

基于伪多道匹配的时移地震互均化方法

李志娜^① 张敏*^① 李振春^① 王一惠^① 徐辉^② 傅金荣^②

(^①中国石油大学(华东)地球科学与技术学院,山东青岛 266580; ^②中国石化胜利油田物探研究院,山东东营 257022)

李志娜,张敏,李振春,王一惠,徐辉,傅金荣. 基于伪多道匹配的时移地震互均化方法. 石油地球物理勘探, 2015, 50(6):1083-1088.

摘要 为了提高数据匹配的精度,更好地消除两期数据非油气藏区域的地震响应差异,文中提出采用伪多道匹配法代替最小二乘匹配法进行时移地震互均化处理。采用伪多道匹配算法同时对时间、振幅、频率和相位进行约束,将模型道表示为关于时间、振幅、频率和相位的表达式,通过公式推导化简为用四道数据精确表示的模型道表达式。该方法相比传统的最小二乘匹配算法具有更高的匹配精度,可以更好地消除非油气藏的静态差异,反映地下油气藏的动态变化。模型试算及实际资料处理验证了本文方法的有效性。

关键词 伪多道匹配 最小二乘匹配 时移地震 互均化

中图分类号:P631 文献标识码:A doi: 10.13810/j.cnki.issn.1000-7210.2015.06.007

1 引言

近年来,随着地震勘探技术的不断发展,时移地震油藏监测技术得到了飞速发展。时移地震主要是通过不同时期采集的地震资料进行差异分析监测地下油气藏的变化。时移地震油藏监测技术基本假设为非油藏因素引起的地震响应特征保持不变,而油气藏本身在开采过程中的地震响应是随时间变化的。这就意味着在不同时期采集的地震资料差异数据体中,除了与油气藏动态流体性质有关的地震特征,其他的地震响应应该是一致的。但是在实际地震资料中这种假设是不合理的。不同时期采集的地震数据大多存在时间、振幅、频率和相位的不一致,这种不一致会产生不同的噪声背景,掩盖油气藏的变化。为了尽可能地逼近时移地震的这一假设,消除或减小不同期采集数据的不一致性,时移地震互均化技术应运而生。

采用互均化技术消除不同期地震数据的不一致性主要体现在消除时间、振幅、频率和相位四方面的差异。国内外诸多学者都对互均化技术开展了大量

的研究,Ross等^[1]分析了不同时期时移地震数据产生不一致的原因,并将其归结为时间、振幅、频率及相位四个方面的不一致,强调了互均化的必要性;Rickett等^[2]对影响一致性的因素进行了分析,并提出详细的互均化算法;邓怀群等^[3]、甘利灯等^[4]、郭念民等^[5]对互均化技术进行了讨论,并提出了可行性的技术方案。其中,针对互均化中的匹配算法研究中,金龙等^[6,7]分别提出了基于误差准则和循环迭代以及基于奇异值分解的时移地震匹配算法,均取得了一定的效果,但是其改进是基于传统的最小二乘匹配滤波理论。由于传统的最小二乘匹配方法仅仅使校正后的结果与期望输出结果的误差能量达到最小,因而数据匹配的精度受到了一定的限制。本文引入伪多道匹配方法,根据地震记录与模型道之间在时间、相位、振幅上的差异,将模型道表示为关于时间、振幅、频率和相位的表达式,实现对时间、振幅、频率和相位的同时约束,通过公式推导化简最终可以得到用四道数据精确表示的模型道表达式,其中这四道分别为原始道、原始道的希尔伯特变换道、原始道的导数道和原始道的希尔伯特变换道的导数道。在求取滤波算子后,就可以根据模型道改

* 山东省青岛市经济技术开发区长江西路 66 号中国石油大学(华东)逸夫楼 332 室,266580。Email: zhangm@upc.edu.cn

本文于 2014 年 8 月 22 日收到,最终修改稿于 2015 年 8 月 14 日收到。

本研究受国家“973”计划项目(2011CB202402)、山东省自然科学基金资助项目(ZR2013DL012)、高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20120133120012)、中国博士后科学基金(2015M582162)联合资助。

善地震道。该算法在推导过程中将时间、相位、振幅、频率因素考虑在内,相对传统的匹配算法具有更高的匹配精度。

2 理论与方法

2.1 传统匹配滤波基本原理

在时移地震数据互均化处理中,为了尽可能消除采集造成的两期数据在时间、振幅、相位和频率方面的差异,通常在对两期数据进行常规的一致性处理以后,需要采用匹配滤波对两期数据做进一步的一致性校正。而最为常用的匹配滤波方法则为基于误差能量最小的最小二乘匹配滤波方法。下面简述传统匹配滤波的基本原理。

假设同一地区不同时期采集的地震数据分别为 $s(t)$, $m(t)$, 其中, $s(t)$ 为基础地震数据, $m(t)$ 为监测地震数据, $\hat{s}(t)$ 为期望输出, 将 $s(t)$ 作为模型道, 设匹配滤波算子为 $\phi(t)$ 。使用传统的匹配滤波算法, 即

$$\hat{s}(t) = m(t) * \phi(t) \quad (1)$$

则匹配滤波后的实际输出与期望输出的误差 $e(t)$ 可表示为

$$e(t) = s(t) - \hat{s}(t) = s(t) - m(t) * \phi(t) \quad (2)$$

式(2)可简写为

$$e = s - m * \phi \quad (3)$$

求式(3)最小值可以表示为如下的最小二乘问题, 即

$$J = \| \mathbf{S} - \mathbf{M}\boldsymbol{\phi} \|_2 \quad (4)$$

式中: 矩阵 \mathbf{S} 为基础地震数据对应的褶积矩阵; 矩阵 \mathbf{M} 为监测地震数据矩阵; $\boldsymbol{\phi}$ 为匹配滤波算子的向量形式; $*$ 为褶积算子; $\| \cdot \|_2$ 为 L_2 范数。应用最小二乘原理求解式(4), 令其偏导数等于零可转化为求解如下线性方程组

$$\mathbf{M}^T \mathbf{M} \boldsymbol{\phi} = \mathbf{M}^T \mathbf{S} \quad (5)$$

由式(5)可以计算得到匹配滤波算子 $\phi(t)$, 将其应用于监测地震数据, 以此实现其与基础数据的一致性匹配。

2.2 伪多道匹配原理与实现

同样, 记 $s(t)$ 为基础地震数据, $m(t)$ 为监测地震数据, $m(t)$ 可以表示为

$$m(t) = \int A(\omega) \exp(i\omega t) d\omega \quad (6)$$

将监测数据与基础数据在振幅、相位和时间上

的差异考虑在内, $s(t)$ 可表示为

$$s(t) = B \int A(\omega) \exp\{i[\omega(t + \tau) + b]\} d\omega \quad (7)$$

式中: B 为振幅标量; b 为旋转相位; τ 为时间延迟。

对式(7)展开, 通过推导最终可化简为

$$s(t) = B \cos(b) [m(t) + \tau m'(t)] + B \sin(b) [m_H(t) + \tau m'_H(t)] \quad (8)$$

式中: $m'(t)$ 是 $m(t)$ 的导数; $m_H(t)$ 是 $m(t)$ 的希尔伯特变换道; $m'_H(t)$ 是 $m_H(t)$ 的导数。于是, $s(t)$ 最终表示为

$$s(t) = m(t) * \phi_1(t) + m'(t) * \phi_2(t) + m_H(t) * \phi_3(t) + m'_H(t) * \phi_4(t) \quad (9)$$

式中: $\phi_1(t)$, $\phi_2(t)$, $\phi_3(t)$ 和 $\phi_4(t)$ 分别为 $m(t)$, $m'(t)$, $m_H(t)$ 和 $m'_H(t)$ 的滤波算子。

滤波后的实际输出与期望输出的误差可表示为

$$e(t) = s(t) - [m(t) * \phi_1(t) + m'(t) * \phi_2(t) + m_H(t) * \phi_3(t) + m'_H(t) * \phi_4(t)] \quad (10)$$

求解式(10)的最小值问题可以表示为

$$J = \| \mathbf{S} - (\mathbf{M}\boldsymbol{\phi}_1 + \mathbf{M}'\boldsymbol{\phi}_2 + \mathbf{M}_H\boldsymbol{\phi}_3 + \mathbf{M}'_H\boldsymbol{\phi}_4) \|_2 \quad (11)$$

式中: \mathbf{M} 是 $m(t)$ 的矩阵表示; \mathbf{M}' 是 $m'(t)$ 的矩阵表示; \mathbf{M}_H 是 $m_H(t)$ 的矩阵表示; \mathbf{M}'_H 是 $m'_H(t)$ 的矩阵表示。应用最小二乘原理求解式(11), 令其偏导数等于零, 可得如下线性方程组^[8]

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{M} & \mathbf{M}^T \mathbf{M}' & \mathbf{M}^T \mathbf{M}_H & \mathbf{M}^T \mathbf{M}'_H \\ \mathbf{M}'^T \mathbf{M} & \mathbf{M}'^T \mathbf{M}' & \mathbf{M}'^T \mathbf{M}_H & \mathbf{M}'^T \mathbf{M}'_H \\ \mathbf{M}_H^T \mathbf{M} & \mathbf{M}_H^T \mathbf{M}' & \mathbf{M}_H^T \mathbf{M}_H & \mathbf{M}_H^T \mathbf{M}'_H \\ \mathbf{M}'_H^T \mathbf{M} & \mathbf{M}'_H^T \mathbf{M}' & \mathbf{M}'_H^T \mathbf{M}_H & \mathbf{M}'_H^T \mathbf{M}'_H \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \boldsymbol{\phi}_1 \\ \boldsymbol{\phi}_2 \\ \boldsymbol{\phi}_3 \\ \boldsymbol{\phi}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{M}^T \mathbf{S} \\ \mathbf{M}'^T \mathbf{S} \\ \mathbf{M}_H^T \mathbf{S} \\ \mathbf{M}'_H^T \mathbf{S} \end{bmatrix} \quad (12)$$

解方程组(12)即可求出滤波算子 ϕ_1 , ϕ_2 , ϕ_3 和 ϕ_4 。继而将滤波算子应用于监测数据, 实现基础数据与监测数据的一致性校正。

该方法首先将两期数据的振幅、时间、相位差异考虑在内, 将数据表示为时间、振幅、相位和频率的表达式, 通过公式推导获取用四道数据精确表示的模型道表达式, 再将其转化为最小二乘问题进行匹配因子的求取, 进而实现两期数据的一致性匹配。该方法同时对时间、振幅、相位和频率进行约束, 相

比传统最小二乘匹配滤波中单纯的能量误差最小约束,可以提高两期数据时间、振幅、相位和频率一致性校正的精度。

3 模型试算及实际资料处理

3.1 模型试算

油气藏的动态变化可归结为地下油气藏构造的密度和速度发生了变化,从而产生了时移地震响应。而时移地震数据处理的目的是通过两期数据处理最终实现油气藏的动态监测。下面通过设计不同的速度模型(图 1)模拟两期采集过程中油气藏的动态变化,选取不同的子波、频率、振幅、时延褶积合成具有相位、频率、振幅和时间差异的模型记录(图 2)。选取的正演参数分别是主频为 25Hz 的雷克子波和 35Hz 的俞氏子波,振幅比为 1 : 0.8,并设置了不同的时间延迟。图 1a、图 1b 分别为基础数据速度模型和监测数据速度模型,用背斜顶部速度模型的速度差异简单描述油气藏开采以后形成的油气藏顶部的储层动态变化,其差异剖面如图 1c 所示。图 2a、图 2b 则分别为对图 1a、图 1b 速度模型进行褶积合成的地震记录,两者的直接差异剖面如图 2c 所示。

由图 2a~图 2c 可知,由于模型选取参数不同,合成地震记录的直接差剖面无法反映出油气藏的动态变化。若要消除基础数据与监测数据在时间、振幅、频率和相位上的非一致性,必须采用互均化技术对其进行校正,这样才能通过差异数据体实现油气

藏的动态监测。为了验证伪多道匹配方法在两期数据互均化中的效果,对图 2 中合成的褶积模型同时进行伪多道匹配和传统的最小二乘匹配处理,用两种方法匹配后的数据与基础数据的差剖面验证本文方法的可行性。由图 2d、图 2e 可以看出,传统最小二乘匹配算法得到的结果可以部分消除非油藏部分的静态差异,动态差异也得到了进一步的突显,但是非油藏部分的静态差异残留能量太强,对油气藏动态监测极为不利。而伪多道匹配方法得到的结果中非油藏部分的静态差异得到了有效的消除,油气藏的动态变化得到了明显的刻画。图 2f、图 2g 中进一步对监测数据中的单道数据匹配前、后与基础数据中的对应道进行了对比。从图 2f 单道记录的波形可看出两期数据存在明显的时间、振幅、频率和相位差异。而对监测数据进行伪多道匹配后得到的单道结果与基础数据相比,在非油藏区域波形的时间、振幅、频率和相位差异都得到了有效的校正,油气藏顶、底界面的差异突出了由于油气藏开发引起的油气藏动态变化(图 2g 中椭圆内)。

值得注意的是,在对含油气藏区域进行一致性匹配时,时窗的选择尤为关键,为了尽可能地保留油气藏的动态特征,在匹配过程中时窗选取应避免油气藏,可在油气藏邻近区域选取一个合适的时窗求取匹配因子。文中选择邻近油气藏的一矩形区域作为参考时窗,求取该时窗内数据对应的匹配因子,并将该匹配因子用于油气藏区域的数据匹配中,在匹配过程中避免消除非油气藏区域静态特征,保留油气藏的动态变化。

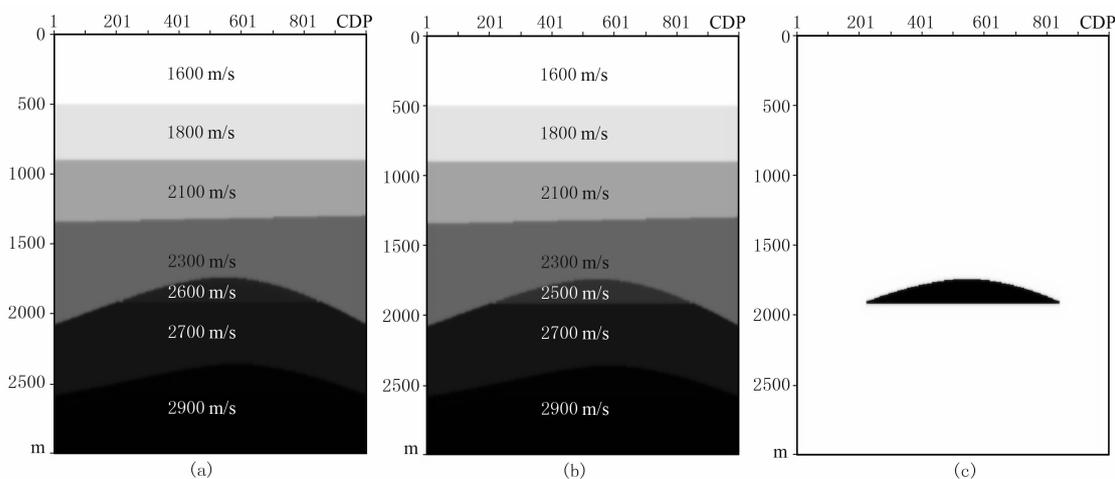


图 1 速度模型

(a) 基础数据; (b) 监测数据; (c) 基础模型与监测模型速度差异剖面

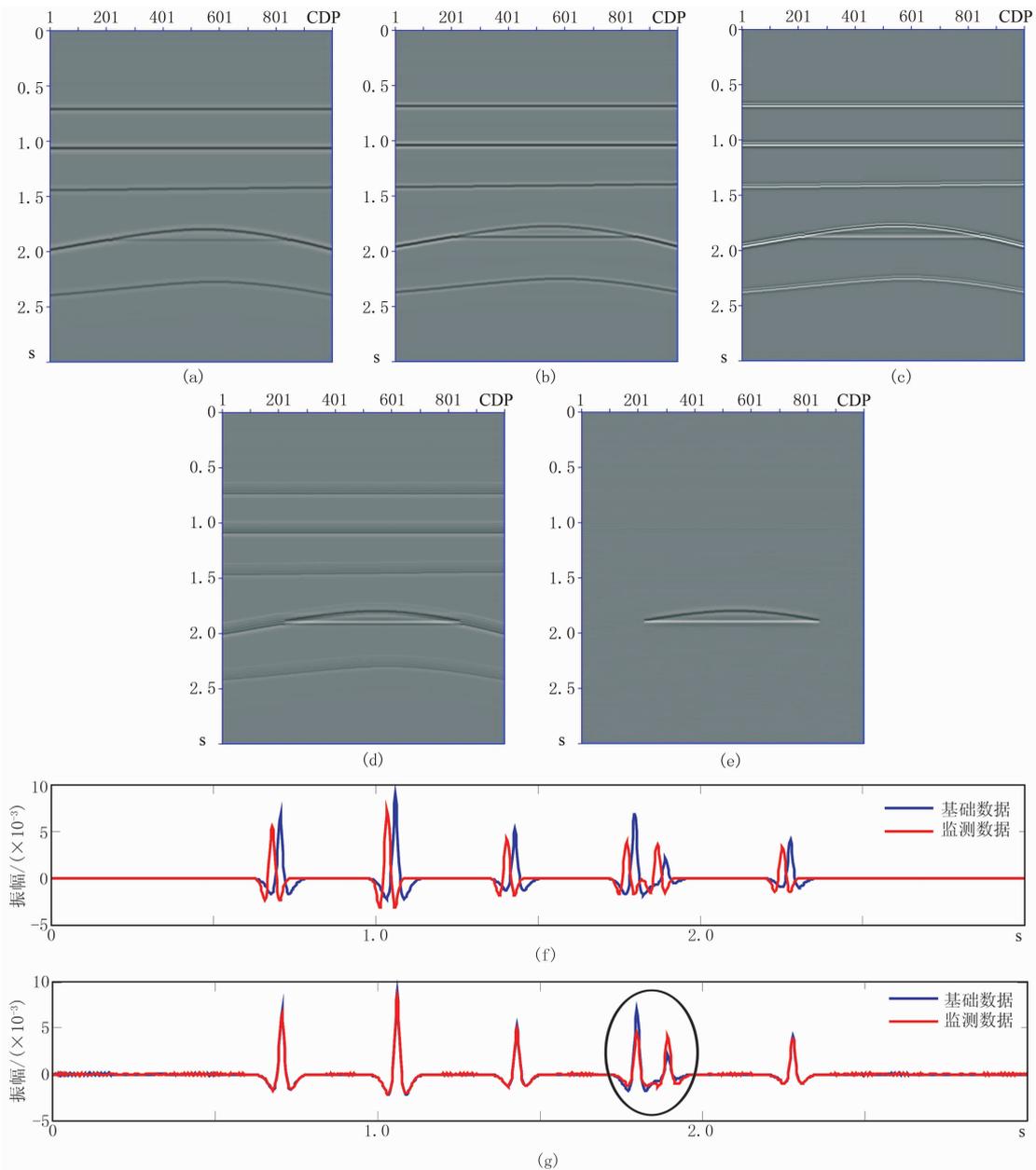


图2 图1速度模型合成两期数据互均化结果

(a)基础数据合成记录;(b)监测数据合成记录;(c)基础数据与监测数据直接差剖面;(d)监测数据传统匹配滤波后与基础数据差值剖面;(e)监测数据伪多道匹配滤波后与基础数据差值剖面;(f)第501道基础数据与监测数据波形对比结果;(g)第501道基础数据与伪多道匹配后的监测数据波形对比结果

3.2 实际资料处理

图3为不同时间采集的两期数据叠前时间偏移互均化剖面。从图中可看出两期数据存在明显的差异,其中方框内约1s处为油藏分布区(图3a、图3b)。为了有效保留油藏的动态特征,在CDP1~CDP40范围内选取参考时窗,求取匹配因子,并将其用于油藏区域的数据匹配中。

由图3c、图3d可以看出,采用匹配滤波后两期数据的一致性都得到了较好的改善,伪多道匹配后

得到的监测数据与基础数据更为相近(图3d)。图4a为图3a、图3b两期数据直接相减的结果,从图中可以看出,由于采集时间及采集参数不同等因素的影响,如对两期数据直接相减会造成油藏的动态特征被完全掩盖,无法实现储层的动态监测,因而对两期数据进行一致性校正具有非常重要的意义。由图4c可以看出,伪多道匹配处理后两期数据的差值剖面的非储层地震响应特征得到了很好的校正,非一致性得到了更为有效的消除(图4c方框内),而在

储层区域的动态差异则得到了有效的保留。因此,伪多道匹配的时移地震互均化处理可以有效消除非储层地震响应的非一致性,很好地实现两期数

据时差、振幅、相位、频率的一致性校正,有效保存储层的动态差异,实际资料处理结果进一步验证了本文方法的有效性。

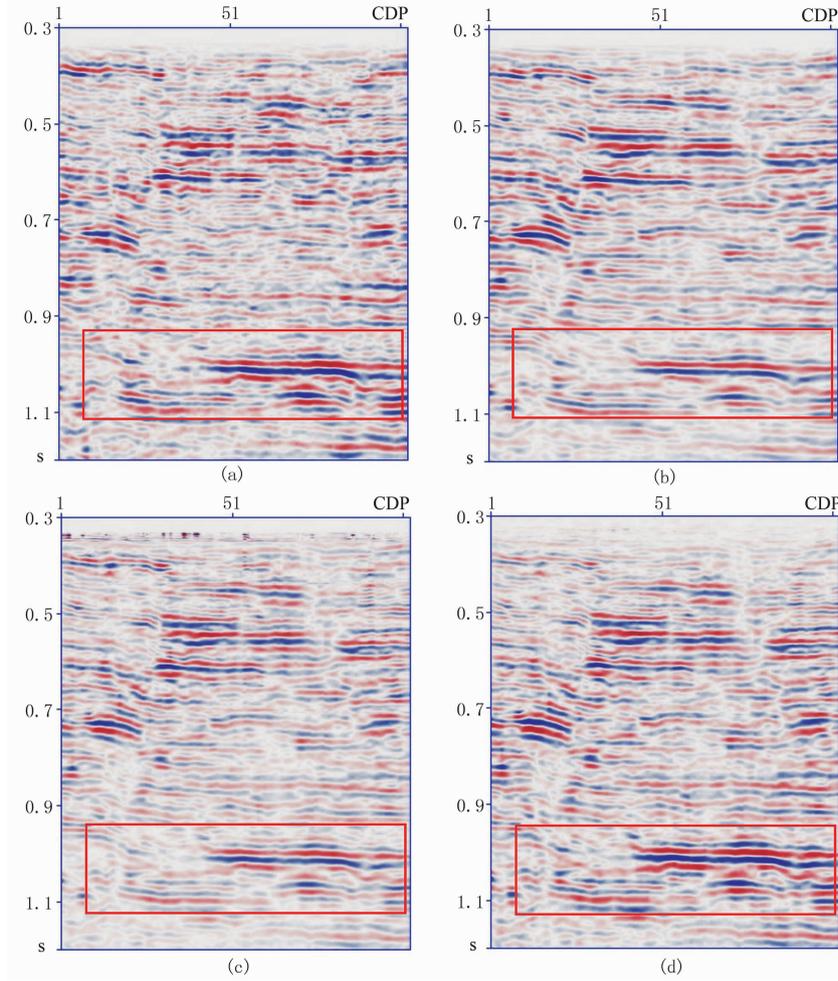


图 3 实际资料两期数据叠前时间偏移互均化剖面

(a)基础资料叠前时间偏移;(b)监测资料叠前时间偏移;(c)监测数据传统最小二乘匹配滤波;(d)监测数据伪多道匹配滤波

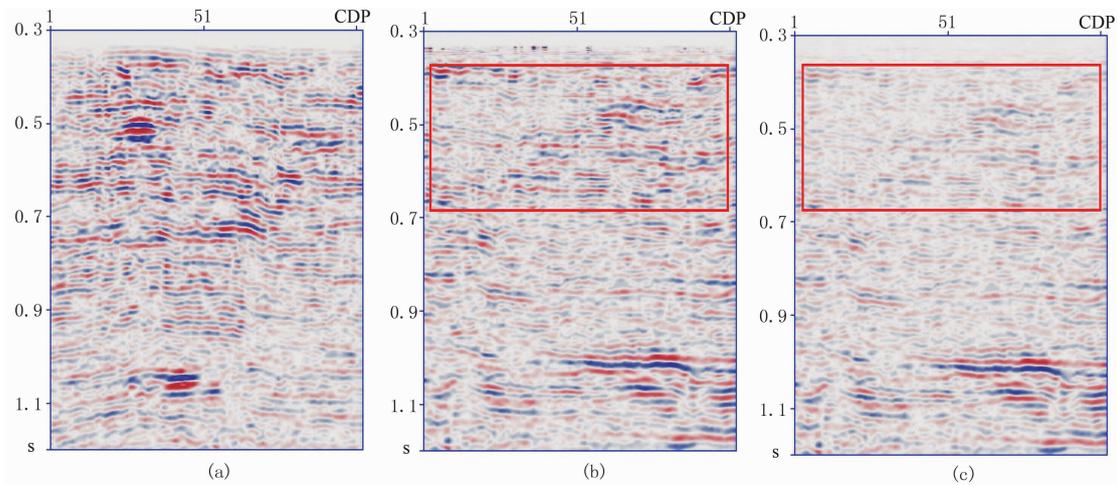


图 4 实际资料两期数据互均化前、后差值剖面

(a)两期资料直接差值剖面;(b)传统最小二乘匹配滤波后差值剖面;(c)伪多道匹配滤波后差值剖面

4 结束语

时移地震中互均化技术在对两期数据时间、振幅、相位、频率的一致性校正中起着至关重要的作用。为了实现两期数据的一致性校正,文中将伪多道匹配算法引入到时移地震数据处理中进行两期数据的互均化。由于伪多道匹配理论推导中将数据的时间、振幅、相位差异考虑在内,对时间、相位、振幅和频率同时约束,与传统的最小二乘匹配滤波算法相比可以获得更高的数据匹配精度,将其用于时移地震两期数据的一致性匹配中,可以有效消除非储层区地震响应的静态特征,保留储层区的动态差异。文中通过模型试算及实际资料处理验证了这一结论,与传统最小二乘匹配滤波方法的结果对比,进一步验证了该方法在时移地震互均化处理中的优势,该方法可以更好地突出油藏的动态变化,更有利于后续的油藏动态监测。需要注意的是,由于本文方法是针对叠后数据进行互均化处理,为了有效保留油气藏的动态信息,需保证两期数据前期预处理的一致性,同时从另一角度也可以考虑将该技术直接用于叠前互均化处理中。

感谢 SWPI 课题组的老师和同学对本文提供的帮助;感谢胜利油田物探研究院提供的数据支持。

参考文献

- [1] Ross C P, Cunningham G B, Weber D P. Inside the cross-equalization black box. *The Leading Edge*, 1996, 15(11):1233-1244.
- [2] Rickett J, Lumley D. A cross-equalization processing flow for off-the-shelf 4D seismic data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 1998, 17:16-19.
- [3] 邓怀群,刘雯林,杨春梅等. 时间推移地震勘探中的互均化技术. *石油天然气工业*, 2000, 20(1):20-23. Deng Huaiqun, Liu Wenlin, Yang Chunmei et al. Cross-equalization in the time lapse seismic exploration.

- tion. *Natural Gas Industry*, 2000, 20(1):20-23.
- [4] 甘利灯,姚逢昌,邹才能等. 水驱四维地震技术——叠后互均化处理. *勘探地球物理进展*, 2003, 26(1):54-60. Gan Lideng, Yao Fengchang, Zou Caineng et al. 4-D seismic in water flooding reservoirs: Post-stack cross equalization processing. *Progress in Exploration Geophysics*, 2003, 26(1):54-60.
- [5] 郭念民,吴国忱,尚新民等. 互均化方法在非重复时移地震数据处理中的应用. *石油物探*, 2011, 50(6):600-605. Guo Nianmin, Wu Guocheng, Shang Xinmin et al. Application of cross-equalization method in non-repeated time-lapse seismic data processing. *GPP*, 2011, 50(6):600-605.
- [6] 金龙,陈小宏,李景叶等. 基于误差准则和循环迭代的时移地震匹配滤波方法. *地球物理学报*, 2005, 48(3):698-703. Jin Long, Chen Xiaohong, Li Jingye et al. A new method for time lapse seismic matching filter based on error criteria and cyclic iteration. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(3):698-703.
- [7] 金龙,陈小宏,刘其成等. 基于奇异值分解的时移地震互均化方法. *地球物理学进展*, 2005, 20(2):294-297. Jin Long, Chen Xiaohong, Liu Qicheng et al. New method for time-lapse seismic matching based on SVD. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(2):294-297.
- [8] 郭恺. 叠前动力学特征保真处理方法研究[学位论文]. 山东青岛:中国石油大学(华东),2012. Guo Kai. The method of prestack dynamic characters preserved-fidelity processing[D]. China University of Petroleum(Huadong), Shandong Qingdao, 2012.

(本文编辑:金文昱)

作者简介



李志娜 博士,1986年生;2009年本科毕业于中国石油大学(华东)勘查技术与工程专业;2012年获中国石油大学(华东)地球探测与信息技术专业硕士学位;2015年获中国石油大学(华东)地质资源与地质工程专业博士学位;现为中国石油大学(华东)地学院师资博士后,主要从事地震数据处理方法研究工作。