

张凤奎,吴汉宁,夏玲燕,等. 突变理论在地震资料解释异常地质体中的应用. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 634~639, DOI: 10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.035.

Zhang F K, Wu H N, Xia L Y, *et al.* Application of catastrophe theory in identifying geological anomalous bodies with Seismic Data. *Progress in Geophys.* (in Chinese), 2009, 24(2): 634~639, DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.035.

突变理论在地震资料解释异常地质体中的应用

张凤奎¹, 吴汉宁¹, 夏玲燕¹, 柏冠军², 张林¹

(1. 大陆动力学国家重点实验室(西北大学), 西安 710069; 2. 中海石油研究中心, 北京 100027)

摘 要 阐述了尖点突变理论,建立了地震信号尖点突变模型并转化为尖点突变的标准形式,在时间域内提取突跳势、突跳时间;在频率域内提取突跳势、突跳次数等参数.运用突变理论对实际地震资料进行薄煤带的解释表明:突跳参数曲线上异常的位置与异常地质体边界的位置有关,为地震资料解释异常地质体提供了一种新的途径.

关键词 突变理论,尖点突变,突跳参数,异常地质体解释

DOI:10.3969/j.issn.1004-2903.2009.02.035

中图分类号 P631

文献标识码 A

Application of catastrophe theory in identifying geological anomalous bodies with Seismic Data

ZHANG Feng-kui¹, WU Han-ning¹, XIA Ling-yan¹, BAI Guan-jun², ZHANG Lin¹

(1. State Key Laboratory of Continental Dynamics(Northwest University), Xi'an 710069, China; 2. CNOOC Research, Beijing 100027, China)

Abstract Point catastrophe theory is detailed in this paper. The point catastrophic model is described here. And the seismic signal is transformed into the standard form of cusp catastrophe by establishing the cusp model. The parameters of catastrophe, such as time-domain catastrophe potential, time-domain catastrophe time, layer catastrophe degree, frequency-domain degree and so on, are used to study real seismic data interpretation and test the feasibility of the theory. The results show that the position of abnormality of the catastrophe parameter profile or curve is related to the location of the geological anomalous body. It is effective to automatically pick up geology information and improve the precision of interpretation in seismic data. The catastrophe theory will provide a potential method for seismic interpretation.

Keywords catastrophe theory, cusp catastrophe, parameter of catastrophe, seismic data

0 引 言

突变理论(catastrophe theory)是 20 世纪 70 年代发展起来的一门新的数学学科,是在非线性科学理论中研究不连续现象的一个新的数学分支,目前已发展和建立了 7 种突变模型,即折叠突变、尖点突变、燕尾突变、椭圆脐突变、双曲突变、蝴蝶突变及抛物突变^[1~8].一般所讲的突变理论实际上是尖点突变理论,它的数学渊源是根据势函数分类临界点,进而研究各临界点附近非连续性状态的特征.在应用上,它直接处理不连续性,而并不联系任何特殊的内

在机制^[7,8],这就特别适用于研究那些内部作用尚属未知的系统;并适用于仅有的可信观察具有不连续性的情况.近年来,为了解释和解决地球科学中的非线性现象,国内外学者应用突变理论研究煤层底板突水、煤与瓦斯(延时)突出、构造解释、油气检测、断层活动机理分析、油气储集层预测等^[2~21].在地震记录上,波阻抗界面本身就是一个波阻抗突变面.从地质—地球物理角度看,构造的存在及异常地质体的存在,势必引起地震波速度和岩石密度的变化,致使波阻抗发生变化,反映在地震记录上就是反射波同相轴的不连续.正是基于此,本文利用突变理论

对地震资料进行了有效的解释识别不可采煤层带。

1 尖点突变理论

由齐曼机构可以导出尖点突变模型的一般表达式^[1,3,5,6,9,12]为:

$$V(x) = x^4 + ux^2 + vx, \tag{1}$$

式中 x 为自变量, u, v 为控制参数, $V(x)$ 为势, 即位置为 x 时系统储存的能量。

当 $V'(x)=0$ 时, 系统处于平衡的位置, 这时

$$4x^3 + 2ux + v = 0. \tag{2}$$

这是一个 3 次方程, 它的实根为 1 个或 3 个, 由判别式 $\Delta = 8u^3 + 27v^2$,

的符号决定。当 $\Delta > 0$ 时, 有 1 个实根; 当 $\Delta < 0$ 时, 有 3 个互异的实根; 当 $\Delta = 0$ 时, 有 1 个二重根 (u, v 均不为零) 或 1 个三重根 ($u=v=0$)。于是可得, $u-v$ 平面上各区域中 $V(x)$ 的图形(图 1)。

把 $V'(x) = 4x^3 + 2ux + v = 0$ 所确定的曲面称为突变流形^[3,5], 是一个褶皱的曲面(见图 2)。图 2 代表了势 V 在不同状态 x 时的变化情况, 上、中、下叶表示了可能的 3 个平衡状态^[8]。其中, 上、下两叶是渐进稳定的, 中叶是不稳定的^[7]。势由上叶向下叶或下叶向上叶的变化中, 如果处在图 1 中 $\Delta > 0$ 位置, 系统是稳定的, 势 V 由高向低或由低向高渐进变化; 如果处在图 1 中 $\Delta < 0$ 位置, 则势 V 必然有一个突变的过程, 是不稳定的。

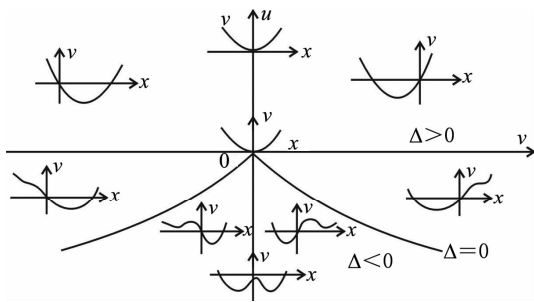


图 1 尖点突变参数平面图

Fig. 1 Plane diagram of cusp catastrophe parameter

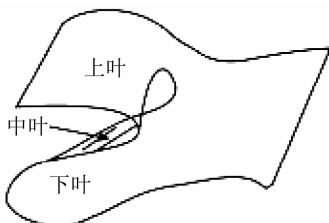


图 2 尖点突变流形图

Fig. 2 Flow chart of cusp catastrophe

在不同的区域内, 由高向低或由低向高渐进变化, 平衡位置为 1 个、2 个或 3 个, 对应于中叶的势函数取极大值, 从而平衡位置是不稳定的; 而对应于上下叶的平衡位置是稳定的。曲面有切线在满足

$$V'' = 12x^2 + 2u \tag{4}$$

的点附近, 平衡位置的数目是不同的, 这些点称为突变点, 实际上就是曲线的拐点。

由式(2)、式(4)消去 x 项可得参数平面中的方程:

$$D = 8u^3 + 27v^2 = 0. \tag{5}$$

由上式确定的曲线 D 称为分叉集(见图 3), 可以看出, 分叉集是一个半立方抛物线, 在点 $(0, 0)$ 处有一个尖点^[2,7]。分叉集 D 将控制平面分为 2 个区域, 即稳定区域和不稳定区域。在稳定区域中, $D > 0$, 系统是稳定的; 在不稳定区域, $D < 0$, 系统有 3 个平衡点, 其中 2 个稳定, 1 个不稳定。研究和应用突变的关键不在稳定区域, 而在不稳定区域, 因为在不稳定区域才会表现出突变的个性^[5]。

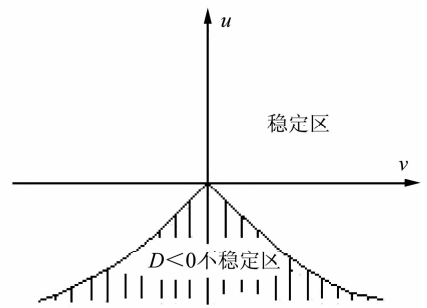


图 3 分叉集对控制空间的划分

Fig. 3 Control space divided by ramification aggregate

2 地震信号尖点突变模型的建立

地震信号可以看成是对时间变量 t 的连续变量函数 $x(t)$ 。 $x(t)$ 可以通过 Taylor 展开式将其表示成幂函数的形式^[1,5,6,7,12]:

$$y = x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + \dots + a_3t^3 + \dots. \tag{6}$$

实际应用发现, 作 4 次项的截断精度即可达到要求。这样对(6)式即近似表示为:

$$y = x(t) = a_0 + a_1t + a_2t^2 + a_3t^3 + a_4t^4. \tag{7}$$

将上式转化成尖点突变的标准形式, 令

$$q = a_3/4a_4, \quad t = Z_i - q, \tag{8}$$

将式(8)代入式(7), 可得:

$$y = b_4Z_i^4 + b_2Z_i^2 + b_1Z_i + b_0, \tag{9}$$

式中

$$\begin{cases} b_0 = a_4 q^4 - a_3 q^3 + a_2 q^2 - a_1 q + a_0 \\ b_1 = -4a_4 q^3 + 3a_3 q^2 - 2a_2 q + a_1 \\ b_2 = 6a_4 q^2 - 3a_3 q + a_2 \\ b_4 = a_4 \end{cases} \quad (10)$$

对(9)式进一步作变量代换,令:

$$Z_t = Z \sqrt[4]{\frac{1}{4b_4}} \quad (b_4 > 0), \quad (11)$$

或

$$Z_t = Z \sqrt[4]{\frac{1}{-4b_4}} \quad (b_4 < 0), \quad (12)$$

当 $b_4 > 0$ 时,将式(11)代入式(9),可得:

$$y = 1/4Z^4 + 1/2uZ^2 + vZ, \quad (13)$$

其中

$$u = \frac{b_2}{b_4}, v = \frac{b_1}{\sqrt[4]{4b_4}}. \quad (14)$$

式(13)即为标准的尖点突变模型方程.由突变理论知识可得式(13)的平衡曲面方程为:

$$Z^3 + uZ + v = 0, \quad (15)$$

判别式为:

$$\Delta = 4u^3 + 27v^2, \quad (16)$$

分叉集方程为:

$$D = 4u^3 + 27v^2 = 0. \quad (17)$$

由图 3 知,当 $4u^3 + 27v^2 > 0$ 时,系统处在稳定区;当 $4u^3 + 27v^2 < 0$,表示系统处在不稳定状态;当系统跨越临界线时,发生突变.此时, $u < 0, D = 0$,方程 $D = 4u^3 + 27v^2$ 有 3 个实根,其中 2 个重根是稳定的,另一个是不稳定的:

$$Z_1 = 2 \times \sqrt{\frac{-u}{3}}, \quad (18)$$

$$Z_2 = Z_3 = -\sqrt{\frac{-u}{3}}. \quad (19)$$

由稳定根 Z_2 到不稳定根 Z_1 ,表明跨越分叉集的状态变量 Z 发生突跳,突跳间隔为:

$$\Delta Z = Z_1 - Z_2 = 3 \sqrt{\frac{-u}{3}}. \quad (20)$$

对应的突跳时间为:

$$\Delta t = \sqrt[4]{\frac{1}{(4b_4)}} \times \Delta Z = \sqrt[4]{\frac{1}{(4b_4)}} \times \sqrt{-3u}. \quad (21)$$

代入公式(13),可得突跳势:

$$\Delta y = y_1 - y_2, \quad (22)$$

其中

$$y_1 = (1/4) \cdot Z_1^4 + (1/2) \cdot u \cdot Z_1^2 + v \cdot Z_1, \quad (23)$$

$$y_2 = (1/4) \cdot Z_2^4 + (1/2) \cdot u \cdot Z_2^2 + v \cdot Z_2. \quad (24)$$

对于 $b_4 < 0$ 的情况具有类似的推导过程.当系

统处于不稳定区时,突跳势和突跳时间这 2 个突变参数的变化刻画了系统产生突变的强度;突跳时间则反映了系统从稳定区向不稳定区的时间跨度.突变参数的改变在一定意义上可以说明地层结构横向的变化^[1,12].

3 实际地震资料的应用

应用突变理论对三维地震资料进行构造解释和不可采煤带的识别,是提取时间和频率域突变参数,采用断层切片彩色或灰度(调制颜色)显示进行解释异常体边界^[12].

通过山东 JN 某采区实际资料应用,在这些切片上能够自动识别断裂、薄煤带等地质现象,共圈定 11 处不可采煤带异常区,在图 4 上主要表现为能量减弱、形状和边界极不规则的圈闭形态,推断可能是由于古地理环境造成的煤层变薄.在突变参数切片图上可以明显反应煤层变薄带异常,由于岩性地层的细微特征变化都可以通过突变信息计算出来.

3.1 煤层变薄区解释

薄煤层在地震剖面上显示特征主要是地震反射波出现分叉、能量发生强弱转换或呈透镜状,解释为变薄区.在突变参数显示上产生突跳,以此可以解释薄煤层的边界、圈定异常区域为采矿提供地质依据.

3.2 时间域突跳参数解释

最早将其应用于刻画地震序列突变程度的文献[3]作者指出,在时间域提取突跳势和突跳时间来反映介质的变化特征^[3].图 5 为山东 JN 某采区三维数据体提取目的层时间域突跳势参数显示.在突跳势平面上,区内的几个较大断层能够清楚地表示出来,薄煤带边界刻画清晰.时间域突跳时间(图 6)信息反应更丰富甚至有微弱信息显露,时间域突跳势和突跳时间起到了相互印证的作用.

突跳次数是另外一种体现介质突变的参数,即波形发生突变的次数.根据该区研究可知,在断裂构造或薄煤带存在的区域,突变次数出现了高值异常,从而可以说明该区域内波形变化的程度比较高,突出了波形的不连续性特征.同时还可以清楚地看出,区内的几个断层的位置、走向和延展长度.突跳次数总体上来说能够反映区内构造特征.

3.3 频率域突跳参数解释

对地震序列,时间域的突变代表了地震序列波形的突变,但仅靠波形突变预测薄煤带还有一定的局限性.当地层结构发生变化时,地层对高频吸收比较强,会引起频谱的较大变化,因此研究谱突变同样

具有实用价值.把频率域的突变与时间域的突变结合起来进行薄煤带预测更具有可靠性.

振幅谱序列.

图 7 显示,薄煤带形态较时间域图清晰,并有多处异常区域显露,说明异常体边界对频率响应敏感,引起了频谱形状的变化.同时可以看出,异常地质体存在的区域,突跳次数产生了异常,突变程度比较高,与地层结构的复杂程度一致.

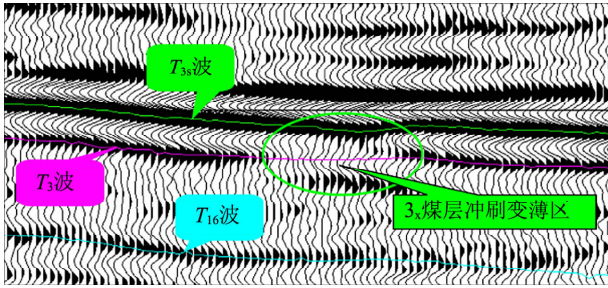


图 4 3_x煤层冲刷变薄的地震响应

Fig. 4 Seismic section of 3_x thin coal bed

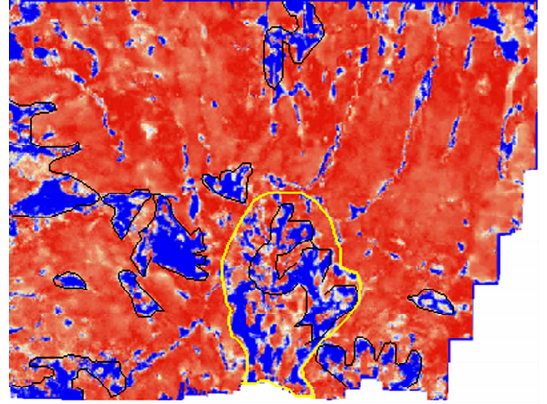


图 7 频率域突跳次数平面图

Fig. 7 Plane view of frequency-domain catastrophe degrees

在图中异常区域明显,部分是断层和村庄的反应特征.综合以上,圈出了 3_x煤层冲刷变薄区 11 个,其中又对 3_x煤层冲刷缺失区和 3 煤合并区进行研究圈定.

4 结 论

利用突变理论进行地震解释薄煤带具有较高的可靠性.突变参数平面或曲线可以突出地层的不连续性;对地质体的分辨能力高于常规振幅切片;可以显示构造的连续性、展布方向等性质,其异常位置与构造(边界)位置具有较好对应关系.根据突变理论的不同认识,可以设计不同的突变模型及有效算法,从不同角度刻画断裂、异常地质体发育程度及规律.突变理论不管是突出波形变化还是频谱变化都有一定的效果,只是有些断层频域特征明显,有些断层波形变化突出,时域时差刻画更有效果.

致 谢 本项研究得到中国矿业大学资源与地球科学学院董守华教授、核工业 203 研究所赵希刚研究员等人的指导和帮助,在此致以衷心感谢!

参 考 文 献 (References):

[1] Zhao M H, Yang W Q, Cui H X. The Application of

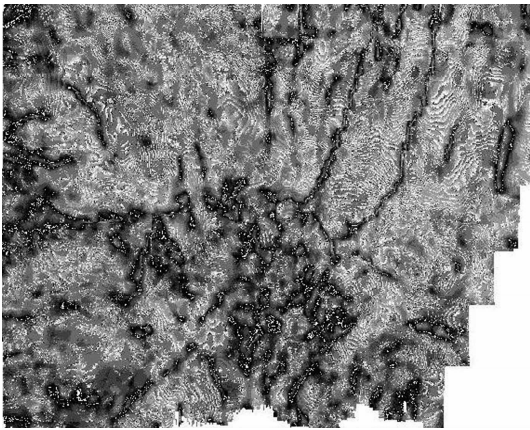


图 5 时间域突跳势平面图

Fig. 5 Plane view of time-domain catastrophe potentials

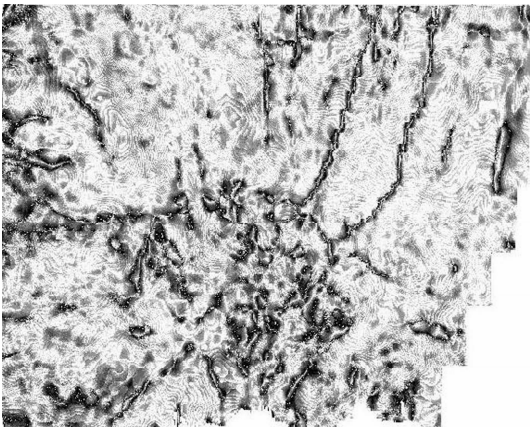


图 6 时间域突跳时间平面图

Fig. 6 Plane view of time-domain catastrophe times

频率域突变参数也包含突跳势和突跳次数,二者均要将原始数据体做时频转换,得到地震信号的

- catastrophe theory in 3D seismic data interpretation of coal mine [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2005, 15(4): 339~343.
- [2] 施泽进, 罗蛰潭, 彭大钧, 等. 突变理论在断层活动机理分析中的应用[J]. *西安地质学院学报*, 1996, 18(1): 50~55.
Shi Z J, Luo Z T, Peng D J, *et al.* Application of catastrophe theory to the analyses of mechanism of faulting movement[J]. *Journal of XI'AN College of Geology*, 1996, 18(1): 50~55.
- [3] 李正文, 唐建明, 鄢永玲, 等. 油气储集层突变理论识别技术及其应用[J]. *矿物岩石*, 1998, 18(3): 87~92.
Li Z W, Tang J M, Yan Y L, *et al.* Technique on oil/gas reservoir catastrophe recognition and it's application [J]. *J Mineral Petrol*, 1998, 18(3): 87~92.
- [4] 王凯, 位爱竹, 陈彦飞, 等. 煤层底板突水的突变理论预测方法及其应用[J]. *中国安全科学学报*, 2004, 14(1): 11~14.
Wang K, Wei A Z, Chen Y F, *et al.* Predicting method and its application of water inrush from coal floor based on catastrophe theory[J]. *China Safety Science Journal*, 2004, 14(1): 11~14.
- [5] 项希勇, 穆星, 纪晓东. 突变理论在油气检测中的应用尝试[J]. *石油地球物理勘探*, 1998, 20(4): 338~343.
Xiang X Y, Mu X, Ji X D. Trial application of catastrophism for hydrocarbon detection [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1998, 20(4): 338~343.
- [6] 项希勇, 穆星, 纪晓东. 突变理论及其在油气检测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(3): 269~274.
Xiang X Y, Mu X, Ji X D. Catastrophe theory and its application to Hydrocarbon prediction [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1999, 34(3): 269~274.
- [7] 罗振丽, 张爱敏, 丁在宇. 突变理论在断层检测中的应用尝试[J]. *物探与化探计算技术*, 2004, 26(2): 105~108.
Luo Z L, Zhang A M, D Z Y. The application of catastrophe theory in faults detection [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2004, 26(2): 105~108.
- [8] 王凯, 俞启香. 煤与瓦斯突出起动过程的突变理论研究[J]. *中国安全科学学报*, 1998, 8(6): 10~15.
Wang K, Yu Q X. Study on catastrophe theory of the starting process of coal and gas outburst [J]. *China Safety Science Journal*, 1998, 8(6): 10~15.
- [9] 李正文, 李琼. 油气储集层裂缝非线性预测技术及应用研究[J]. *石油地球物理勘探*, 2003, 38(1): 48~52.
Li Z W, Li Q. Research on non-Linear prediction of fracture of oil/gas reservoir and its application [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2003, 38(1): 48~52.
- [10] 王连国, 宋扬, 缪协兴. 基于尖点突变模型的煤层底板突水预测研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2003, 22(4): 573~577.
Wang L G, Song Y, Miao X X. Study of prediction of water-inrush from coal floor based on cusp catastrophic model [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(4): 573~577.
- [11] Liu B X, Wang Z Y, Liu L. A catastrophe model of coal and gas delay outburst [J]. *Journal of Sichuan University of Science and Technology*, 2003, (Suppl.): 86~89.
- [12] 柏冠军, 吴汉宁, 赵希刚, 等. 突变理论在地震资料解释中的应用[J]. *煤田地质与勘探*, 2007, 35(1): .
Bai G J, Wu H N, Zhao X G, *et al.* The application of catastrophe theory in seismic data interpretation [J]. *Coal Geology & Exploration*, 2007, (Suppl.):
- [13] 柏冠军, 吴汉宁, 赵希刚, 等. 地震资料预测薄层厚度方法研究与应用[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 554~558.
Bai G J, Wu H N, Zhao X G, *et al.* Research on prediction of thin bed thickness using seismic data and its application [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2006, 21(2): 554~558.
- [14] 张宏兵, 尚作萍, 杨长春, 等. 波阻抗反演正则参数估计[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 181~188.
Zhang H B, Shang Z P, Yang C C, Duan Q L. Estimation of regular parameters for the impedance inversion [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(1): 181~188.
- [15] 闫述, 陈明生. 瞬变电磁场资料的联合时-频分析解释[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 203~208.
Yan S, Chen M S. Interpretation of transient electromagnetic field data using joint time-frequency analysis [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(1): 203~208.
- [16] 陆文凯, 丁文龙, 张善文, 等. 基于信号子空间分解的三维地震资料高分辨率处理方法[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(4): 896~901.
Lu W K, Ding W L, Zhang S W, *et al.* A high-resolution processing technique for 3-D seismic data based on signal subspace decomposition [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(4): 896~901.
- [17] 孟召平, 郭彦省, 王赞, 等. 基于地震属性的煤层厚度预测模型及其应用[J]. *地球物理学报*, 2006, 49(2): 512~517.
Meng Z P, Guo Y S, Wang Y, *et al.* Prediction models of coal thickness based on seismic attributions and their applications. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2006, 49(2): 512~517.
- [18] 王延光, 杜启振. 泥岩裂缝性储层地震勘探方法初探[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 494~501.
Wang Y G, Du Q Z. Study of seismic methods in detecting shale-fracture reservoirs [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2006, 21(2): 494~501.
- [19] 张进铎. 地震解释技术现状及发展趋势[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(2): 578~587.
Zhang J D. Present status and future trend of seismic data interpretation techniques [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 2006, 21(2): 578~587.
- [20] 黄新武, 孙春岩, 牛滨华, 等. 基于数据一致性预测与压制自由表面多次波——理论研究及试处理[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 173~180.
Huang X W, Sun C Y, Niu B H, *et al.* Surface-related multiple prediction and suppression based on data-consistence: a theoretical study and test [J]. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 2005, 48(1): 173~180.

- [21] 柏冠军,吴汉宁,赵希刚,等.重力资料识别鄂尔多斯盆地线性构造方法研究[J].地球物理学进展,2007,22(5):1386~1392.
Bai G J, Wu H N, Zhao X G, *et al.* Research on recognition of linear structures using gravity data in ordos basin[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2007, 22(5):1386~1392.
- [22] 刘伟,曹思.远基于地震资料的三种岩性流体预测方法对比分析[J].地球物理学进展,2008,23(6):1918~1923.
Liu W, Cao S Y. Comparison and analysis of three fluid identification technologies based on seismic data[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 23(6):1918~1923.
- [23] 王从斌,龚洪林,许多年,等.高分辨率相干体分析技术及其应用[J].地球物理学进展,2008,23(5):1575~1578.
Wang C B, Gong H L, Xu D N, *et al.* High-resolution coherency analysis technique and its application[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2008, 23(5):1575~1578.
- [24] 陈林,宋海斌.地震信号瞬时频率的估算[J].地球物理学报, 2009, 52(1):206~214.
Chen Lin, Song H B. The estimation of instantaneous frequency of seismic signal[J]. Chinese Journal Geophysics (in Chinese), 2009, 52(1):206~214.