(W_\psi x)(a, b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{|a|^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi(a_0^j t - k b_0)} dt \quad (6)$$

如果取  $a=2, b=1$  时, 小波基为

$$\psi_{j,k}(t) = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \psi(2^j t - k) \quad (7)$$

则对应的离散小波变换公式如式(8)所示:

$$(W_\psi x)(a, b) = \langle x, \psi_{a,b} \rangle = \frac{1}{\sqrt{2^j}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \overline{\psi(2^j t - k)} dt \quad (8)$$

通过整数  $j, k$  的变换, 信号就可以在时频上进行精细化分析<sup>[16-18]</sup>。

## 2 基于小波分析的信号识别

通过人工识别技术的研究, 对微震监测信号可大致分类, 但是对于某些信号仍然很难用肉眼进行分辨, 特别是地

震波 P 波到时选取, 因此需要更加精细化的分辨技术, 小波分析被称为信号分辨技术中的显微镜, 具有很好的高低频分辨水平<sup>[9]</sup>。在信号的检测过程中必然会混入噪声, 因此为了得到有效的波形, 要进行降噪处理。在 Matlab 小波工具箱中具有很好的降噪方法, 有强制消噪, 给定软阈值消噪, 默认消噪等方法<sup>[9]</sup>。利用 Matlab 小波工具箱对地震波信号以及受干扰地震波信号进行小波分解和降噪。

### 2.1 Matlab 矿震信号小波变换

小波分析的过程, 可通过图 1 来描述: 对于给定的一个小波基, 在给定的原始信号时间段的开始点与小波基进行对比, 得到一个相似程度系数  $C$ ; 然后随着时间的推移, 平移小波基, 直到给定时间段的时间结束, 得到一组程度系数。通过式(1), 变换小波基的尺度, 重复以上动作, 最后形成了相似系数矩阵。

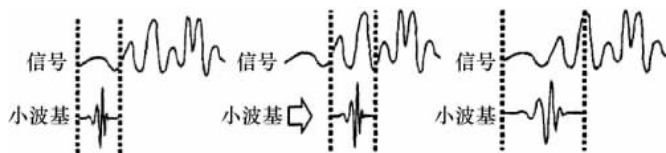


图 1 小波分析的过程  
Fig. 1 Wavelet analysis

小波系数列 coefficients 可由式(3)给出, 对应于一系列尺度因子  $a$  和平移因子  $b$ , 尺度因子  $a$  越大, 则表示对信号的低频部分分辨越好, 同时时窗也较宽; 尺度因子  $a$  越小, 则表示对信号的高频部分分辨越好, 同时时窗较窄。随着平移因子  $b$  的移动,  $a$  值在不断地变化, 意味着频率随时间的变化而变化, 因此通过观察尺度—时间关系图, 可以观察到精细化的频谱图。

图 2 和图 3 分别为典型矿震波形和其经过小波分解后的频谱图。从图 3 可知, 在 A 区域的末尾处存在一个颜色突然变黑的分界线, 说明此区域存在奇异点, 根据采样频率和图中的时间步距, 结合图 3 中的微震检测到地震波形, 可以发现这个奇异点对应于 P 波的初到达时间, 因此这意味着对于微震检波窗口中无法用肉眼选取的 P 波初到时, 可以通过分析观察小波频谱图的方法找到。B 区域的颜色较深, 且上部宽, 下部窄, 这说明低频信号占主要成分, 且此区域集中了地震波的主要能量。C 区域, 通过图 3 可以看到高频信号衰减得很快, 而低频信号衰减得很慢, 随着时间的推移高频部分几乎为 0。

图 3 的频谱图中, A、B、C 代表竖向 3 块区域, 间隔区间为 1000, 蓝色箭头表示变化趋势, 横坐标表示时间步距, 纵坐标表示尺度因子  $a$  值, 图片右侧的由白色到深黑色变化的标注条, 代表了对给定的  $a, b$  相应的频率比重大小。

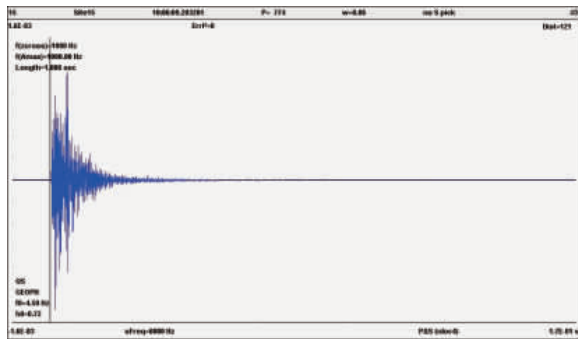


图 2 矿震信号波形

Fig. 2 Waveform of mine earthquake

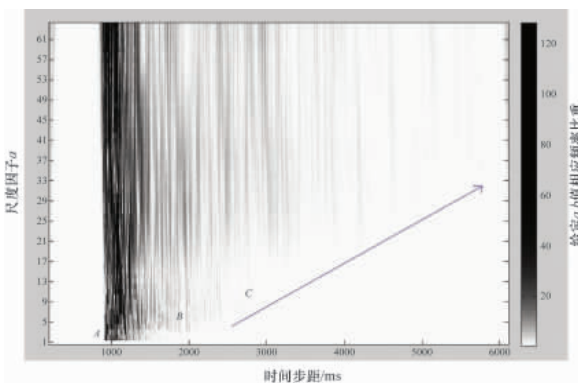


图 3 小波变换后的频谱图

Fig. 3 Spectrum of wavelet transform

## 2.2 Matlab 矿震信号小波消噪

小波消噪的特点是不平滑。平滑是去除高频信息而保留低频信息,而小波滤波是要试图去除所有噪声,保留所有信号,并不考虑频率范围。并且它是在小波变换域对小波系数进行非线性处理<sup>[9]</sup>。图 4 为受到噪声干扰的地震波形,而噪声的特点是高频,低幅值,而且随着尺度因子  $a$  值的增大,迅速消失。但并不意味高频就是噪声,地震波也存在着高频部分,这是小波分析的优势之处,不会丢掉信号的高频部分<sup>[20-22]</sup>。

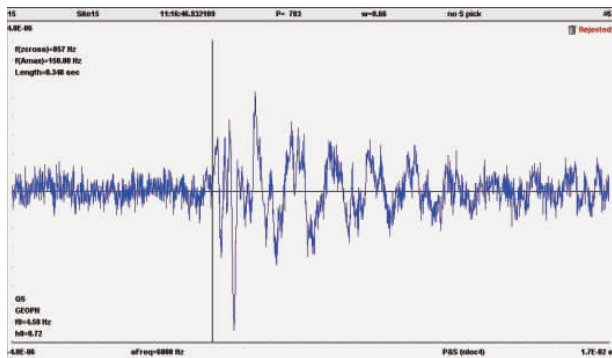


图 4 受到干扰的地震波形

Fig. 4 Disturbed mine earthquake waveform

图 5 是对图 4 的干扰地震波波形进行的小波变换后的合成图。对比图 4、图 5 可以看到,噪声部分几乎被完美地去除,显示了小波分析的强大降噪功能。

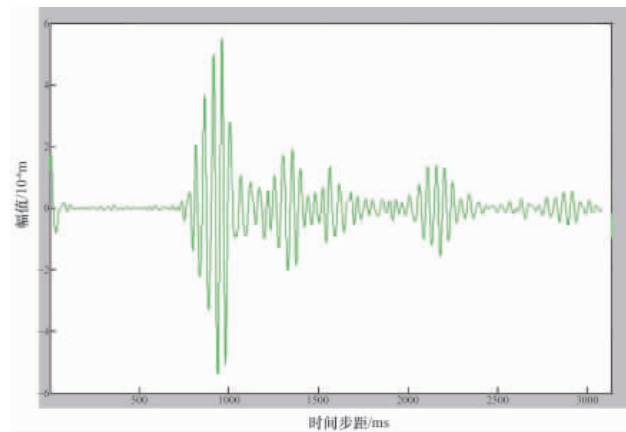


图 5 小波变换合成图

Fig. 5 Composite image of wavelet transform

信号降噪的过程一般分为如下 3 个步骤<sup>[19-21]</sup>:

(1) 选择小波基,并确定分界的层数,一般地震波选择 db 小波会得到比较好的分解波形。

(2) 对小波分解高频系数进行阈值设定,一般有默认阈值,该方法利用 `ddencmp` 生产信号默认阈值;强制降噪阈值,即将小波分解结构中的高频系数都设置为 0,滤掉所有的高频部分,然后再重构信号;给定阈值降噪,一般根据经验公式得到。

(3) 小波重构。根据小波分解的最低层低频系数和各层高频系数,进行小波重构。

图 6 所示的 4 种阈值降噪方法,都有效地消除了噪声。从图 6 可知,固定阈值曲线相对光滑,而无偏似然估计阈值保留了一定的高频信号。

根据小波工具箱的统计参数,表 1 给出了各阈值信号最大幅值与原始信号最大阈值的比值,以及各阈值信号的均方差与原始信号方差的比值。设最大幅值之间的比值为 MAR (Maximum Amplitude Rate), 均方差比为 SDR (Standard Deviation Rate)。

从表 1 可以更加清楚地看到,无偏似然估计阈值效果最好,其实质是给定软阈值,能够很好地保留信号里的高频信号成分,更加接近原始信号的有效成分。但是一般对于某些计算精度要求不高的信号,也可以用固定阈值,固定阈值的优点是曲线光滑,高频成分少。

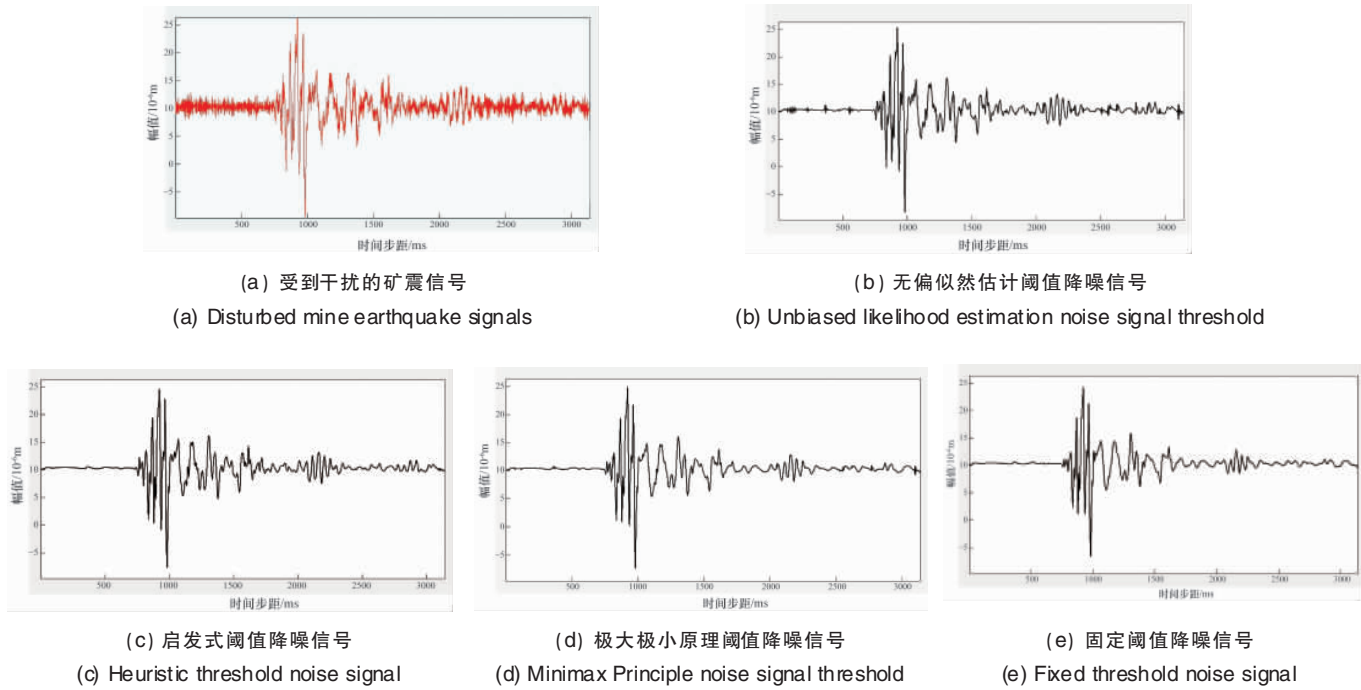
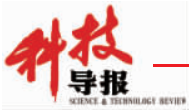


图 6 强干扰地震信号及不同阈值降噪的信号

Fig. 6 Disturbed mine earthquake signals and different threshold noise signals

表 1 各阈值与原始信号的 MAR 和 SDR 值  
Table 1 Threshold and the original signal MAR and SDR value

降噪指标	无偏似然阈值	极值阈值	启发式阈值	固定阈值
MAR	0.112	0.139	0.153	0.180
SDR	0.325	0.384	0.364	0.433

### 3 结论

对地下矿山震源信号识别这一关键技术进行了研究。对于受到干扰的地震信号,通过小波分析理论,认为小波分析能够很好地处理非稳态信号,保留了信号的有用信息;结合 Matlab 工具箱小波分析,对冬瓜山铜矿微震系统监测到的强干扰信号进行了小波变换和降噪处理,结果表明小波分析具有良好的信号识别效果和消噪能力。主要结论如下:

(1) 通过研究小波理论,认为小波分析在处理非稳态信号方面具有不可比拟的优势,而井下矿山信号正是这种非稳态信号,笔者认为小波分析对于有效识别矿震信号具有重要的作用。

(2) 使用 Matlab 工具箱小波分析对强干扰信号进行小波变换,通过观察尺度-时间关系图,可以观察到精细化的频谱图,并能对 P 波初到时进行有效识别,其小波变换合成图符合理论推断,有效地保留了高频和低频信息,同时对含噪声信号进行了有效地消噪处理。

### 参考文献 (Reference)

- [1] 杨志国, 于润沧, 郭然, 等. 微震监测技术在深井矿山中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 1066-1073.  
Yang Zhiguo, Yu Runcang, Guo Ran, et al. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 1066-1073.
- [2] 徐宏斌, 李庶林, 陈际经. 基于小波变换的大尺度岩体结构微震监测信号去噪方法研究[J]. 地震学报, 2012, 34(1): 85-96.  
Xu Hongbin, Li Shulin, Chen Jijing. Acta Seismologica Sinica, 2012, 34(1): 85-96.
- [3] 周彦江, 潘一山. 基于小波变换的矿震波的 P 波和 S 波的识别[J]. 煤矿开采, 2007, 12(6): 1-4.  
Zhou Yanjiang, Pan Yishan. Coal Mining Technology, 2007, 12(6): 1-4.
- [4] Sweldens W. The lifting scheme: A new philosophy in biorthogonal wavelet constructions[C]/Proceedings of the SPIE-The International Society for Optical Engineering, 1995, 256968-256979.
- [5] 凌同华, 李夕兵. 基于小波变换的时能分布确定微差爆破的实际延迟时间[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2266-2270.  
Ling Tonghua, Li Xibing. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2266-2270.
- [6] 靳新民, 王德胜. 小波包能量法在爆破地震安全中的应用 [J]. 有色金属, 2004, 56(2): 96-99.  
Jin Xinmin, Wang Desheng. Nonferrous Metals Engineering, 2004, 56(2): 96-99.
- [7] 金解放, 赵奎, 王小军, 等. 岩石声发射信号处理小波基选择的研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(2): 12-15.  
Jin Jiefang, Zhao Kui, Wang Xiaojun, et al. Mining Research and Development, 2007, 27(2): 12-15.
- [8] 凌同华, 李夕兵. 用小波变换识别微差爆破中的实际延迟时间[J]. 湖南科技大学学报, 2004, 19(2): 21-23.

- Ling Tonhua, Li Xibing. Journal of Hunan University of Science & Technology, 2004, 19(2): 21-23.
- [9] 肖大雪. Matlab 小波分析在信号处理中的应用[J]. 科技广场, 2011(1): 61-64.
- Xiao Daxue. Science Mosaic, 2011(1): 61-64.
- [10] 柳建新, 韩世礼, 马捷, 等. 小波分析在地震资料去噪中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 541-545.
- Liu Jianxin, Han Shili, Ma Jie, et al. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 541-545.
- [11] 刘燕德, 欧阳爱国, 应义斌, 等. 小波分析用于光谱信号处理及其在 Matlab 中的实现[J]. 传感技术学报, 2006, 19(3): 821-823.
- Liu Yande, Ouyang Aiguo, Ying Yibin, et al. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2006, 19(3): 821-823.
- [12] 张义平, 吴桂义. 爆破地震波特性和研究[J]. 矿业研究与开发, 2007, 27(6): 68-72.
- Zhang Yiping, Wu Guiyi. Mining Research and Development, 2007, 27(6): 68-72.
- [13] 孙兴林, 匡中文, 王晨辉, 等. 基于 Matlab 的矿震信号小波分析[J]. 煤矿安全, 2012, 43(6): 168-171.
- Sun Xinglin, Kuang Zhongwen, Wang Chenhui, et al. Safety in Coal Mines, 2012, 43(6): 168-171.
- [14] Yomogida K. Detection of anomalous seismic phases by the wavelet transform[J]. Geophysical Journal International, 1994, 116: 119-130.
- [15] 梁宝霞. 矿震信号识别和定位及其在木城涧煤矿的应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
- Liang Baoxia. The Signal Identification and Localization of Rockburst and Their Application at Muchergjian Colliery[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007.
- [16] 许大为, 潘一山, 李国臻, 等. 基于小波变换的矿山微震信号滤波方法研究[J]. 地质灾害与环境保护, 2008, 19(3): 74-77.
- Xu Dawei, Pan Yishan, Li Guozhen, et al. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2008, 19(3): 74-77.
- [17] Calderbank A R, Daubechies L, Sweldens W, et al. Wavelet transforms that map integers to integers[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 1998, 5(3): 332-369.
- [18] Anant K, Dowla F. Wavelet transform methods for phase identification in three-component seismograms bull[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1997, 87(6): 1598-1612.
- [19] 许大为. 小波变换在矿震信号滤波和震相到时拾取中的应用研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2007.
- Xu Dawei. Study on Application of wavelet Transform in filtering rockburst data and picking the onset time of seismic phase[D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2007.
- [20] Gorbatikov A V, Kalinina A V, Volkov V A, et al. Results of analysis of the data of microseismic survey at Lanzarote Island, Canary, Spain[J]. Pure and Applied Geophysics, 2004, 161: 1561-1578.
- [21] 许大为, 潘一山, 王岩, 等. 基于小波变换的矿山微震信号滤波方法研究[J]. 矿业工程, 2007, 5(2): 66-68.
- Xu Dawei, Pan Yishan, Wang Yan, et al. Mining Engineering, 2007, 5(2): 66-68.
- [22] Morlet J. Wave propagation and sampling theory and complex waves[J]. Geophysics, 1982, 43: 215-235.

(责任编辑 吴晓丽)

## ·学术动态·



## 中国科技论坛聚焦“海水淡化与供水安全”

2013年10月16日,由中国科协主办、中国海洋学会等承办的第28次中国科技论坛——海水淡化与海岛供水安全学术会议在天津召开。中国工程院院士高从堦、国家海洋局天津海水淡化与综合利用研究所总工程师阮国岭、天津膜天膜技术有限公司总工程师戴海平、国家海洋局第三海洋研究所海岛中心主任陈庆辉担任本次论坛学术召集人。来自国家海洋局、沿海省市海洋与渔业管理部门、高校和科研院所的100余位专家、学者参加会议。

本次论坛围绕当前海岛海水淡化技术、产业及海岛地区水资源保障中的热点问题,邀请产、学、研、政4个方面的专家学者,从海水淡化与海岛开发、海水淡化技术基础研究、海水淡化装备材料应用、海水淡化自主创新和产业化、海水淡化与环境问题、超滤技术应用、国产反渗透膜应用、可再生能源与海水淡化耦合、海岛水资源规划等不同角度进行深入研讨和交流。

详见中国科协网 <http://www.cast.org.cn/n35081/n35473/n35518/15129644.html>。