doi:10.3969/j.issn.1003-2029.2022.02.009

基于匹配追踪的反射系数反演在渤海 PL 油田的应用

魏天罡，李福强，李　久，周建科

（中海石油（中国）有限公司天津分公司，天津　300450）

摘　要：渤海海域 PL 油田储层沉积环境以河流相和浅水三角洲相为主，薄互层发育，尤其薄储层处于调谐厚度产生调谐效应后很难分辨，为油气勘探和开发工作带来了很大困难。本文采用的匹配追踪是地震信号稀疏分解的一种方法，对薄储层具有较高的分辨精度，当遇到两层之间的厚度达到调谐厚度时，该方法仍然可以显示地震反射系数的大小和位置，并能有效指证储层延伸方向，因此匹配追踪算法可以作为薄互层地震波阻抗反演的一种有效方法。在对地震信号进行分析时，Ricker 小波的波形与实际地震信号相似，因此本文将 Ricker 小波应用到匹配追踪算法中，在实际地震数据反演应用过程中收敛速度较高，为反演结果的高效性提供了很好的保证，反演结果与实际地下地质特征相吻合度较高。通过对模型和地震资料的计算表明，匹配追踪反射系数反演方法在薄互层发育的油田进行储层研究是有效的，为后续相似地质条件油田进行储层研究提供了一定的参考。

关键词：匹配追踪；稀疏分解；Ricker 小波

中图分类号：TE19　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1003-2029（2022）02-0069-07

海洋石油储量丰富，具备很大的勘探和开发潜力，但海洋石油的勘探工作与陆地油田有所不同，由于受到天气及海水等自然条件限制，海上油田的勘探条件比陆地油田要更加复杂、难以预测，对海底地层的储层勘探技术也有着更高的要求。渤海 PL 油田构造位于渤海海域中南部的渤南低凸起上，该构造以基地隆起为背景发育而来，整体处于郯庐断裂带之上，受两组近南北向走滑断层控制。近北东走向正断层使 PL 油田构造形态进一步复杂化，复杂的构造运动使该区域内的地震反射信号都受到影响。同时，工区内含油层析主要集中的明化镇组和馆陶组，主要以河流相沉积为主，目的层段多为砂泥岩互层，储层厚度较薄，存在分辨上的困难。

由于实际地质条件导致的地震信号非常复杂，一些地震信号分解方法不具有普遍适用性。为了有效地挖掘地震信号的特征，MALLAT S G 等[1]于 1993 年首次提出了匹配追踪分解稀疏信号的方法。匹配追踪算法将地震道划分为一系列子波，从一个含有时频原子的冗余字典中选择原子进行组合，通过不断迭代优化组合，达到原始信号的最佳匹配结构，该算法在地震信号领域有着广泛的应用。CASTAGNA J P 等[2]采用瞬时谱的匹配追踪算法分析与油气相关的储层的低频阴影特征。武国宁等 [3]在复数地震道的基础上，基于复 Morlet 子波，阐述了匹配追踪算法的原理及其实现过程，并给出了具体的算法流程图。通过与传统时频分析的比较，验证了该算法具有较高的时频分析精度，对于实际资料的应用表明，该算法能够很好地显示储层的位置与边界。张繁昌等[4]利用匹配追踪算法的瞬时谱特性识别出三角洲沉积相的边缘。王纯伟等[5]采用匹配

收稿日期：2021-12-14

作者简介：魏天罡（1982—），男，硕士，工程师，主要从事地震资料处理、解释研究。E-mail：weitg2@cnooc.com.cn

追踪算法去除叠前地震的面波，得到了很好的过滤效果。程文波等[6]针对传统的信号分解方法中所存在的信号的特性与基函数不完全匹配时，所分解的结果不一定是信号的稀疏表示的问题，在分析传统信号分解方法不足的基础上，从确定性信号与随机信号两方面探讨了基于过完备原子库的信号稀疏表示算法的特点及其应用。由于采用匹配追踪算法进行信号稀疏分解时，计算量很大，一些专家也在试图解决这些问题。尽管现阶段还有许多问题需要解决，但该算法依然有许多优秀的地方。例如，匹配追踪作为一种自适应稀疏表示，具有信号表示灵活、时频分辨率最佳等优点，该算法还可以更灵活地改变信号的结构参数。

综上所述，由于以上储层薄、横向变化快等原因，河流相储层预测一直是一个难题。针对渤海PL油田区域构造复杂，地层厚度薄难以有效识别等问题，本文采用匹配追踪法进行反射系数反演，通过将匹配追踪算法应用在该区域，并对储层有较好的识别效果，可以看出该方法是一种寻找目的层和有利储层内的砂体分布的有效手段。

1 理论与方法

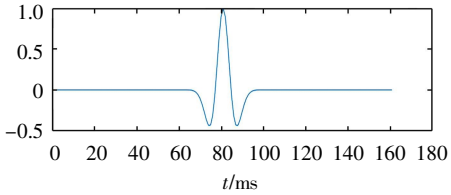
在储层研究工作中，反演是一种很有效的储层预测方法，可以很大程度地恢复储层的真实结构，现阶段反演方法从基础算法上可分为两类：一是波动方程反演；二是基于褶积模型的反演。基于波动方程算法的反演方法对地震波在地层中传播的动力学参数和运动学参数进行了考虑，并有相对准确的表达。由于波动方程本身复杂程度导致参考变量多、运算量巨大，使该算法在实际应用中受到了很多限制。基于波动方程算法的反演还有一点不足就是计算模型的精确性导致在运算过程中要求数据的准确性很高，而地震资料由于在采集过程中不能避免被各种自然界中的其他声波干扰，因此数据本身存在很多噪音，为计算准确性带来很多问题，从而导致该方法在实际生产工作中还没有得到广泛推广。褶积模型反演相对波动方程方法要相对简单，抗噪声干扰能力强，在实际生产工作中应用较多。褶积模型反演过程就是通过找到合理的子波对实际地下地层速度和密度进行求解，反演得到的速度和密度越接近实际地层岩石物理参数，说明反演效果越好，也就越能对地下地质条件有准确的认识。

匹配追踪算法是信号稀疏分解中的一种算法，该算法核心思想为贪婪迭代，即多次匹配寻优。匹配追踪算法的关键在于选择合适的基函数，然后利用它通过一系列的变换形成过完备的原子字典，在过完备匹配子波库中搜寻与地震信号最匹配的子波，即为褶积反演模型中需要的子波。在反演过程中，通过应用该子波实现信号的自适应分解，从而在减少人为干扰因素的情况下获得更好的匹配结果[7]。

为了使匹配追踪算法获得满意的结果，原子词典必须满足两个重要条件。第一，库中原子的数量远远大于信号的分解长度。第二，原子的波形特征与地震信号相似[8]。在地震信号分析中，由于Ricker子波的波形与真实地震信号相似，子波旁瓣短，在合成地震记录制作和常规地震资料反演中得到了广泛的应用[9]。在本文应用匹配追踪算法进行研究的过程中，以非零相位Ricker小波作为基函数建立了过完备字典。原始Ricker小波的表达式见式(1)。

$$r(t)=[1-2(\pi ft)^2]\ e^{-(\pi ft)^2} \tag{1}$$

式中，f为峰值频率；e为自然常数，其波形如图1所示。



(f = 40 Hz，dt = 0.002 s)

图1 零相位Ricker小波波形

为了建立一个过完备的原子字典，需要不同相位、不同频率、不同时延的Ricker小波原子。非零相位方程（如Ricker的非相位表达式）如下。

$$g(t-u)=r(t-u)\cos w-r^*(t-u)\sin w \tag{2}$$

式中，$r^*(t)$是$r(t)$的希尔伯特变换结果；$g(t-u)$为非零相位Ricker小波原子；w是相位。

构建过完备字典库多种相位子波如图2和图3所示，在得到过完备原子字典后，与实际地震信号进行匹配，最后需要对原子进行归一化处理，如

$\|g(t-u)\|=1$。为了从过完备字典中找出最佳原子 $g_{\gamma 1}$，$g_{\gamma 1}$ 应满足以下公式。

$$|\langle y, g_{\gamma 1}\rangle| = \sup|\langle y, g(t-u)\rangle| \tag{3}$$

式中，y 为分解后的信号；$\sup|\langle y, g(t-u)|$表示内积的最大值。假设 y 可以表示如下。

$$y = |\langle y, g_{\gamma 1}\rangle| g_{\gamma 1} + R^1 y \tag{4}$$

式中，$|\langle y, g_{\gamma 1}\rangle| g_{\gamma 1}$ 是 y 在 $g_{\gamma 1}$ 上的投影；$R^1 y$ 是 $g_{\gamma 1}$ 和 y之间最大内积后的余数。由于计算过程是一种矢量计算，$R^1 y$ 和 $g_{\gamma 1}$ 保持正交性。所以式（4）可表示如下。

$$\|y\|^2 = |\langle y, g_{\gamma 1}\rangle|^2 + \|R^1 y\|^2 \tag{5}$$

$R^1 y$ 可进一步表述为以下公式。

$$R^1 y = \langle R^1 y, g_{\gamma 2}\rangle g_{\gamma 2} + R^2 y \tag{6}$$

在上面的例子中，$\langle R^1 y, g_{\gamma 2}\rangle g_{\gamma 2}$ 表示 $R^1 y$ 在 $g_{\gamma 2}$ 上的投影。在 k+1 迭代中，$R^k y$ 表示如下。

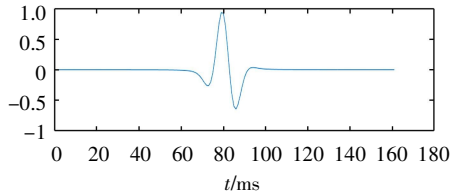
$$R^k y = \langle R^k y, g_{\gamma k}\rangle g_{\gamma k} + R^{k+1} y \tag{7}$$

式中，$g_{\gamma k}$ 和 $R^k y$仍然保持正交。最重要的是 $\langle R^k y, g_{\gamma k}\rangle$ 代表反射系数的值。

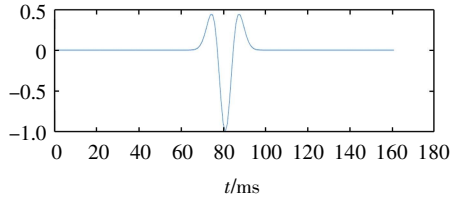
$$\|R^k y\|^2 = |\langle R^k y, g_{\gamma k}\rangle|^2 + \|R^{k+1} y\|^2 \tag{8}$$

式中，$\|y\|^2 = \sum_{i=1}^{k} |\langle R^k y, g_{\gamma k}\rangle|^2 + \|R^{k+1} y\|^2$。

本文采用的匹配追踪算法是一个常循环迭代的过程，需要选择合适的参数来判断分解是否结束。通过采用设置剩余能量 $R^{k+1} y$ 阈值，使剩余能量的



（a）非零相位的 Ricker 小波为：f = 30 Hz，w = 45°，dt = 0.002 s



（b）非零相位的 Ricker 小波为：f = 30 Hz，w = 180°，dt = 0.002 s

图 2　非零相位 Ricker 小波

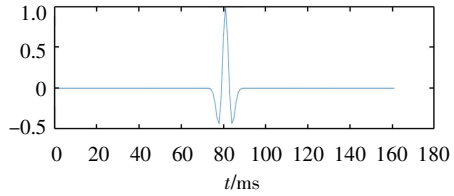
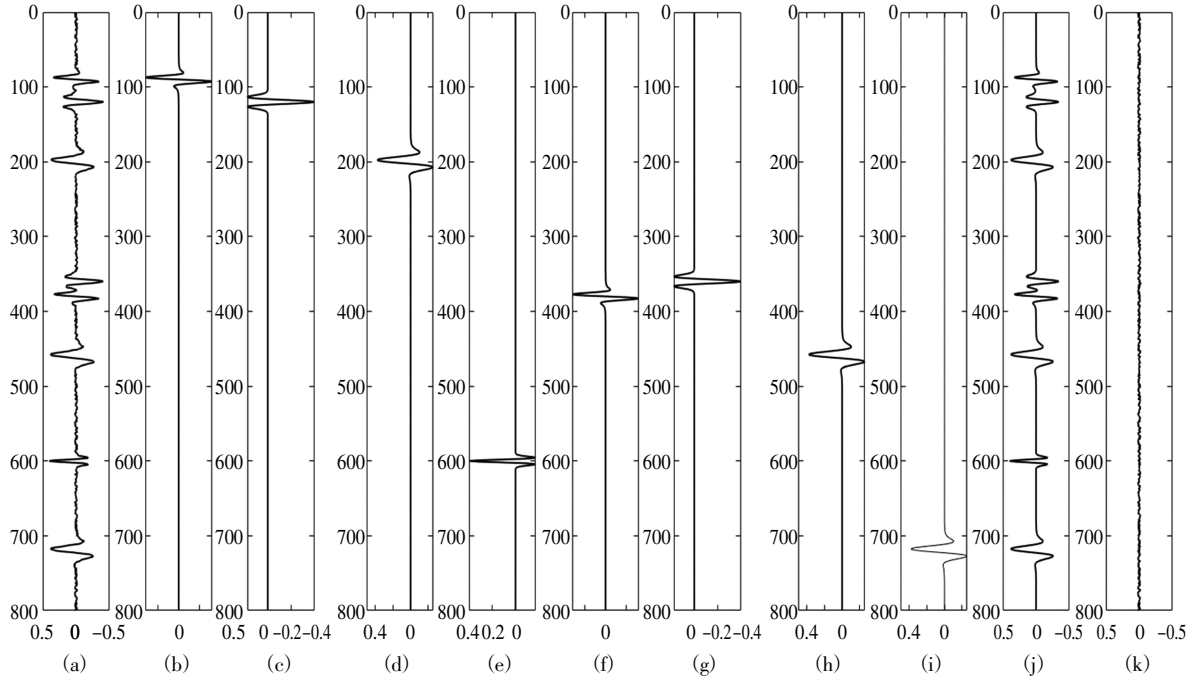


图 3　零相位 Ricker 小波的参数为：f = 60 Hz，dt = 0.002 s



（a）单道地震数据加噪；（b）至（i）迭代匹配原子；（j）匹配重构信号；（k）噪声序列。

图 4　单道地震数据加噪匹配结果

阈值极小，作为迭代的结束条件。如引入剩余能量阈值 $\varepsilon(N)$，使 $\|R^{k+1}y\|^2 < \varepsilon(N)$，$\varepsilon(N)$ 极小时该分解完毕。

为验证上述方法可靠性，设计了图4所示的模型，模型为由不同主频、不同相位、相同振幅 Ricker 子波褶积得到的合成记录，得到匹配追踪后的 Ricker 子波合成记录及重构信号如图5所示。

对比图（图4(a)和图4(j)）可看出：层位和系数相对大小分别与真实值吻合较好，偏差不大，可反映层的位置和相对关系。重构地震信号和合成地震信号中的反射信号及相对关系也基本相同，去除噪音后，匹配基本一致。

通过以上对比分析可知，MP 算法可用于地震信号的稀疏分解，且得到地震数据可以反映原地震数据信息。

2 应用实例

在进行实际应用之前，将上述匹配追踪算法首先应用于楔形模型，通过计算楔形模型反射系数的值及其对应的位置，在此基础上根据波阻抗递推公式得到波阻抗，验证匹配追踪算法的可靠性。在该算法的可靠性得到验证的基础上，在渤海 PL 油田地震数据中进行了实际应用，并取得了一定的应用效果。

对比常规反演手段与基于匹配追踪算法的反射系数反演手段可以发现，匹配追踪算法具有很高的时频分辨率并具有较好的能量聚焦特性，能够准确地分辨出地震信号的真实特征及地震轴产状。通过对楔形模型的反射信号进行匹配追踪反演得到反射系数剖面及波阻抗剖面，在地层厚度大于常规地震可分辨的厚度（上下地层间距大于 $\lambda/4$）时，随着地层变薄，反演剖面地震轴的连续性好，反射特征清晰且无干扰。当上下地层间距在调谐厚度附近时，虽然地震轴连续性降低，剖面上局部出现了扰动，但依然可以根据反演结果得到的反射系数剖面和波阻抗剖面看出地震轴的产状及走势，且尖灭点清晰，可以表征储层的横向展布范围及尖灭位置，对渤海 PL 油田这种河流相油田储层研究具有很好的指导意义。

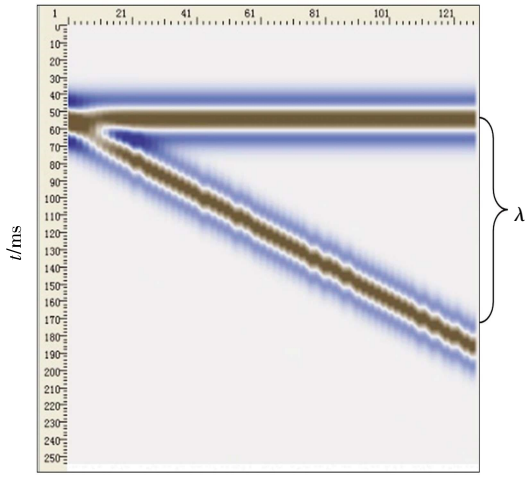
2.1 模型分析

本节主要通过对楔形体正演模型的反演来证实该方法对储层识别具有较好的适用性。首先建立楔形模型，如图5(a)所示，横坐标代表地震道，纵坐标代表时间，单位为 ms，采样间隔是 0.002 s，以 Ricker 子波作为地震激发子波，合成记录如图5(a)中的棕色地震轴，其中蓝色部分为子波旁瓣。

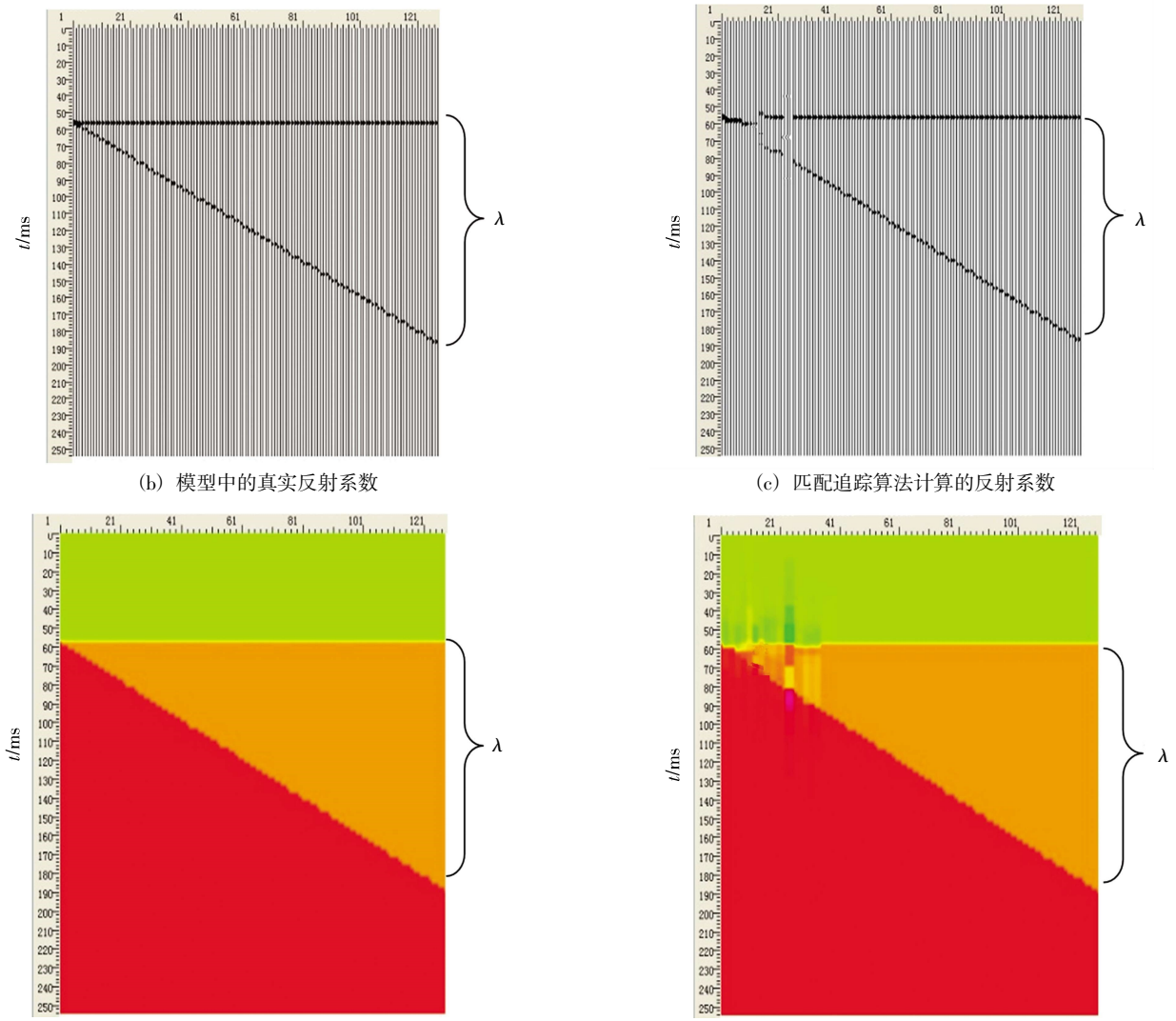
图5(b)和图5(d)分别显示了模型中的真实反射系数和真实波阻抗，图5(c)和图5(e)则分别显示了用匹配追踪算法计算的反射系数值和阻抗值。从图5(c)可以看出，当储层上下两层之间的距离大于 $\lambda/4$ 时，匹配追踪算法可以精确地导出模型中反射系数的值和位置，当两层之间的距离小于 $\lambda/4$ 时，由于受到调谐效应的影响，反射系数的大小和位置都有轻微的偏差，但它仍然可以代表地震同向轴的趋势。对比图5(d)和图5(e)，不难看出，用这种方法可以显示模型中的地层产状的基本信息，即使当上下两套储层之间的距离小于 $\lambda/4$ 时，波阻抗的计算结果仍然是准确的，反演结果的波阻抗剖面上可以看到尖灭点较清晰，在储层厚度小于 $\lambda/4$ 时的地震轴产状和走势都可以得到很好的还原。

2.2 实际地震资料分析

渤海矿区 PL 油田储层沉积特征主要以河流相沉积为主，薄互层占比较大，其中主要目的层明下段64%的储层单层厚度小于4 m，明化镇组地层主要属于曲流河沉积，砂体横向变化块，多呈窄条带状分布，砂体连续性相对较差，而匹配追踪系数反演方法在播出层预测上具有较大的优势[10]，基于储



(a) 楔形正演模型



(b) 模型中的真实反射系数

(c) 匹配追踪算法计算的反射系数

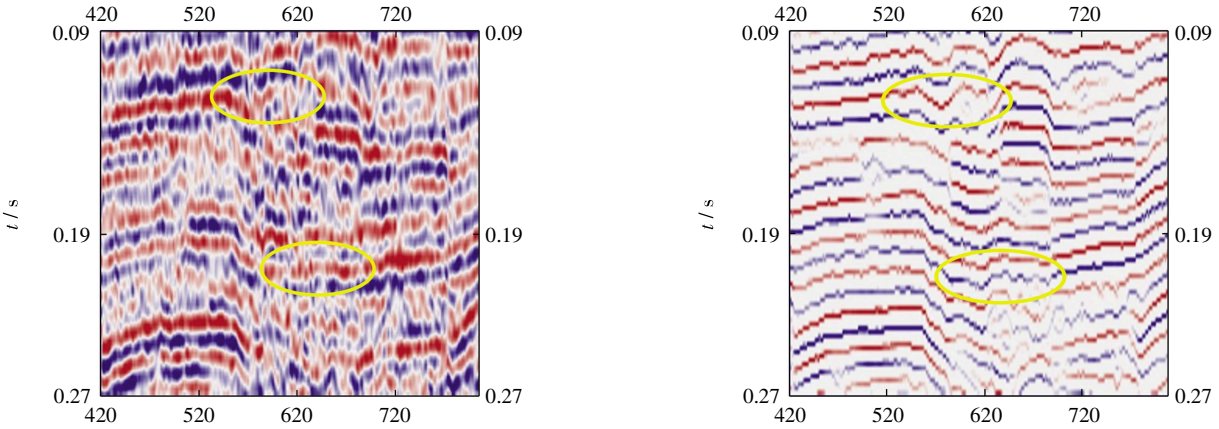
(d) 模型中的真实波阻抗

(e) 匹配追踪算法计算的波阻

图 5　匹配追踪算法计算的波阻抗与模型真实数据对比

层特点将该方法应用于渤海 PL 地区，对薄储层进行有效识别，取得了较好的储层预测效果。

图 6 所示为原始地震剖面及应用匹配追踪反演后得到的地震剖面。如图 6(a)所示，该区域的地震轴横向连续性较差，难以进行储层横向追踪，无法有效判断储层的走势及尖灭情况，为进行储层



(a) 原始叠后地震剖面

(b) 匹配追踪反演结果剖面

图 6　匹配追踪反演结果

预测工作带来了很大的困难。通过对图6(a)的地震资料进行基于匹配追踪的反射系数反演，得到如图6(b)所示剖面。对比两张剖面地震同向轴可以发现，受到储层横向厚度变化的影响，原始地震剖面椭圆形区域内存在地震轴有杂乱反射的特征，这种特征与上下地层地震轴产状出现差异，上下地层地震轴均表现为光滑、连续性较好的波组特征。椭圆区域内地震轴表现的受调谐作用影响导致的连续性变差的波组特性，在工区内已经被已钻井证实。反演结果剖面显示出地震储层横向连续性很好，与实际钻探认识一致，可作为下一步该区域勘探工作开展的依据。

3 结 论

渤海PL油田工区内储层主要分布在明下段和馆陶组，这两个时期沉积特征主要体现的是从浅湖沉积体系到河流沉积体系的变化的过程。本文讨论的明化镇组明下段即为渤海PL油田储层主要分布层段之一，该层段整体表现出河流在泛滥平原上的摆动特征，储层多以薄砂层为主，因此该工区内目的层砂体普遍较薄，多呈薄互层分布特征。薄互层发育的地层在剖面上容易形成调谐效应导致的地震轴反射杂乱的特征，存在难以分辨的问题。减轻调谐效应导致的干扰现象是研究该工区储层分布的重点，清晰的地震轴产状能够成为储层研究的有力依据。

匹配追踪算法应用于地震波阻抗反演，对薄储层的分辨具有很好的优势，本文在模型中对这种优势进行了展示，并通过实际地震资料和模型试验验证了该算法的有效性。匹配追踪算法对地震信号进行反演，具有较高的精度，在实际工作中如需要对薄储层的厚度、平面分布及尖灭点进行精细研究，可多应用该方法进行分析，会有很好的参考价值。

参考文献：

[1] MALLAT S G，ZHANG Z. Matching pursuit with time-frequency dictionaries[J]. IEEE Transactions on Signal Processing，1993，41：3397-3415.

[2] CASTAGNA J P，Sun S J，SIEGFRIED W R. Instantaneous spectral analysis: Detection of low-frequency shadows associated with hydrocarbons[J]. The Leading Edge，2003，22：120-127.

[3] 武国宁，曹思远，孙娜. 基于复数道地震记录的匹配追踪算法及其在储层预测中的应用[J]. 地球物理学报，2012，55(6)：2027-2034.

[4] 张繁昌，李传辉，印兴耀. 三角洲砂岩尖灭线的地震匹配追踪瞬时谱识别方法[J]. 石油地球物理勘探，2012，47(1)：82-88.

[5] 王纯伟，薛念. 利用匹配追踪算法去除地震资料中的随机噪声[J]. 科协论坛，2010，1：100-101.

[6] 程文波，王华军. 信号稀疏表示的研究及应用[J]. 西南石油大学学报，2008，30(5)：148-151.

[7] 张繁昌，兰南英，李传辉，等. 地震匹配追踪技术与应用研究进展[J].石油物探，2020，59(4)：491-504.

[8] 张繁昌，李传辉，印兴耀. 基于动态匹配子波库的地震数据快速匹配追踪[J]. 石油地球物理勘探，2010，45(1)：667-673.

[9] 张繁昌，刘汉卿，代荣获. 基于Ricker子波的指数追踪地震信号分解算法[J]. 中国矿业大学学报，2016，45(1)：132-136.

[10] 杨军. 匹配追踪技术在薄互层砂体预测中的应用[J]. 西部探矿工程，2018，30(11)：56-59.

The Application of Reflection Coefficient Inversion Based on Matching Pursuit in Bohai PL Oilfield

WEI Tiangang, LI Fuqiang, LI Jiu, ZHOU Jianke

(Tianjin Branch of CNOOC (China) Co., Ltd., Tianjin 300450, China)

Abstract: The reservoir sedimentary environment of PL oilfield in Bohai Sea area is mainly fluvial facies and shallow delta facies, and thin interbeds are developed. In particular, it is difficult to distinguish thin reservoirs after tuning thickness produces tuning effect, which brings great difficulties to oil and gas exploration and development. The matching tracking used in this paper is a method of sparse decomposition of seismic signals, which has high resolution accuracy for thin reservoirs. When the thickness between the two layers reaches the tuning thickness, this method can still display the size and position of seismic reflection coefficient and effectively indicate the extension direction of reservoirs, therefore, the matching pursuit algorithm can be used as an effective method for seismic impedance inversion of thin interbeds. When analyzing the seismic signal, the waveform of Ricker wavelet is similar to the actual seismic signal. Therefore, this paper applies Ricker wavelet to the matching tracking algorithm, which has a high convergence speed in the inversion application of actual seismic data, provides a good guarantee for the high efficiency of the inversion results, and the inversion results are in good agreement with the actual underground geological characteristics. The calculation of model and seismic data shows that the matching tracking reflection coefficient inversion method is effective in reservoir research in thin interbedded oilfields, which provides a certain reference value for reservoir research in oilfields with similar geological conditions.

Key words: matching pursuit; sparse decomposition; Ricker wavelet