

文章编号:1009-9603(2021)02-0085-06

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.02.011

# 多尺度边缘检测技术在断层识别及 裂缝发育带预测中的应用

## ——以车排子地区排691井区为例

马承杰

(中国石化胜利油田分公司 信息化管理中心,山东 东营 257000)

**摘要:**常规边缘检测技术可以用于断层、裂缝及砂体的边界识别,但难以满足对不同尺度的地质体边界响应特征进行描述的要求,为此,提出了一种集成多种技术的多尺度边缘检测技术,该技术将三参数小波变换与结构导向梯度计算算子相结合,以倾角体及方位角体作为约束条件可以实现对小断层及裂缝发育带精准识别。准噶尔盆地西缘车排子地区排691井区发育断块圈闭油气藏和石炭系风化壳裂缝型油气藏,地震资料品质较差,常规方法识别断层和预测裂缝发育效果不明显,该技术的应用结果表明,其可准确定位边缘以及多尺度特性基础上进行小断层识别和裂缝发育带预测。在大尺度、中尺度和小尺度边缘检测效果图上可以较好识别大断裂、小断层展布和裂缝发育带,展示了该项技术的有效性。

**关键词:**小波变换;结构导向梯度;多尺度;边缘检测;断层与裂缝

中图分类号:TE341

文献标识码:A

# Application of multi-scale edge detection technology to fault recognition and fracture zone prediction: A case study of Block Well P691, Chepaizi area

MA Chengjie

(Information Management Center, Shengli Oilfield Company, SINOPEC, Dongying City, Shandong Province, 257000, China)

**Abstract:** Conventional edge detection technology can recognize boundaries of faults, fractures and sand bodies, but it is difficult to meet the demands of description of the boundary response of the geological bodies in different scales. To this end, an integrated multi-scale edge detection technology is proposed to precisely identify small faults and fracture zones, which combines three-parameter wavelet transform with a structure-oriented gradient operator, with dip volume and azimuth volume as constraints. The faulted-block reservoirs and Carboniferous weathering crust fractured reservoirs are dominant in Block Well P691 of Chepaizi area, western margin of Junggar Basin. However, limited by the poor seismic data, conventional methods cannot accurately identify faults and predict fracture development. Application results demonstrate that the designed technology can recognize small faults and predict fracture zones on the basis of accurate location of edges and multi-scale detection. Large and small faults and fracture zones can be clearly identified on the large-scale, mesoscale and small-scale edge detection maps, proving the effectiveness of this technique.

**Key words:** wavelet transform; structure-oriented gradient; multi-scale; edge detection; fault and fracture

常规边缘检测技术可以识别砂体、断裂、砂岩透镜体、火成岩岩体等地质体的边界特征<sup>[1-2]</sup>,但是

地下地质条件的复杂性决定了这些地质体既具有边缘特征,又具有多级多尺度的特征,常规的边缘

收稿日期:2020-11-09。

作者简介:马承杰(1973—),男,山东德州人,高级工程师,从事油田勘探开发信息化研究工作。E-mail:machengjie.slyt@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“准噶尔盆地碎屑岩层系油气富集规律与勘探评价”(2016ZX05002-006)。

检查方法对于断层识别与裂缝发育带预测,特别是地震资料品质较差条件下的识别表现出极大的不适应性<sup>[3]</sup>。为此,需要根据不同的地质体选择特定的方法来检测其边缘特征,最大限度利用地震数据及其衍生出的多种信息识别其不同的地质现象,提高对复杂地质体的精准描述能力。前期的边缘检测算法仅根据地震数据,提取相关属性参数,如索伯算子、Canny算子、Prewitt算子等,基本没有考虑地质体的多尺度的性质。近年来又有学者根据不同地质体多尺度边缘响应特征提出了小波变换多尺度边缘检测方法<sup>[4]</sup>,在实际应用中取得了较好的效果,但是这些方法仅局限于二维地震剖面的识别,而且需要进行层位解释的约束,应用范围具有一定的局限性。针对上述难点,研发三维检测算子,建立三维地震数据边缘检测方法,即三参数小波变换与结构导向梯度联合约束的多尺度边缘检测算法,该算法同时考虑了倾角和方位角导向下沿层检测。选取准噶尔盆地西缘车排子地区排691井区作为方法应用的靶区,研究区的三维全覆盖面积接近350 km<sup>2</sup>,主要勘探目的层为新近系沙湾组及石炭系,沙湾组多为断块圈闭油气藏,石炭系为裂缝型油气藏,而研究区石炭系顶面构造也可以作为沙湾组底面构造,因此在实际研究中,选取石炭系顶面作为标准层上下开窗进行属性分析,利用所提出的方法开展沙湾组断层识别及石炭系裂缝发育带预测,预测效果良好。

## 1 三参数小波变换基本原理

小波变换方法目前应用比较广泛,高静怀等提出三参数小波变换算法<sup>[5-10]</sup>,该方法增加了3个控制参数,相对增加了小波分析的适用性,通过3个参数的互相调节,提高了应用的灵活性,与最佳匹配地震子波小波变换(BMSW)等其他小波变换相比,其具有更好的收敛特点。该小波时域表达式为:

$$\varphi(t; \Lambda) = e^{-\tau(t-\beta)^2} \left\{ p(\Lambda) [\cos(\sigma t) - k(\Lambda)] + iq(\Lambda) \sin(\sigma t) \right\} \quad (1)$$

对(1)式作傅氏变换,得到频率域公式:

$$\hat{\varphi}(\omega; \Lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(t; \Lambda) e^{-i\omega t} dt = \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \frac{p(\Lambda) + q(\Lambda)}{2} \times e^{-i\beta(\omega - \sigma) - \frac{(\omega - \sigma)^2}{4\tau}} + \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} \frac{p(\Lambda) - q(\Lambda)}{2} \times e^{-i\beta(\omega + \sigma) - \frac{(\omega + \sigma)^2}{4\tau}} - p(\Lambda) k(\Lambda) \sqrt{\frac{\pi}{\tau}} e^{-i\beta\omega - \frac{\omega^2}{4\tau}} \quad (2)$$

其中:

$$p(\Lambda) = \left( \frac{2\tau}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[ 4 \left( e^{\frac{\sigma^2}{2\tau}} - e^{-\frac{3\sigma^2}{8\tau}} \right) \cos^2(\beta\sigma) + 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

$$q(\Lambda) = \left( \frac{2\tau}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} \left[ 4 \left( e^{\frac{\sigma^2}{2\tau}} - e^{-\frac{3\sigma^2}{8\tau}} \right)^2 \sin^2(\beta\sigma) + 1 - e^{-\frac{\sigma^2}{2\tau}} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$$k(\Lambda) = e^{-\frac{\sigma^2}{4\tau}} \left[ \cos(\beta\sigma) + \frac{iq(\Lambda)}{p(\Lambda)} \sin(\beta\sigma) \right] \quad (5)$$

假设任意给定的信号  $s(t) \in L^2(R)$ , 则三参数小波变换式为:

$$S_{\varphi}(a, b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \varphi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (6)$$

为验证建立的三参数小波变换的时-频优势,将三参数小波变换与BMSW的时-频特征进行对比。取  $\Lambda = (1, 0.5, 0)$ , 计算得到这2种方法的时-频与振幅的变化关系(图1),图1a和1b为BMSW计算得到的时间与振幅和频率与振幅的关系,其时-频特征出现了多个峰值,如果用这种出现多个峰值的小波作为基本小波对信号进行分析时就会产生一些假象,而图1c和1d为三参数小波变换得到的时-频特征图,其时-频特征仅出现一个峰值,表明三参数小波变换获得的结果在时-频域具有相对唯一性,即表明三参数小波适于分析不同频带分量的信号。断层及裂缝发育带的地震资料含有频率及振幅快速变化的分量,BMSW小波具有模糊断层及裂缝的时-频响应特性,难以对断层及裂缝发育边界做出正确的识别,而三参数小波变换却能较好地解决这一问题。

## 2 技术原理

常规边缘检测采用梯度极大值技术,具有算法简单、程序易于实现、计算量较小等特点,被广泛应用于地震资料信噪比较高情况下的河道、砂体、断层等地质体边界的识别中。但对于地震资料品质较差地区的断层识别及裂缝发育带预测难以取得良好的效果,究其原因采用绝对梯度值,导致裂缝边界的弱反射信息被强地层背景边界信息所淹没,在地层边界信息的干扰下,难以有效检测小断层及微裂缝边界。而利用三参数小波变换计算不同频带及不同尺度的地震数据体,在此基础上求取地层倾角和方位角,然后作为约束,利用索伯算子

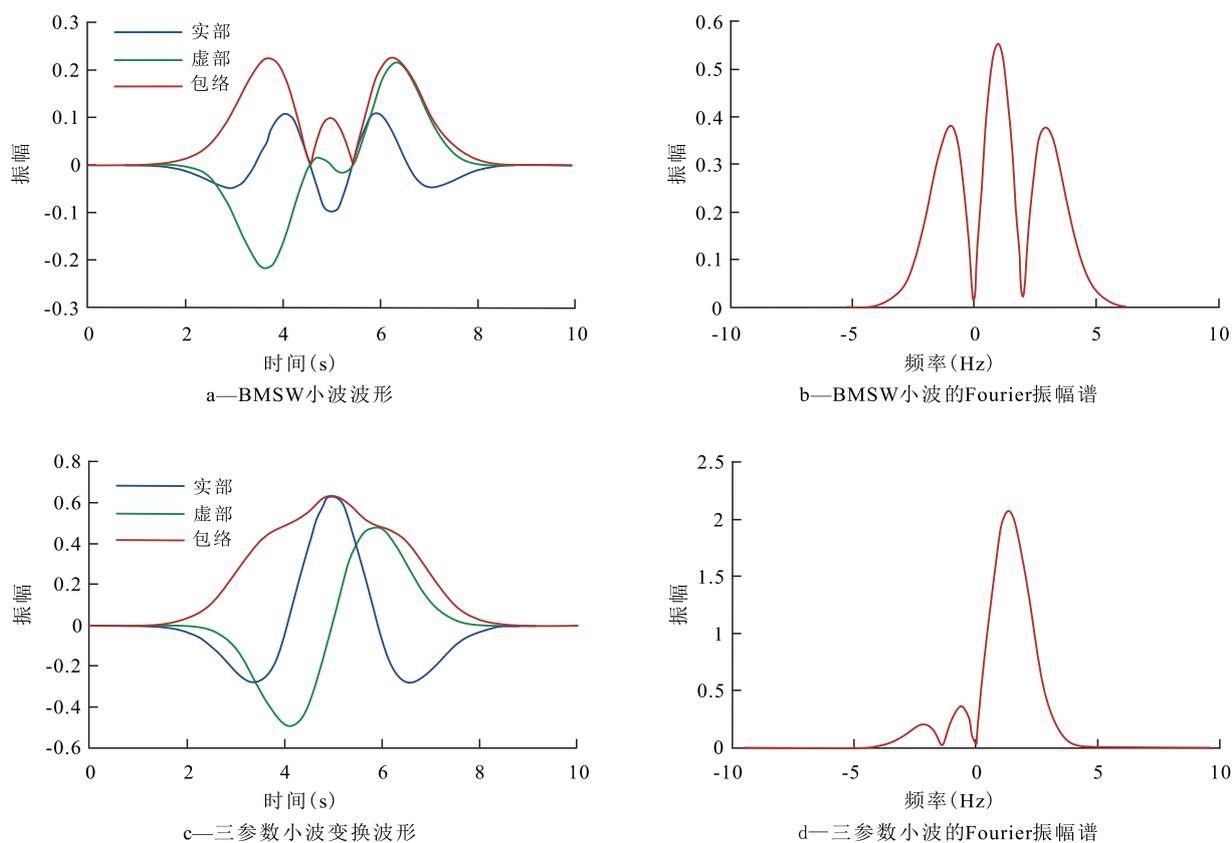


图1 三参数小波变换与BMSW的时-频特征对比

Fig.1 Comparison between time-frequency characteristics of three-parameter wavelet transform and BMSW

应用于小断层及微裂缝边界检测。三参数小波变换与结构导向梯度联合约束的多尺度边缘检测方法实现步骤包括：①利用(6)式计算出不同尺度的分频地震数据体。②对这些不同尺度的分频数据体，计算地层倾角和方位角。③根据索伯算子，针对不同尺度的分频数据体，计算结构导向梯度属性来进行地质体的边缘检测。

通常情况下地层倾角测井可以测量出地层倾角和方位角，而倾角和方位角是地震几何属性中必备的起重要作用的地质分析参数，如可以利用地层倾角和方位角确定构造特征、分析断层、不整合、层理、沙坝、礁滩、盐丘等的构造变形及识别地层裂缝和破碎带等。因此本文利用倾角和方位角来计算结构导向梯度属性体，通过(7)–(10)式推导出计算倾角和方位角体的(11)和(12)式，将计算结果带入(13)式进行计算，最终获得结构导向梯度属性体。

图2为地震数据体中的一个小块体的倾角和方位角几何模型，根据图中的几何关系，倾角和方位角表达式分别为：

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{(\tan\theta_x)^2 + (\tan\theta_y)^2} \quad (7)$$

$$\phi = \tan^{-1} (\tan\theta_x / \tan\theta_y) \quad (8)$$

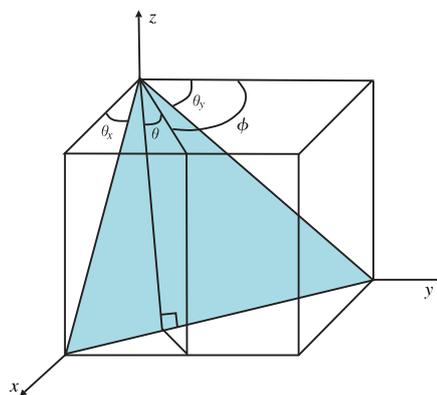


图2 倾角和方位角模型与差分计算的网格单元  
Fig.2 Model of dip and azimuth and grid elements of differential calculation

但实际计算中很难从三维地震数据体中获得视倾角，为此采用3×3网格单元，由一阶导数的定义，用差分计算的方法分别写为：

$$W_x = \frac{dz}{dx} = \frac{z_3 + z_6 + z_9 - z_1 - z_4 - z_7}{3\Delta x} \quad (9)$$

$$W_y = \frac{dz}{dy} = \frac{z_1 + z_2 + z_3 - z_7 - z_8 - z_9}{3\Delta y} \quad (10)$$

$$\theta = \tan^{-1} \sqrt{W_x^2 + W_y^2} \quad (11)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left( \frac{W_x}{W_y} \right) \quad (12)$$

利用(11)和(12)式计算出三维地震数据体的倾角体和方位角体。

在此基础上,建立结构导向的索伯算子,其表达式为:

$$\text{Sobel}(x, y, t) = \frac{1}{2K+1} \times \frac{\sum_{i=-nj}^n \sum_{j=-n}^n [D_{i,j,k}(x, y, t) M_{i,j}^x]^2 + \sum_{i=-nj}^n \sum_{j=-n}^n [D_{i,j,k}(x, y, t) M_{i,j}^y]^2}{\sum_{i=-nj}^n \sum_{j=-n}^n D_{i,j,k}(x, y, t)^2 [(M_{i,j}^x)^2 + (M_{i,j}^y)^2]} \quad (13)$$

将地震数据体分成多个小块体,将这些小块体当成一个目标点来进行计算,如通常选取小块体为3道×3道或者5道×5道等,根据实际情况可以任意选取。通过(7)式分别求取每个小块体 $x$ 方向和 $y$ 方向的索伯梯度值,并对2个方向的梯度值进行平方求和,然后沿着法线方向对所有小块体求得的索伯梯度相加求和,最后做归一化能量均衡处理。其中:

$$D_{i,j,k}(x, y, t) = f(x + i, y + j, t + k\Delta t + i\tau_{i,j,k}^x(x, y, t) + j\tau_{i,j,k}^y(x, y, t)) \quad (14)$$

$$\tau_{i,j,k}^x(x, y, t) = \tau^x(x + i, y + j, t + k\Delta t) \quad (15)$$

$$\tau_{i,j,k}^y(x, y, t) = \tau^y(x + i, y + j, t + k\Delta t) \quad (16)$$

$$\tau^x = \tan\theta \sin\phi \quad (17)$$

$$\tau^y = \tan\theta \cos\phi \quad (18)$$

利用(6)式,结合(7)~(18)式即可实现三参数小波变换与结构导向梯度联合约束的多尺度边缘检测方法,进而实现多尺度三维地震资料的边缘检测。

### 3 应用实例

准噶尔盆地西缘车排子地区排691井区发育古近系沙湾组断块圈闭油气藏及石炭系顶部风化壳裂缝型油气藏,为了较好地描述该区沙湾组断块圈闭油藏及石炭系裂缝油藏的有利分布区<sup>[11-17]</sup>,利用边缘检测技术对研究区2套目的层的断裂进行识别及对裂缝发育带进行预测。

以25 m×25 m网格精度精细解释了研究区三维地震资料的石炭系顶面反射层,并沿该反射层上下各开50 ms时窗,基本可以涵盖2套目的层段。利用该数据体通过常规边缘检测技术计算获得的石炭系顶面的相干图(图3)显示,相干整体效果较差,平

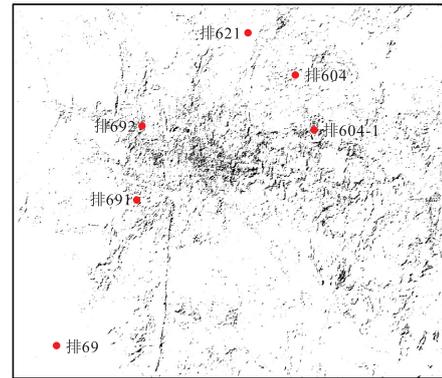


图3 排691井区沿石炭系顶向下50 ms时窗常规边缘检测相干图

Fig.3 Coherence map of conventional edge detection below time window of 50 ms along top of the Carboniferous in Block Well P691

面上断层边界模糊导致特征难以识别,仅有几条较大的断层有一定的显示,无法描述研究区断裂体系的完整平面展布特征,不利于对沙湾组断块圈闭的描述。同时石炭系裂缝发育特征的识别也不够理想,反映裂缝发育的黑色条带也模糊不清,无法反映石炭系风化壳裂缝型油气藏的平面发育特征。为此,该地区尝试应用多尺度边缘检测技术进行断层识别及裂缝发育带预测,首先利用三参数小波变换计算得到大中小3个尺度的地震数据体,分别计算倾角体和方位角体,利用(13)式计算出3个尺度的结构导向梯度属性。由计算得到的3个尺度的结构导向梯度属性边缘检测效果(图4)可见,整体上看,利用多尺度边缘检测技术得到的不同尺度的边缘检测效果图断层及裂缝的边界都比较清晰,噪音干扰较少,尤其是对于断层的刻画较有利,解释人员可以较好地对比平面断层的展布进行组合,勾绘出研究区不同级别断层的分布特征。从细节上来看,大尺度低频率的预测图反映的大断裂特征更加清晰,研究区主要断层清晰可辨,尤其是断层的展布方向、断层的组合、断层的延伸及断层的平面排列特征等较好的刻画出来(图4a),有利于沙湾组断块圈闭描述。中尺度主频的预测图反映较小断层展布更加明显(图4b),可以将中等发育断层及裂缝发育区识别出来。作为大尺度和小尺度的一种补充,可以完整描述出研究区的断层分布形态,尤其是断层组合过程中的某两条断层的接触关系,中尺度主频的预测结果可以作为参考和辅证。而小尺度则反映裂缝的集中发育带。小尺度高主频的预测图将研究区裂缝发育特征展示得比较清晰,裂缝带主要发育在研究区中部区带(图4c),因此可以利用该图进行石炭系裂缝发育有利区带预测。这样将3个

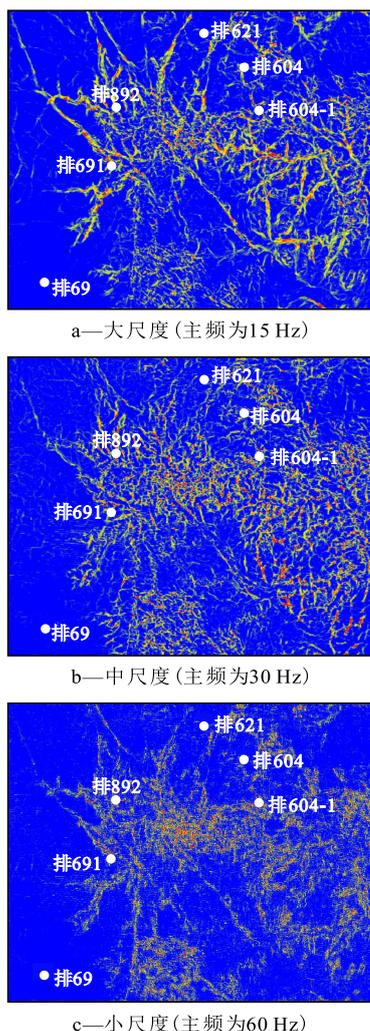


图4 排691井区三参数小波变换与结构导向梯度联合约束的多尺度边缘检测结果

Fig.4 Multi-scale edge detection results under joint constraint of three-parameter wavelet transform and structure-oriented gradient in Block Well P691

尺度的边缘检测结果进行组合解释,一方面可以较好地解释出研究区不同尺度的断层以及断裂组合,同时也可以明确研究区的裂缝分布特征,从而预测裂缝发育有利区,为研究区断块圈闭油气藏及裂缝性油气藏的分布区预测提供较好的基础研究资料。

## 4 结论

三参数小波变化可以将地震资料进行分频得到不同频带的地震数据体,进而计算得到不同频率数据体的倾角体和方位角体,再利用改进的索伯算子计算得到结构导向梯度属性,最后建立了三参数小波变换与结构导向梯度联合约束的多尺度边缘检测技术。结果表明,该方法理论技术是可行的,在断层及裂缝发育带的检测方面具有较好的适用

性,尤其是不同尺度下的边缘检测方法突破了传统方法的局限性,具多尺度优势,可以充分挖掘地震资料包含的丰富的地质信息,为断块圈闭油气藏及裂缝型油气藏勘探提供了新技术手段,以期胜利油田西部新区及东部老区新层系勘探提供指导。

### 符号解释

- $a$ ——尺度因子;
- $b$ ——平移因子;
- $D$ ——小块体分析窗口所有样点在三参数小波变换后不同频率的地震数据中的取值;
- $i$ ——横向测线偏移量;
- $j$ ——纵向测线偏移量;
- $k$ ——时间域约束系数;
- $K$ ——上块体个数,  $2K+1$  为块体总数;
- $L^2$ ——平方可积函数空间;
- $M^x, M^y$ —— $x$  和  $y$  方向的索伯算子模板;
- $n$ ——上下滑动时窗数量;
- $p(\Lambda), k(\Lambda), q(\Lambda)$ ——待定函数;
- $R$ ——实数域集合;
- $s(t)$ ——任意的信号;
- $S_\varphi$ ——三参数小波变换核;
- $Sobel(x, y, t)$ ——结构导向的索伯算子;
- $t$ ——时间, ms;
- $W_x$ ——振幅在  $x$  方向的差分;
- $W_y$ ——振幅在  $y$  方向的差分;
- $x$ ——横向测线值;
- $y$ ——纵向测线值;
- $z$ ——三维地震数据道振幅;
- $z_1-z_9$ ——差分格式网格点的振幅;
- $\beta$ ——能量延迟因子;
- $\Delta t$ ——采样率;
- $\Delta x, \Delta y$ ——网格点间的在  $x$  和  $y$  方向上的距离,即为道间距;
- $\theta$ ——阴影地层反射界面的倾角, ( $^\circ$ );
- $\theta_x, \theta_y$ —— $x$  和  $y$  方向的视倾角, ( $^\circ$ );
- $\Lambda$ —— $\sigma, \tau, \beta$  的一组集合;
- $\sigma$ ——小波的调制频率;
- $\tau$ ——能量衰减因子;
- $\tau^x$ ——用倾角体和方位角体计算的沿  $x$  方向的延迟时间, ms;
- $\tau^y$ ——用倾角体和方位角体计算的沿  $y$  方向的延迟时间, ms;
- $\tau_{i,j,k}^x(x, y, t)$ ——横向测线方向相同层位的延迟时间, ms;
- $\tau_{i,j,k}^y(x, y, t)$ ——纵向测线方向相同层位的延迟时间, ms;
- $\phi$ ——阴影地层反射界面的方位角, ( $^\circ$ );

$\varphi(t; \Lambda)$ ——时域小波函数;  
 $\hat{\varphi}(\omega; \Lambda)$ ——频率域小波函数;  
 $\varphi^*$ ——复共轭;  
 $\omega$ ——频率。

### 参考文献

- [1] 孙夕平,杜世通.边缘检测技术在河道和储层小断裂成像中的应用[J].石油物探,2003,42(4):469-472,476.  
 SUN Xiping, DU Shitong. Using edge detection technique to image channels and minor faults [J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2003, 42(4): 469-472, 476.
- [2] AQRRAWI A A, BOE T H. Improved fault segmentation using a dip guided and modified 3D Sobel filter [J]. SEG Expanded Abstracts, 2011, 30(1): 999-1 003.
- [3] 罗朝阳,张鹏超,姚晋晋,等.一种基于形态学的边缘检测算法[J].计算机应用与软件技术,2020,37(2):177-181,247.  
 LUO Zhaoyang, ZHANG Pengchao, YAO Jinjin, et al. An edge detection algorithm based on morphology [J]. Computer Applications and Software, 2020, 37(2): 177-181, 247.
- [4] 黄捍东,魏修成,叶连池,等.分形边缘检测在裂缝预测中的应用[J].石油地球物理勘探,2002,37(1):65-68.  
 HUANG Handong, WEI Xiucheng, YE Lianchi, et al. Application of fractal edge detection in fracture prediction [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2002, 37(1): 65-68.
- [5] 高静怀,万涛,陈文超,等.三参数小波及其在地震资料分析中的应用[J].地球物理学报,2006,49(6):1 802-1 812.  
 GAO Jinghuai, WAN Tao, CHEN Wenchao, et al. Three parameter wavelet and its applications to seismic data processing [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(6): 1 802-1 812.
- [6] 潘斐,张在旭,明玉坤.基于Hilbert空间的致密碎屑岩储层有效裂缝识别方法[J].油气地质与采收率,2020,27(2):80-86.  
 PAN Fei, ZHANG Zaixu, MING Yukun. Identification of effective fractures in tight clastic reservoirs in Hilbert space [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2020, 27(2): 80-86.
- [7] 万涛,高静怀,陈文超,等.三参数小波及其在薄互层地震资料分析中的应用[J].煤田地质与勘探,2005,33(4):69-72.  
 WAN Tao, GAO Jinghuai, CHEN Wenchao, et al. TP wavelet and its applications to analysis of seismic data of thin interbeds [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(4): 69-72.
- [8] 辛福东,许浩,汤达祯,等.基于小波变换的黔西北地区龙潭组煤系地层层序划分[J].油气地质与采收率,2018,25(1):49-55.  
 XIN Fudong, XU Hao, TANG Dazhen, et al. Sequence division of Longtan coal measure strata based on wavelet transform in north-western Guizhou [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2018, 25(1): 49-55.
- [9] 张凤青,宋永忠,高静怀,等.基于三参数小波变换的地震瞬时属性计算方法及应用[J].物探化探计算技术,2014,36(4):481-486.  
 ZHANG Fengqing, SONG Yongzhong, GAO Jinghuai, et al. Method and application of instantaneous attributes analysis based on three-parameter wavelet transform [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(4): 481-486.
- [10] 乐友喜,李斌,问雪,等.三参数小波分频处理在走滑断层识别中的应用[J].物探化探计算技术,2014,36(4):436-440.  
 YUE Youxi, LI Bin, WEN Xue, et al. Application of three parameter wavelet frequency processing to the recognition of strike-slip fault [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2014, 36(4): 436-440.
- [11] 林会喜,宫亚军,赵乐强,等.火山岩风化壳发育规律及油气地质意义——以淮西车排子地区石炭系火山岩为例[J].油气地质与采收率,2019,26(6):11-18.  
 LIN Huixi, GONG Yajun, ZHAO Leqiang, et al. Volcanic weathering crust development pattern and its petrogeological significance: A case study of Carboniferous volcanic crust of Chepaizi area in West Junggar Basin [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2019, 26(6): 11-18.
- [12] 梅俭.输导断裂主要特征部位及其对油气运移的控制[J].大庆石油地质与开发,2020,39(1):35-40.  
 MEI Jian. Main characteristic parts of the transporting fault and their controls on the hydrocarbon migrations [J]. Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing, 2020, 39(1): 35-40.
- [13] AQRRAWI AA, BOE TH, BARROS S. Detecting salt domes using a dip guided 3D Sobel seismic attribute [J]. SEG Technical Program Expanded Abstracts, 2011, 30(1): 1 014-1 018.
- [14] 张啸,高雯君,李静,等.中拐凸起火山岩裂缝型储层相态发育模式[J].特种油气藏,2019,26(2):52-58.  
 ZHANG Xiao, GAO Wenjun, LI Jing, et al. Facies evolution pattern of volcanic fractured reservoir in Zhongguai bulge [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2019, 26(2): 52-58.
- [15] 杜金虎,支东明,唐勇,等.准噶尔盆地上二叠统风险领域分析与沙湾凹陷战略发现[J].中国石油勘探,2019,24(1):24-35.  
 DU Jinhu, ZHI Dongming, TANG Yong, et al. Prospects in Upper Permian and strategic discovery in Shawan sag, Junggar Basin [J]. China Petroleum Exploration, 2019, 24(1): 24-35.
- [16] 黄诚.叠合盆地内部小尺度走滑断裂幕式活动特征及期次判别——以塔里木盆地顺北地区为例[J].石油实验地质,2019,41(3):379-389.  
 HUANG Cheng. Multi-stage activity characteristics of small-scale strike-slip faults in superimposed basin and its identification method: a case study of Shunbei area, Tarim Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2019, 41(3): 379-389.
- [17] 欧阳明华,史建南,胡天文,等.四川盆地威远地区页岩气储层多尺度裂缝预测[J].成都理工大学学报:自然科学版,2020,47(1):75-84.  
 OUYANG Minghua, SHI Jiannan, HU Tianwen, et al. 3D frequency-division fracture prediction in shale gas reservoir in Weiyuan area, Sichuan Basin, China [J]. Journal of Chengdu University of Technology: Science & Technology Edition, 2020, 47(1): 75-84.