doi: 10.11720/wtyht.2026.1437
王丙钢, 丁成震, 吴建鲁, 等. 两种回转波 FWI 方法对比研究和应用[J]. 物探与化探, 2026, 50(3): 516-524. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1437
Wang B G, Ding C Z, Wu J L, et al. Comparative study and application of two FWI methods for turning waves[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2026, 50(3): 516-524. https://doi.org/10.11720/wtyht.2026.1437

两种回转波 FWI 方法对比研究和应用

王丙钢[1], 丁成震[1], 吴建鲁[2], 李翔[1], 董庆宇[1], 张丹[1]
(1. 东方地球物理公司研究院, 河北涿州 072750; 2. 东方地球物理公司研发中心, 河北涿州 072750)

摘 要: 全波形反演 (full waveform inversion, FWI) 是目前精度最高的速度反演建模技术。该技术通过迭代算法不断更新速度模型, 使正演数据和实际数据的误差不断减小, 从而逼近真实的速度模型。该技术面临的主要问题是跳周现象, 即正演数据和实际数据相差半个周期以上时, 随着速度模型的更新, 正演数据和实际数据会发生错误的匹配, 导致速度模型向错误的方向收敛。传统的最小二乘 FWI 的目标函数只考虑正演数据和实际数据的能量差, 因此, 只能依靠数据中周期较大的低频信息和尽量准确的初始速度模型来尽量避免跳周现象, 对原始数据中低频信号的质量要求较高且初始速度模型建模工作量较大。为了解决该问题, 本文提出时延全波形反演, 其目标函数为正演数据和实际数据的能量差对二者时差的积分, 即目标函数中既考虑二者的能量差, 又考虑二者的时差, 因此可以更好地避免跳周现象, 在原始数据低频信号能量较弱以及初始速度模型误差较大的情况下依然能够使速度模型向正确的方向收敛, 降低了对原始数据中低频信号的依赖, 同时减少了初始速度模型建模的工作量。本文分别利用理论速度模型和实际地震数据进行试验, 对比两种方法的结果, 证明了在初始速度模型误差较大的情况下, 本文提出的时延 FWI 依然可以反演得到更准确的速度模型。本文使用的最小二乘 FWI 和时延 FWI 均为回转波 FWI, 即只使用地震数据中的回转波进行匹配, 不使用反射波。

关键词: 回转波时延全波形反演; 回转波最小二乘全波形反演; 跳周现象; 低频信号; 初始速度模型; 深度偏移
中图分类号: P631.4; P31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2026)03-0516-09

0 引言

FWI 的理论基础由 Tarantola[1-2] 和 Lailly[3] 在 20 世纪 80 年代提出, 即通过最小化正演数据和实际数据的误差的二范数来不断更新速度模型, 从而获得准确的地下速度模型。其后的学者以此为基础开始了对 FWI 方法的不断研究和改进, 使 FWI 算法的精度不断提高, 收敛速度不断加快, 计算成本不断降低[4-9]。FWI 面临的主要问题是跳周现象, 即正演数据和实际数据的误差相差半个周期以上时, FWI 会使正演数据和实际数据向错误的方向匹配, 从而使速度模型向错误的方向收敛。解决该问题主要可以从两方面入手, 即应用方面和算法方面。从应用方面来说, 可以提高低频数据的采集质量并且提高初始速度模型的精度[10-11]。低频数据的周期较大, 在初始速度模型具有相同误差的情况下, 低频数据更不容易发生跳周现象。提高初始速度模型精度的方法主要包括利用初至波层析反演速度模型建立较准确的近地表速度模型, 以及利用反射波层析反演方法建立较准确的中深层初始速度模型[12-14]。在算法方面, 通过改进 FWI 的算法, 可以更好地避免跳周现象, 使速度反演更加准确。Luo 等[15] 提出了将正演数据和实际数据的走时差异作为目标函数, 通过最小化该走时差异来更新速度模型, 可以较好地避免跳周现象, 其中走时差异主要是通过对正演数据和实际数据做互相关, 利用互相关的极大值和零时间的时差来计算走时差异。Choi 等[16] 提出了相位缠绕的频率域 FWI 方法, 可以减小正演数据和实际数据的相位差异。Bi 等[17] 提出了将相位差大于半个

收稿日期: 2025-12-30; **修回日期:** 2026-03-31
基金项目: 中国石油天然气股份有限公司重大科技专项资助(2021-DJ-34-01)
第一作者: 王丙钢(1987-), 男, 工程师, 主要从事地震资料处理方面的工作与研究。 Email: 958552598@qq.com

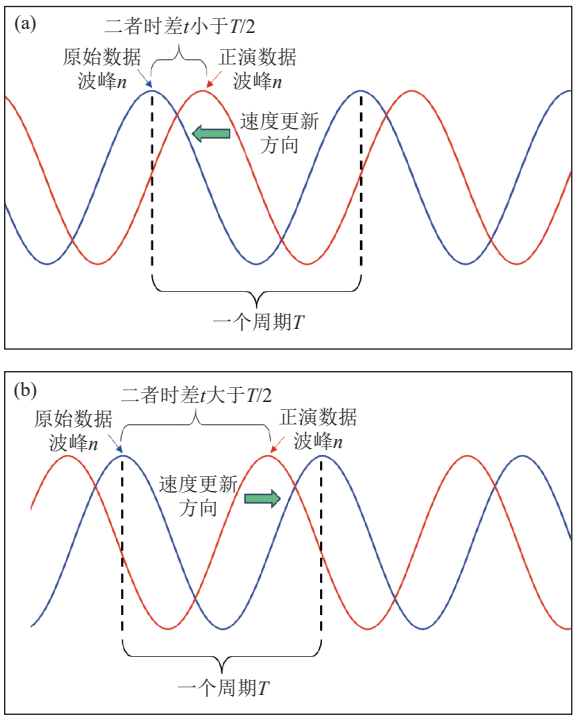
周期的数据进行切除的数据选择策略来进行 FWI, 从而规避跳周现象。Wu 等[18] 提出了利用地震数据的包络来建立目标函数进行 FWI, 可以有效对低频数据进行补偿, 从而更好地避免跳周现象。杨贺龙等[19] 利用波场相位时移算法对正演数据进行预处理来提高正演数据和实际数据的匹配度, 从而更好地避免跳周现象。整体上来说, 目标函数只考虑正演数据和实际数据的振幅差异而不考虑二者时差的方法统称为最小二乘 FWI 方法, 该类方法容易出现跳周现象, 对原始数据的低频信息和初始速度模型的准确度要求较高。而考虑正演数据和实际数据时差的 FWI 方法统称为时延 FWI 方法, 该类方法更不容易出现跳周现象, 反演更稳定, 反演速度结果更加准确。本文在前人的研究成果上, 提出了一种新的时延 FWI 方法, 该方法将目标函数设计为正演数据和实际数据的能量差对二者时差的积分, 即目标函数中既考虑二者的时差又考虑二者的能量差。该新方法有两方面的优势: ①该方法相对于最小二乘 FWI 方法可以更好地避免跳周现象; ②大部分时延类 FWI 方法在正演数据和实际数据的时差较小时难以对速度模型进行有效地更新, 而新方法由于同时考虑了正演数据和实际数据的能量差, 因此在二者时差较小时, 依然可以通过正演数据和实际数据的能量差来更新速度模型。

本文利用 BGP 速度模型试验和实际生产地震数据进行试验, 对比了传统的最小二乘 FWI 和时延 FWI 的结果, 证明了在初始速度模型误差较大的情况下, 后者的反演过程更稳定, 反演结果更准确。本文使用的时延 FWI 方法是在前人研究成果的基础上自主研发的时延 FWI 算法, 试验结果验证了其相对于传统最小二乘 FWI 方法的优越性。在本文中只比较了新的时延 FWI 方法和传统最小二乘 FWI 方法, 而将新的时延 FWI 方法和其他时延 FWI 方法进行对比则会在以后的研究中进行。另外, 本文使用的最小二乘 FWI 和时延 FWI 均为回转波 FWI, 即只使用地震数据的回转波信息进行速度模型反演, 不使用反射波信息。为了便于描述, 在下文中将回转波最小二乘 FWI 和回转波时延 FWI 均简称为最小二乘 FWI 和时延 FWI。

1　基本原理

1.1　跳周现象

当初始速度模型误差较小时, 正演数据和实际数据的误差小于半个周期, 在这种情况下, 随着 FWI 的迭代运算以及速度模型的不断更新, 正演数据的波形会向着原始数据的波形不断靠近, 直至二者达到较好的匹配程度, 同时得到比较准确的地下速度模型, 如图 1a 所示。而当初始速度模型误差较大时, 正演数据和实际数据的误差相差半个周期以上时, 随着 FWI 的迭代运算以及速度模型的不断更新, 正演数据会向错误的方向不断变化, 并最终与实际数据发生错误的匹配, 同时得到一个误差更大的速度模型, 如图 1b 所示。



a—正演数据和实际数据的误差小于半个周期, 无跳周现象; b—正演数据和实际数据的误差大于半个周期, 有跳周现象

a—the misfits between forward modeling data and real data is less than half a cycle, without cycle skipping occurring; b—the misfits between forward modeling data and real data is greater than half a cycle, with cycle skipping occurring

图 1　跳周现象示意

Fig. 1　Schematic of cycle-skipping phenomenon

拓宽实际数据的低频信息和建立更准确的初始速度模型是避免 FWI 跳周现象的主要方法。但是, 野外采集得到的地震数据质量是客观存在的, 通过信号处理的方法来拓宽低频信号的能量也是有限的。建立更准确的初始速度模型也需要大量的时间和人力成本。因此, 在实际地震数据质量较差以及建立准确的初始速度模型难度较大的情况下, 可以采用时延 FWI 技术, 该技术将正演数据和实际数据的时差引入目标函数, 其目标函数为正演数据和实际数据的能量差对二者时差的积分, 通过迭代算法使目标函数不断减小来优化速度模型, 该技术相对

于常规的最小二乘 FWI 方法能够更好地避免跳周现象，可以更稳定地应对低频信号能量较差的地震资料，得到更准确的速度模型，更多地节省人力物力成本。

1.2　最小二乘 FWI

常规的最小二乘 FWI 的目标函数是正演数据和实际数据误差的二范数[1-3]，如式 (1) 所示：

$$E(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}\|L(\boldsymbol{m})-\boldsymbol{d}_{\text{obs}}\|^2, \tag{1}$$

式中：$\boldsymbol{m}$是地下速度模型；$E(\boldsymbol{m})$代表目标函数；L是正演算子；$L(\boldsymbol{m})$代表正演数据；$\boldsymbol{d}_{\text{obs}}$代表实际数据。通过最小二乘 FWI 迭代运算不断更新地下速度模型$\boldsymbol{m}$，从而使$E(\boldsymbol{m})$不断减小，最终得到准确的速度模型。

最小二乘 FWI 的迭代更新公式如式 (2) 所示：

$$\boldsymbol{m}_{n+1}=\boldsymbol{m}_n+\alpha_n\nabla\boldsymbol{E}(\boldsymbol{m}_n), \tag{2}$$

式中：$\boldsymbol{m}_n$是第 n 次迭代的速度模型；$\boldsymbol{m}_{n+1}$是第 n+1 次迭代的速度模型；α_n是第 n 次迭代的更新步长；$\nabla\boldsymbol{E}(\boldsymbol{m}_n)$是目标函数$\boldsymbol{E}(\boldsymbol{m})$在$\boldsymbol{m}_n$处的更新梯度，是目标函数关于速度模型$\boldsymbol{m}_n$的偏导数，更新梯度表示目标函数下降的方向。更新梯度由式 (3) 求取：

$$\nabla\boldsymbol{E}(\boldsymbol{m}_n)=\frac{\partial L(\boldsymbol{m}_n)}{\partial\boldsymbol{m}_n}[L(\boldsymbol{m}_n)-\boldsymbol{d}_{\text{obs}}], \tag{3}$$

式中：$\frac{\partial L(\boldsymbol{m}_n)}{\partial\boldsymbol{m}_n}$表示第 n 次迭代的正演数据相对于第 n 次迭代的速度模型的偏导数。

最小二乘 FWI 的迭代过程如图 2 所示。达到设定的迭代次数或者目标函数足够小是判定迭代停止的标准。

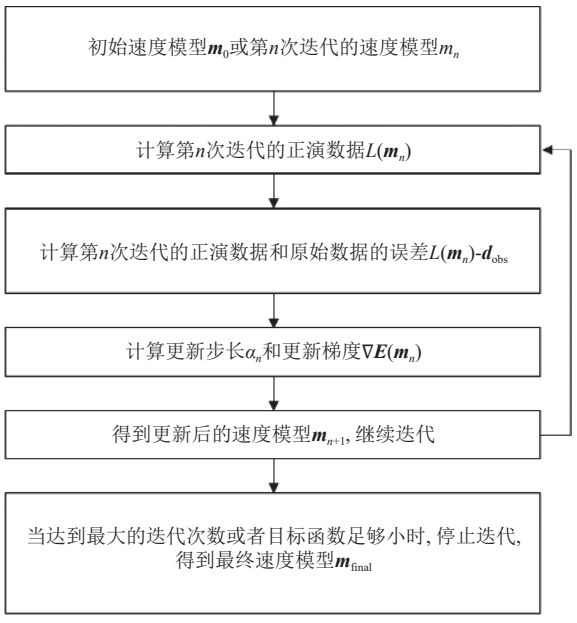


图 2　最小二乘 FWI 的迭代流程

Fig. 2　Iterative workflow of least-squares FWI

1.3　时延 FWI

时延 FWI 与最小二乘 FWI 最大的不同是前者在目标函数中考虑了正演数据和实际数据的时差。因而有更强的抗周波跳跃能力。传统时延 FWI 的目标函数只考虑正演数据和实际数据的时差，不考虑二者的振幅差异，其目标函数如式 (4) 所示：

$$\Phi(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}\|\omega\|^2, \tag{4}$$

式中：$\Phi(\boldsymbol{m})$是目标函数；ω是正演数据和实际数据的时差。该方法虽然抗“跳周”能力较强，但是其主要缺点是当正演数据和实际数据的时差较小时，对速度模型难以进行有效地更新。

本文使用的时延 FWI 算法是在前人研究成果的基础上自主研发的算法，其目标函数为正演数据和实际数据的能量差对二者时差的积分，该方法既考虑正演数据和实际数据的时差，又考虑二者的能量差。新的时延 FWI 算法集合了传统时延 FWI 方法和最小二乘 FWI 方法的优点，不仅具有更好的抗“跳周”能力，同时在正演数据和实际数据的时差较小时，依然可以依靠正演数据和实际数据的能量差来对速度模型进行有效地更新。其目标函数如式 (5) 所示：

$$\Phi(\boldsymbol{m})=\int_0^{\omega}\frac{\partial\|L(\boldsymbol{m})-\boldsymbol{d}_{\text{obs}}\|^2}{\partial\omega}\mathrm{d}\omega, \tag{5}$$

式中：$\boldsymbol{m}$ 是地下速度模型；$\Phi(\boldsymbol{m})$是目标函数；ω是正演数据和实际数据的时差；$\frac{\partial\|L(\boldsymbol{m})-\boldsymbol{d}_{\text{obs}}\|^2}{\partial\omega}$表示正演数据和实际数据的能量差对时间的偏导数。$\omega$可以利用正演数据和实际数据的互相关的极大值和零时间的距离来求取得到，如式 (6) 所示：

$$\omega=\text{argmax}_{\tau}\int_{t_1}^{t_2}d(t+\tau)u(t)\mathrm{d}t, \tag{6}$$

式 (6) 表示求取实际数据 d 和正演数据 u 的互相关的极大值和零时间的距离。

时延 FWI 的速度模型迭代公式如式 (7) 所示：

$$\boldsymbol{m}_{n+1}=\boldsymbol{m}_n+\alpha_n\nabla\Phi(\boldsymbol{m}_n), \tag{7}$$

式中：$\boldsymbol{m}_{n+1}$是第 n+1 次迭代的速度模型；$\boldsymbol{m}_n$是第 n 次迭代的速度模型；α_n是第 n 次迭代的更新步长；$\nabla\Phi(\boldsymbol{m}_n)$是第 n 次迭代的更新梯度。更新梯度可以由式 (8) 计算得到：

$$\nabla\Phi(\boldsymbol{m}_n)=\omega_n\frac{\partial L(\boldsymbol{m}_n)}{\partial\boldsymbol{m}_n}[L(\boldsymbol{m}_n)-\boldsymbol{d}_{\text{obs}}], \tag{8}$$

式中：ω_n是第 n 次迭代正演数据和实际数据的时差。

时延 FWI 的速度迭代更新流程如图 3 所示，和最小二乘 FWI 的主要区别在于二者的目标函数不同，以及更新梯度的求取方法不同。

和最小二乘 FWI 相比，新的时延 FWI 算法由于在目标函数和速度模型的迭代过程中考虑了正演数据和实际数据的时差，因而可以更好地避免由于原

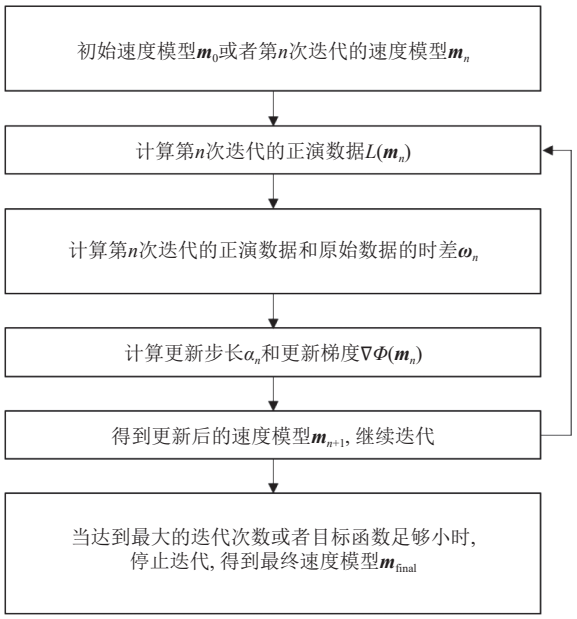


图 3　时延 FWI 的迭代流程

Fig. 3　Iterative workflow of time-lag FWI

始数据低频缺失以及初始速度模型不准确造成的跳周现象, 能够更好地适应低频信号质量较差的地震资料, 有效地降低了初始速度模型建模的工作量, 可以得到更准确的速度模型。

2　时延 FWI 和最小二乘 FWI 效果对比

本文利用的最小二乘 FWI 方法和时延 FWI 方法所利用的数据均为地震数据中的“回转波”, 即靠近地震数据初至的部分, 没有利用地震数据中的反射波。下面分别利用 BGP 模型数据和实际生产数据来对比最小二乘 FWI 和时延 FWI 的效果。由于没有拿到传统时延 FWI 的具体算法, 因此没有对传统时延 FWI 方法和本文提出的新的时延 FWI 方法的效果进行对比。只是验证了本文提出的新的时延 FWI 方法相对于传统最小二乘 FWI 方法的优势。

2.1　BGP 模型试验

首先采用 BGP 速度模型进行试验。BGP 速度模型为海洋速度模型, 最终面为零米, 水深为 500 m 左右。该速度模型横向宽度为 15 000 m, 垂向深度为 7 000 m。海面到海底之间为常数水速为 1 500 m/s, 海底以下由不整合构造、断层构造、单斜构造、背斜构造、盐体构造、油气散射点构造等组合而成的复杂构造地质体, 其速度范围在 2 000~4 200 m/s 之间, 如图 4 所示。速度模型横向 15 km, 垂向深度 6 km, 利用该速度模型正演单炮, 炮点距和检波点距均为 50 m, 总共设计 301 个炮点和 301 个检波点, 炮检点水深均为 10 m, 炮点激发, 所有检波点全部接收, 不设计滚进滚出, 即每炮均为 301 道, 道长为 8 s。正演速度模型网格为横向 25 m, 垂向 5 m, 正演频率范围为 2~10 Hz。分别使用时延 FWI 和最小二乘 FWI 进行速度反演试验。将 BGP 速度模型进行一个横向 5 000 m、垂向 1 000 m 的大尺度平滑, 将平滑后的速度模型作为 FWI 的初始速度模型, 如图 5 所示。分别使用最小二乘 FWI 和时延 FWI 进行 20 次反演迭代, 频带范围均为 2~10 Hz, 得到结果如图 6 和图 7 所示。对比两个结果可以发现, 使用时延 FWI 得到的反演速度模型和真实的速度模型更加接近, 反演得到的速度模型细节更多, 更加准确。说明在速度误差较大的情况下, 时延 FWI 比最小二乘 FWI 更有

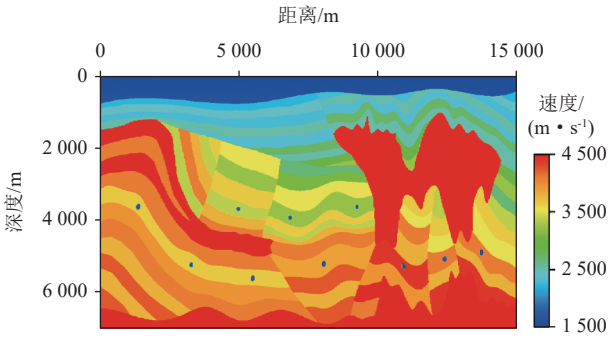


图 4　BGP 速度模型

Fig. 4　BGP velocity model

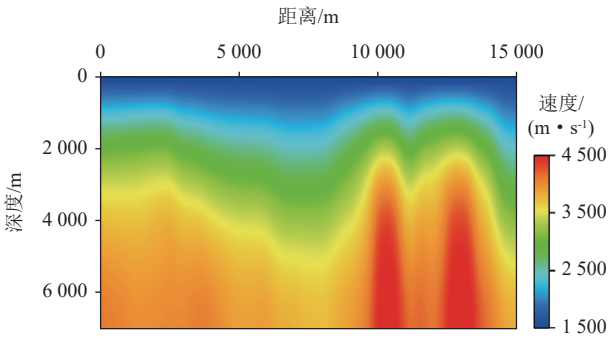


图 5　平滑后的 BGP 速度模型, 即 FWI 初始速度模型

Fig. 5　BGP velocity model after smooth, serve as FWI initial velocity model

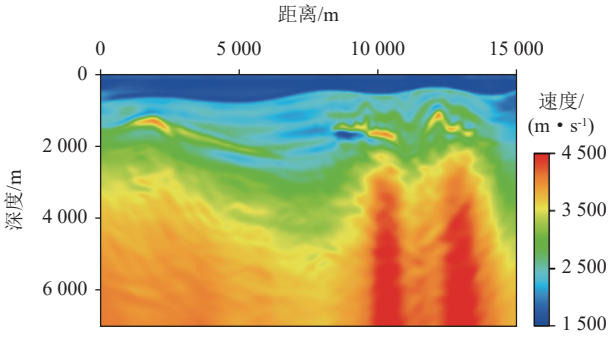


图 6　最小二乘 FWI 方法 20 次迭代后得到的速度模型

Fig. 6　Velocity model after 20 iterations by least squares FWI

优势。同时可以发现，不论是应用最小二乘 FWI 还是时延 FWI，二者收敛得到的速度模型依然和实际速度模型有较大差距，尤其在深层时差距较大，且对速度模型右侧的盐体屏蔽区域的速度更新依然有较大误差。出现该问题的主要原因是本文使用的两种 FWI 方法均为“回转波”FWI，即只利用数据中的回转波，而不能利用数据中的“反射波”，回转波 FWI 对速度模型的最大有效更新深度约为最大偏移距的 1/3，本模型中根据炮位置的不同，单炮的最大偏移距为 7 500~15 000 m(中间的炮最大偏移距为 7 500 m，边界炮的最大偏移距为 15 000 m)，因此，对速度模型的最大有效更新深度约为 2 500~5 000 m。相对于反射波 FWI，回转波 FWI 对速度模型的更新深度较浅，在应对特别复杂的构造特别是存在速度反转的盐体屏蔽构造时，其速度更新能力也有一定的局限性。

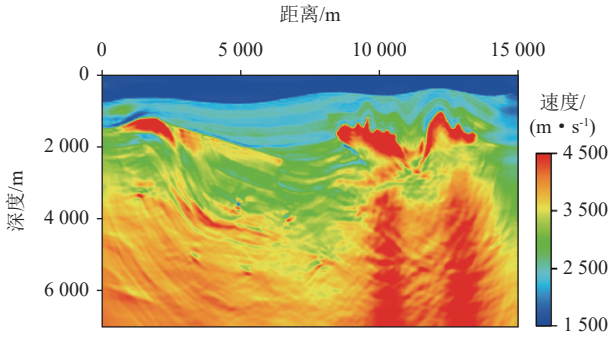


图 7　时延 FWI 方法 20 次迭代后得到的速度模型

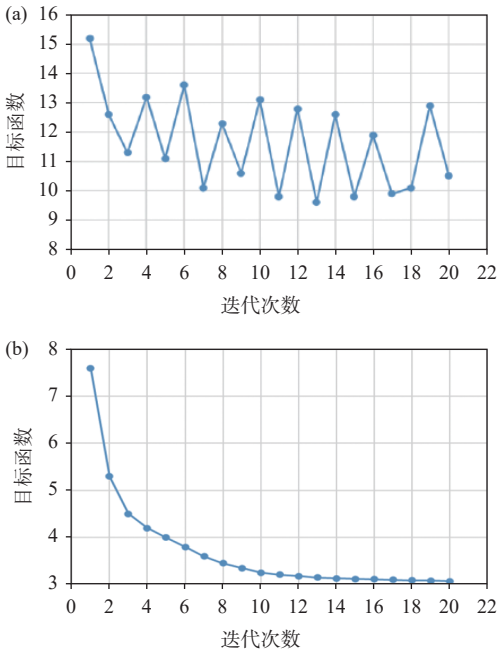
Fig. 7　Velocity model after 20 iterations by time-lag FWI

图 8 为两种 FWI 方法的目标函数下降曲线。图 8a 为最小二乘 FWI 的目标函数下降曲线，虽然整体有下降趋势，但是“跳跃”现象明显，目标函数的收敛过程不稳定。图 8b 为时延 FWI 的目标函数下降曲线，目标函数为持续下降趋势，收敛过程稳定。

图 9 为正演单炮和实际单炮的交叉显示。图 9a 为初始速度模型的正演单炮和实际单炮的交叉显示，二者匹配较差，同相轴有明显的错断现象。图 9b 为最小二乘 FWI 得到的速度模型的正演单炮和实际单炮的交叉显示，可见，同相轴发生了错误的匹配，即发生了“跳周”现象。图 9c 为时延 FWI 得到的速度模型的正演单炮和实际单炮的交叉显示，可见二者同相轴匹配良好且没有发生错误的匹配，说明速度场得到了正确的收敛。

2.2　实际生产数据试验

选取某区块海洋地震数据为试验数据。该区块为浅海 OBN 数据，炮线距为 50 m，炮点距为 25 m，检波线距 200 m，检波点距 100 m，炮线和检波线平行，双边接收，工区中间的单炮的最大纵向偏移距为



a—最小二乘 FWI; b—时延 FWI

a—least-squares FWI; b—time-lag FWI

图 8　目标函数的收敛过程

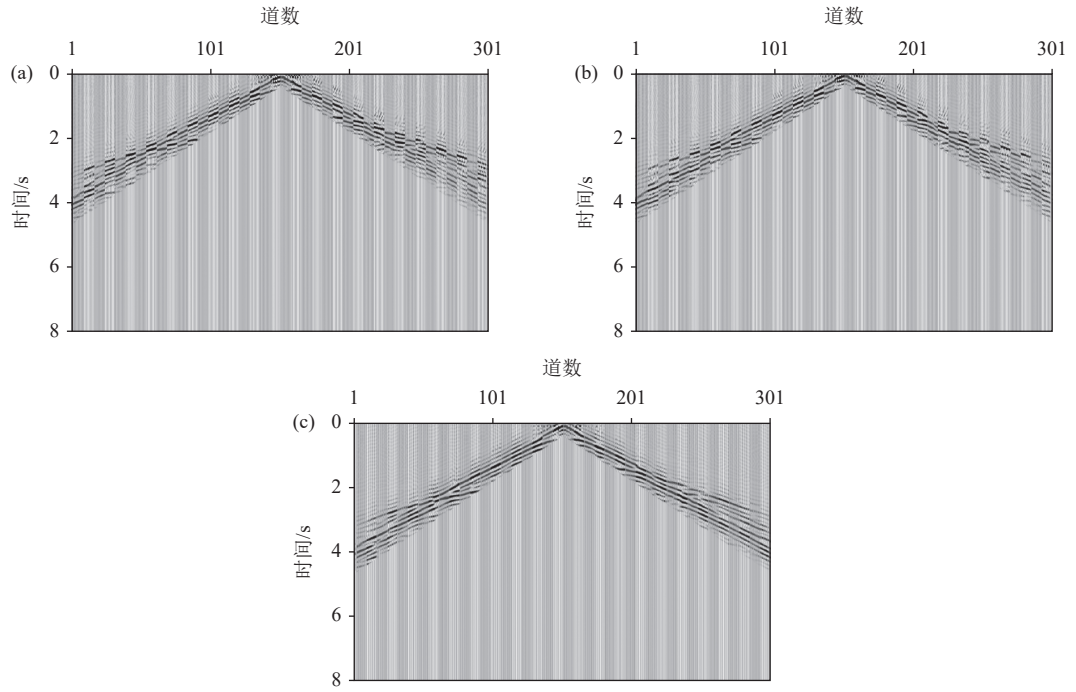
Fig. 8　Convergence process of the objective function

8 km，工区两侧边缘的激发炮的最大纵向偏移距可达 16 km。选取相邻的炮线和检波线进行模拟二维线试验，将炮点和检波点互换。通过以下 3 个步骤建立初始速度模型：①使用 Dix 公式将时间偏移域的均方根速度直接转成深度域层速度；②对深度域层速度模型进行水平 5 000 m，垂向 200 m 的平滑；③将平滑后的速度模型乘以 105%。通过以上 3 个步骤，得到一个非常简单、精度较低的初始速度模型。分别使用时延 FWI 和最小二乘 FWI 进行 17 次迭代，频带范围均为 2~10 Hz。目标函数的迭代收敛过程如图 10 所示。

由图 10 可以看出，随着迭代过程的进行，二者的目标函数整体都是下降的，但是时延 FWI 的目标函数下降的过程更加稳定，没有中途上升的现象。

由图 11a 可以看出，由于初始速度模型的精度较低，因此正演数据和实际数据误差较大，同相轴匹配较差。图 11b 为最小二乘 FWI 后的正演数据和实际数据交叉显示，从同相轴的强弱程度来看，虽然有些同相轴貌似对齐了，但是实际上是正演数据和实际数据发生了错误的匹配，即发生了跳周现象。图 11c 为时延 FWI 后的正演数据和实际数据的交叉显示，可以发现正演数据和实际数据匹配正确且匹配良好，没有发生跳周现象。

由图 12a 可以看出，初始速度模型整体比较平滑，没有速度异常体。深度偏移剖面也显示该区为

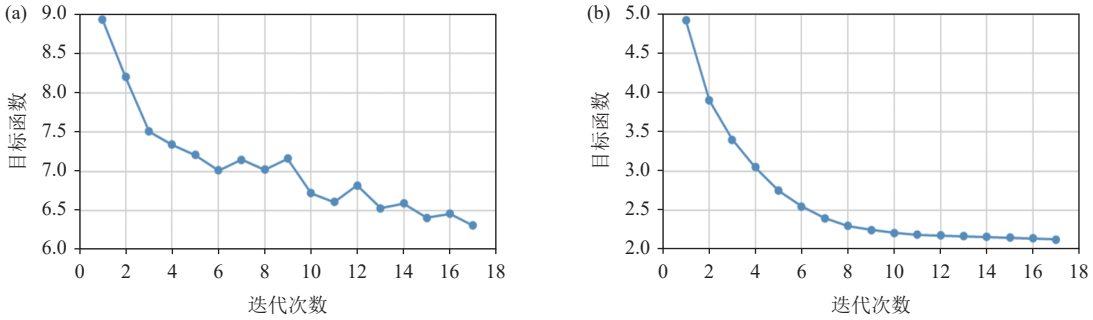


a—初始速度模型的正演数据和实际数据交叉显示; b—最小二乘 FWI 的速度模型的正演数据和实际数据交叉显示; c—时延 FWI 速度模型的正演数据和实际数据交叉显示

a—interleaved display of forward modeling data with initial velocity model and real data; b—interleaved display of forward modeling data with least squares FWI velocity model and real data; c—interleaved display of forward modeling data with time-lag FWI velocity model and real data

图 9　正演数据和实际数据的交叉显示

Fig. 9　Interleaved display of forward modeling data and real data



a—最小二乘 FWI; b—时延 FWI

a—least-squares FWI; b—time-lag FWI

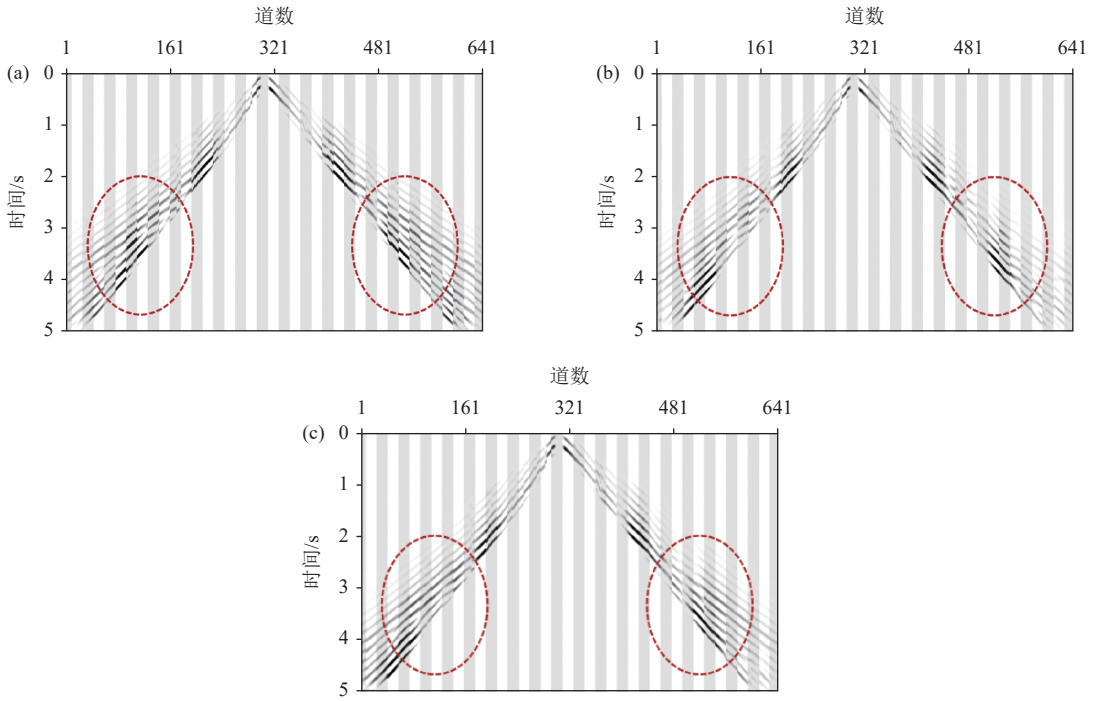
图 10　目标函数的收敛过程

Fig. 10　Convergence process of the objective function

较为稳定的背斜构造, 没有异常构造体。而图 12b 的最小二乘 FWI 得到的速度模型显示有较多的速度异常体, 和该区的地质条件不吻合, 判断其为跳周现象引起的速度模型向错误的方向收敛导致的速度异常。图 12c 中时延 FWI 后的速度模型整体依然较为平滑, 和地质构造大致吻合, 没有出现速度异常体, 说明时延 FWI 避免了跳周现象, 得到了一个稳定的收敛结果。

图 13a 为初始速度模型的深度偏移剖面, 可以发现红圈中的背斜构造和绿色箭头所指的同相轴成像并不十分清晰。图 13b 为最小二乘 FWI 后的深度偏移剖面, 红色圆圈中的背斜构造成像并没有变好, 反而变得更差, 背斜顶部出现同相轴交叉的现象。绿色箭头所指的同相轴也没有变好的趋势。图 13c 为时延 FWI 后的深度偏移剖面, 可以发现红色圆圈中的背斜构造和绿色箭头所指的同相轴的成像明显变好, 同相轴的能量更强、连续性更好, 成像更加清晰。

图 14 为初始速度、最小二乘 FWI 速度、时延 FWI 速度和井曲线速度的对比。可以发现, 初始速度准确度较差, 明显高于井曲线速度, 最小二乘 FWI 得到的速度和井曲线吻合度较差, 而时延 FWI 得到的速度和井曲线吻合较好。

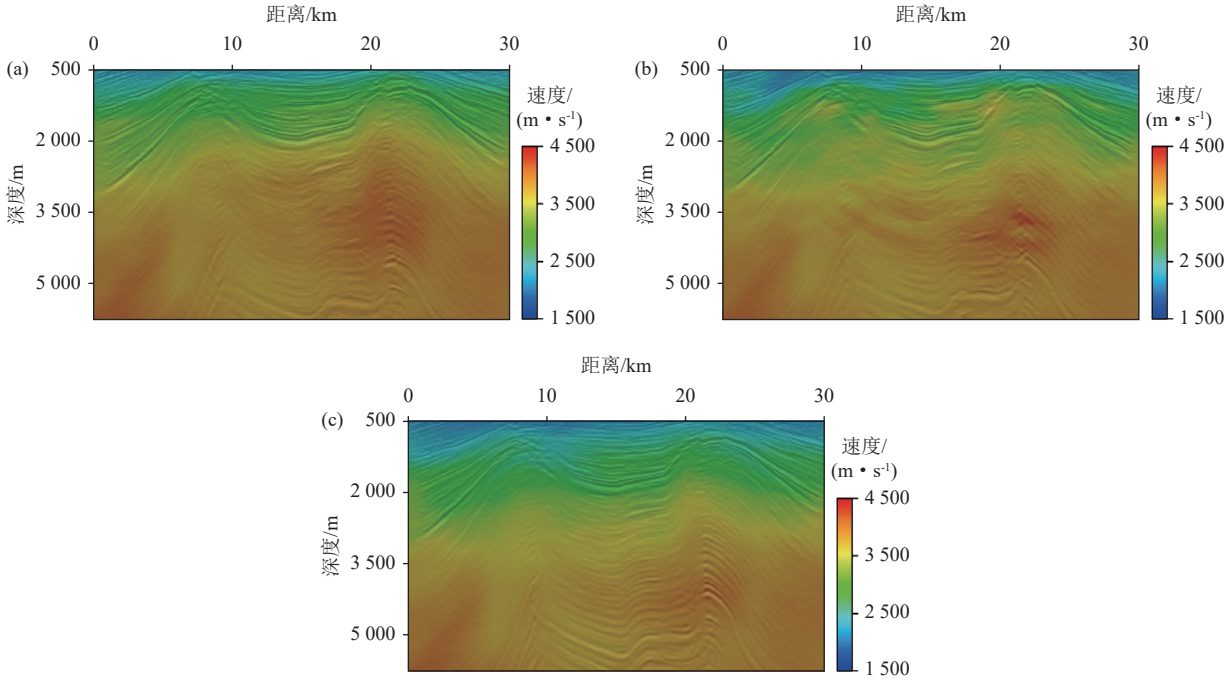


a—初始速度模型的正演数据和实际数据交叉显示；b—最小二乘 FWI 得到的速度模型的正演数据和实际数据交叉显示；c—时延 FWI 得到的速度模型的正演数据和实际数据交叉显示

a—interleaved display of forward modeling data with initial velocity model and real data; b—interleaved display of forward modeling data with least squares FWI velocity model and real data; c—interleaved display of forward modeling data with time-lag FWI velocity model and real data

图 11　正演数据和实际数据的交叉显示

Fig. 11　Interleaved display of forward modeling data and real data

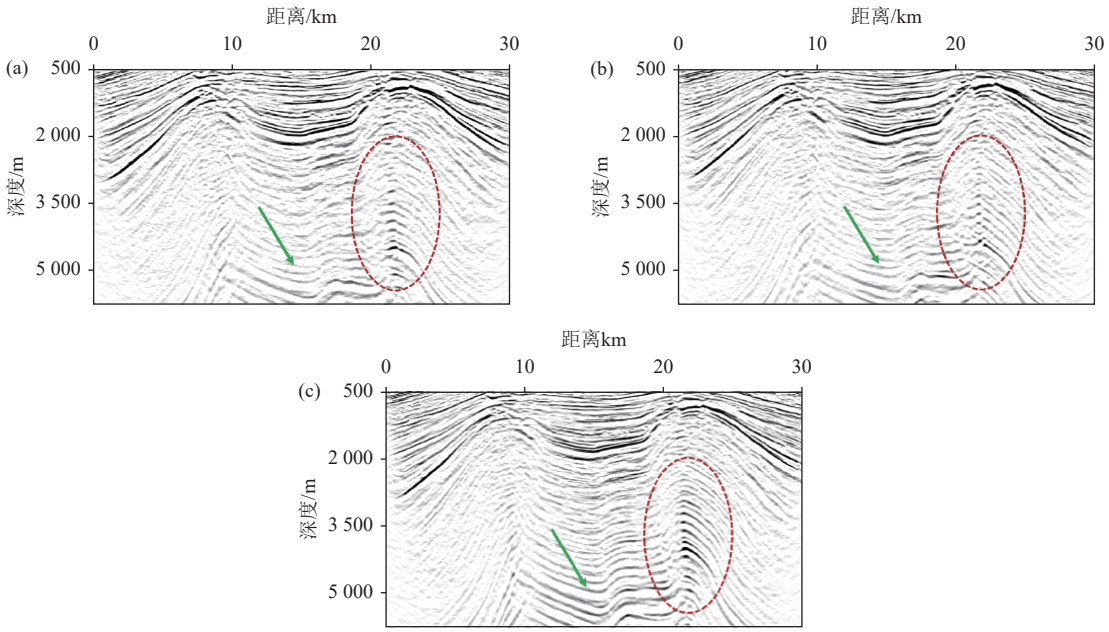


a—初始速度模型及其对应的深度偏移剖面；b—最小二乘 FWI 的速度模型及其对应的深度偏移剖面；c—时延 FWI 的速度模型及其对应的深度偏移剖面

a—initial velocity model and its PSDM section; b—least squares FWI velocity model and its PSDM section; c—time-lag FWI velocity model and its PSDM section

图 12　速度模型和深度偏移剖面叠合显示

Fig. 12　Overlay display of velocity model and PSDM section



a—初始速度模型的深度偏移剖面; b—最小二乘 FWI 的速度模型得到的深度偏移剖面; c—时延 FWI 的速度模型得到的深度偏移剖面

a—PSDM section of initial velocity model; b—PSDM section of least squares FWI velocity model; c—PSDM section of time-lag FWI velocity model

图 13　深度偏移剖面

Fig. 13　PSDM section

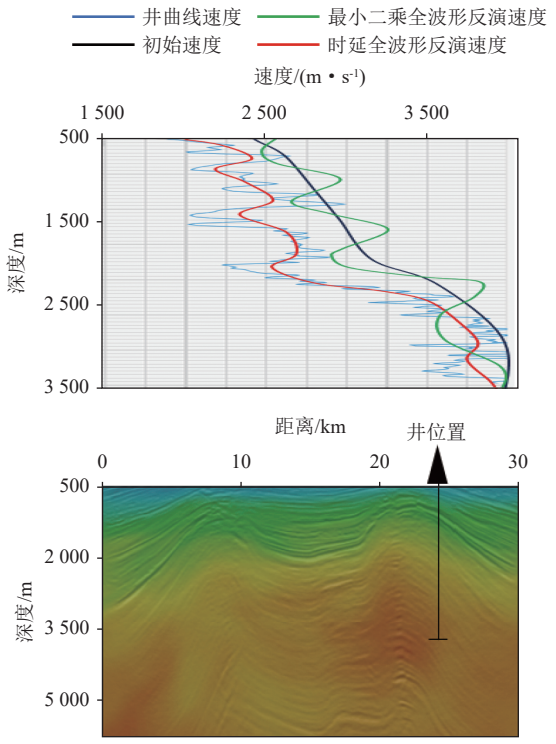


图 14　井曲线速度、初始速度、最小二乘 FWI 速度、时延 FWI 速度对比

Fig. 14　Comparison of well logs, initial velocity, least squares FWI velocity and time-lag FWI velocity

3　结论和认识

本文提出的自主研发的回转波时延 FWI 算法采用正演数据和实际数据的能量差对二者时差的积分为目标函数, 可以更好地避免跳周现象, 能够更好地适应原始数据中缺少长周期低频信息的情况和初始速度模型误差较大的情况。本文首先利用 BGP 速度模型进行试验, 证实了本文提出的时延 FWI 方法的优越性, 然后利用某实际工区的海洋数据进行试验, 设计了一个不准确的初始速度模型, 通过比较回转波最小二乘 FWI 和回转波时延 FWI 的目标函数收敛情况、迭代得到的正演单炮、速度模型和深度偏移剖面, 最终证明了在初始速度模型不准确的情况下, 回转波时延 FWI 可以更好地避免跳周现象, 目标函数收敛更稳定, 速度模型更新更准确, 最终的速度模型和井速度吻合更好, 深度偏移剖面质量更高。在未来 FWI 技术的发展中, 时延 FWI 技术会得到更多的发展, 会使 FWI 大大降低对原始数据低频信号质量的依赖和对初始速度模型准确度的依赖, 降低初始速度建模的人力和物力成本。

参考文献(References):

[1] Tarantola A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation[J]. Geophysics, 1984, 49(8): 1259−1266.

[2] Tarantola A. A strategy for nonlinear elastic inversion of seismic reflection data[J]. Geophysics, 1986, 51(10): 1893−1903.

[3] Lailly P. The seismic inversion problem as a sequence of before stack migrations[C]//Conference on Inverse Scattering: Theory and Application,Society for Industrial and Applied Mathematics, 1983: 206-220.

[4] Pratt R G. Frequency-domain elastic wave modeling by finite differ-

ences: A tool for crosshole seismic imaging[J]. Geophysics, 1990, 55(5): 626−632.
[5] Schuster G T, Quintus-Bosz A. Wavepath eikonal traveltime inversion: Theory[J]. Geophysics, 1993, 58(9): 1314−1323.
[6] Shin C, Ha W. A comparison between the behavior of objective functions for waveform inversion in the frequency and Laplace domains[J]. Geophysics, 2008, 73(5): 119−133.
[7] Tran K T, Mcvay M. Site characterization using Gauss-Newton inversion of 2D full seismic waveform in the time domain[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2012, 43: 16−42.
[8] Liu S, Li X, Wang W, et al. A mixed-grid finite element method with PML absorbing boundary conditions for seismic wave modeling[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2014, 11(5): 5001−5009.
[9] Virieux J, Operto S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics[J]. Geophysics, 2009, 74(6): WCC1−WCC26.
[10] Operto S, Ravaut C, Improta L, et al. Quantitative imaging of complex structures from dense wide-aperture seismic data by multi-scale traveltime and waveform inversions: A case study[J]. Geophysical Prospecting, 2004, 52(6): 625−651.
[11] Brenders A, Pratt G. Efficient waveform tomography for lithospheric imaging: implications for realistic, 2D acquisition geometries and low frequency data[J]. Geophysical Journal International, 2007, 168(1): 152−170.
[12] Symes W. Migration velocity analysis and waveform inversion[J]. Geophysical Prospecting, 2008, 56(6): 765−790.
[13] 王连坤, 方伍宝, 段心标, 等全波形反演初始模型建立策略研究综述 [J]. 地球物理学进展, 2016, 31(4): 1678-1687.
Wang L K, Fang W B, Duan X B, et a1. Review of full waveform inversion initial model building strategy[J]. Progress in Geophysics, 2016, 31(4): 1678-1687.
[14] 王杰, 胡光辉, 刘定进, 等. 陆上地震资料全波形反演策略研究 [J]. 石油物探, 2017, 56(1): 81-88.
Wang J , Hu G H , Liu D J, et a1. Strategy study on full waveform inversion for the land seismic data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(1): 81-88.
[15] Luo Y, Schuster G T. Wave-equation traveltime inversion[J]. Geophysics, 1991, 56: 645−653.
[16] Choi Y, Alkhalifah T. Frequency-domain waveform inversion using the unwrapped phase[J]. Expanded Abstracts of 81st Annual Internat SEG Mtg, 2011: 2576-2580.
[17] Bi H, Lin T. ffective cycle skipping reduction through adaptive data selection for full waveform inversion[C]//Expanded Abstract of 76th EAGE Conference and Exhibition, 2014: 330-340.
[18] Wu R S, Luo J, Wu B. Seismic envelop inversion and modulation signal model[J]. Geophysics, 2014, 79(3): WA13−WA24.
[19] 杨贺龙, 韩立国, 陈雪. 波场相位相关时移全波形反演的实现与验证 [J]. 石油物探, 2013, 52(4): 417-425.
Yang H L,Han L G,Chen X. Wavefield phase correlation shifting full waveform inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2016, 55(4): 568-575.

Comparative study and application of two FWI methods for turning waves

WANG Bing-Gang[1], DING Cheng-Zhen[1], WU Jian-Lu[2], LI Xiang[1], DONG Qing-Yu[1], ZHANG Dan[1]
(1. *Geophysical Research Institute, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou* 072750, *China*; 2. *R & D Center, BGP Inc., CNPC, Zhuozhou* 072750, *China*)

Abstract: Currently, full-waveform inversion (FWI) represents the velocity inversion and modeling technology with the highest accuracy. By continuously updating the velocity model through an iterative algorithm, FWI gradually minimizes the errors between forward modeling data and real data, thereby approaching the true velocity model. The primary challenge faced by FWI is cycle skipping, which occurs when the phase difference between forward modeling data and real data exceeds half a cycle. In this case, with the updating of the velocity model, the forward modeling data and real data will be incorrectly matched, causing the velocity model to converge in a wrong direction. In conventional least-squares FWI, the objective function considers merely the energy difference between forward modeling data and real data. In this case, cycle skipping can only be avoided as far as possible by using the low-frequency signals with high cycles in the data and a sufficiently accurate initial velocity model. This poses stringent demands for the quality of low-frequency signals in raw data and entails a substantial workload for the initial velocity modeling. To address this issue, this study proposes a time-lag FWI (TLFWI) method. In this method, the objective function is defined as the integral of the energy difference between forward modeling data and real data with respect to their time difference. In this manner, the objective function accounts for both the energy difference and time difference between forward modeling data and real data, enabling cycle skipping to be effectively avoided. In the case of weak low-frequency signals in raw data and large errors in the initial velocity model, TLFWI can still enable the velocity model to converge in the correct direction. Therefore, TLFWI reduces the dependence on low-frequency signals in raw data and decreases the workload for constructing the initial velocity model. The results of experiments on a theoretical velocity model and practical seismic data reveal that, compared to least-squares FWI, TLFWI can derive a more accurate velocity model under the condition of high errors in the initial velocity model. Notably, both least squares FWI and TLFWI used in this study are turning wave FWI. In other words, only turning waves in seismic data are used for matching in both methods, with reflected waves excluded.

Key words: turning wave time-lag full-waveform inversion(FWI); turning wave least-squares FWI; cycle skipping; low-frequency signal; initial velocity model; depth migration

（本文编辑：叶佩）