

时移地震数据空间偏差校正方法

李景叶^{1,2}, 张连群², 陈小宏^{1,2}

(1. 中国石油大学 油气资源与探测国家重点实验室, 北京 102249; 2. 中国石油大学 CNPC 物探重点实验室, 北京 102249)

摘要: 时移地震油藏监测技术是直接确定剩余油分布的关键技术之一。针对时移地震油藏监测在国内的需求及推广应用难点, 研究了时移地震数据空间偏差校正处理方法。由于在观测系统、采集方向的处理参数等方面的差异, 导致地下同一反射点在不同时移地震数据偏移后空间位置存在差异, 产生与油藏变化无关的地震差异, 增加数据解释的难度和风险。通过对参考数据与监测数据三维空间内的局部数据体的三维相关计算, 确定监测数据体在 x 方向、 y 方向和时间方向上最佳移动量, 从而实现两次地震数据空间位置差异校正。实际时移地震数据处理试验结果分析表明, 空间偏差校正处理方法在消除时移地震数据三维空间非线性空间偏差方面是有效的。

关键词: 时移地震; 非目的性重复采集; 空间偏差校正; 三维相关; 油藏监测

中图分类号: P631.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2012)04-0678-06

时移地震油藏监测技术将地质学、地球物理学、岩石物理学、油藏工程学综合起来, 实现油藏从静态描述到动态预测的转变, 快速进行油藏评价, 达到调整油田开发方案、提高油气采收率的目的, 已成为当今储层地球物理学研究的热点^[1]。Shell、BP 和其他的主要石油公司和服务公司都投入了相当的力量, 利用时移地震油藏监测技术实现了不同油藏参数变化动态监测^[2-3]。近几年, 在国内时移地震油藏监测技术在国内也有了较大的进展, 新疆油田、大庆油田、渤海油田和辽河油田等都进行了时移地震油藏监测试验研究和推广应用, 取得一定效果^[4-5]。从目前我国时移地震研究来看, 国内油田油藏结构复杂、非均质性强, 时移地震投资风险大, 因此主要采用非目的性重复采集时移地震资料进行研究试验。非目的性重复采集地震资料是指不是针对时移地震研究而对同一油藏在不同时期重复采集地震资料, 因为省去了地震数据采集成本, 投资相对少得多, 可以有效推动时移地震技术在国内的推广。但由于非目的性重复采集在观测系统、采集方向等方面的差异, 会导致地下同一反射点的在偏移后空间位置存在差异, 即使采用相同的观测系统, 油藏开发引起速度变化也会导致相同层位反射在叠后存在空间差异, 需要进行时移地震资料空间偏差校正处理^[6]。

笔者研究了时移地震空间偏差校正的方法原理和实现步骤, 通过参考数据与监测数据三维空间内

局部数据体三维相关计算, 确定监测数据体在 x 、 y 方向和时间方向上最佳移动量, 从而实现两次地震数据空间位置差异校正。实际地震数据处理结果表明, 时移地震空间偏差校正方法在消除时移地震数据空间偏差、提高资料一致性方面是有效的。

1 问题的提出

由于地震数据采集成本较高, 以及地震采集设备与技术的不断进步, 我国的时移地震油藏监测研究主要面对非目的性重复采集时移地震数据。由于非目的性重复采集在观测系统、采集方向等方面的差异, 会导致地下同一反射点的在偏移后空间位置存在差异。同时由于观测系统差异, 即使对两次数据采用同样偏移方法, 来自同一反射点的绕射归位也会存在偏差^[7-8]。

两次时移地震数据处理流程很可能不完全一致, 每个处理环节中算法的选择和参数的选择都会存在差异, 这种差异在非目的性重复时移地震数据间表现得更明显, 而处理的差异将引起两次成像的三维地震数据体之间的空间偏差。Ross 和 Altan^[9]指出不同的 NMO 速度和偏移速度函数可能造成两次成像的反射界面空间位置的偏差, 使得假像出现在时移地震差异剖面上。

对于我国多层系油气藏, 当上层油气藏因开发地震速度发生变化时, 下面油藏反射波旅行时也会

发生变化。因此油藏开发不仅导致反射系数变化而(通过改变反射系数)引起目的层反射波地震振幅发生变化,同时也导致(通过改变)下层反射波的旅行时变化而引起地震振幅相应变化。为保留反射系数变化引起的振幅差异,消除下层反射波旅行时变化引起的假地震差异,需要进行空间偏差校正处理。

时移地震数据空间偏差中既包含非油藏的因素,也包含了油藏因素,它的存在是不可避免的,并且在整个三维地震体中是变化的,静态时间校正虽然能减少部分非油藏因素引起的空间偏差,但不能完全消除,因为它不能校正时移地震偏移剖面上反射界面横向上的偏差和随深度变化的动态时移。而两次偏移成像的反射界面很小的偏差也会引起假同相轴出现在时移地震的差异剖面上,从而造成不合理的差异分析。所以空间偏差校正处理是非目的性重复采集时移地震资料处理中必不可少的环节^[10]。

2 空间偏差校正理论与实现

空间偏差校正目的是校正监测地震数据和参考地震数据采样点之间的空间偏差向量,使监测地震数据向参考地震数据匹配,即找到从参考地震数据

到监测地震数据的反变换函数,使监测地震数据校正到与参考地震数据最为匹配。对非目的性重复采集时移地震数据,反变换函数是个局部的变换函数,即监测地震数据各采样点的空间偏差向量是不同的,因此,对监测地震数据的空间偏差校正是一种三维非线性校正。

2.1 整采样空间偏差校正向量计算

在三维监测数据中以每个方向上采样间隔的整数倍为步长抽取部分采样点,称为稀疏分布的控制节点。对某个控制节点 $p_0(x, y, t)$,其空间偏差校正向量求解过程如下:在参考数据中,取以 p_0 为中心,大小为 $(2M+1) \times (2N+1) \times (2P+1)$ (M, N, P 均为正整数)的正六面体互相关计算窗口;在监测数据中,在以 p_0 为中心稍大的正六面体搜索窗中搜索,并按某一互相关函数进行三维互相关运算,以找出与参考数据的相关系数为最大值的以 (x', y', t') 为中心的 $(2M+1) \times (2N+1) \times (2P+1)$ 正六面体,这样 p_0 点的偏差校正向量为 $w_p = (x', y', t') - (x, y, t)$,即相关系数最大时对应的三维位移向量。

对于三维空间中能量有限的两个离散地震信号 $f(x, y, t)$ 和 $g(x, y, t)$,通常有积互相关函数

$$C(u, v, w) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P [f(x, y, t)g(x+u, y+v, t+w)], \quad (1)$$

$$C(u, v, w) = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P f(x, y, t)g(x+u, y+v, t+w)}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P f^2(x, y, t)} \times \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P g^2(x+u, y+v, t+w)}} \quad (2)$$

$$C(u, v, w) = \frac{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P [f(x, y, t) - \bar{f}][g(x+u, y+v, t+w) - \bar{g}]}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P [f(x, y, t) - \bar{f}]^2} \times \sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P [g(x+u, y+v, t+w) - \bar{g}]^2}} \quad (3)$$

和减互相关函数

$$C(u, v, w) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P |f(x, y, t) - g(x+u, y+v, t+w)|, \quad (4)$$

$$C(u, v, w) = \frac{1}{(2M+1) \times (2N+1) \times (2P+1)} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-N}^N \sum_{t=-P}^P [f(x, y, t) - g(x+u, y+v, t+w)]^2. \quad (5)$$

因有乘法运算,积相关的运算量要比减相关大,但精度比减相关高。上式中, $f(x, y, t)$ 和 $g(x+u, y+v, t+w)$ 分别为参考数据和监测数据中正六面体互相关窗中各采样点振幅, \bar{f} 和 \bar{g} 为其互相关计算窗口的平均振幅值, $(2M+1) \times (2N+1) \times (2P+1)$ 是三维相关窗口大小, (u, v, w) 要在给定的搜索范围内,它是正六面体中心的整采样三维位移向量。当互相关函数 $C(u, v, w)$ 取最大值(对积相关)或最小值(对减相关)时,对应的 (u^*, v^*, w^*) 为相关窗

中心点的空间偏差校正向量^[11-14]。

由于三维地震数据记录的是离散采样点振幅信息,利用上述相关函数进行相关搜索时窗口的移动只能以整采样为单位进行,因此相关搜索所获得的三个方向的移动量 u^* 、 v^* 和 w^* 为该方向采样间隔的整数倍,即空间偏差校正向量为整采样向量。因此对稀疏均匀分布于监测数据体中的每个控制节点,通过整采样局部三维互相关搜索,便得到该节点的初始整采样空间偏差校正向量。所有控制节点的

空间偏差校正向量形成一个稀疏向量体。在实际资料处理过程中用局部三维互相关计算稀疏均匀分布于监测数据体中的控制节点的空间偏差校正向量得到稀疏向量体之后,需要对稀疏向量进行约束消除噪音的影响,避免插值时插出不合理的向量,然后再插值出稀疏控制节点之间其他采样点的空间偏差校正向量^[15-16]。

2.2 相关系数的三元函数插值

由基于局部三维互相关的整数采样空间偏差校正向量的计算可知,若参考数据中以采样点 (x, y, t) 为中心的相关窗与校正前监测数据中以采样点 (x', y', t') 为中心的相关窗相关系数 C 最大,则校正后监测数据中采样点 (x, y, t) 的整采样空间偏差校正向量则为 (x', y', t') 相对于 (x, y, t) 的位移量。点 (x, y, t) 与 (x', y', t') 间的相关系数值即整采样空间偏差校正向量对应的最大相关系数值可用 $C(0, 0, 0)$ 表示,同样点 (x, y, t) 与校正前对应点 (x', y', t') 周围各点间相关系数可用 $C(u, v, w)$ 表示,可得到27个点组成的相关系数体。可将这些相关系数插值为三元连续函数,然后求出该函数的极值点作为亚采样空间偏差校正向量的求解结果。

对27个点的相关系数采用三元二次拉格朗日插值法进行插值,该插值函数表达式为

$$\begin{aligned}
 C(u, v, w) = & c_0 + c_1 \cdot u + c_2 \cdot v + c_3 \cdot w + \\
 & c_4 \cdot u^2 + c_5 \cdot v^2 + c_6 \cdot w^2 + c_7 \cdot uv + c_8 \cdot vw + \\
 & c_9 \cdot uw + c_{10} \cdot u^2v + c_{11} \cdot uv^2 + c_{12} \cdot wv^2 + \\
 & c_{13} \cdot v^2w + c_{14} \cdot uu^2 + c_{15} \cdot vv^2 + c_{16} \cdot uuv + \\
 & c_{17} \cdot u^2v^2 + c_{18} \cdot v^2w^2 + c_{19} \cdot u^2w^2 + c_{20} \cdot u^2vw + \\
 & c_{21} \cdot uv^2w + c_{22} \cdot uvw^2 + c_{23} \cdot u^2v^2w + c_{24} \cdot uv^2w^2 + \\
 & c_{25} \cdot u^2vw^2 + c_{26} \cdot u^2v^2w^2. \quad (6)
 \end{aligned}$$

显然,该函数常数项系数 $c_0 = C(0, 0, 0)$ 。插值函数 $C(u, v, w)$ 的极值点应满足如下方程组

$$\begin{cases} \partial[C(u, v, w)]/\partial u = 0, \\ \partial[C(u, v, w)]/\partial v = 0, \\ \partial[C(u, v, w)]/\partial w = 0. \end{cases} \quad (7)$$

式(7)可以通过Newton迭代法求解其极值点,迭代的初值估计为 $(0, 0, 0)$,当相邻两次迭代解之差的绝对值小于设定阈值时迭代终止^[17-19]。假设迭代求解出的解向量为 $w_s = (u_0, v_0, w_0)$,则高精度的空间偏差校正向量等于为初始整采样空间偏差校正向量加上 w_s 。

2.3 空间偏差校正向量的应用

空间偏差校正向量应用处理可以采样两种模式,向前映射和向后映射。监测数据的样点 (x, y, t)

经向前映射函数 f 变换到变形后目标监测数据的 (x', y', t') 位置,而 (x', y', t') 不一定恰好是目标监测数据的样点,故还需在目标监测数据的坐标中利用这些不一定恰好是样点位置的 (x', y', t') 的振幅值插值出目标监测数据规则分布的样点振幅值。而向后映射法是对变形后的目标监测数据样点 (x', y', t') 通过向前映射反函数 f^{-1} 找到它在对监测数据中对应的位置 (x, y, t) , (x, y, t) 不一定是原监测数据样点位置, (x, y, t) 的振幅值可在原监测数据中用它周围样点的振幅值插值得到,这样便得到目标数据上样点 (x', y', t') 的振幅值。用同样的方法,得到空间偏差校正后新的监测数据上其他采样点的振幅,最后得到经空间偏差校正后与参考数据体匹配较好的新的监测数据体。向前映射法相对于向后映射法比较复杂,因此笔者利用各点空间偏差校正向量重建校正后新的监测数据体时采用向后映射。

在应用空间偏差校正向量重构校正后新的监测数据时需要振幅插值。地震数据采样点是三维的规则网格点,用三元一次Lagrange插值法,即利用待插值点周围8个采样点的振幅插值其振幅,具体计算方法和步骤如下。

设给定正六面体域上 $M \times N \times P$ 个节点在各个方向上的坐标分别为 $M \times N \times P$ 个 $x_0 < x_1 < \dots < x_{M-1}, y_0 < y_1 < \dots < y_{N-1}, t_0 < t_1 < \dots < t_{P-1}$,相应的函数为 $f_{ijk} = f(x_i, y_j, t_k), i = 0, 1, \dots, M-1, j = 0, 1, \dots, N-1, k = 0, 1, \dots, P-1$ 。选择与插值点 (u, v, w) 最近的8个节点,其三个方向的坐标为 $x_p < x_{p+1}, y_q < y_{q+1}, t_l < t_{l+1}$,即 $x_p < u < x_{p+1}, y_q < v < y_{q+1}, t_l < w < t_{l+1}$,然后采用如下三元两点即三元一次Lagrange插值公式

$$\begin{aligned}
 f(x, y, t) = & \sum_{i=p}^{p+1} \sum_{j=q}^{q+1} \sum_{k=l}^{l+1} \left(\prod_{\substack{k=p \\ k \neq i}}^{p+1} \frac{x - x_k}{x_i - x_k} \right) \times \\
 & \left(\prod_{\substack{m=q \\ m \neq j}}^{q+1} \frac{y - y_m}{y_j - y_m} \right) \left(\prod_{\substack{n=l \\ n \neq k}}^{l+1} \frac{t - t_n}{t_k - t_n} \right) \quad (8)
 \end{aligned}$$

计算插值点 (u, v, w) 处的近似函数值。

3 理论模型处理与分析

为验证空间偏差校正方法的正确性,对基于二维地质模型模拟的时移地震资料进行处理测试,如图1所示,开发前后仅背斜油藏速度发生变化。

油藏开发前后合成叠后地震数据时两次所用的子波相同,但由于开发前后背斜部位油藏速度发生变化,引起地震波传播过程中在油藏顶底界面反射系数和油藏顶界面以下旅行时变化,如图2a所示。

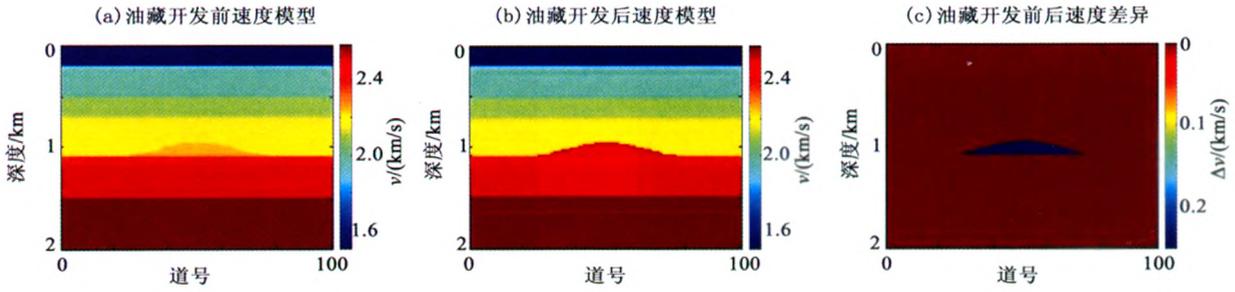


图1 油藏开发前后的速度模型及速度差异

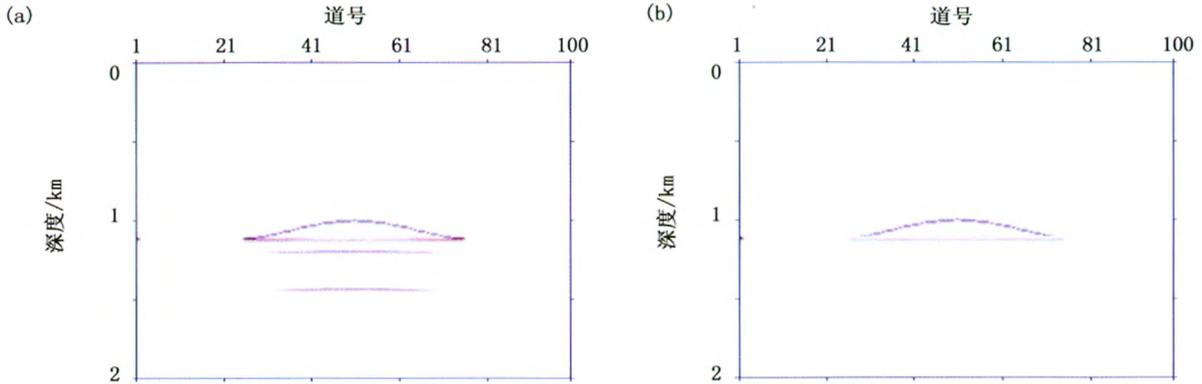


图2 油藏开发前后时移地震数据原始差异剖面(a)和空间偏差校正后差异剖面(b)

油藏顶界面振幅差异是由反射系数变化引起的,底界面振幅差异是由反射系数与旅行时变化引起的,而油藏底界面以下差异完全是由于旅行时变化引起的,不能反映对应层位地震反射振幅的变化,是一种假的振幅差异,会导致时移地震解释错误。

为消除油藏速度变化引起的差异,对开发后的监测数据以开发前基数据为参考数据作空间偏差校正,得到如图2b所示的空间偏差校正后的新的差异剖面。可以看出,油藏下方因旅行时差异引起的假的差异振幅得到了很好的去除,而油藏顶底界面因反射变化引起的振幅差异被很好地保留,反映了方

法的有效性。

4 实际资料处理效果

为了验证空间偏差校正方法在实际资料处理中的有效性,选择S油田非目的性重复采集时移地震数据进行处理试验。两次采集在采集方向和采集设备上都有较大差异,在空间偏差校正处理之前,已对该数据进行了振幅能量均衡处理、频谱一致性处理和子波、相位一致性处理。图3、图4、图5分别给出了空间偏差校正处理前的参考数据剖面、监测数据剖面和两次采集时移地震数据的差异剖面,图6、图

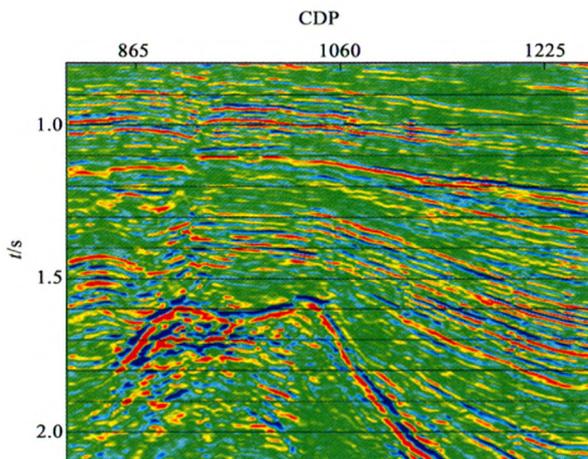


图3 空间偏差校正处理前参考地震数据剖面

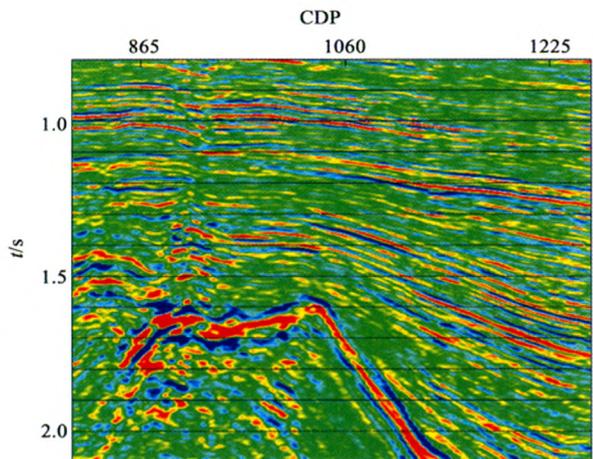


图4 空间偏差校正处理前监测地震数据剖面

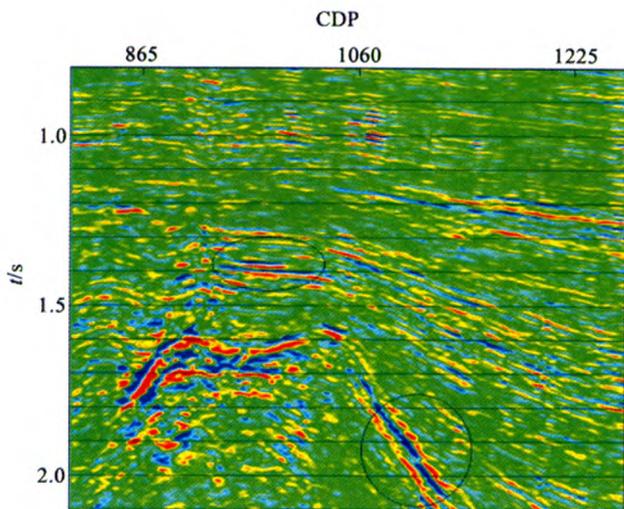


图5 空间偏差校正处理前两次采集时移地震资料差异剖面

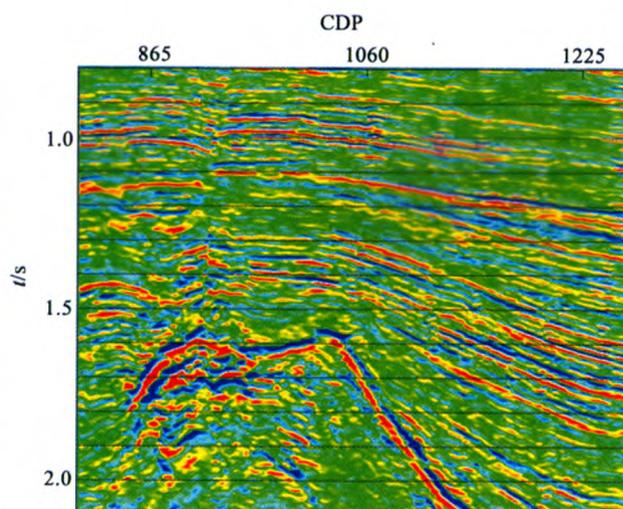


图6 空间偏差校正处理后参考地震数据剖面

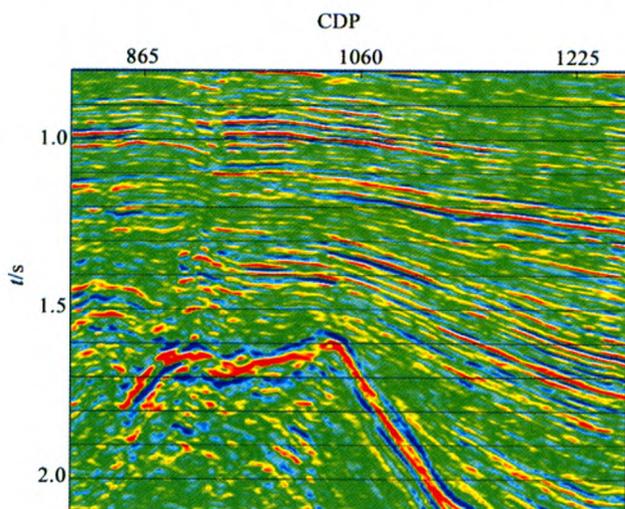


图7 空间偏差校正处理后监测地震数据剖面

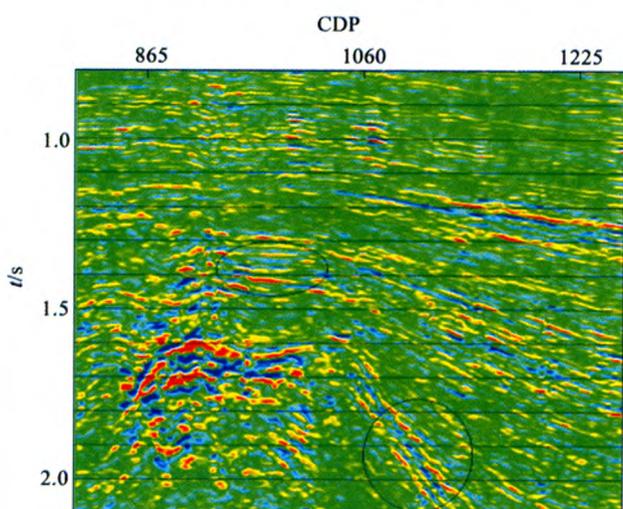


图8 空间偏差校正处理后两次采集时移地震资料差异剖面

7、图8 分别给出了空间偏差校正处理后的参考数据剖面、监测数据剖面和两次采集时移地震数据的差异剖面。

对比图5和图8所示的时移地震差异剖面,可以看出经空间偏差校正处理后,时移地震差异更为合理,其中,剖面上部选择区域内,由上部油藏参数变化引起的下部反射差异得到消除,而在剖面下部选择区域内,由采集方向不同引起的偏移归位差异也得到有效压制。在该处理资料成果的基础上进行后续的基于标志层匹配处理研究,将获得更理想的效果。

5 结论与建议

时移地震匹配处理是时移地震油藏动态监测研究的关键步骤之一,其目的就是最大程度地提高参考地震数据与监测地震数据的一致性,消除非油藏

变化引起的地震差异,突出油藏变化引起的地震差异。针对非目的性重复采集时移地震数据匹配处理难点,开展了空间偏差校正处理方法研究、实际资料处理试验与效果分析,得到如下认识。

(1)由于采集观测系统与采集设备的差异,存在非目的性重复采集时移地震资料空间偏差,影响时移地震动态监测研究精度。

(2)对监测地震数据的空间偏差校正是一种三维非线性校正,实际资料处理结果表明,该方法能较好消除时移地震在空间和时间上的偏差,提高地震资料的一致性。

(3)时移地震空间偏差校正向量是在有限的局部三维空间内通过相关运算得到的,不能消除所用的空间差异。实际处理中,潜山顶部由于采集方向差异引起绕射点成像差异减弱,但没有完全消除。

因此,有效提高时移地震资料可重复性的根本

是提高时移地震资料采集的一致性。

参考文献:

- [1] Wang Z. Feasibility of time-lapse seismic reservoir monitoring: The physical basis[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16(9): 1327 - 1329.
- [2] Kloosterman H J, Kelly R S. Successful application of time-lapse seismic data in Shell Expro's Gannet Fields, central North sea UKCS[J]. *Petroleum Geoscience*, 2003, 9(3): 25 - 34.
- [3] Landro M. Discrimination between pressure and fluid saturation changes from time-lapse seismic data[J]. *Geophysics*, 2001, 66(3): 836 - 844.
- [4] 陈小宏. 四维地震数据归一化方法及实例处理[J]. *石油学报*, 1999, 20(5): 22 - 26.
- [5] 云美厚, 易维启, 陈卫军, 等. 薄互层油藏注水地震监测理论研究[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(6): 723 - 732.
- [6] Li J Y, Chen X H, Zhao W, et al. Purposeless repeated acquisition time-lapse seismic data processing[J]. *Petroleum Science*, 2008, 5(1): 31 - 36.
- [7] Perez G, Marfurt K J. Warping prestack imaged data to improve stack quality and resolution[J]. *Geophysics*, 2008, 73: 1 - 7.
- [8] Hall S A. A methodology for 7D warping and deformation monitoring using time-lapse seismic data[J]. *Geophysics*, 2006, 71(4): 21 - 31.
- [9] Ross C P, Altan M S. Time-lapse seismic monitoring; some shortcomings in nonuniform processing[J]. *The Leading Edge*, 1997, 16: 931 - 937.
- [10] Hall S A, MacBeth C, Barkved O I, et al. Time-lapse seismic monitoring of compaction and subsidence at Valhall through crossmatching and interpreted warping of 3D streamer and OBC data[C]// 72nd Annual International Meeting, SEG Expanded Abstracts, 2002, 1696 - 1699.
- [11] 杨小林, 严敬. PIV 测速原理与应用[J]. *西华大学学报: 自然科学版*, 2005, 24(1): 19 - 20.
- [12] 孙鹤泉, 康海贵, 李广伟. PIV 原理与应用[J]. *水道港口*, 2002, 23(1): 42 - 45.
- [13] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 面内位移测量的基于梯度的数字图像相关方法[J]. *光学技术*, 2005, 31(5): 643 - 647.
- [14] 汪敏, 胡小方, 伍小平. 物体内部三维位移场分析的图像相关方法[J]. *物理学报*, 2006, 55(10): 5135 - 5139.
- [15] 许联峰, 陈刚, 李建中, 等. 粒子图像测速技术研究进展[J]. *力学进展*, 2003, 33(4): 533 - 540.
- [16] 段俐, 康琦. PIV 技术的粒子图像处理方法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2000, 26(1): 79 - 82.
- [17] 赵前进. 三元向量值混合有理插值及其算法[J]. *工科数学*, 2001, 17(4): 44 - 47.
- [18] 李一琼. 一种求三元有理插值函数的方法[J]. *宁夏大学学报: 自然科学版*, 2004, 25(2): 130 - 133.
- [19] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展[J]. *力学进展*, 2005, 35(3): 345 - 352.

A STUDY OF SPATIAL DIFFERENCE CORRECTION FOR TIME-LAPSE SEISMIC DATA

LI Jing-ye^{1,2}, ZHANG Lian-qun², CHEN Xiao-hong^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Petroleum Resource and Prospecting, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; 2. Geophysical Prospecting Key Laboratory of CNPC, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: Time-lapse seismic reservoir monitoring technology is one of the most important technologies that can determine the distribution of residual oil directly. Spatial difference correction for time-lapse seismic data was studied in this paper, aiming at solving the difficulties in the demand and application of time-lapse seismic reservoir monitoring technique in China. Spatial position difference for the same reflection point in different migrated sections caused by the differences in geometry and acquisition orientation results in unreasonable time-lapse seismic data difference, which increases the difficulty and risk of time-lapse seismic interpretation processing parameters. The optimal shifts in x , y and time directions are calculated by 3D cross-correlation between local data volumes from reference data and monitor data. And then the spatial position difference correction can be conducted for monitor seismic data. The comparison and analysis of real time-lapse seismic data indicate that time-lapse seismic spatial difference correction is effective in decreasing 3D nonlinear spatial difference of purposeless repeated acquisition time-lapse seismic data.

Key words: time-lapse seismic exploration; purposeless repeated acquisition; spatial difference correction; 3D cross-correlation; reservoir monitor

作者简介: 李景叶(1978 -), 男, 2005 年获中国石油大学(北京)工学博士学位, 现为中国石油大学(北京)资源与信息学院副研究员, 主要从事开发地震和地震、地质一体化研究, 曾获北京市科学技术二等奖, 2007 年入选北京市科技新星计划, 公开发表论文 40 余篇。