

地震相干技术的进展及其在油气勘探中的应用

王大伟^{1,2}, 刘震¹, 陈小宏^{1,2}, 姬小兵³

(1. 中国石油大学石油天然气成藏机理教育部重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油天然气集团公司物探重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油化工股份有限公司胜利油田有限公司勘探监理部, 山东 东营 257001)

摘要:在介绍相干技术基本原理、相干算法发展历程和相干技术发展趋势的基础上,分析了相干技术在油气勘探中的应用。由于其对不连续体非常敏感而广泛应用于断层和裂缝的识别,若与其它地震技术相结合,则可以更好地识别砂体、复杂的断块构造。相干数据能够反映地质体的空间变化,即不同能量环境下沉积的地质体具有不同的相似性,因此可以通过对相干体切片的分析来判断地质体的空间变化及当时的沉积环境,为寻找有利的储集带和隐蔽性油气藏提供重要的信息。

关键词:相干;不连续体识别;沉积环境;油气勘探

中图分类号:P631.4

文献标识码:A

文章编号:1000-7849(2005)02-0071-06

自从1995年Bahorich和Farmer^[1]提出相干算法以来,该算法已从第一代基于互相关的算法(简称C₁算法)、第二代利用多道相似性的算法^[2](简称C₂算法),发展到第三代基于特征结构的相干算法^[3](简称C₃算法)。无论哪一代相干技术都是通过计算相邻地震道的相似性来确定地震属性空间连续性的分布,进而解释地质体的空间展布。这种技术可以压制连续性,突出不连续性,比地震水平切片的地质解释更直观。相干技术由于对不连续体非常敏感,因此主要应用于更客观、更细致的断层解释^[4,5]、河道、砂体及裂缝的预测^[6,7]、复杂地质体的识别^[8]等方面。这些局部的细微的地质特征常常指示着可能有油气圈闭存在,因此准确解释这些地质现象很有意义。

近年来,相干技术逐渐应用于沉积环境的解释^[9]和隐蔽油气藏的勘探^[10]。相干技术可以定量地反映地震特征的横向变化,分析沉积环境,确定沉积相和构造带,特别适合于复杂隐蔽油气藏的勘探。随着油气勘探难度的加大,对地震资料解释精度的要求也越来越高,相干技术在精确描述油气藏方面的应用也越来越广。

1 相干技术

相干技术(event similarity prediction,简称ESP)是一种预测相似性的方法,可以输出地震道之

间的相似性、构造倾角和方位角等属性,主要包括二维相干(2D ESP)、三维相干(3D ESP)、沿层相干(ESP 3D along horizon)、边角探测(edge detection)和局部构造分析等。相似性的横向变化往往与断层、沉积相等地质现象有关。连续的地质体一般对应较高的相似性值,当地层不连续时可能出现异常值。这种地质现象通过ESP可以更加明显地被识别出来。

1.1 基本原理

相干技术主要用于描述地震数据的空间连续性(图1),如图1所示,地震信号上半部同相轴的连续性较好,下半部同相轴的连续性较差^[1]。根据地震理论,连续性好的同相轴对应于连续性较好的地质

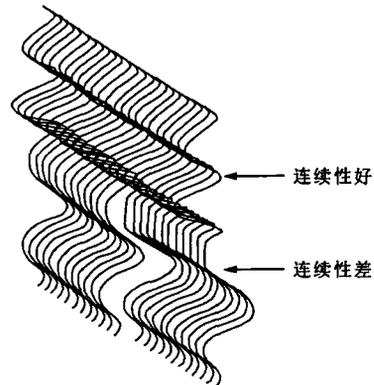


图1 相干技术的基本原理图^[1]

Fig.1 Coherence principle

收稿日期:2004-12-30 编辑:黄秉艳

基金项目:中国石油天然气股份公司塔里木油田分公司“英买力地区地震多属性分析及裂缝预测技术研究”(41004060022)

作者简介:王大伟(1976—),男,现正攻读地质资源与地质工程专业博士学位,主要从事油气田地质学研究。

体,如水平地层或倾斜地层等;连续性差的同相轴对应于连续性较差的地质体,如断层等。

自从 1995 年 Bahorich 和 Farmer 将相干引入到三维数据的解释中以来,相干的算法有了很大发展,大体上可以分为第一代相干 (cross correlation)、第二代相干 (semblance)、第三代相干 (eigenstructure)。

1.2 第一代相干

Bahorich 和 Farmer^[1] 提出了利用传统的归一化相干算法预测同相轴的相似性,即第一代相干算法(C₁),预测主要通过互相关得到。设有两个离散的信号序列 $x(n)$ 和 $y(n)$,定义两者间的相似程度 P_{xy} 为:

$$P_{xy}(m) = \frac{r_{xy}(m)}{[r_{xx}(0) \cdot r_{yy}(0)]^{1/2}} = \frac{\sum_{i=1}^N x(i) \cdot y(i-m)}{[\sum_{i=1}^N x(i)^2 \cdot \sum_{i=1}^N y(i)^2]^{1/2}} \quad (1)$$

式中: N 代表选取的时窗长度; $r_{xy}(m)$ 代表信号序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的互相关; $r_{xx}(0)$ 和 $r_{yy}(0)$ 分别代表信号序列 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的能量,且 $P_{xy}(m)$ 满足条件: $|P_{xy}(m)| \leq 1$ 。

为了突出地层和岩性的横向非均质性,定义相干系数为:

$$R_{xy}(m) = 1 - P_{xy}(m) \quad (2)$$

且 $R_{xy}(m)$ 满足 $0 \leq R_{xy}(m) \leq 2$,这样当相干系数为零时,相似程度最大。计算相似性时,将中间地震道与其相邻的道进行比较,计算结果作为中间道的输出。

C₁ 算法适用于高质量的地震资料,而不适用于存在相干噪声的地震资料;同时,应用 C₁ 算法时,假设地震道是零平均信号,该算法受到此假设条件的限制。因此,为了解决这些问题,提出了利用多道相似性的第二代相干技术(C₂)。

1.3 第二代相干

Marfurt 等^[2] 在 Taner 和 Koehler 1969 年、Landa 等 1993 年研究的基础上,将多道相似计算引入到同相轴的相似性预测中。如图 2 所示,首先定义一个椭圆或矩形窗口,在这个窗口中以分析点为中心,有 N 道地震数据,如果分析点的坐标为 (x, y) ,则定义相似性 (p, q) 为:

$$(p, q) = \frac{\left[\sum_{i=1}^N u(t - px_i - qy_i, x_i, y_i) \right]^2 + \left[\sum_{i=1}^N u^H(t - px_i - qy_i, x_i, y_i) \right]^2}{\left[\sum_{i=1}^N \{ [u(t - px_i - qy_i, x_i, y_i)]^2 + [u^H(t - px_i - qy_i, x_i, y_i)]^2 \} \right]} \quad (3)$$

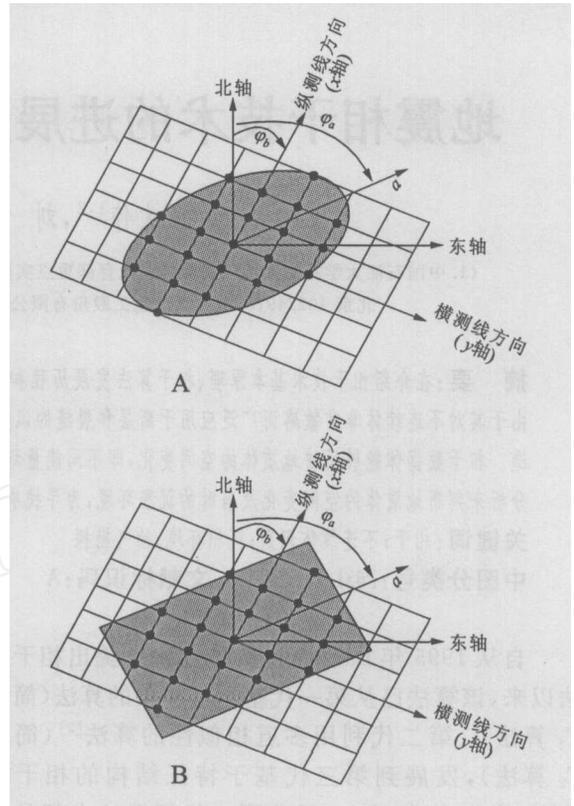


图 2 分析窗口^[2]

Fig. 2 Analysis window

A. 以分析点为中心的椭圆分析窗口,主轴为 a ,径向轴为 b ,主轴方位角为 α ; B. 以分析点为中心的矩形分析窗口,主轴为 a ,径向轴为 b ,主轴方位角为 α

式中:三维坐标 (x, p, q) 定义了一个时刻的平面, p 和 q 分别代表 x 和 y 方向的视倾角 (ms/m); $px_i + qy_i$ 代表点 (x, p, q) 定义的平面内点 (x_i, y_i) 处与中心点时间的差异;上标 H 表示 Hilbert 变换或实际地震道 u 的正交分量。

通过式 (3) 可以计算多道地震道的相似性。对于某些小的相干同相轴,如在计算沿过零点追踪的同相轴的相干性时,采用式 (3) 的相似算法是不稳定的,因此常采用式 (4) 计算。

假设时窗长度为 $2w$ (ms) 或半高度 $K = w/t$,则定义相干计算的平均相似性 c 为:

$$c(t, p, q) = \frac{\left[\sum_{k=-K}^K \left\{ \sum_{i=1}^N u(t+k-t-px_i - qy_i, x_i, y_i) \right\}^2 + \left[\sum_{i=1}^N u^H(t+k-t-px_i - qy_i, x_i, y_i) \right]^2 \right]}{\left\{ \sum_{k=-K}^K \left\{ \sum_{i=1}^N \left[u(t+k-t-px_i - qy_i, x_i, y_i) \right]^2 + \left[u^H(t+k-t-px_i - qy_i, x_i, y_i) \right]^2 \right\} \right\}} \quad (4)$$

式中: t 为采样间隔。

式 (4) 的优越性在于可以准确地计算数据的相

干性、倾角和方位角,且垂直分析时窗可以限制在几个采样点以内,从而可以精确地计算薄的、细微的地质特征的相似性。从地震剖面中可以得到最大的倾角 d_{max} (ms/m),限制视倾角为:

$$\sqrt{p^2 + q^2} \quad d_{max} \quad (5)$$

根据相似性的特点,当视倾角与真倾角满足式

(6)时,相似性 $c(t, p, q)$ 达到最大值,式(6)为:

$$\begin{cases} p = d \cdot \sin \\ q = d \cdot \cos \end{cases} \quad (6)$$

式中: (p, q) 为视倾角对; d 为地层的真倾角 (ms/m); 是与正 x 轴(或北)的顺时针夹角,也就是当计算得到的视倾角能够反映真实地层时,相似性达到极值。

计算时,在以 (t, p_0, q_0) 为中心的(矩形或椭圆形)分析平面内,根据 Nyquist 定律确定视倾角的采样间隔,按照离散点进行计算,最后得出极值点,根据对应的视倾角对 (p, q) 可以求出地层的真倾角 d 。

Marfurt 等提出的沿倾角(方位角)计算的多道 C_2 算法的抗噪能力较强,但横向分辨率较低。

1.4 第三代相干

为了提高相干算法的分辨率, Gersztenkorn 和 Marfurt^[3]将数学中的矩阵特征结构引入到相干分析中,利用特征结构来计算相干,即基于特征结构的第三代相干算法(C_3)。假设在一个分析窗口中有 J 道地震数据, N 个采样点(道),用矩阵 D 表示三维数据体:

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1J} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2J} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \dots & d_{NJ} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: d_{nj} 代表第 j 道的第 n 个采样点。

矩阵 D 的第 n 行向量 $d_n^T = [d_{n1}, d_{n2}, \dots, d_{nJ}]$ ($1 \leq n \leq N$),代表数据体中第 n 个采样点的集合。假定每一个窗口中的数据体平均值为零,那么第 n 个采样点的协方差矩阵为:

$$d_n d_n^T = \begin{bmatrix} d_{n1} \\ d_{n2} \\ \vdots \\ d_{nJ} \end{bmatrix} [d_{n1}, d_{n2}, \dots, d_{nJ}] = \begin{bmatrix} d_{n1}^2 & d_{n1} d_{n2} & \dots & d_{n1} d_{nJ} \\ d_{n1} d_{n2} & d_{n2}^2 & \dots & d_{n2} d_{nJ} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ d_{n1} d_{nJ} & d_{n2} d_{nJ} & \dots & d_{nJ}^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

如果 d_n 是一个非零向量,则协方差矩阵 $d_n d_n^T$ 是一个秩为 1 的半正定对称阵,有一个不为零的特征值。同样,整个数据体的协方差矩阵 $D^T D$ 可以用

下式表示:

$$C = D^T D = \sum_{n=1}^N d_n d_n^T = \begin{bmatrix} \sum_{n=1}^N d_{n1}^2 & \sum_{n=1}^N d_{n1} d_{n2} & \dots & \sum_{n=1}^N d_{n1} d_{nJ} \\ \sum_{n=1}^N d_{n1} d_{n2} & \sum_{n=1}^N d_{n2}^2 & \dots & \sum_{n=1}^N d_{n2} d_{nJ} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \sum_{n=1}^N d_{n1} d_{nJ} & \sum_{n=1}^N d_{n2} d_{nJ} & \dots & \sum_{n=1}^N d_{nJ}^2 \end{bmatrix} \quad (9)$$

协方差矩阵 C 的秩代表分析窗口中地震数据的自由度,特征值的大小可以定量描述数据体的变化程度。

Golub 和 Van Loan 于 1998 年定义了 $Tr(C)$:

$$Tr(C) = \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N d_{nj}^2 = \sum_{j=1}^J c_{jj} = \sum_{j=1}^J \quad (10)$$

式中: $Tr(C)$ 代表分析窗口中地震数据的能量和,它等于协方差矩阵 C 特征值的和。

E_c 代表特征结构相干值:

$$E_c = \frac{1}{Tr(C)} = \frac{1}{\sum_{j=1}^J c_{jj}} = \frac{1}{\sum_{j=1}^J} \quad (11)$$

如果协方差矩阵 C 的秩为 1,则分析时窗内地震数据的自由度为 1,协方差矩阵 C 只有一个特征值 λ_1 ,因此 $E_c = 1$,说明分析时窗内的地震数据完全可以由中心道来表示;如果协方差矩阵 C 的秩大于 1,则说明分析时窗内地震数据的自由度大于 1,地震数据同时与几个因素有关。

值得注意的是无论哪种相干技术,相干的分辨率都与分析时窗的长度有关。窗口的长度可以根据解释者的意图来决定,如果需要解释大的地质体,例如构造等,则应该选择相对大的时窗长度;如果需要解释小的地质体,例如河道等,则应该选择相对小的时窗长度;时窗长度应该根据所要反映的地质体的垂向长度来选择,以便准确地了解地质现象或地质体。

用来计算相干的数据体既可以是地震数据体,也可以是地震属性(振幅、相位、频率)数据体,通过式(12)~(15),可以得到地震道的瞬时特征参数(瞬时振幅、瞬时相位、瞬时频率)。

$$U(i, p, q) = \sum_{i=1}^N u(t - px_i - qy_i, x_i, y_i) \quad (12)$$

$$a_i(i, p, q) = \sqrt{[U(i, p, q)]^2 + [U^H(i, p, q)]^2} \quad (13)$$

$$\phi(i, p, q) = \arctan[U^H(i, p, q)/U(i, p, q)] \quad (14)$$

$$f_i(i, p, q) = [U(i, p, q) \cdot \partial U^H(i, p, q) / \partial -$$

$$U^H(\omega, p, q) \cdot \partial U(\omega, p, q) / \partial \omega \Big/ \sqrt{[U(\omega, p, q)]^2 + [U^H(\omega, p, q)]^2} \quad (15)$$

式中: $U(\omega, p, q)$ 代表分析时窗中的地震数据; $U^H(\omega, p, q)$ 代表地震道的正交分量; $a_i(\omega, p, q)$ 代表瞬时振幅; $\phi_i(\omega, p, q)$ 代表瞬时相位; $f_i(\omega, p, q)$ 代表瞬时频率。Gersztenkorn 和 Marfurt 提出的 C_3 算法具有最佳的横向分辨率,但对大倾角不敏感,不如同等情况下 C_2 算法的分辨率高。Marfurt 等^[11]对 C_3 算法进行了修正,提出了 $C_{3.5}$ 算法,虽然改进了 C_3 算法对倾角的敏感程度,但计算成本要高 N 倍[倾角对 (p, q) 的个数],且分辨率与 C_2 算法相同。为此,Marfurt 等^[11]又发展了 $C_{3.6}$ 算法,该法是沿更平滑的区域倾角来计算特征结构。

1.5 最新进展

2002年,王西文等^[12]将小波分析引入到相干计算中,他们首先利用小波域分频方法计算地震数据各个频带内的瞬时特征参数,然后应用 C_1 算法计算各个频带内的地震相干数据体,最后通过重构系数,对一定频带内的相干体放大或减小(主要突出特定频段的相干体),分频重构的相干体易于突出被忽略的小断层信息。他们以马东-唐南油田为例,对该方法进行了初步的探讨。2003年,宋维琪和刘江华^[13]在特征结构的基础上提出了地震多矢量属性相干数据体的计算方法。该算法在属性提取方面,既考虑了方位,又考虑了倾向,即计算地震矢量属性。利用 C_3 算法计算各属性的最大特征值 X_{\max}^m ($1 \leq m \leq M$, M 代表地震属性的个数),然后将各属性最大特征值组成向量 $X = \{X_{\max}^m\}$ ($1 \leq m \leq M$),形成协方差矩阵 $C = X^T X$,进而按照 C_3 算法计算综合相干值 $E_c = \max / \text{Tr}(C)$ 。他们以胜利油田桩西地区为例进行了讨论,认为该方法可以最大限度地提高地质体边界的分辨率。

利用一个不准确的叠加速度将所有数据体叠加成一个简单的数据体,这样会损害数据体,尽管图像的整体相干性得到了加强,但却模糊了边界和其他的不连续体。针对上述做法所存在的不足,Al-Dossary 等^[14]提出了一种新的算法。该算法是将叠前地震数据按照方位角和炮检距进行分类,然后计算具有相同炮检距、不同方位角的地震数据之间的相干性。新算法的覆盖次数和信噪比都较低,由此计算出来的相干体可以对边界进行更加清晰的成像,能够推断出微小断层和裂缝。他们以 Texas 的某油田为例,说明了该算法在裂缝探测方面的实效性。

2 相干技术在油气勘探中的应用

三维地震数据体包含了大量的地质信息,对三维数据体进行相干计算可以得到一个三维相干数据体,并可以对三维相干数据体进行剖面显示和时间切片显示。利用相干技术,可以突出那些相邻地震道的不连续性,压制连续性,使特殊的地质现象更加清晰、更易于解释,尤其是相干数据体的时间切片比常规三维地震数据的时间切片所反映的地质异常现象更加清楚、直观。余德平等^[4]验证了三维相干技术不仅可以快速、准确地确定断层的平面展布及其细节特征,而且可以利用其提供的地层产状信息研究目标储层的构造沉积演化体系。

2.1 沉积环境分析

利用三维 ESP 的时间切片,可以定量估计横向的相似性变化,从而在宏观上判断地质体的分布范围和沉积环境的能量变化。相同沉积环境中形成的地质体具有相似的结构,在地震剖面上反映为相似的波形特征。一般,高能环境下的沉积地层对应的地震波形相对较紊乱,通过相干计算得知,在高压环境下沉积的地层所对应的反射同相轴的相似性较差;在低能环境下沉积的地层所对应的地震波形相对较连续,对应的反射同相轴的相似性较好,这样可以通过 ESP 的时间切片来分析沉积环境的变化。凌云项目组^[9]应用相干数据体来描述沉积环境,并验证了相干数据体描述沉积环境的可行性与有效性。图 3 是一组某地区的三维 ESP 的时间切片图(3 200 ~ 3 000 ms)。图中 a 区的相似性差,代表高能沉积环境;a 区以外的区域相似性好,代表低能的沉积环境。在 3 200 ~ 3 000 ms 的时间切片中,可以看到该地区环状 a 区的发展趋势是从西部逐渐向东北部移动,代表了一个沉积演化过程,结合其他资料认为,这可能是一个水体的发育过程,从而确定了该地区这一时期的地质背景——自西向东北的湖进过程。从 3 200 ms 和 3 160 ms 的时间切片中可以判断,A、B 井附近可能是一种活跃的高能沉积环境,钻井等资料也表明 A、B 井所在位置此时可能为河流相沉积,但并没被水淹没或水体较浅。在 3 120 ~ 3 000 ms 的时间切片中可以看出,随着构造变形的进一步加剧,东北部相对下沉,沉积中心逐渐向东北部倾斜,导致湖水进一步加深,A、B 井所在位置逐渐被淹没,形成了蒸发浅湖,沉积了很厚的古近系膏盐层。从沉积环境的相似性看,A、B 井所在位置

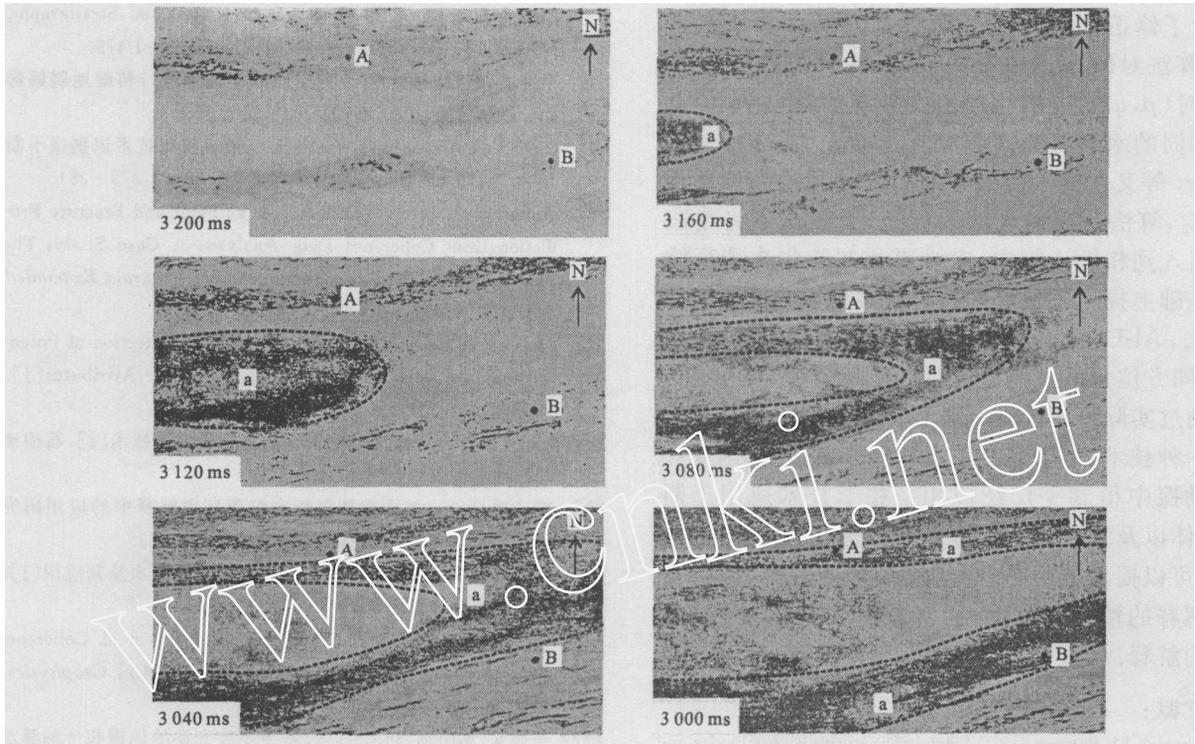


图 3 利用 ESP 切片判断沉积环境

Fig. 3 Interpretation of depositional environments using time-slices of ESP

从 ESP 切片可以看出,环状的 a 区在 3 200 ~ 3 000 ms 间逐渐向东北方向移动,代表一个沉积演化过程

在始新统早期可能处在河流—湖泊之间的地理位置。

2.2 断层、砂体及复杂构造的确定

一般情况下,断层或波形畸变、地层或岩性所引起的地震属性的突变等在相干体上都会产生一个窄条低值区,相干技术可用来识别地层边界(断层、岩性尖灭),如果与三维可视化技术结合使用,则能更方便、快捷地识别出微小断层。三维地震数据经相干处理得到相干信息数据体,加载到三维可视化中,并针对所研究的断层和砂体,采用适当的透视参数,即可清晰地显示断层的空间形态与砂体的空间展布规律,为研究断层和砂体提供客观依据^[5]。相干技术大大缩短了三维地震数据的解释周期,Ashbridge 等^[6]以 Magnus 油田为例,提出了一种基于相干分析和井下数据相结合的、用于断层和裂缝解释的新方法(Fault-Magic),实例研究表明该方法可以提高绘图的速度和效率。Neves 等^[7]以 Unayzah 砂岩为例,利用地震属性分析方法研究了有潜能的裂缝和小断层,他们指出相干体和频谱分解技术在确定裂缝和小断层方面很有潜力。相干技术不仅可以用来确定断层和砂体,而且还可以用来查明复杂断块构造,发现微小圈闭,寻找构造油藏。王萍等^[8]指出地震相干技术与断层封堵技术结合,可以建立地质模型,在成图过程中采用

变速成图技术和大比例尺、小等值线间距技术,可以寻找 10 ~ 30 m 长的小断层和微构造,进而分析油藏的成藏条件,确定主探目标层位。

2.3 隐蔽性油气藏的确定

地震相干技术从波形的相似性分析入手的目的是揭示地下储层的横向变化。当沉积相单元发生变化时,地震反射波的特征必定发生相应的变化,因此可以利用相干技术将地震特征的横向变化量化,推断沉积相的变化和断裂的发育程度,有利于沉积相和构造带的确定,特别适合于复杂隐蔽油气藏的勘探^[10]。

3 结 语

自从 1995 年基于互相关的 C_1 算法提出后,又相继发展了基于相似性的 C_2 算法和基于特征结构的 C_3 算法。Bahorich 和 Farmer 提出的 C_1 算法适用于高质量的地震资料,而不适用于存在相干噪声的地震资料;Marfurt 等提出的沿倾角(方位角)计算的多道 C_2 算法具有较强的抗噪能力,但分辨率低;Gersztenkorn 和 Marfurt 提出的 C_3 算法具有最佳的横向分辨率,但对大倾角不敏感,不如同等情况下 C_2 算法的分辨率高。为此,Marfurt 等对 C_3 算

法进行了修正,提出了 $C_{3.5}$ 算法,虽然 $C_{3.5}$ 算法改进了 C_3 算法对倾角的敏感程度,但计算成本要高 N [倾角对 (p, q) 的个数]倍,且分辨率仅能达到与 C_2 算法相同的水平。为了解决 $C_{3.5}$ 算法存在的问题,Marfurt 等又发展了沿更平滑的区域倾角来计算相干的 $C_{3.6}$ 算法。在前人的基础上,王西文等将小波分析引入到相干计算中,宋维琪和刘江华在特征结构的基础上提出了地震多矢量属性相干数据体的计算方法,Al-Dossary 等提出了计算具有相同炮检距、不同方位角的叠前地震数据之间的相干性算法,他们通过实际应用验证了各种方法的适用性。相干作为一种技术,由于其对不连续体非常敏感,因此在油气勘探中得到了广泛应用。相干技术适用于断层、砂体以及复杂断块构造等的识别,能够分析沉积环境,可以揭示更隐蔽、更难以解释的地震特征,提高了解释的精度和速度,大大缩短了传统三维地震数据的解释周期。

参考文献:

- [1] Bahorich M, Farmer S. 3-D Seismic Discontinuity for Faults and Stratigraphic Features: The Coherence Cube[J]. *The Leading Edge*, 1995, 14 (10) : 1 053 - 1 058.
- [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) : 1 150 - 1 165.
- [3] Gersztenkorn A, Marfurt K J. Eigenstructure-Based Coherence Computations as an Aid to 3-D Structural and Stratigraphic Mapping[J]. *Geophysics*, 1999, 64 (5) : 1 468 - 1 479.
- [4] 余德平,曹辉,郭全仕.应用三维相干技术进行精细地震解释[J].*石油物探*,2000,39(2) :83 - 88.
- [5] 王志君,黄军斌.利用相干技术和三维可视化技术识别微小断层和砂体[J].*石油地球物理勘探*,2001,36(3) :378 - 381.
- [6] Ashbridge J, Pryce C, Coutel F, et al. Fault and Fracture Prediction from Coherence Data Analysis. A Case Study: The Magnus Field, UKCS[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2000, 19: 1 564 - 1 567.
- [7] Neves F A, Zahrani M S, Bremkamp S W. Detection of Potential Fractures and Small Faults Using Seismic Attributes[J]. *TLE*, 2004, 23(9) : 903 - 906.
- [8] 王萍,宋书军,王新征,等.岩性油藏配套解释技术[J].*石油地球物理勘探*,2003,38(5) :557 - 560.
- [9] 凌云项目组.基本地震属性在沉积环境解释中的应用研究[J].*石油地球物理勘探*,2003,38(6) :642 - 653.
- [10] 郭栋,韩文功.高分辨率地震资料综合解释技术及其应用[J].*勘探地球物理进展*,2004,27(4) :290 - 296.
- [11] Marfurt K J, Sudhaker V, Gersztenkorn A, et al. Coherence Calculations in the Presence of Structural Dip[J]. *Geophysics*, 1999, 64(1) : 104 - 111.
- [12] 王西文,苏明军,刘军迎,等.基于小波变换的地震相干的算法及应用[J].*石油物探*,2002,41(3) :334 - 338.
- [13] 宋维琪,刘江华.地震多矢量属性相干数据体计算及应用[J].*物探与化探*,2003,27(2) :128 - 130.
- [14] Al-Dossary S, Simon Y, Marfurt K J. Inter Azimuth Coherence Attribute for Fracture Detection[J]. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 2004, 23: 183 - 186.

Progress of Seismic Coherence and Its Application to Petroleum Exploration

WANG Da-wei^{1,2}, LIU Zhen¹, CHEN Xiao-hong^{1,2}, JI Xiao-bing³

(1. Key Laboratory for Hydrocarbon Accumulation in China University of Petroleum, Ministry of Education, Beijing 102249, China; 2. Key Laboratory of Geophysical Exploration, CNPC Beijing 102249, China; 3. Division of Exploration Supervision, Shengli Oilfield Co. Ltd., SINOPEC, Dongying Shandong 257001, China)

Abstract: Application of seismic coherence in petroleum exploration has been discussed based on its principle, history and trend. Coherence is broadly applied to infer faults and fractures and also can be used to detect and interpret sandstone and complex fault blocks as it is sensitive to discontinuities. Emphasis has been put on its application in depositional environment analysis. Coherence cube can reflect the spatial changes in geologic bodies, in other words, similar geological bodies from different energy environments may vary. Therefore contrasting coherence slices can infer the spatial changes for geologic bodies and depositional environments, and provide important information to explore the profit reservoirs and the subtle traps.

Key words: coherence; discontinuity detection; sedimentary environment; petroleum exploration