

检测地震不连续性结构的多分辨局部结构熵算法

周艳辉, 高静怀, 陈文超

(西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安)

摘要: 根据地质构造的变化特点和地震数据的时间-尺度特性, 提出了基于多尺度瞬时相位的多分辨率局部结构熵算法. 首先在小波域的多尺度瞬时相位体上, 利用局部结构熵检测不同分辨率下的局部不连续性结构, 然后利用图像融合中的像素灰度极大值法, 将不同分辨率下的局部结构熵值进行融合, 得到一个最终的不连续性检测结果. 在具体的算法实现中, 利用螺旋坐标系对分析单元内的地震道进行排列组合, 构建4阶协方差矩阵, 减少了计算量. 模型和实际资料算例的计算结果表明, 与基于特征结构的相干算法相比, 该方法既可以清晰地显示出大的结构突变, 又能加强微弱、缓变的岩性变化, 计算效率提高了近4倍.

关键词: 多尺度瞬时相位; 局部结构熵; 局部不连续性结构; 融合; 螺旋坐标系

中图分类号: TN911.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2008)02-0226-05

On the Method of Multi-Resolution Local Structural Entropy for Enhancing Local Discontinuities of Seismic Data

ZHOU Yanhui, GAO Jinghuai, CHEN Wenchao

(School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In terms of the variation of geological feature and the time-scale distribution of seismic data, a multi-resolution local structural entropy (LSE) measure based on the multi-scale instantaneous phase is proposed. At first, based on the multi-scale instantaneous phase in wavelet domain, the local structural entropy measure is used to detect different-resolution local discontinuities of seismic data. Then the method of maximizing pixel-grey of image is applied to fuse the local structural entropies in different resolution. And the LSE is finally obtained. In order to reduce the computational complexity the helix coordinate is introduced to arrange and combine the seismic traces in the analyzing cube and to construct the fourth-order covariance matrix. Synthetic results and real data show that not only the large-scale structural discontinuities are displayed clearly, but also small-scale and slow structural variations are enhanced. The approach improves the interpretation of seismic data, and the computational efficiency increases nearly four times.

Keywords: multi-scale instantaneous phase; local structural entropy; local discontinuities; fusion; helix coordinate

利用地震资料检测地下断层、裂缝、岩性变化以及地质体的边缘等不连续性结构对隐蔽油气藏勘探有重要的意义. 相干数据体方法^[1]能够对断层、河道等不连续性结构进行有效检测, 从本质上改变了依

靠经验直接从地震剖面上进行地质解释的模式, 提高了利用计算机自动解释的能力, 但这种算法受噪声的影响较大.

基于多道相似的相干算法^[2]提高了抗噪性能,

但增加了分析单元中的地震道,这意味着计算量的增加以及横向分辨率的降低.基于特征结构的相干算法^[3-4]将地震数据映射为分离的信号和噪声子空间,具备更好的抗噪性能,提高了检测结果的横向分辨率,但协方差矩阵特征值的计算降低了运算效率.局部结构熵(LSE)算法^[5]具备较高的运算效率,但主要用于检测大的断层等,对细小、微弱不连续性结构的检测能力较低.

本文针对局部结构熵算法对细微岩性变化检测能力弱的问题,提出基于多尺度瞬时相位的多分辨率局部结构熵算法,并对不同分辨率下的局部结构熵值进行融合,所得到的成像结果既能清晰显示大的结构突变,又能加强微弱、缓变的岩性变化.

1 算法描述

1.1 多尺度瞬时相位

连续小波变换具有多尺度(即多分辨率)的特性,能够在不同的分辨率下分析信号的局部特征.基于小波变换的多尺度瞬时相位^[6-7]描述了不同尺度下,具有不同分辨率的地震信号的瞬时特征,从而有利于细致描述不同分辨率下的地质结构变化.

设一信号 $f(t)$ 是平方可积函数,其连续小波变换可表示为

$$W(b, s) = \frac{1}{s} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) g^* \left(\frac{t-b}{s} \right) dt \quad (1)$$

式中:时间 $t \in \mathbf{R}$; b 为时移, $b > 0$; s 为尺度因子;上标 $*$ 表示取复共轭;小波函数 $g(t)$ 满足的特定条件见文献^[6].

对于一个离散时间信号 $f(n\Delta t)$,其中 Δt 为时间采样间隔, $n=1, 2, \dots, N$,其小波变换可表示为

$$W(n', s) = \frac{1}{s} \sum_{n=1}^N f(n\Delta t) g^* \left(\frac{(n-n')\Delta t}{s} \right) \quad (2)$$

式中: n' 为时移采样点.信号对应的多尺度瞬时相位定义为

$$\theta(n', s) = \arctan[W_I(n', s)/W_R(n', s)] \quad (3)$$

式中: $W_I(n', s)$ 和 $W_R(n', s)$ 分别为小波变换 $W(n', s)$ 的虚部和实部.式(2)、式(3)中的小波函数 $g(t)$ 为改进的 Morlet 小波^[6,8],与地震信号最为接近,能够利用信号和随机噪声的时间-尺度域特征差别计算多尺度瞬时相位,有效地压制随机噪声.

假定地震信号的有效频率范围为 (f_1, f_2) ,根据频率 f 和小波尺度因子 s 的对应关系^[9],可得到反映信号特征的 M 个尺度因子为

$$s_m = 2^{-u_0-(m-1)\Delta u}, m = 1, 2, \dots, M \quad (4)$$

式中: Δu 为尺度间隔; 2^{-u_0} 为选定的最大尺度,对应信号的低频段.在每个尺度 $s=s_m$ 下,利用式(3)计算地震数据体的多尺度瞬时相位体 $\theta(s_m, x, y, t)$ (其中 x 表示纵测线号, y 为横地震道号, t 为时间点).实际计算中,在满足地震信号特征分析的情况下,适当增大 Δu ,令 $\Delta u=0.5$,减少尺度个数 M ,从而降低了计算量.

1.2 协方差矩阵构成

在地震数据体的多尺度瞬时相位体上计算一点 (x, y, t) 的不连续性时,首先要选择以该点为中心的分析单元.本文选择分析单元为立方体,大小为 $[N_x, N_y, N_t]$ (即包含 N_x 条侧线,每条侧线 N_y 个地震道,每个地震道有 N_t 个时间采样点).分析单元内每道的瞬时相位可记为向量

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{ij}^s &= [\theta(s, x_i, y_j, t_1), \dots, \theta(s, x_i, y_j, t_k), \dots, \\ &\quad \theta(s, x_i, y_j, t_{N_t})]^T \\ t_k &= t + k - (N_t + 1)/2 \quad k = 1, \dots, N_t \\ x_i &= x + i - N_x/2 - 1 \\ i &= 1, \dots, N_x \quad y_j = y + j - N_y/2 - 1 \\ j &= 1, \dots, N_y \end{aligned}$$

将 $\theta(s, x_i, y_j, t_k)$ 简记为 θ_{ijk} ,表示尺度因子为 s 时,点 (x_i, y_j, t_k) 处的瞬时相位值.尺度因子为 s 的

瞬时相位每一道均值为 $\bar{\theta}_{ij}^s = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} \theta_{ijk}$,令每一道瞬时相位减去其均值 $\bar{\theta}_{ij}^s$,得到修正后的尺度因子为 s 时的瞬时相应地震道

$$\begin{aligned} \mathbf{l}_{ij}^s &= [\theta_{ij1}^s - \bar{\theta}_{ij}^s, \dots, \theta_{ijN_t}^s - \bar{\theta}_{ij}^s]^T \\ i &= 1, \dots, N_x \quad j = 1, \dots, N_y \end{aligned}$$

为了减少计算量,本文提出借鉴螺旋坐标系的思想排列图 1a 分析单元内的地震道.按照图 1a 所示将分析单元分为 4 个象限,每个象限包含的地震道数为 $N_{xy} = N_x N_y / 4$,以图 1b 所示的方式,依次将 $\mathbf{l}_{ij}^s$ 赋予第 d 象限内的向量 $\mathbf{a}_{d1}^s, \mathbf{a}_{d2}^s, \dots, \mathbf{a}_{dN_{xy}}^s$, $d=1, 2, 3, 4$,根据螺旋坐标系中多维数据变一维处理的方法^[10],在每个象限内将地震道依次首尾连接,合并成一个向量,即 $\mathbf{a}_d^s = [(\mathbf{a}_{d1}^s)^T, (\mathbf{a}_{d2}^s)^T, \dots, (\mathbf{a}_{dN_{xy}}^s)^T]^T$,从而得到分别代表 4 个象限内地震道的 4 个向量,进而得到分析单元的协方差矩阵为

$$\mathbf{C}_s = \begin{bmatrix} (\mathbf{a}_1^s)^T \\ (\mathbf{a}_2^s)^T \\ (\mathbf{a}_3^s)^T \\ (\mathbf{a}_4^s)^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{a}_1^s & \mathbf{a}_2^s & \mathbf{a}_3^s & \mathbf{a}_4^s \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} (a_1^s)^T a_1^s & \cdots & (a_1^s)^T a_4^s \\ \vdots & & \vdots \\ (a_4^s)^T a_1^s & \cdots & (a_4^s)^T a_4^s \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $(a_p^s)^T a_q^s$ 表示列向量 a_p^s 和 a_q^s 之间的互相关性, 即分析单元内 a_p^s 所表示的地震道和 a_q^s 的地震道数据之间相关性强弱, 值越大表示两地震道的相关性越强。

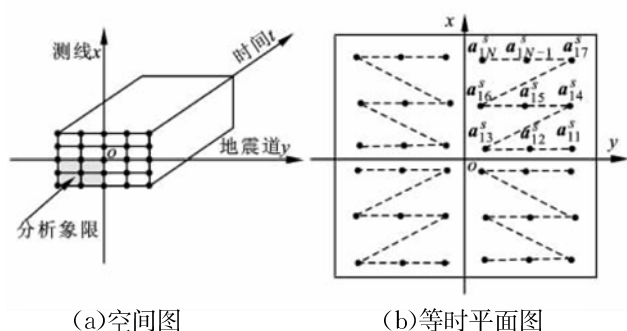


图1 分析单元选择示意图

1.3 基于多尺度瞬时相位的局部结构熵及其融合

基于多尺度瞬时相位的局部结构熵定义为

$$\epsilon_m(s, x, y, t) = \frac{\text{tr} C_s}{\|C_s\|} - 1 = \frac{\sum_{p=1}^4 (a_p^s)^T a_p^s}{\left(\sum_{p,q=1}^4 [(a_p^s)^T a_q^s]^2 \right)^{1/2}} - 1$$

$m = 1, 2, \dots, M$ (6)

式中: $\epsilon_m(s, x, y, t)$ 是在尺度 $s = s_m$ 时, 基于地震数据的瞬时相位体得到的点 (x, y, t) 处的局部结构熵值; $\text{tr} C_s$ 表示矩阵 C_s 的迹 $\|C_s\|$ 为矩阵 C_s 的 2 范数。在多尺度瞬时相位体上, 当分析单元内地震道与道的相关性较强时, $[(a_p^s)^T a_q^s]^2$ 逼近 $[(a_p^s)^T a_p^s] \cdot [(a_q^s)^T a_q^s]$, ϵ_m 的值较小, 若地震道完全相关, 则 $\epsilon_m = 0$, 当道之间的相关性很弱, 不连续性很强时, $[(a_p^s)^T a_q^s]^2 \ll [(a_p^s)^T a_p^s][(a_q^s)^T a_q^s]$, $\epsilon_m \rightarrow 1$ 。可见, $0 \leq \epsilon_m \leq 1$, 反映了地震道与道之间的不连续性(即不相干性)。

利用图像融合中的像素灰度极大值法, 本文定义局部结构熵为

$$\epsilon(x, y, t) = \max(\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_M) \quad (7)$$

基于不同尺度瞬时相位的 ϵ_m 反映了地震数据在不同分辨率下的不连续性描述, 大尺度(对应低频段)的局部结构熵值主要描述的是地震数据体中比较缓慢的岩性变化, 而小尺度(对应高频段)的则突出地层中的结构突变(例如断层)以及裂隙等。利用式(7)融合 $\epsilon_1, \epsilon_2, \dots, \epsilon_M$, 最终得到点 (x, y, t) 的局部

结构熵 $\epsilon(x, y, t)$, 融合后的检测结果既可以显示出地震数据体的大断层等结构, 又能加强细节的不连续性变化, 从而能更有效地提高自动解释能力。

2 模型及实际资料算例

图2是模拟实际地震数据频谱特性的合成二维地震记录, 子波主频为 50 Hz, 时间采样间隔为 1 ms, 地震道号为 0~63。A₀ 处(第 22 和 24 道之间)是一个垂向断层, B₀ 处(第 39、40、41 道附近)为模拟地层缓变引起的不连续性结构(例如河道等), 在地震记录上表现较弱。图 3a 是直接合成地震记录上计算局部结构熵(LSE)值的结果, 突出了 A₀ 处的断层, 而对 B₀ 处的不连续性结构检测效果较弱。A₀ 处为地震记录低频和低频分量的突变, B₀ 处的地层缓变则更多为信号低频段的变化。合成地震记录的有效频率范围为 30~80 Hz, 根据频率和尺度的关系, 可得 $M=2$, 利用式(4)得 2 个尺度因子为 $s_1 = 0.2, s_2 = 0.12 (s_1 > s_2)$, 分别在尺度 s_1 (对应低频段)、 s_2 (对应高频段)下利用式(6)计算基于瞬时相位的局部结构熵值, 结果见图 3b、3c。与图 3a 的检测结果相对比可以看出, B₀ 处的不连续性变化在图 3b 上得到了加强, A₀ 处断层在图 3c 上反映得更突出。图 3d 为利用式(7)融合图 3b、3c 得到的结果, 不连续性结构处的局部结构熵值较图 3a 得到了加强, 尤其突出了 B₀ 处的地层缓变结构。

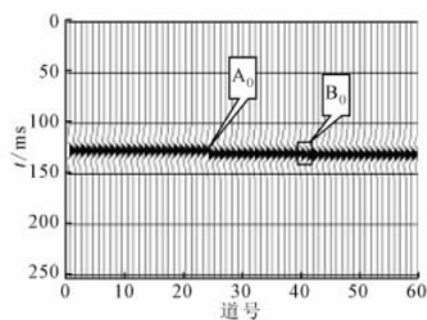
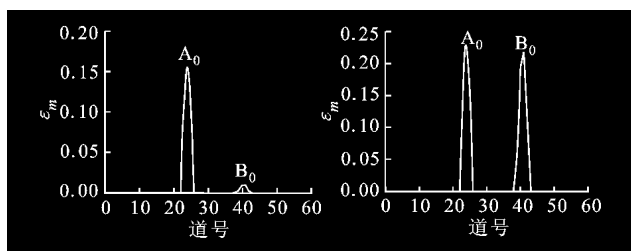


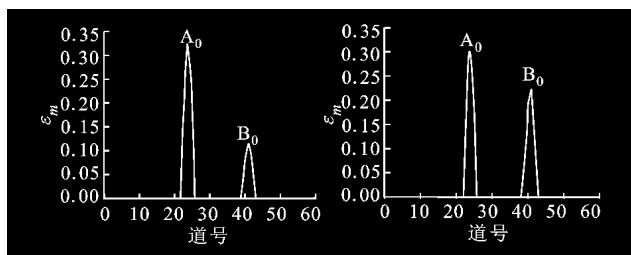
图2 合成地震记录

实际资料算例中选取的三维数据体测线号范围为 1 100~1 580, 地震道号范围为 1 300~1 650, 时间为 0.75~1.3 s, 时间采样间隔为 1 ms。选取分析单元为 $[4, 4, 45]$, 分别用基于特征结构的相干算法(具体计算公式见文献[3-4])、局部结构熵算法以及基于多尺度瞬时相位的局部结构熵算法检测其不连续性。在计算多尺度瞬时相位时, 根据三维数据体的有效频带(约为 30~80 Hz)以及对合成地震记录的检测结果, 选取和算例中同样的尺度因子 s_1, s_2 。

在CPU为PentiumD3.0GHz的微机,用



(a)直接计算 LSE

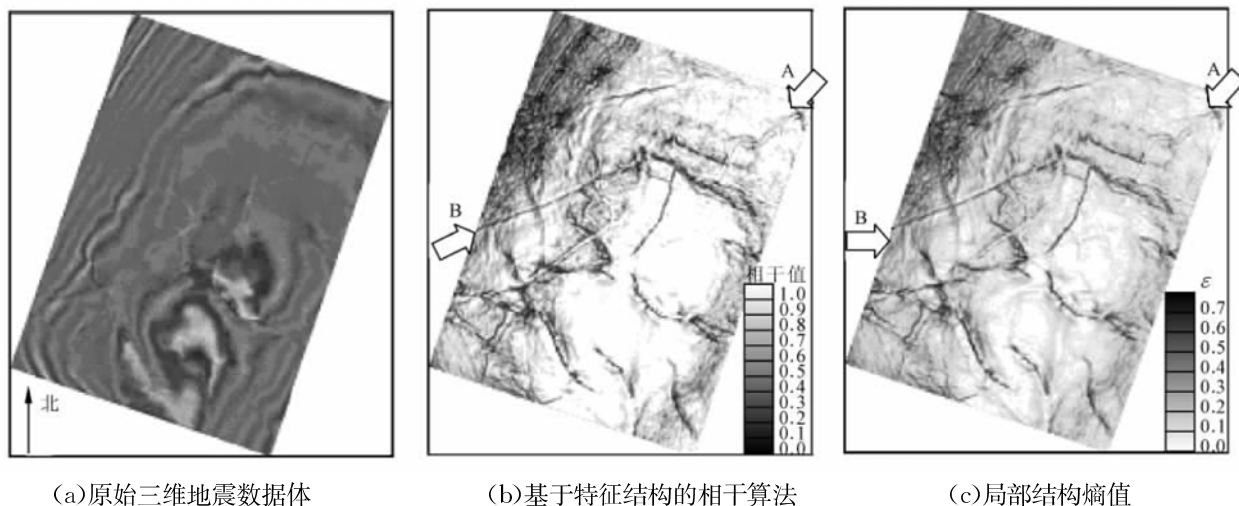
(b)尺度因子为 s_1 (c)尺度因子为 s_2

(d)图 3b、图 3c 融合结果

图3 时间 $t=132$ ms 处的不连续性

基于特征结构的相干算法和基于多尺度瞬时相位的局部结构熵算法计算数据体相干值,所用时间分别为 450 min 和 86 min,可见本文方法的运算效率得到了显著提高。

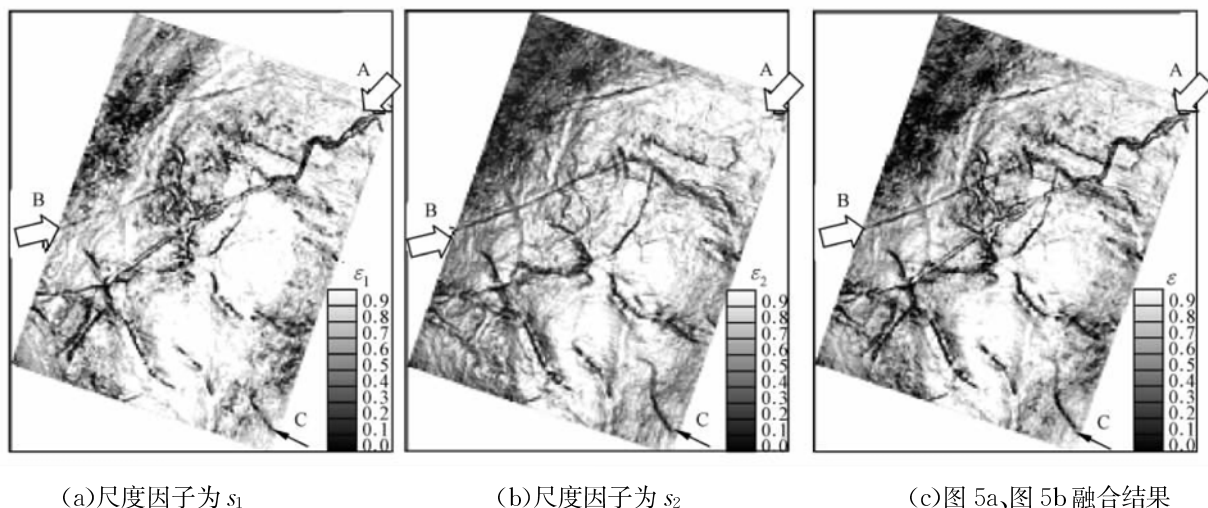
图4、图5是不连续性检测结果的时间切片,图中颜色越深表示不连续性越强(相干性越弱).对比图4b、图4c可得,基于特征结构的相干算法和局部结构熵算法均能清晰地检测到地震数据体上大的断层和裂缝等,但都不能很好地显示一些缓变的地质结构体边界(例如箭头A所指)以及细小的岩性裂隙变化.图5是用本文提出的基于多尺度瞬时相位的局部结构熵算法得到的检测结果时间切片,图5a是大尺度(低频段)的检测结果,清晰显示出了箭头A所示的缓变河道边界,图5b为小尺度(高频段)的检测结果,箭头B、C所指的断层以及一些岩性细节突变在这里得到加强,图5c综合了图5a和图5b的



(a)原始三维地震数据体

(b)基于特征结构的相干算法

(c)局部结构熵值

图4 常规算法的 $t=762$ ms 的时间切片(a)尺度因子为 s_1 (b)尺度因子为 s_2

(c)图 5a、图 5b 融合结果

图5 利用本文算法得到的 $t=762$ ms 的局部结构熵值

结果, A、B、C 处的变化均得到突出, 从而更有效地显示出地震数据体的不连续性结构。

将图 5c 与图 4b、图 4c 做对比可以看出: 从整个时间切片上图 5c 描述不连续性结构较图 4b、图 4c 更为清晰; 从细节上, 例如 A 所指的地质体边界、B 处的断层以及一些细小裂隙, 图 5c 较图 4b、图 4c 显示得更为突出, 从而增强了地震结构的自动解释能力。

3 结 论

本文针对局部结构熵算法对细小、微弱不连续性结构检测能力弱的问题, 根据不同的地质构造变化在地震记录上的不同表现, 提出基于多尺度瞬时相位的局部结构熵算法, 分别在不同尺度的瞬时相位体上计算局部结构熵, 然后利用图像融合的方法将其融合为最终的检测结果。模型和实际算例结果表明, 基于融合的多尺度瞬时相位的局部结构熵算法不仅能有效地检测大的断层和裂缝, 而且能清晰地显示数据体中的细微、缓变的不连续性结构, 对于自动解释地质结构变化具有重要的实际意义。在构建协方差矩阵时, 基于特征结构的相干算法和基于多尺度瞬时相位的局部结构熵算法所需的计算复杂度分别为 $O((N_x N_y)^2 N_t)$ 和 $O(M N_x N_y N_t)$, 对两种算法处理实际资料的计算时间统计结果表明, 局部结构熵算法利用螺旋坐标系来构建 4 阶协方差矩阵可以显著提高计算效率。

基于小尺度瞬时相位的局部结构熵结果在突出地震数据细节不连续性结构的同时, 也使得高频噪声的影响变大, 但和有规律的地质结构空间变化相比, 噪声呈随机分布, 所以可以结合已知地质结构进行联合解释, 以消除对检测结果的影响。由于实际资料算例中所涉及的地震数据地层较为平缓, 故本文算法没有考虑地层视倾角的影响。

参考文献:

- [1] BAHORICH M S, FARMER S L. 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features [J]. *The Leading Edge*, 1995, 14(10): 1053-1058.
- [2] MARFURT K J, KIRLIN R L, FARMER S L, et al. 3-D seismic attributes using a semblance-based coherency algorithm [J]. *Geophysics*, 1998, 63(4): 1150-1165.
- [3] MARFURT K J, SUDHAKER V, GERSZTENKORN A, et al. Coherency calculations in the presence of structural dip [J]. *Geophysics*, 1999, 64(1): 104-111.
- [4] GERSZTENKORN A, MARFURT K J. Eigenstructure-based coherence computations as an aid to 3-D structural and stratigraphic mapping [J]. *Geophysics*, 1999, 64(5): 1468-1479.
- [5] COHEN I, COIFAMN R R. Local discontinuity measures for 3-D seismic data [J]. *Geophysics*, 2002, 67(6): 1933-1945.
- [6] 高静怀, 汪文秉, 朱光明. 小波变换与信号瞬时特征分析 [J]. *地球物理学报*, 1997, 40(6): 821-832.
GAO Jinghuai, WANG Wenbing, ZHU Guangming. Wavelet transform and instantaneous attributes analysis [J]. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 1997, 40(6): 821-832.
- [7] 王西文, 杨孔庆, 周立宏, 等. 基于小波变换的地震相干体算法研究 [J]. *地球物理学报*, 2002, 45(6): 847-853.
WANG Xiwen, YANG Kongqing, ZHOU Lihong, et al. Method of calculating coherence cube on the basis of wavelet transform [J]. *Chinese Journal of Geophysics (Acta Geophysica Sinica)*, 2002, 45(6): 847-853.
- [8] 高静怀, 汪文秉, 朱光明, 等. 地震资料处理中小波函数的选取研究 [J]. *地球物理学报*, 1996, 39(3): 392-400.
GAO Jinghuai, WANG Wenbing, ZHU Guangming, et al. On the choice of wavelet functions for seismic data processing [J]. *Chinese Journal of geophysics*, 1996, 39(3): 392-400.
- [9] CHRISTOPHER T, GILBERT P C. A practical guide to wavelet analysis [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 61-79.
- [10] CLAERBOUT J F. Multidimensional recursive filters via a helix [J]. *Geophysics*, 1998, 63(5): 1532-1541.

(编辑 刘杨)