

蒋雪珍, 芦俊, 王赞. 2017. 基于动态图像变形的 PP 与 PS 波层位直接匹配. 地球物理学报, 60(3):1106-1117, doi:10.6038/cjg20170322.

Jiang X Z, Lu J, Wang Y. 2017. PP- and PS-waves matching directly based on dynamic image warping. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 60(3):1106-1117, doi:10.6038/cjg20170322.

基于动态图像变形的 PP 与 PS 波层位直接匹配

蒋雪珍^{1,2}, 芦俊^{3*}, 王赞^{1,4}

1 中国科学院地球化学研究所, 矿床地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081

2 中国科学院大学, 北京 101407

3 中国地质大学(北京), 海相储层演化与油气富集机理教育部重点实验室, 北京 100083

4 中国地质大学(北京), 地质过程与矿产资源国家重点实验室, 北京 100083

摘要 多分量地震资料的矢量偏移、多波地震资料的联合解释与反演均需要估算纵横波的速度比, 实现纵波与转换横波在时间或深度域的匹配. 基于 DTW, 本文实现了一种适用于 PP 与 PS 波直接匹配的动态图像变形算法. 该算法分为三个部分: 首先, 使用二阶对称动态规划算法逐样点递归计算 PP 与 PS 波走时或深度的误差累积和; 其次, 在以误差累积和为目标函数的回溯阶段设定变形窗, 并在纵横波速比约束的变形窗内递归回溯搜索匹配路径; 最后, 根据最大相关系数判定准则在匹配路径中确定最佳匹配路径, 获得使 PP 与 PS 波匹配的拉伸或压缩时移量. 利用所获得的拉伸压缩时移量计算纵横波速度比就可以实现 PP 与 PS 波之间的匹配. 模型与实际陆上多分量地震资料测试结果表明: 该方法具有较高的匹配精度, 且对于信噪比、相似度较低的多分量地震资料, 该方法也能产生较好的匹配效果.

关键词 多分量地震; 动态图像变形; 纵横波速比; 匹配; 最大相关系数判定准则

doi:10.6038/cjg20170322

中图分类号 P631

收稿日期 2016-06-21, 2016-11-25 收修定稿

PP- and PS-waves matching directly based on dynamic image warping

JIANG Xue-Zhen^{1,2}, LU Jun^{3*}, WANG Yun^{1,4}

1 Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, State Key Laboratory of Ore Deposit Geochemistry, Guiyang 550081, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101407, China

3 China University of Geosciences, Key Laboratory of Marine Reservoir Evolution and Hydrocarbon Accumulation Mechanism, Ministry of Education, Beijing 100083, China

4 China University of Geosciences, State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, Beijing 100083, China

Abstract P- to S-wave velocity ratio estimation as well as PP- and PS-waves matching in time or depth domain are the basic procedures for the imaging, inversion, and interpretation of multi-component seismic data. Based on Dynamic Time Warping (DTW), we propose a three-step dynamic image warping algorithm which can be used to match PS- to PP-waves directly in time or depth domain of post-stack sections. With the second order symmetrical dynamic programming

基金项目 中央高校基本科研业务费专项资金(52013093), 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2013AA064201)和国家自然科学基金项目(41574126, 41425017)资助.

第一作者简介 蒋雪珍, 女, 1990 年生, 中国科学院地球化学研究所在读硕士研究生, 研究方向为多分量偏移速度建模.

E-mail: jiangxuezheng@mail.gyig.ac.cn

* **通讯作者** 芦俊, 男, 副教授, 主要从事多分量地震技术的研究. E-mail: lujun615@163.com

method, we first compute the total alignment errors of the double-way travel time or one-way depth for PP- and PS-waves. The warping window on total alignment errors is calculated with the maximum and minimum of the P- to S-wave velocity ratio to constrain the searching zone. We then search the optimal path within the warping window by using the recursive backtracking method. A maximum correlation coefficient criterion is applied to determine the best warping path. We finally calculate time- or depth-shifts between PP- and PS- images and match PS to PP post-stack section with the best shifts or the P- to S-wave velocity ratio calculated from the shifts. Our method is tested by using synthetic and field data from Xin Chang oil field. The results show that our method is effective and accurate in matching the PP- and PS- events, and could be further applied to the seismic data with low signal-to-noise ratio or weak similarity in different components.

Keywords Multi-component seismic data; Dynamic time warping; P- to S-wave velocity ratio; Matching; Maximum correlation coefficient

1 引言

纵波与转换横波时间或深度域层位匹配是进行多波地震资料联合解释与反演的基础,层位匹配过程中估算的纵横波速度比也是多分量地震偏移成像中的关键参数(胡晓亚和王赟,2015)。以往,纵波和转换横波匹配一般采用人工拾取法以及测井标定法。Gaiser(1996)提出了利用最大相关法求取纵横波速比、平均纵横波速比以及层间纵横波速比。王赟等(2009)推导了用多波走时参数求取速度比的系列公式。Van Dok 和 Gaiser(2001)利用最大相似性原理,扫描 PP 与 PS 波的速度比谱,拾取平均速度比值,完成 PS 与 PP 波在时间域的匹配。Fomel 和 Backus (2003)采用最小二乘和多次迭代的方法来实现 PP 与 PS 波时间域自动匹配。Yuan 等(2008)以最大相似性为迭代收敛准则,采用模拟退火算法实现 PP 与 PS 波在时间域上的匹配。Zhang 和 Wang(2010)采用纵横波速度比最优化估计和子波存储的校准 workflow 来减小匹配后的子波畸变程度。Chen 等(2014)通过时间匹配 workflow 来提高多分量地震数据同相轴定位精度以及联合解释反演技术。Pan 等(2016)基于线性平滑模型以及 Born 公式对 HTI 介质采用 PP 与 PS AVAZ (azimuthal amplitude variation with offset)数据联合反演技术来估算裂缝特性。Lu 等(2015, 2016)利用测井合成记录的标定实现了 PP 与 PS 波的匹配,并将 PS 波的 AVO 道集压缩至 PP 波时间,用于后续的多波联合反演与解释。

在多分量地震数据的偏移处理过程中,为方便

PP 与 PS 波的联合解释与反演,经常需要用到层位匹配技术使得 PP 与 PS 波具有相同的走时时间刻度。Hale(2013)在 DTW 算法的基础上提出基于图像的动态变形技术 DIW(Dynamic Image Warping, 动态图像变形)实现 PP 与 PS 波的匹配,但在层位匹配过程中,由于 PP 与 PS 波子波和频谱特征的差异使得振幅与相位在匹配中产生畸变。Graziano 和 Hale(2014)提出层位匹配前的 PS 波子波反褶积方法来消除层位匹配过程中的子波畸变并估算 PS 子波。Yang 等(2014)提出基于 P 波速度的 S 波速度反演图像定位方法,该方法是在 PS 深度偏移成像过程中基于 DIW 技术将 PS 定位到 PP 图像中从而实现 PP 与 PS 波的匹配。

DIW 算法是 DTW 在多维数据上的应用。Hale (2013)使用树序列动态规划(tree-sequential dynamic programming, TSDP)方法对 2D 剖面垂向方向上的时间序列和横向方向上的道序列分别应用 DTW 算法获得时移量。该方法首先通过一个常数纵横波速度比将 PS 波的走时压缩到 PP 波时间上,再采用先垂向方向上的 DIW 后水平方向上的 DIW 方法,实现 PP 时间尺度上的 PS 与 PP 波的匹配。Compton 和 Hale(2013)对此作了进一步改进,对 3D PP 数据进行强反射粗采样,使用平滑动态图像变形(Smooth dynamic image warping, SDIW)算法估算时移量,然后将估算的时移量插值平滑,计算得到纵横波速比。本文引入 Hale 和 Compton 提出的 DIW、SDIW 算法思想,基于二阶 DTW 算法,采用垂向纵横波速比约束的变形窗与水平斜率约束,并基于最大相关系数判定准则直接将 PS 与 PP 波匹配,估算纵横波速比。

2 方法原理

2.1 动态时间变形算法

DTW(Lin et al., 2010)算法普遍应用于时间序列匹配. 该算法以动态规划(Dynamic programming, DP)的思想为依据,最初用于解决语音识别中发音长短不一的模板匹配问题. Muñoz 和 Hale(2013)首次将这一算法引用到测井与地震联合处理技术领域,实现了测井数据与合成地震数据的自动匹配.

当 P 波从地表入射,经过阻抗差界面反射后,部分能量继续以 P 波形式被地表检波器接收,部分能量转换为 S 波被地表检波器接收. 假定叠后 PP 与 PS 波记录中的某一道地震记录的振幅分别为 $I(t_{PP}), I(t_{PS})$, 如图 1a 所示,图 1a 为接收到两个阻抗差界面反射信号的 PP 与 PS 波记录图,图 1b 为 1a 中 PS 波的频谱图,从图 1b 中可看出, PS 波的主频约为 30 Hz. 设对于同一反射界面的 PP 与 PS 波,二者双程走时存在一个时间间隔 $\tau(t_{PP})$, 则有

$$\tau(t_{PP}) = t'_{PP} - t'_{PS}, \quad (1)$$

其中 t'_{PS}, t'_{PP} 为经过某一阻抗差界面反射到地面的双程走时, $\tau(t_{PP})$ 为二者的时间间隔,单位 s. 图 1a 中,

地面接收到两个阻抗差界面反射的 PP 与 PS 波的时间间隔分别为 $\tau_1(t_{PP})$ 和 $\tau_2(t_{PP})$.

由于地震反射能量的差异或不同的处理过程,叠后 PP 与 PS 波存在反射振幅动态范围的差异,因此,首先需要分别对 PP 与 PS 波做整体归一化处理,设由 $I(t_{PP}), I(t_{PS})$ 归一化后的振幅分别为 $I_n(t_{PP}), I_n(t_{PS})$, 则归一化后 PP 与 PS 波在时间剖面上的匹配可表示为

$$I_n(t_{PP}) \approx \omega I_n(t_{PS} + \tau(t_{PP})), \quad (2)$$

其中, ω 为加权系数,无量纲; $\tau(t_{PP}) \leq 0$, 且 $\tau(t_{PP})$ 是未知的.

PP 与 PS 波匹配的目的是估算 $\tau(t_{PP})$, 并求取相对于 $t=0$ 时刻的平均纵横波速度比,实现叠后 PP 与 PS 波的匹配.

对图 1a 中的 PP 与 PS 波归一化处理,逐样点计算对齐误差,设对齐误差

$$E(t_{PP}, t_{PS}) = [I_n(t_{PP}) - \omega I_n(t_{PS})]^2. \quad (3)$$

计算的结果如图 2a 所示,此图表示 PP 波中的每一采样点与 PS 波所有采样点的对齐误差. 图 2a 中 PP 与 PS 两个反射信号对应处存在 4 个交叉点, PP 约 200 ms 处与 PS 约 230 ms 处反射信号对应的交叉点,以及 PP 约 420 ms 与 PS 约 580 ms 的反射

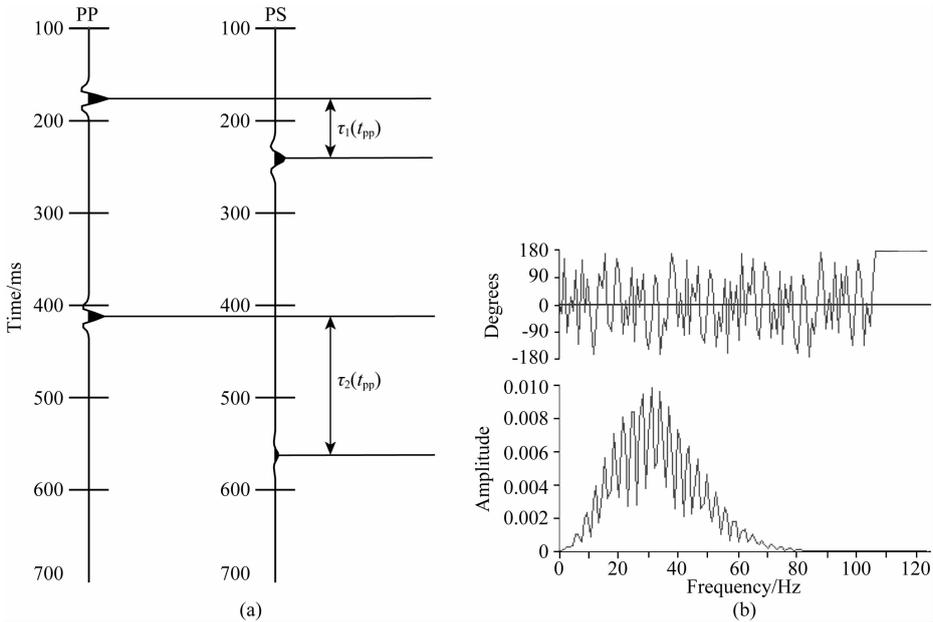


图 1 叠后 PP 与 PS 记录中提取的某道数据图

(a) 左边为 PP 波,右边为 PS 波, $\tau_1(t_{PP}), \tau_2(t_{PP})$ 分别为地表接收到同一阻抗差界面反射的 PP 与 PS 波的双程走时时间间隔. (b) 为 PS 波的相位谱(上)与振幅谱(下).

Fig. 1 One trace of post-stack PP and PS record

(a) The left is extracted from post-stack PP record, the right corresponding to the left is extracted from post-stack PS record, $\tau_1(t_{PP}), \tau_2(t_{PP})$ are differences between PP and PS double-way travel time reflected from the same interface; (b) The phase spectrum (the up) and amplitude spectrum (the down) of PS.

对应交叉点即为所选数据的两个界面对应的反射 PP 与 PS 波双程走时。

采用二阶 DTW 算法估算 $\tau(t_{PP})$ 。DTW 算法分为三步:第一步,对公式(3)计算结果采用二阶对称 DP 算法递归计算累积误差和;第二步,利用纵横波速比计算变形窗,并以此作为约束条件;第三步,采用回溯法在变形窗内的累积误差和基于最大相关系数判定准则搜索最佳匹配路径,从而估算出最佳的

$\tau(t_{PP})$ 。

2.1.1 动态规划算法

Herrera 和 van der Baan(2014)在 DP 过程中采用公式(4)所示的一阶对称递归求和函数,该方法在回溯搜索最优路径时求取的时移量可能会出现剧烈变化的情况。本文采用公式(5)所示的二阶对称递归求和函数(Geppener et al., 2007),降低了时移量变化的剧烈程度。

$$D(t'_{PP}, t'_{PS}) = E(t'_{PP}, t'_{PS}) + \min\{D(t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS}), D(t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS}), D(t'_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS})\}, \quad (4)$$

$$D(t'_{PP}, t'_{PS}) = E(t'_{PP}, t'_{PS}) + \min\begin{cases} D(t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS} - 2\delta_{PS}) + E(t'_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS}), \\ D(t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS}), \\ D(t'_{PP} - 2\delta_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS}) + E(t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS}), \end{cases} \quad (5)$$

其中, $D(t_{PP}, t_{PS})$ 为递归函数; δ_{PP} 、 δ_{PS} 分别为 PP 与 PS 波时间域的时间采样率, $0 \leq t_{PP} \leq M\delta_{PP}$, $0 \leq t_{PS} \leq N\delta_{PS}$, M 、 N 分别为 PP、PS 波时间域的时间粗采样点数。 $D(t'_{PP}, t'_{PS})$ 为 $(t_{PP} = t'_{PP}, t_{PS} = t'_{PS})$ 时的累积误差和, $E(t'_{PP}, t'_{PS})$ 为 $(t_{PP} = t'_{PP}, t_{PS} = t'_{PS})$ 时的对齐误差;公式(5)从 $(t_{PP} = 0, t_{PS} = 0)$ 逐样点递归计算直到 $(t_{PP} = M\delta_{PP}, t_{PS} = N\delta_{PS})$, 计算出所有时间采样点的误差累积和记为 $\mathbf{D}(t_{PP}, t_{PS})$, 累积误差和越大, 说明两道数据相似性越低, 匹配程度越低。图 1 中的 PP 与 PS 波记录, 依据公式(5)计算出的 $\mathbf{D}(t_{PP}, t_{PS})$ 如图 2b 所示。在 PP 与 PS 两个反射层处分别对应区域值非常小, 接近于 0, 偏离这一区域则数值变大。

2.1.2 变形窗约束条件

根据公式(5), 最佳匹配路径搜索的时间复杂度为 $O(MN)$ 。由于复杂度较高, 且可能搜索到无效的匹配路径, 定义变形窗为误差累积和内允许匹配路

径访问的元素的集合。一般采用约束条件(即变形窗)对匹配路径允许访问的范围进行约束。常用两种变形窗为 Sakoe-Chiba Band 变形窗(Sakoe and Chiba, 1978)和 Itakura Parallelogram 变形窗(Rabiner and Juang, 1993)。Sakoe-Chiba Band 变形窗可表示为 $t_{PP} - r \leq t_{PS} \leq t_{PP} + r$, 其中 r 为一常数。图 3a 为 Sakoe-Chiba Band 变形窗约束下的误差累积和图, 变形窗为沿对角线方向的带形, 变形窗外的误差累积和设置为零; Itakura Parallelogram 变形窗可表示为 $t_{PP} - r(t_{PP}) \leq t_{PS} \leq t_{PP} + r(t_{PP})$, 其中 $r(t_{PP})$ 为 t_{PP} 的函数。图 3b 为 Itakura Parallelogram 变形窗约束下的误差累积和图, 变形窗为沿对角线方向的平行四边形, 变形窗外的误差累积和设置为零。在 Sakoe-Chiba Band 或 Itakura Parallelogram 变形窗的约束下, 匹配路径将从 $(t_{PP} = M\delta_{PP}, t_{PS} = N\delta_{PS})$ 为起始点递归回溯搜索直至 $(t_{PP} = 0, t_{PS} = 0)$ 。而根

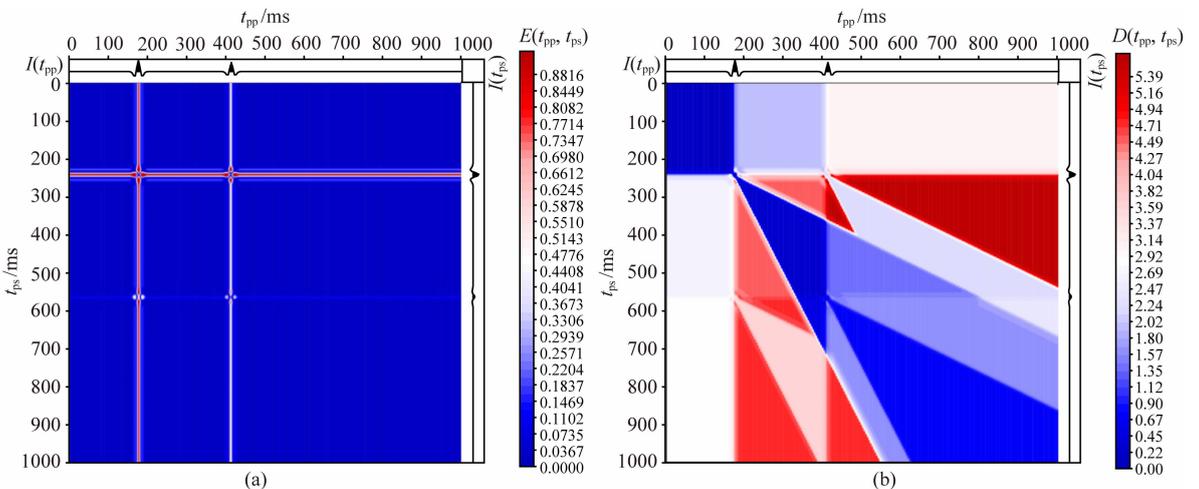


图 2 (a) 归一化后 PP 与 PS 波的对齐误差; (b) 由公式(5)计算的二阶累积误差和图

Fig. 2 (a) The alignment errors for normalized PP- and PS-waves; (b) The total alignment errors calculated by equation (5)

据纵横波速度比关系 (李庆忠, 1992; 王赟等, 2014), Sakoe-Chiba Band 或 Itakura Parallelogram 变形窗在一定程度上提高了计算效率, 但增加了大量的病态的访问元素 (Keogh and Ratanamahatana, 2005), 同时去除了有效的访问元素. 图 3a 和图 3b 中, 变形窗内红色区域内的可访问元素皆为病态的无效访问元素.

针对上述问题, 根据纵横波速度比关系设定适用于多分量地震资料匹配的变形窗:

$$\left(\frac{1+\gamma_{\min}}{2}\right)t_{PP} \leq t_{PS} \leq \left(\frac{1+\gamma_{\max}}{2}\right)t_{PP}, \quad (6)$$

其中 $\gamma_{\min}, \gamma_{\max}$ 分别为最小和最大纵横波速度比,

t_{PP}, t_{PS} 分别为 PP 与 PS 波的双程走时向量. 对图 1a 中的 PP 与 PS 波设定最小、最大纵横波速度比分别为 1.414 和 2.5, 计算的变形窗如图 3c 所示. 从图 3c 中可看出, PP 与 PS 波的两个反射信号对应的时间上的误差累积和均在变形窗内, 这一时间区域内的误差累积和即为匹配路径所要访问的有效元素.

当采用变形窗约束递归搜索最佳匹配路径时, 由公式 (6) 联合 (1) 式得到

$$\frac{(\gamma_{\min}-1)}{2}t_{PP} \leq \tau(t_{PP}) \leq \frac{(\gamma_{\max}-1)}{2}t_{PP}, \quad (7)$$

公式 (7) 表明了估算出的时移量的范围. 超出这一范围即为无效的时移量.

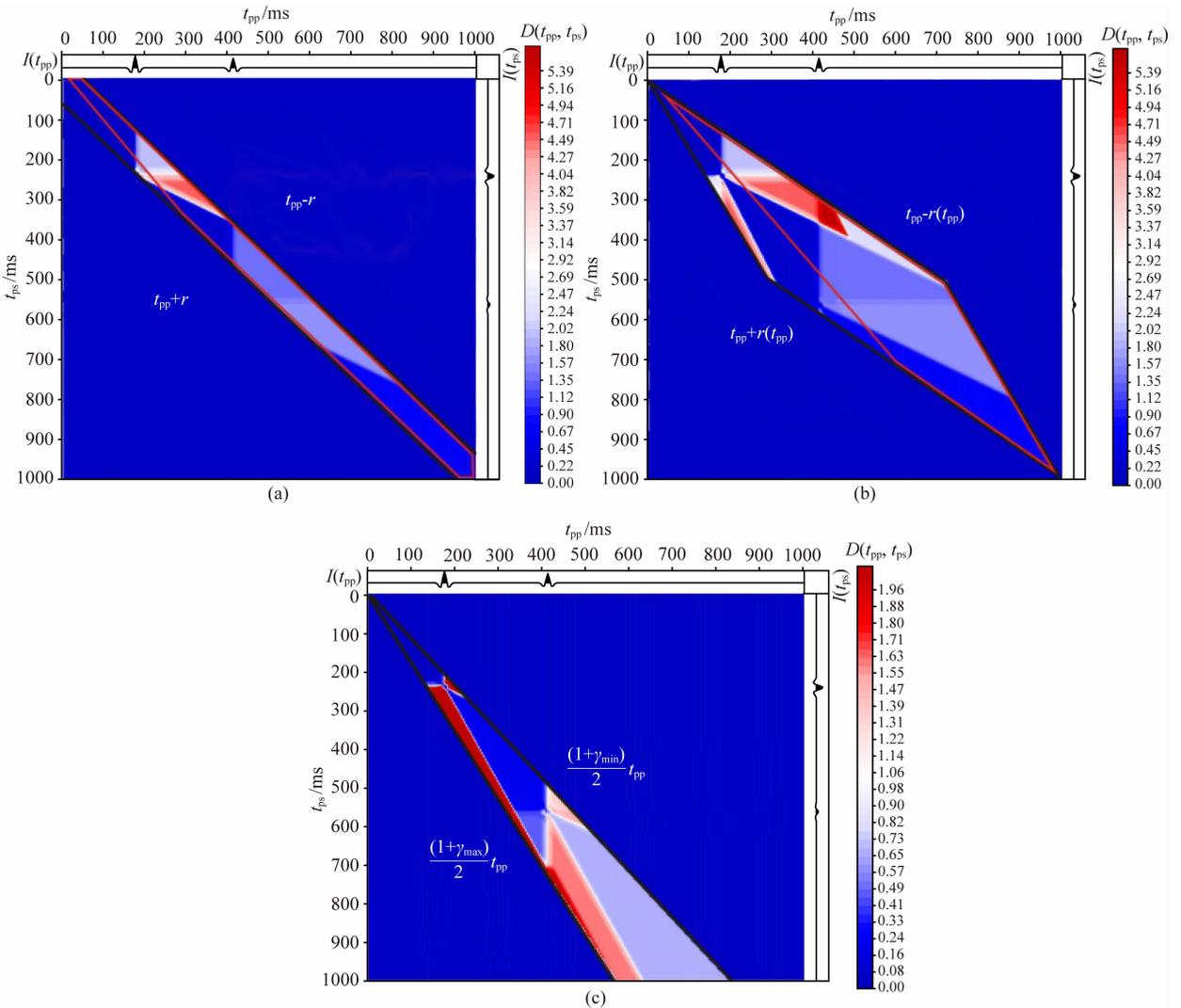


图 3 (a) Sakoe-Chiba Band 变形窗以及变形窗内的误差累积和图; (b) Itakura Parallelogram 变形窗以及变形窗内的误差累积和图; (c) 本文中采用的变形窗图, 计算变形窗所设定的纵横波速度比的范围为 [1.414, 2.5]. 其中黑线为变形窗边界, 红线为病态访问元素区域边界

Fig. 3 (a) Sakoe-Chiba Band warping window and the total alignment errors; (b) Itakura Parallelogram warping window and the total alignment errors; (c) Warping window calculate by our method, the total alignment errors extracted from Fig. 2b with P to S wave velocity ratio limits from 1.414 to 2.5. black line stands for the boundary of warping window; red line stands for the boundary of pathological element zone

2.1.3 基于最大相关系数判定准则的回溯法

DTW 算法的第三步是在满足连续性、唯一性以及变形窗约束三个条件下,采用回溯法在累积误差和 $D(t_{PP}, t_{PS})$ 上递归回溯搜索匹配路径,并基于最大相关系数判定准则确定最佳匹配路径。

设回溯路径为 $W = \{\omega_0, \omega_1, \dots, \omega_k\}$, 回溯搜索匹配路径是采用 DP 法求取误差累积和的逆计算,因此,回溯搜索的起始位置为

$$\omega_k = [t'_{PP} = m \cdot \delta_{PP}, t'_{PS} = (N - 1) \cdot \delta_{PS}], \quad (8)$$

当 $t_{PS} = (N - 1) \cdot \delta_{PS}$ 时,变形窗在该时刻的大小为

$$S = 2 \frac{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}{(1 + \gamma_{\max})(1 + \gamma_{\min})} t_{PS}, \quad (9)$$

且有

$$\frac{2(N - 1)\delta_{PS}}{(1 + \gamma_{\max})\delta_{PP}} + \alpha_1 S \leq m \leq \frac{2(N - 1)\delta_{PS}}{(1 + \gamma_{\min})\delta_{PP}} + \alpha_2 S. \quad (10)$$

(10)式中 $\alpha_1 = \frac{1}{8}, \alpha_2 = -\frac{1}{8}$. 对变形窗内误差累积和以 ω_k 为匹配路径起始点遍历回溯搜索,向后回溯搜索一步 $\omega_{k-1} = [t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS}]$ 或是两步 $\omega_{k-1} = [t'_{PP}, t'_{PS} - 2\delta_{PS}]$, $\omega_{k-2} = [t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS} - 2\delta_{PS}]$ 或 $\omega_{k-1} = [t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS}]$, $\omega_{k-2} = [t'_{PP} - 2\delta_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS}]$, 直至 $\omega_0 = [0, 0]$.

在递归回溯搜索过程中,每递归回溯一步,选择误差累积和最小的元素为该匹配路径访问的下一路径. 当存在多条选择路径时,若遍历所有的有可能的路径,则耗时较长,这不仅增加了算法的时间和空间复杂度(Goodrich and Tamassia, 2006),还提高了对计算机硬件方面的要求. 由于非对角线路径使得在匹配过程中增加振幅与相位畸变的程度,因此,为解决上述问题,本文采用对角线优先法,即存在多条选择路径时,优先选择 $\omega_{k-1} = [t'_{PP} - \delta_{PP}, t'_{PS} - \delta_{PS}]$ 这一路径,同时以纵横波速度比作为路径的约束,搜索出最佳匹配路径。

在地球物理测井与地震资料联合处理过程中,相关系数法常用于判定测井—地震数据匹配质量的好坏(Hampson-Russell, 1999);此外,相关系数法也用于地震资料处理过程中估算纵横波速比(Gaiser, 1996; 姜镭等, 2012)。

对所有起始点递归回溯搜索,可搜索到 3/4S 条匹配路径;依次遍历 3/4S 条匹配路径,计算相关系数,最终依据最大相关系数判定准则就可以确定 PP 与 PS 波的最佳匹配路径. 如图 4 所示,其中红线表示所确定的最佳匹配路径. 利用最佳匹配路径

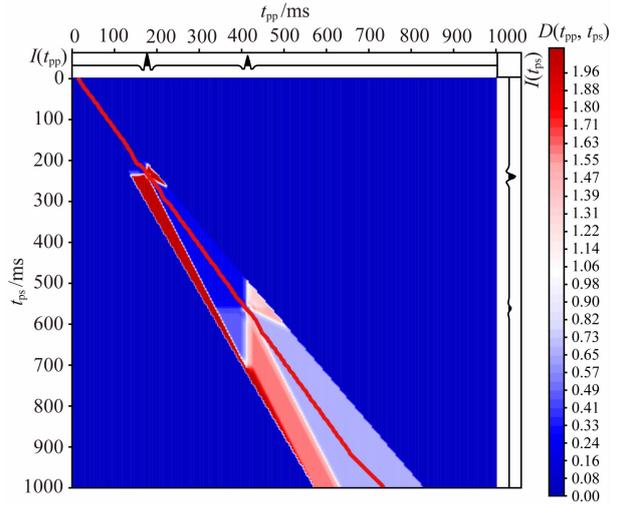


图 4 采用本文方法通过回溯变形窗内的误差累积和确定的最佳匹配路径图. 其中,红线为最佳匹配路径
Fig. 4 The optimal path calculated by our method.

Red line stands for the optimal path

计算 PP 与 PS 波匹配的时移量 $\tau(t_{PP})$, 依据 $\tau(t_{PP})$ 将归一化前的 PS 波压缩与 PP 波匹配,匹配结果如图 5a 所示. 从图 5a 中可看出,压缩后的 PS 波的两个反射层位处较精确地与 PP 波匹配. 压缩后的 PS 波的频谱图如图 5b 所示. 比较压缩前与压缩后的 PS 频谱分析图可看出:PS 波主频由压缩前的 30 Hz 变为 40 Hz,压缩后的 PS 波主频与 PP 波一致;压缩后的振幅与相位产生畸变,这是由 PP 与 PS 波子波和频谱特征差异导致。

2.2 动态图像变形算法

粗采样不仅能提高计算效率,还能提高估算的时移序列的精度,因此,首先对 2D 叠后 PP 与 PS 波粗采样。

DIW 是 DTW 在 2D 数据上的应用,最简单的方法是将整体归一化且粗采样后的 2D 多分量地震数据看作一系列的垂向时间序列,单独对每一序列采用 DTW 算法估算时移量 $\tau(t_{PP})$. 但由于每道 PP 与 PS 波记录的信噪比以及在地表接收到的反射强度不一致使得二者的相似度不一致,这就导致了在以时移量压缩 2D PS 波时横向出现不连续的现象. 为避免该现象的出现,本文在基于最大相关系数判定准则的基础上采用如下公式进行横向斜率约束。

$$\left| \frac{\tau(x + dx, t_{PP}) - \tau(x, t_{PP})}{dx} \right| \leq a_u, \quad (11)$$

其中 dx 为空间采样间隔, a_u 表示时移量变化速率的上界。

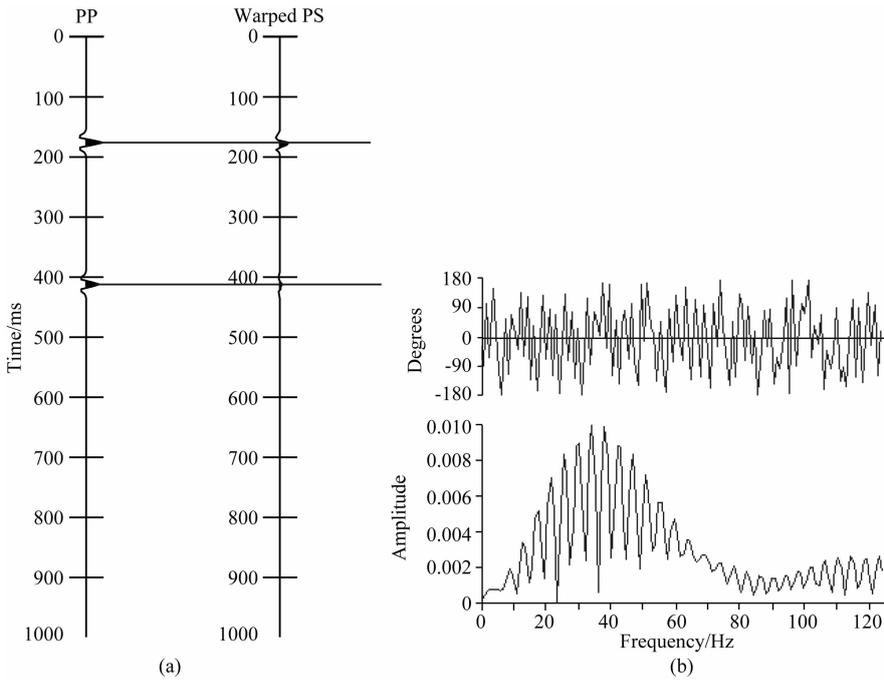


图 5 (a) 左边为 PP 波, 右边为压缩后的 PS 波;
(b) 压缩后的 PS 波的相位谱(上)与振幅谱(下)

Fig. 5 (a) PP (left) and warped PS waves (right) warped by our method; (b) is the phase spectrum (the up) and amplitude spectrum (the down) of warped PS

横向斜率约束后的 2D 时移量记为 $\tau(x, t_{PP})$ 。估算 $\tau(x, t_{PP})$ 时, 仅计算了粗采样的位置, 但估算纵横波速度比并且将 PS 与 PP 波匹配需要所有采样点的时移量。因此, 本文采用 2D 线性插值法插值, 最终得到插值后的 2D 时移量, 记为 $\tau_{d_i}(x, t_{PP})$ 。2D 线性插值收敛性好, 构造简单, 且具有较高的数值精度, 但在粗采样处时移量不光滑, 且 2D 线性插值的准确度取决于粗采样的密集程度。因此, 对插值后的 $\tau_{d_i}(x, t_{PP})$ 采用简单平均平滑方法做平滑处理, 平滑后 2D 时移量记为 $\tau_{d_{i-s}}(x, t_{PP})$ 。

2.3 纵横波速度比估算

纵横波速度比是纵波与转换波资料匹配的基础(陈双全和李向阳, 2011), 也是多分量地震资料偏移成像的关键(胡晓亚和王赞, 2015)。采用 DIW 技术估算出 $\tau_{d_{i-s}}(x, t_{PP})$ 后, 利用 $\tau_{d_{i-s}}(x, t_{PP})$ 计算相对于 $t_{PP} = 0$ 时刻的平均纵横波速度比 $\gamma(x, t_{PP})$, 联合公式(7), 得到平均纵横波速度比

$$\gamma(x, t_{PP}) = \frac{2\tau_{d_{i-s}}(x, t_{PP})}{t_{PP}} + 1. \quad (12)$$

3 模型测试

为了验证该方法的有效性, 本文分别采用加入

高斯白噪声前后的简单二层倾斜模型进行测试, 如图 6 所示。图 6a 和 6b 分别为未加噪声的叠后 PP 与 PS 剖面, 图 6c 和 6d 分别为加入能量比为 100:1 的高斯白噪声后的叠后 PP 与 PS 剖面。经计算, 二者信噪比分别为 1.94 dB 和 -4.13 dB。该模型地层倾角小于 10° ; 模型 CDP 间隔为 5 m, 共计 50 道; 每道 251 个采样点, 采样率为 4 ms, 记录长度为 1 s。为方便显示, 图中每 5 道显示一道地震记录。PP 与 PS 波的地震子波为分别为 40 Hz、25 Hz 的雷克子波。第一个界面反射较强, 第二个界面反射较弱; PP 的反射强于 PS 波的反射。其中 PP 与 PS 波的理论纵横波速比 $\gamma_{理}(x, t_{PP}) = 1.732$, 理论时移量如图 7a 所示。

采用本文的方法, 在同一条件下分别对加入高斯白噪声前后的 PP 与 PS 波匹配并估算纵横波速度比。归一化 PP 与 PS 波, 设置 PP 与 PS 波时间窗为道号 1-50, 采样时间 0~1000 ms; 粗采样网格为 1 个 CDP \times 4 ms, 即空间和时间采样间隔都为 1 个采样点。由于归一化以及粗采样后的 PP 与 PS 波所有采样点振幅差较小, 因此设置 PS 波加权系数为 1。为使 PS 与 PP 波相匹配, 设置速度比范围为 1.414~2.5, 经计算后的变形窗如图 3c 所示。横向斜率约束为 100%。加入高斯白噪声前后估算的

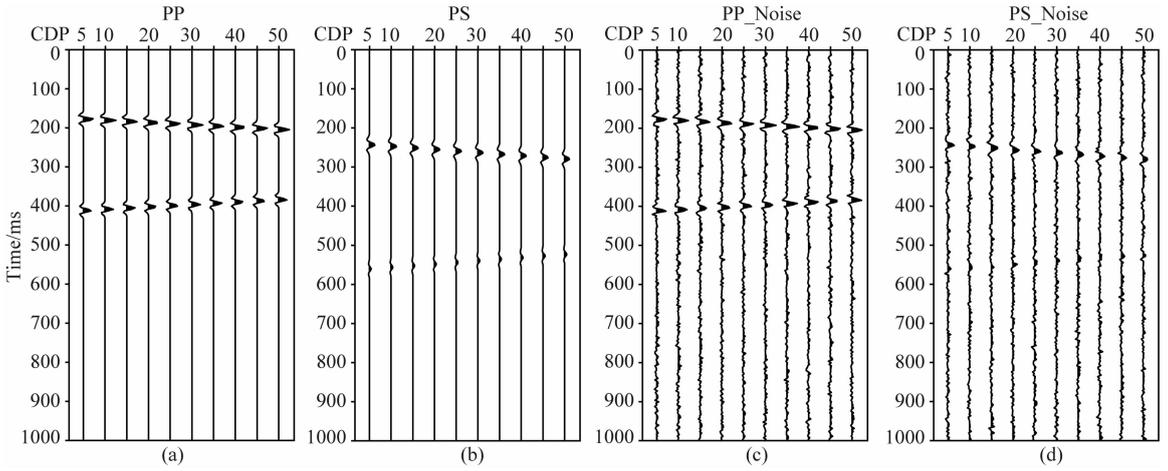


图 6 (a)和(b)分别为未加高斯白噪声时的叠后 PP 与 PS 剖面;(c)和(d)分别为加入高斯白噪声后的叠后 PP 和 PS 剖面.其中,PP 和 PS 波加入的信噪比分别为 1.94 dB 和 -4.13 dB

Fig. 6 Post-stack (a) PP- and (b) PS records without White Gaussian Noise; and post-stack (c) PP-and (d) PS records with White Gaussian Noise. The signal-to-noise ratio (SNR) of PP is 1.97dB, and the SNR of PS is -4.09 dB

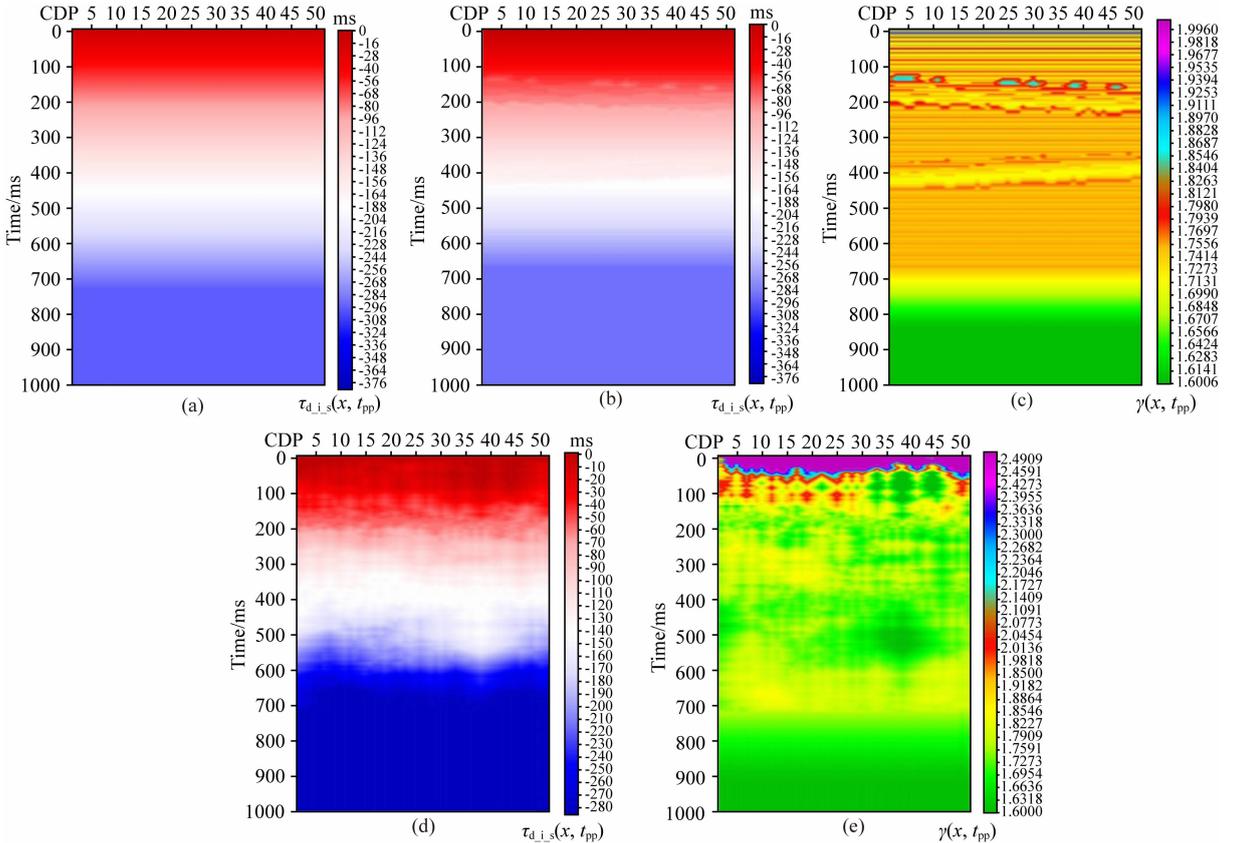


图 7 (a)理论纵横波速度比为 1.732 计算出的 2D 时移量图;(b)和(c)分别为未加高斯白噪声时的 2D 时移量和纵横波速度比图;(d)和(e)分别为加入高斯白噪声后的 2D 时移量和纵横波速度比图

Fig. 7 (a) Time-shift of module with the oretical P-to S- wave velocity ratio, 1.732; (b) Time-shift and (c) P-to S wave velocity ratio without White Gaussian Noise; and (d) time-shift and (e) P-to S wave velocity ratio with White Gaussian Noise

$\tau_{d_{i,s}}(x, t_{pp})$ 以及平均纵横波速度比 $\gamma(x, t_{pp})$ 如图 7 所示.从图 7b 和 7d 中结果可知,加入高斯白噪声前后估算的 $\tau_{d_{i,s}}(x, t_{pp})$ 为 0~300 ms,与 $\gamma_{理}(x, t_{pp})$ 计算

出的时移量(图 7a)相符.从图 7c 和 7e 中可知计算出的 $\gamma(x, t_{pp})$ 约为 1.73,与 $\gamma_{理}(x, t_{pp})$ 相近.根据 $\gamma(x, t_{pp})$ 可计算出 PS 波的 1000 ms 对应 PP 的约为

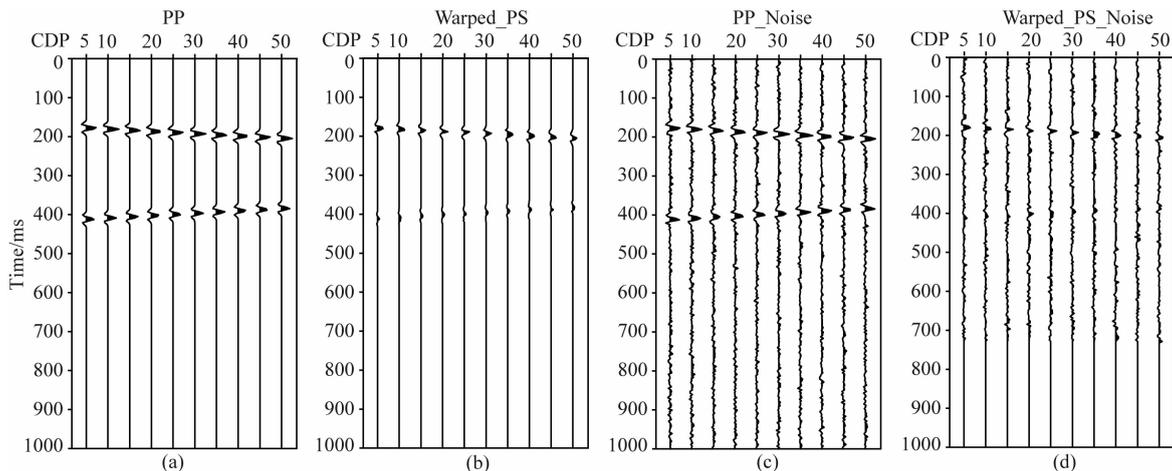


图8 未加高斯白噪声时的(a)叠后 PP 和(b)本文方法压缩后的 PS 剖面图,

加入高斯白噪声后的(c)叠后 PP 和(d)本文方法压缩后的 PS 剖面图

Fig. 8 (a) Post-stack PP- and (b) warped PS- record warped by our method without White Gaussian Noise; and (c) post-stack PP- and (d) warped PS- record warped by our method with White Gaussian Noise

730 ms,因此,图7中730~1000 ms之间的 $\gamma(x, t_{pp})$ 为外推时移量计算的结果. 加入噪声前后未归一化的PS波分别经过图7b和7d中的 $\tau_{d_{i,s}}(x, t_{pp})$ 压缩后的结果如图8b和8d所示. 对比图8a和8b中的未加高斯白噪声时的PP时间尺度上的PP与PS波,可看出压缩到PP时间尺度后的PS波较好地与PP波匹配. 对比图8c和8d中的加入高斯白噪声后压缩到PP时间尺度上的PS波可知,加入噪声后压缩后的PS波同样能够较好地与PP波匹配,且匹配精度与未加噪声时相当. 倾斜模型经该算法计算的误差小于等于1个采样率大小. 此模型结果很好地说明了本文方法对于PS匹配PP是有效的.

4 实际工区数据应用

本文采用四川新场多分量地震数据进行测试. 以Inline1383测线为例,部分叠后PP与PS时间剖面如图9所示. 通过对图9中PP与PS波进行对比可知,叠后PP与PS剖面浅层成像较差,无明显的同相轴,地层无法一一对应;PP时间2500~5000 ms之间有4层较强的反射,PP与PS波能大致一一对应;PP时间5000~7000 ms之间反射较弱,同相轴不明显,PP与PS波难以对应. 采用欧氏距离法计算Inline1383测线PP与PS波的相似度为5.87%,相似度较低,匹配程度差.

该测线CDP范围为1002—1779,CDP间距为25 m. 每道数据3500个采样点,采样率为2 ms,记录长度为7 s. 分别归一化PP与PS波,设置CDP

范围1002—1779,采样时间0~7000 ms. 粗采样设置为10CDP×6 ms,根据PP与PS波能量分析设置加权系数 $\omega=3$;加权系数使得归一化后的PS与PP波能量相近. 根据已有的地震测井资料可知新场这一工区的纵横波速比在1.9左右,因此,设置的纵横波速比范围为1.6~2.2;斜率约束为100%.

估算出的2D时移量 $\tau_{d_{i,s}}(x, t_{pp})$ 如图10所示;由 $\tau_{d_{i,s}}(x, t_{pp})$ 计算的对于 $t_{pp}=0$ 的平均纵横波速度比 $\gamma(x, t_{pp})$ 如图11所示. 由图11可知,由于在0~500 ms处,叠后PP波成像效果极差,且PS波无反射层位,因此,在约500 ms处, $\gamma(x, t_{pp})$ 精确度低;500~5000 ms之间, $\gamma(x, t_{pp})$ 约为1.8~1.9;CDP为1002—1300,时间为1000~1500 ms区域为一低速度比区,约为1.75;1500~3000 ms区域以及CDP为1340—1779,时间为1200~3000 ms区域为高速度比区域,约为2.0;3000~5000 ms区域平均速度比约为1.85. 整个测线剖面 $\gamma(x, t_{pp})$ 约为1.9. 未归一化的PS波经过图10中的 $\tau_{d_{i,s}}(x, t_{pp})$ 压缩后的结果如图12右图所示. 对比图12中的PP与压缩后的PS波可看出,反射较强的PS波能够很好地与PP匹配;一些反射较弱的难以完全匹配. 从整体上看,压缩后的PP时间尺度上的PS与PP剖面匹配较好.

新场Inline1383测线数据测试结果表明,对于相似度较低的PP与PS时间剖面,本文算法能够使得压缩后PP时间尺度的PS与PP波较好地匹配. 同时,可估算出相对精细的 $\gamma(x, t_{pp})$,将有利于多分量地震数据的偏移速度建模.

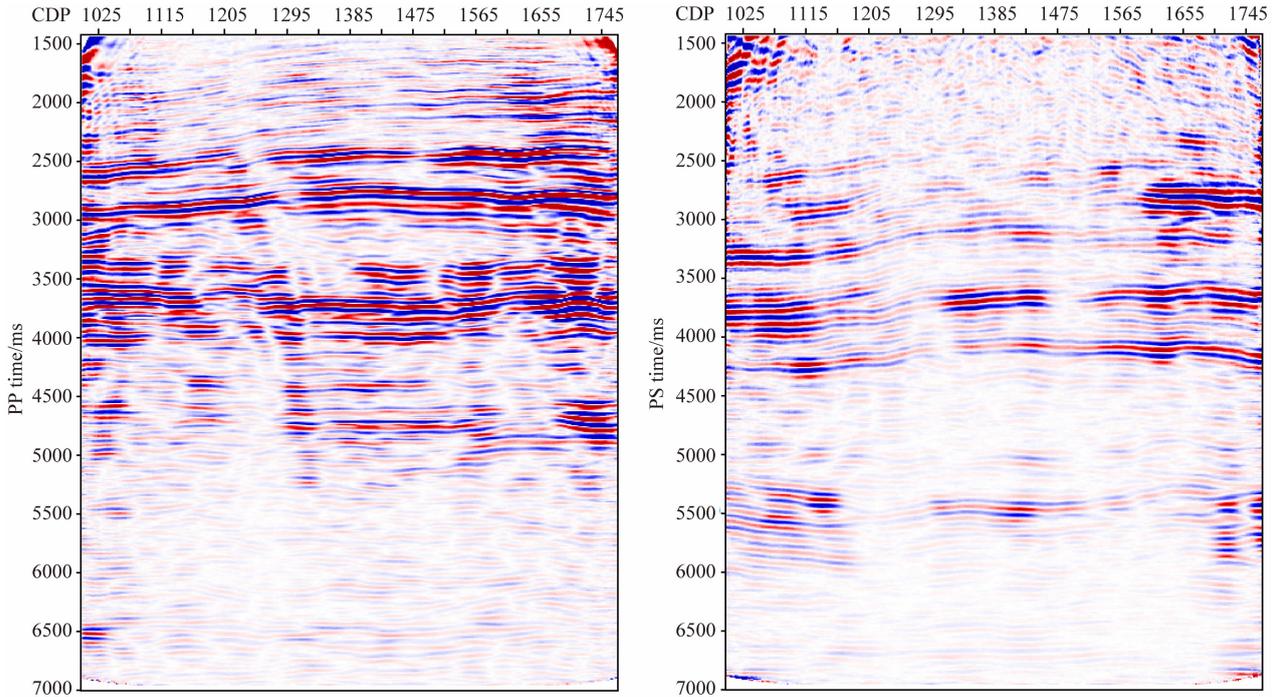


图 9 1383 测线 PP(左)与 PS(右)剖面图

Fig. 9 Inline 1383 PP-(left) and PS sections (right) in Xin Chang

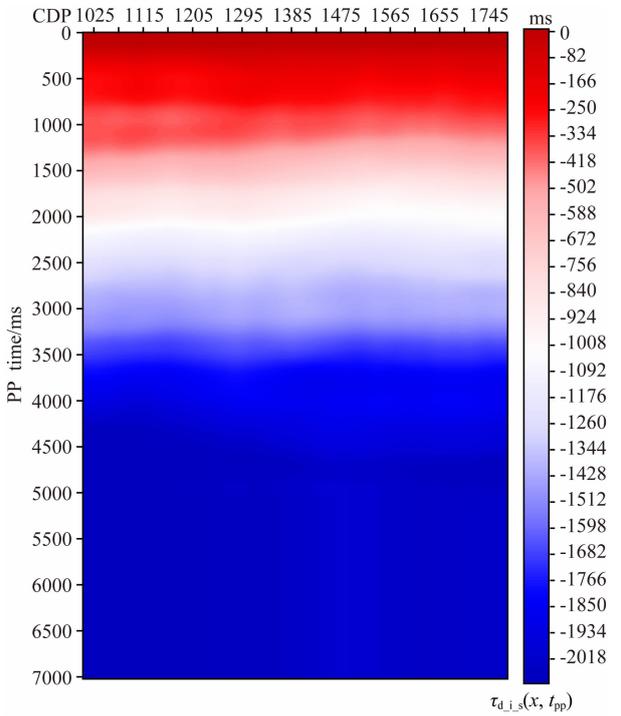


图 10 1383 测线压缩时移量图

Fig. 10 Inline1383 time-shift

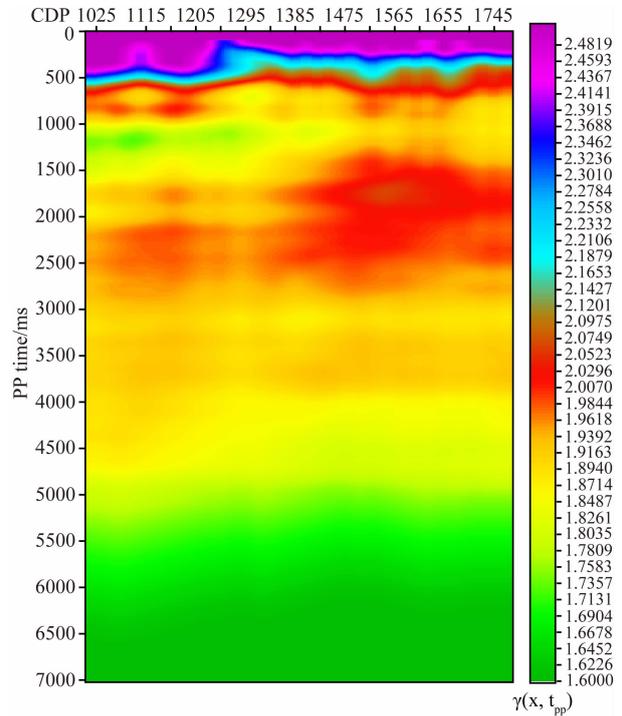


图 11 1383 测线平均纵横波速比图

Fig. 11 The average P-to-S-wave velocity ratio of Inline 1383

5 结论

为使得多分量地震数据叠后 PS 与 PP 波剖面

匹配,本文基于 DTW,实现了一种适用于 PP 与 PS 波直接匹配的二阶 DIW 算法.该算法通过最大、最小纵横波速比计算变形窗来约束最佳匹配路径的搜索范围,并基于最大相关系数判定准则确定最佳匹

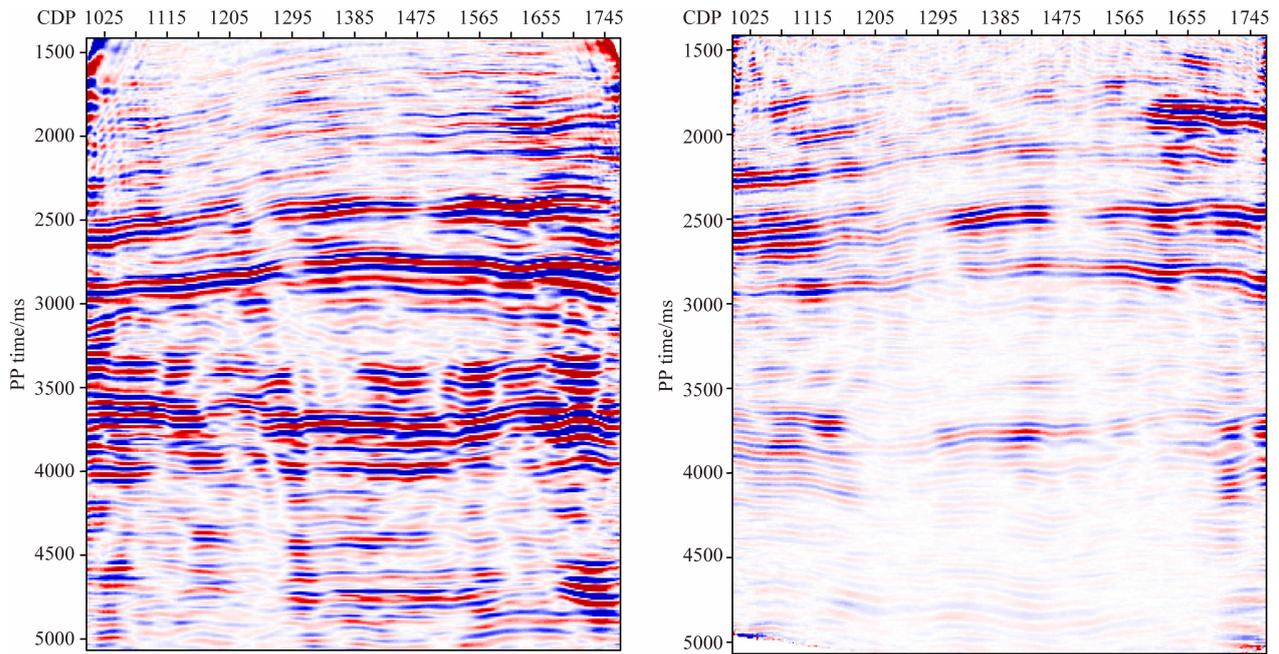


图 12 1383 测线 PP(左)和压缩后的 PS(右)图

Fig. 12 Inline 1383 PP- (left) and warped PS (right) sections by our method

配路径,最后通过计算时移量来估算相对 $t=0$ 时刻的平均纵横波速度比. 模型数据和实际数据测试得到如下的结论:

(1) 本文给出以最大相关系数为判定准则,采用变形窗纵向约束和斜率横向约束的二阶对称 DIW 算法. 在纵横波速比或是纵横波速度未知的条件下,只需根据工区的叠后 PP 与 PS 时间剖面就可以估算出较精确的纵横波速比.

(2) 通过简单倾斜模型以及新场工区数据的验证,本文的算法对于高信噪比、相似度较高的叠后 PP 与 PS 时间剖面数据,能够得到较高精度的纵横波速度比,且压缩后的 PS 与 PP 匹配程度高;该算法在确保精确度较高的情况下不仅适用于时间域与深度域的多分量地震资料,还适用于信噪比、相似度较低的多分量地震资料的匹配.

References

- Chen S Q, Li X Y, Tang J M. 2014. Converted-wave time domain registration using the inverted pseudo-PS-wave attribute section. *J. Geophys. Eng.*, 11: 015007, doi: 10.1088/1742-2132/11/1/015007.
- Chen S Q, Li X Y. 2011. A study on the event time registration of PP- and PS-wave based on the prestack inversion method. // Proceedings of the 27th Chinese Geophysical Society. Changsha: Chinese Geophysical Society.
- Compton S, Hale D. 2013. Estimating V_p/V_s ratios using smooth

- dynamic image warping. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2013. SEG, 1639-1643, doi: 10.1190/segam2013-1300.1.
- Fomel S, Backus M M. 2003. Multicomponent seismic data registration by least squares. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2003. SEG, 781-784, doi: 10.1190/1.1818052.
- Gaiser J E. 1996. Multicomponent V_p/V_s correlation analysis. *Geophysics*, 61(4): 1137-1149, doi: 10.1190/1.1444034.
- Geppener V V, Simonchik K K, Haidar A S. 2007. Design of speaker verification systems with the use of an algorithm of Dynamic Time Warping (DTW). *Pattern Recognition and Image Analysis*, 17(4): 470-479, doi: 10.1134/S1054661807040050.
- Goodrich T M, Tamassia R. 2006. Algorithm Design: Foundations, Analysis, and Internet Examples (in Chinese). Huo H W Trans. Beijing: Posts & Telecom Press, 8-12.
- Graziano C, Hale D. 2014. Wavelets and warping PS seismic images. // SEG Technical Program Expanded Abstracts 2014. SEG, 1848-1852, doi: 10.1190/segam2014-0362.1.
- Hale D. 2013. Dynamic Warping of seismic images. *Geophysics*, 78(2): S105-S115, doi: 10.1190/geo2012-0327.1.
- Hampson-Russell. 1999. Theory of the strata program. Technical report. CGGVeritas Hampson-Russell.
- Herrera R H, van der Baan M. 2014. A semiautomatic method to tie well logs to seismic data. *Geophysics*, 79(3): V47-V53, doi: 10.1190/GEO2013-0248.1.
- Hu X Y, Wang Y. 2015. The new multi-component seismic technology progress—Analysis and commentary of thesis about multi-component seismic technology on 2013 SEG Annual Meeting. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 30(1): 391-400, doi: 10.6038/pg20150157.
- Jiang L, Ding W N, Li S. 2012. Influential factors of PP-wave and

- PS-wave matching. *Geophysical Prospecting for Petroleum* (in Chinese), 51(4): 367-370, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2012.04.008.
- Keogh E, Ratanamahatana C A. 2005. Exact indexing of dynamic time warping. *Knowledge and Information Systems*, 7(3): 358-386.
- Li Q Z. 1992. Velocity regularities of P and S-waves in formations. *OGP* (in Chinese), 27(1): 1-12.
- Lin J, Cervone G, Franzese P, et al. 2010. Assessment of error in air quality models using dynamic time warping. // Proceedings of the 1st ACM SIGSPATIAL International Workshop on Data Mining for Geoinformatics. *San Jose, California: ACM*, 38-44, doi: 10.1145/1869890.1869895.
- Lu J, Yang Z, Wang Y, et al. 2015. Joint PP and PS AVA seismic inversion using exact Zoeppritz equations. *Geophysics*, 80(5): R239-R250, doi: 10.1190/GEO2014-0490.1.
- Lu J, Meng X H, Wang Y, et al. 2016. Prediction of coal seam details and mining safety using multicomponent seismic data: A case history from China. *Geophysics*, 81(5): B149-B165, doi: 10.1190/GEO2016-0009.1.
- Muñoz A, Hale D. 2013. Automatically tying well logs to seismic data. CWP Report 725, 253-260.
- Pan B, Sen M K, Gu H M. 2016. Joint inversion of PP and PS AVAZ data to estimate the fluid indicator in HTI medium: a case study in Western Sichuan Basin, China. *J. Geophys. Eng.*, 13: 690-703, doi: 10.1088/1742-2132/13/5/690.
- Rabiner L, Juang B H. 1993. Fundamentals of speech recognition. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 146-147.
- Sakoe H, Chiba S. 1978. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 26(1): 43-49 doi: 10.1109/TASSP.1978.1163055.
- Van Dok R, Gaiser J E. 2001. Stratigraphic description of the Morrow Formation using mode-converted shear waves: Interpretation tools and techniques for three land surveys. *The Leading Edge*, 20(9): 1042-1047, doi: 10.1190/1.1487310.
- Wang Y, Yang D Y, Lu J. 2009. Study of three-component converted wave velocity ratio in TI media. *Journal of China Coal Society* (in Chinese), 34(6): 752-755.
- Wang Y, Xu X K, Yang D Y. 2014. Ultrasonic elastic characteristics of five kinds of metamorphic deformed coals under room temperature and pressure conditions. *Science China: Earth Sciences*, 57(9): 2208-2216, doi: 10.1007/s11430-014-4922-4.
- Yang D, Shang X F, Malcolm A, et al. 2014. Image registration guided wavefield tomography for shear wave velocity model building. // SEG Technical Program Expanded Abstracts. SEG, 1200-1205, doi: 10.1190/segam2014-0847.1.
- Yuan J J, Nathan G, Calvert A, et al. 2008. Automated C-wave registration by simulated annealing. // SEG Technical Program Expanded Abstracts. SEG, 1043-1047, doi: 10.1190/1.3059105.
- Zhang F, Wang Y H. 2010. Wavelet-preserved PP- and PS-wave registration. *J. Geophys. Eng.*, 7(4): 395-403, doi: 10.1088/1742-2132/7/4/006.

附中文参考文献

- 陈双全, 李向阳. 2011. 基于叠前反演方法的纵波与转换波时间匹配研究. // 中国地球物理学会第二十七届年会. 长沙: 中国地球物理学会.
- 古德里奇, 塔玛西亚. 2006. 算法分析与设计. 霍红卫译. 北京: 人民邮电出版社, 8-12.
- 胡晓亚, 王赞. 2015. 多分量地震技术新进展——SEG2013 年会多分量地震技术论文分析与评述. *地球物理学进展*, 30(1): 391-400, doi: 10.6038/pg20150157.
- 姜锴, 丁蔚楠, 李珊. 2012. 纵、横波匹配影响因素分析. *石油物探*, 51(4): 367-370, doi: 10.3969/j.issn.1000-1441.2012.04.008.
- 李庆忠. 1992. 岩石的纵、横波速度规律. *石油地球物理勘探*, 27(1): 1-12.
- 王赞, 杨德义, 芦俊. 2009. TI 介质中三分量转换波的速度比研究. *煤炭学报*, 34(6): 752-755.
- 王赞, 许小凯, 杨德义. 2014. 常温压条件下五种变质程度构造煤的超声弹性特征. *中国科学: 地球科学*, 44(11): 2431-2439, doi: 10.1007/s11430-014-4922-4.

(本文编辑 胡素芳)