

文章编号: 1001—1749(2011)03—0237—06

地震瞬空参数法及其应用

贺锡雷^{1,2}, 黄德济², 文晓涛², 贺振华^{1,2}

(1. 油气藏地质及开发工程国家重点实验室 成都理工大学, 四川 成都 610059;

2. 成都理工大学 信息工程学院 四川 成都 610059)

摘要: 提出了一种变有害奇异值为更有利于横向储层预测有效信息的提取方法——瞬空参数法(SIPA), 并与时间域中基于复数道分析的常规瞬时参数法进行了对比。瞬空参数法是通过将地震数据沿层重组后, 构成沿层变化的反射振幅信号道, 以它为实数道进行瞬空复数道分析, 计算出瞬空参数。横向振幅的变化点正是不满足解析条件和性质的奇点, 这些奇点所对应的奇异值, 刚好对应沿层横向地质结构的突变点。又由于瞬空相位和瞬空波数沿层方向的相对变化率大于振幅的相对变化率, 因此利用瞬空参数进行断层、裂缝、缝洞发育带、河道、地层尖灭点等各种岩性突变点更有效。通过瞬空参数应用效果的数值模拟和Y地区的资料处理, 以及裂缝性储层预测的实际效果, 证明了上述结论的正确性。

关键词: 瞬空参数; 复数道分析; 储层预测; 裂缝发育带

中图分类号: P 631.4 **文献标识码:** A

0 前言

在地震勘探领域, 人们熟悉的复数道分析法是将实际地震记录道视为实数道, 利用实数道的希尔伯特变换求出一个对应的虚数道, 再由实数道和虚数道构成一个复数道, 进而建立地震波三瞬属性参数(瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率)的系列算法^[1,2]。三瞬属性参数的系列算法可以将隐含在地震波形统一体中, 且相互制约的振幅、相位、频率等信息分离出来, 形成三个独立的瞬时属性参数。其主要优点在于:

(1) 便于进行单独显示和解释, 可突出弱信号的频率和相位变化, 有利于减少地震解释的模糊性与多解性^[2]。

(2) 强化了地震属性参数随时间和空间的变化特征, 为分析和预测地下地质结构及含流体状况的空间变化提供了基础。

因此, 复数道分析法自从引入地震勘探以来, 便引起了业内人士的普遍关注。人们在构造解释、

储层预测、地震地层学研究, 以及岩性和流体识别等方面, 对该方法进行了应用研究和批量生产。大量的成功实例表明, 复数道分析法的出现, 使地震勘探由构造解释向构造岩性解释和储层预测跨进了一步。然而, 任何方法应用效果的好坏都是有条件的, 当满足条件时, 效果就好, 否则效果就差^[3]。

人们在大量的应用实践中认识到, 瞬时参数在地质解释效果方面大大地优越于常规地震参数, 但同时还发现它有时也存在解释陷阱^[3,4]。由于瞬时参数的计算精度和可靠性受到多种因素的影响, 例如干扰波、随机干扰、反射波层间调谐、希氏因子长度及其修饰方法、反射波类型及其参数等。这些众多影响会降低瞬时参数的精度和可靠性, 尤其是瞬时频率有时出现高频抖动和尖脉冲等异常值, 严重影响正常的地质解释。当地震记录受规则波干扰或发生反射波层间调谐时, 还可能出现假的亮点或暗点等解释陷阱^[4]。

为了提高计算三瞬参数的精度和可靠性, 人们利用正交小波对复数道的实道和虚道进行配匹滤

基金项目: 国家自然科学基金项目(40739907, 40774064)

收稿日期: 2010-12-14

改回日期: 2011-03-24

波,以达到消除干扰的目的^[5]。考虑到反射波主能量部份的信噪比高,学者们还采用了主特征参数法(或主参数法)^[6,7],该方法只提取反射波主能量部份所对应的瞬时参数,这虽然增加了地质解释的可靠性,但对地震层间反射等产生的异常值,目前尚无特别有效的消除方法。

作者在本文,致力于复数道分析的再研究,寻找瞬时参数异常值产生的原因。并通过瞬空参数的构建与计算,形成利用异常值进行有效地地质解的新方法。

1 复数道分析的前提条件

前面提到在复数道分析中,常因诸多影响因素产生干扰正确解释的异常值,这些异常值的产生,主要是因复数道(又称复信号)中存在若干个不满足解析信号性质和条件的奇异点。要想使三瞬参数中每一个点上的值都是正确可靠的,那么就要求复数道中每一个点都满足解析条件,即要求复数道在每一点上都是连续可微的解析函数。

判断一个复信号是否解析,需要了解满足解析信号的充分必要条件和性质。如果复函数 $f(z)$ 在给定的 D 域内处处可导,那么 $f(z)$ 在 D 域内每一点都解析,则称 $f(z)$ 是 D 域内的一个解析函数。如果 $f(z)$ 在 Z_0 点不解析,那么 Z_0 为 $f(z)$ 的奇点。设复函数 $f(z)$ 为式(1)。

$$f(z) = u(x, y) + iv(x, y) \quad (1)$$

复函数 $f(z)$ 在给定的 D 域内处处解析的充要条件是:其实部 $u(x, y)$ 和虚部 $v(x, y)$ 在 D 域内处处可微,并满足柯西-黎曼方程,即:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial y}, \quad \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{\partial v}{\partial x} \quad (2)$$

由式(2)可知,一个复合函数的实部 $u(x, y)$ 或虚部 $v(x, y)$,如果在某一坐标点 (x_0, y_0) 处不存在偏导数,则 (x_0, y_0) 点就是解析函数 $f(z)$ 的奇点,该点上的值就是奇异值。

解析函数还具有一些重要性质:

(1) 若解析函数 $f(z)$ 的导数 $f'(z) \neq 0$,则其实部 u 和虚部 v 必定相互正交。

(2) 任何一个解析函数的实部和虚部都具有多阶的连续偏导数,且满足拉普拉斯方程。通常将具有二阶连续偏导数,且满足拉普拉斯方程的二元函数称为调和函数。如果已知一个调和函数 u ,可利用解析函数的正交性,求取与其对应的共轭调和函数 v ,进而由 $u + iv$ 构成一个解析函数 $f(z)$ 。可

以证明,未受干扰和层间调谐影响的单层反射波,均属于调和函数类。

(3) 解析信号 $f(z)$ 的频谱 $F(f)$ 是单边的因果函数^[10],而其实部和虚部的频谱是偶共轭函数和奇共轭函数,且二者之间存在正交性。

在实际应用中,上述复数道分析的基本条件和特征是必须要注意的。

2 复数道分析中的奇异值及其作用

在地震勘探领域里,人们设地震子波或实际地震记录道为实信号道,即实道,其希尔伯特变换信号道称为虚道,由实道和虚道构成的解析信号道称为复数道。在满足上述重要条件的复数道分析中,就不会出现奇异值,否则就会出现干扰正常解释的奇异值。

2.1 无奇异值的复数道

在地震勘探中,地震子波经常用式(3)表示。

$$b(t) = e^{-\alpha t^2} \cos 2\pi ft \quad (3)$$

为了研究 $b(t)$ 的属性参数,人们通常用 $b(t)$ 构造一个复函数 $f(z)$,且

$$f(z) = e^{-\alpha t^2} \cos 2\pi ft + ie^{-\alpha t^2} \sin 2\pi ft \quad (4)$$

要论证 $f(z)$ 是否为解析函数,我们对式(4)作变量置换,设 $x = -\alpha t^2$, $y = 2\pi ft$,则式(4)可以改写为式(5)。

$$f(z) = e^x \cos y + ie^x \sin y = e^x \cdot x^{iy} = e^{x+iy} = e^z \quad (5)$$

在“数学分析”中指出:指数函数 e^x 对任何实数 x 都是可导的,且存在多阶导数。在“复变函数”中已充分证明,式(5)中复变函数 z 的指数函数 $f(z)$,是一个在复平面内处处解析的函数。这表明由式(3)表示的地震子波 $b(t)$ 为实数道,通过希尔伯特变换所构成的复数道是没有任何奇点,处处解析的复数道。利用这种满足解析函数条件复数道计算的瞬时参数,才会是正确可靠的。

2.2 复数道中的奇点及危害

如果地质模型只是由两层介质(一个反射界面)构成,利用具有这种地质结构的地震记录进行复数道分析,其效果等价于对单个地震子波的分析。但实际上,地下地质结构是复杂多层的。因此,在实际地震记录道中,会因各种干扰和层间调谐而存在若干个不可导的奇点。

由下页图1可见:在图1中各小图(a)、(b)、(c)及(d)中曲线 $x(t)$ 虽都存在左导数、右导数,但二者不相等,所以 t_1 点就是 $x(t)$ 的奇点。

当用图1中 $x(t)$ 构造复数道、虚道,及其瞬时

参数时,各道中 t_1 处同样也是奇点。在各种信号道中,奇点所对应的幅值就是奇异值,这种奇异值多数发生在层间能量较弱且信噪比较低的时间段。

由图 2 可见,当层间调谐未影响各层主能量部份时,在实道 $x(t)$ 、虚道 $y(t)$ 及瞬时振幅 $A(t)$ 中,这种奇异值较小,对地质解释影响不大。但在瞬相位 $Q(t)$ 和瞬时频率 $F(t)$ 中,因不受振幅的制约,这种异常值就显得更突出,尤其是因瞬频率是对瞬相位求导得到的,所在瞬频率中会把这种奇值放大。因此,在瞬相位和瞬时频率中,奇异值对地质解释的影响最大^[7]。

到目前为止,在时间域复数道分析中,因信号不解析出现的奇异值干扰或地质假象,尚无好的办法去掉或充分利用它们进行有效的地质解释。

3 瞬空参数的构建与计算

3.1 利用空变奇异值进行地质解释的构想

在以时间 t 为自变量的复数道分析中,严重干扰有效地质解释的奇异值,是因实际地震记录道中存在非连续可微的奇点而产生的。如果我们通过对地震记录的样本点进行重组,使重组信号中的奇点刚好对应地下地质结构的突变点,那么我们就可利用由这种奇点产生的奇异值,对地下特殊地质结构进行预测。例如对断层、裂缝、缝洞发育带、河道、地层尖灭带、岩性突变带等特殊地质结构,进行有效预测。

3.2 瞬空参数的计算原理

为突出空变奇点的奇异值,让该值具有地质含

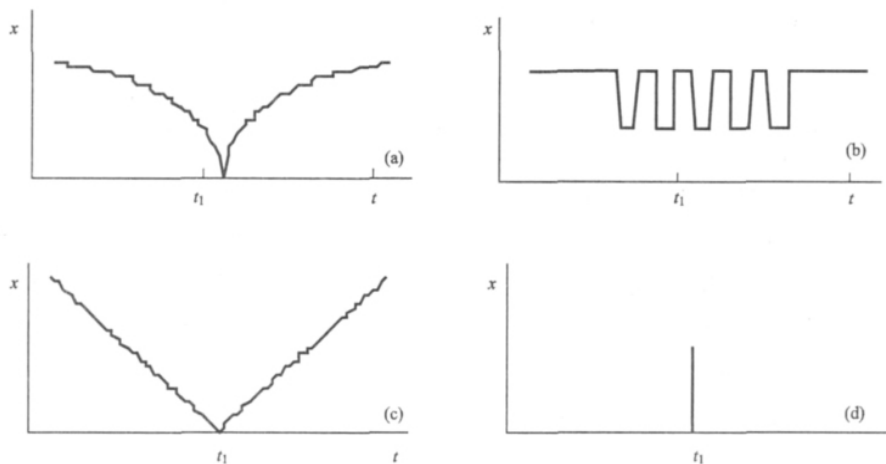


图 1 存在奇点的曲线类型
Fig. 1 Some kinds of singular values in $x-t$ domain

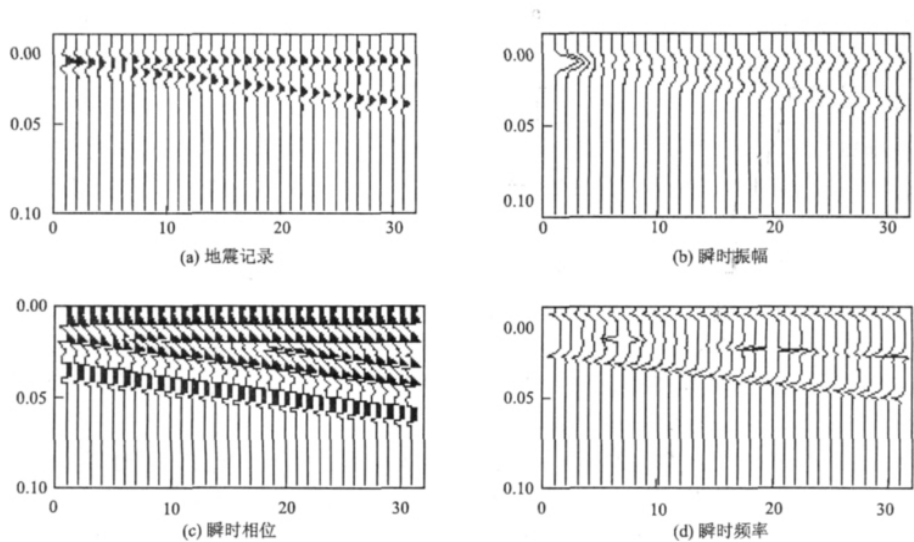


图 2 劈形记录的瞬时参数图
Fig. 2 Instantaneous parameters from a wedge model

义,我们需要将以 t 为自变量的反射信号,改造为以沿层面水平距离 S 为自变量的信号道。改造后的信号道,会形成类似阶跃、方波、脉冲、折线、余弦脉冲等具有突变点的函数。

在对实际记录进行自变量转换时,首先将目的层拉平,然后抽取二维地震数据体中相同时间点上的采样值,按道号的顺序重新排列,形成以道号为自变量的新的地震信号道 $p_1(m\Delta x)$ 。采用复数道分析理论,同样可以构成一个瞬空变化的复数道

$$p(m\Delta x) = p_1(m\Delta x) + ip_2(m\Delta x)$$

设 $h(n\Delta x)$ 为空变希氏因子。为了减小截断效应,需要给希氏因子乘个窗含数,例如,用哈林窗 $w_1(n\Delta x)$ 对 $h(n\Delta x)$ 进行修饰:

$$\tilde{h}(n\Delta x) = h(n\Delta x) \cdot w_1(n\Delta x)$$

$$w_1(n\Delta x) = \begin{cases} \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi n \Delta x}{N \Delta x} \right) & |n\Delta x| \leq N \Delta x \\ 0 & \text{其它} \end{cases}$$

其中 $p_2(m\Delta x) = p_1(m\Delta x) * \tilde{h}(n\Delta x)$

式中 星号* 表示褶积运算。

瞬空振幅 $A_p(m\Delta x)$ 、瞬空相位 $Q_p(m\Delta x)$ 和瞬空波数 $K_p(m\Delta x)$,由下面式(6)计算。

$$\begin{aligned} A_p(m\Delta x) &= \sqrt{p_1^2(m\Delta x) + p_2^2(m\Delta x)} \\ Q_p(m\Delta x) &= \arctg\left(\frac{p_2(m\Delta x)}{p_1(m\Delta x)}\right) \\ K_p(m\Delta x) &= \frac{dQ_p(m\Delta x)}{2\pi\Delta x} \end{aligned} \quad (6)$$

4 瞬空参数的数值模拟分析

见下页图3(a)左面的裂缝发育带由八个窄裂缝构成,裂缝发育带的起始边缘在第20点,终止边缘为第36点,单个裂缝的宽度为一个道间距。图3(a)中部的裂缝发育带,是由四个较宽的(裂缝宽度为四个道间距)裂缝构成,裂缝边缘的起止点分别为第57点和第86点。图3(a)右边为尖灭地层,尖灭点为第95点。在下页图3(c)中,瞬空振幅和瞬时振幅的幅值基本一致,且幅值的变化带与模型设计值一一对应,只是尖灭点位于图3(c)右侧振幅的突变点而不是最大值处,这是因为尖灭层的顶底反射极性相反,故调谐后尖灭点处能量最弱。在下页图3(d)中,瞬时相位除了尖灭地层段因顶底反射靠近产生调谐相位外,其余均为零,原因是实际地震资料叠前处理时都要做零相位转换的结果。瞬空相位是在记录道数据重组后,形成沿空间变化的信号道基础上计算的,所以在岩性突变

带均有变化值。图3(d)中示出左边窄裂缝发育带的起止边缘显示的十分清楚,且与设计值对应,但其内部单个裂缝因太窄不能分辨,而中间的裂缝发育带中四个裂缝,均能识别且与设计值对应。瞬时相位与瞬空相位均可识别尖灭点,其相位极大值均对应尖灭点的设计值。在下页图3(e)中,瞬时频率与瞬时相位类似,除尖灭点附近有异常值外,其余基本为常数。这是因为经大量的生产实践和理论研究证明,瞬时振幅极大值所对应的瞬时频率(称为主频)在岩性变化引起振幅变化很大时,其瞬时频率依然非常小。文献[9]中认为,在储层预测中它不是一个好的参数,然而瞬空波数是在瞬空相位的基础上计算的,所以它对岩性变化的反映与瞬空相位是基本一致的,但它对较宽裂缝带的内部结构反映得更精细。

5 瞬空波数法应用实例

Y地区的应用实例:该地区的研究目的,是寻找碳酸盐岩古潜山顶部(Tg5')的缝洞发育带。断层属于大裂缝,它与附近的小裂缝一起,构成裂缝发育带。在一般情况下,大断层属于油气运移通道,而它附近的小裂缝才是储集空间。

图4(见后面)是Y地区利用瞬空波数属性检测裂缝,并进行储层横向预测的效果图。在图4(a)中,黑色条带是断层,它附近非条带形的区域从白色到黑色,颜色越深,其裂缝越发育。图4(b)是Tg5'层构造解释断层分布图,将图4(b)与图4(a)叠合,我们发现瞬空波数检测出的断层与构造解释断层很吻合。图4(c)和图4(d)分别为1井至3井和4井至5井的任意线剖面图。由图4(b)和图4(c)可以看出,1井至2井之间只有一个较大的主断层,而2井至3井间有两个断层;由图4(b)和图4(d)看出,4井至3井之间只有一个断层,而3井到5井之间没有断层,这与图4(a)中的断层是吻合的,这证明瞬空波数在检测裂缝发育带方面效果很好。

在图4(a)及图4(b)中,1井、2井、3井在潜山顶层层段试油效果较好。其中:3井最好,高产,日产油128 m³/d,产气6 219 m³/d;1井次之,2井最差。1井、2井均需酸化,2井酸化后,日产油40.99 m³/d,产气1 774 m³/d,产水39.42 m³/d;在本层段4井产水,5井无产能。

上述各井的产能情况,与图4(a)裂缝发育程度展布情况也较吻合,除5井位于裂缝不发育区

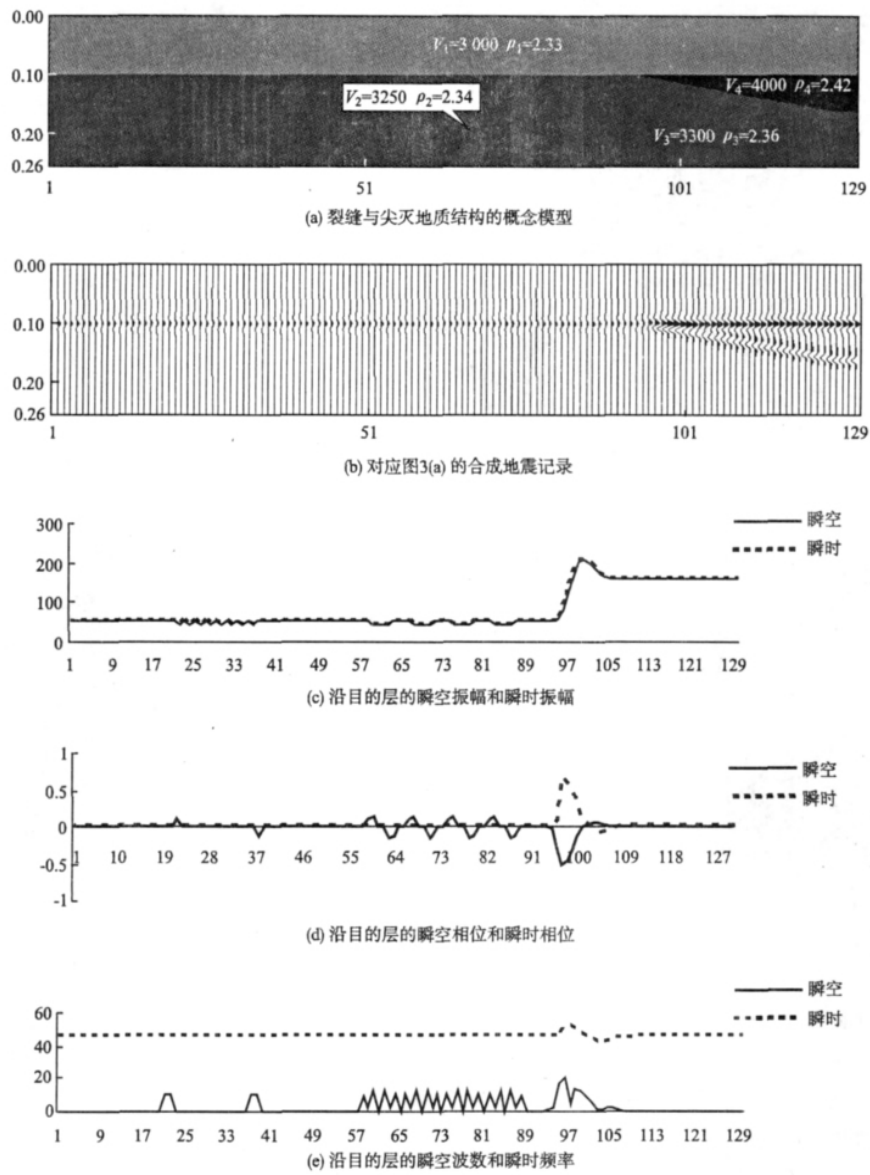


图 3 瞬空和瞬时参数的数值模拟分析

Fig. 3 Numerical simulation analysis of space instantaneous and time instantaneous parameters

外,各井均位于断层附近的缝洞发育带,3井最发育,2井较差。在图4(a)中,4井也显示裂缝发育,但由图4(c)和图4(d)可知,它与其它井相比构造位置相对较低,所以只产水不产油。由图4(a)、图4(b)可知,3井位于几个方向断层裂缝发育带的交汇区,岩芯资料也反映出3井该层段溶蚀缝洞很发育,所以3井高产。

由地质资料可知,5井位于中寒武局限台地潮坪至泻湖相带,岩石含泥质偏多,相对较致密。1井、2井、3井位于上寒武半局限台地的台内滩相带内,以白云岩为主,且具有不同程度的溶蚀,裂缝相对较发育。4井位于奥陶系侵蚀面,裂缝也较发育,因构造位置太低所以产水。

Y地区裂缝检测与储层横向预测应用效果,证明了作者在本文提出的瞬空参数法的有效性。说明利用瞬空参数,对空间信号不解析奇异点的敏感性进行裂缝检测的构想是合理的。

6 结 论

(1) 复数道分析是有条件的,当实部和虚部满足解析函数的充分必要条件和性质时,求出的瞬空参数才是正确可靠的。否则,将出现干扰正确解释的异常值。

(2) 在以时间 t 为自变量的复数道分析中,当反射波主能量部份未受到干扰或层间调谐影响时,

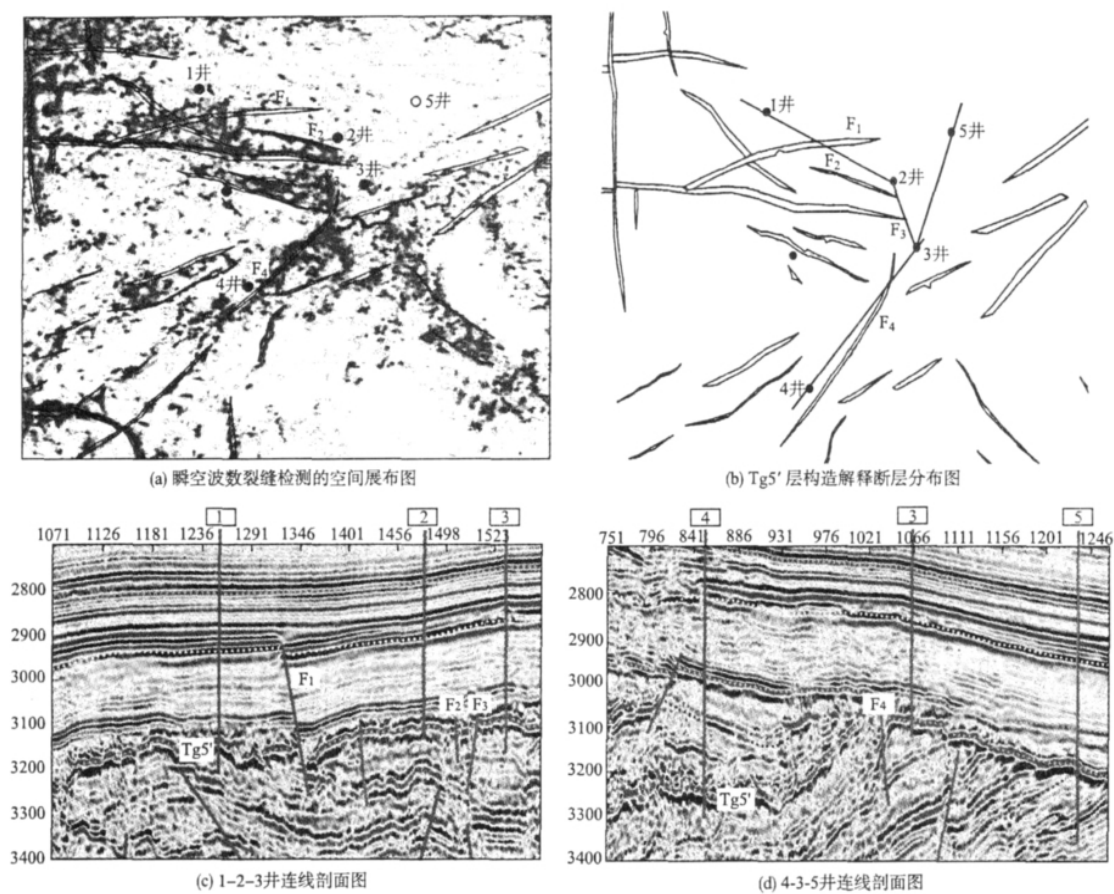


图 4 Y 地区的应用实例

Fig. 4 Example for space instantaneous parameter interpretations in area Y

这个位置的瞬时参数才能真正表征反射层的物理属性。由于地震资料处理时要做零相位转换,以及主频率对岩性变化极不敏感,故瞬时参数中用于储层预测最有效的是瞬时振幅。

(3) 瞬空参数恰恰要利用那些不满足解析条件的空变奇异值,进行沿层横向地质结构突变预测。

(4) 将地震数据沿层重组后,在构成沿层变化的反射振幅信号道的基础上,再做瞬空复数道分析,以获得有用的瞬空属性参数。其中,振幅的相对变化率,要小于相位和频率的相对变化率,所以在横向岩性预测时,瞬空相位和瞬空波数要比瞬空振幅对异常的反映更加敏感有效,这与瞬时属性参数的特征和作用正好相反。

参考文献:

[1] GABPR D. Theory of Communication [J]. Inst Elec. En-grs. (London) ,Pt III ,1946(93) :429.
[2] TANER M T ,KOEHLER F ,SHERIFF R E. Complex seismic trace analysis [J]. Geophysics ,1979 ,44 (6) :

1041.
[3] 张建宁,于建国.地震属性应用中的不确定性分析[J].石油物探 2006 45(4) :373.
[4] 王达昌.陆相地层中亮点的检测效果[J].石油地球物理勘探 ,1982 ,17(4) :30.
[5] 张志禹,高静怀,秦卫阳,等.小波变换用于高分辨率三瞬参数提取研究[J].煤田地质与勘探 ,1998 ,1:54.
[6] 黄德济.地震波主特性参数的提取[J].石油地球物理勘探 ,1989 ,24(2) :155.
[7] 贺振华.地震波复数道分析的计算方法[J].石油物探 ,1980 ,19(4) :64.
[8] 西安交通大学高等数学教研室.工程数学复变函数[M].北京:人民教育出版社 ,1978.
[9] 黄绪德.油气预测与油气藏描述——地震勘探直接找油气[M].南京:江苏科学技术出版社 2003.
[10] 奥东海姆 A V ,谢弗著 R W. 数字信号处理[M].董士嘉 杨耀译.北京:科技出版社 ,1980

作者简介:贺锡雷(1971 -) ,男,博士,主要从事地震勘探信号处理研究工作。

ABSTRACTS

CHARACTERISTICS AND IMPLICATIONS OF THE SEISMIC ABNORMAL RESPONSES OF CARBONIFEROUS HUANGLONG FORMATION IN FULING AREA, SOUTHEASTERN SICHUAN BASIN

SHI Ze-jin^{1,2}, XIA Wen-qian², WANG Chang-cheng², et al. (1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China; 2. College of energy resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 231

Fuling area is located in southeastern Sichuan basin. Through carefully seismic interpretation of Huanglong formation of carboniferous in Fuling area, there are four typical seismic responses in reflecting structure as follows: ① The amplitude of both peak and trough of seismic are medium to weak. ② Peak amplitude with phase axis pulled down present as strong or weak, and above trough amplitude is high to medium. ③ Seismic phase axis is pulled down clear and the amplitude is medium to weak, and amplitude is weakens lower with the seismic phase axis pulled down clear. ④ Seismic amplitude is weak and close to nil trace. Based on the theoretical models of karst units developing and sedimentary characteristics in this area, the four seismic responses in reflecting structure which we mentioned above probably means four different geologic origins, which respectively represented: A. developing of karst positive topography and karst negative topography; B. developing karst caves that are filled by mud completely or certain mud or developing high - porosity reservoirs; C. developing fissures and caves that are filled by much mud or not entirely filled that performances low speed in seismic profiles; D. identifier of Huanglong formation which is deposited seven to nine meters or the sediment thickness is less than that. Meanwhile, the seismic forward modeling for the four geologic origins is matching for the four typical seismic responses in reflecting structure well. All those study results based on specific structure in seismic profiles can be used to predict the new type of reservoirs and effective to search for new alternative exploration zones for more gas discovery in Fuling area.

Key words: seismic reflecting structure; seismic response; seismic forward modeling, Huanglong formation, southeast region of Sichuan basin

SEISMIC SPACE INSTANTANEOUS PARAMETER ANALYSIS AND ITS APPLICATION

HE Xi-lei^{1,2}, HUANG De-ji², WEN Xiao-tao², et al. (1. State Key Lab. of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploration, Chengdu University of Technology,

Chengdu 610059, China; 2. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 237

As a comparison to conventional instantaneous parameter analysis based on complex trace analysis in time domain, a new method, space-instantaneous parameter analysis (SIPA), is proposed in this paper, which changes the harmful singular values in seismic complex traces into effective information and is more useful in lateral prediction of reservoir. This method recombines seismic data along horizon to form varying reflection amplitude signal traces which are used as real traces to process space instantaneous complex trace analysis, and calculate out the space instantaneous parameters. The change points of lateral amplitude are just these singular points which are not satisfied with the summary of analysis conditions and characters, the singular point corresponding to the singular value are just correspond to geological structure catastrophe points along the horizontal layer, the relative change ratio of instantaneous phase and wave-number along the horizon is greater than that of amplitude. Consequently, SIPA can effectively detect fault, crack, fracture - rich zone, channel, fringe and other lithological pinch - out points. The results of numerical modeling and fractured reservoir prediction with real seismic data in Y area show that the above conclusion is correct.

Key words: space-instantaneous parameters; complex trace analysis; reservoir prediction; fracture-rich zone

STRUCTURE MAPPING WITH TRANSVERSELY VARIABLE 3D SEISMIC VELOCITY MODEL IN ERLIAN BASIN

JIA Yi-rong^{1,2}, HE Zhen-hua¹, SHI Lan-ting², et al. (1. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Northwest Geology Institute, CNPC, Lanzhou Gansu 730020, China). *COMPUTING TECHNIQUES FOR GEOPHYSICAL AND GEOCHEMICAL EXPLORATION*, 2011, 33(3): 243

Depressions in Erlian Basin are long and narrow with complex faults and structures. Challenges for correct structure mapping include complex structure imaging and sharply lateral variable velocity analysis. Traditional methods by using stack velocity spectrum do not meet the demands of high precision seismic interpretations. The improved structure mapping in this paper involves the following steps: (1) creating velocity model by stacking velocity spectrum based on seismic pre-stack time migration data; (2) calibration of the velocity model with well log and seismic data and building up a transversely variable 3D seismic velocity