

# 不依赖于子波的声波多尺度全波形反演方法

周 敏<sup>1</sup>, 武 杰<sup>2</sup>

(1. 中国科学技术大学近代物理系, 安徽合肥 230026;  
2. 中国科学技术大学核探测技术与核电子学国家重点实验室, 安徽合肥 230026)

**摘要:** 伴随着油气勘探目标复杂性的日益增加, 对速度场建模和成像方法都提出了更高的要求。声波介质下的全波形反演方法是现阶段精度最高的速度场建模方法, 在复杂介质速度场建模方面具有一定的应用前景。然而, 传统的波形反演方法对地震子波的准确性具有较高的依赖性, 并且在地震数据主频较高的情况下难以得到有效的反演结果。为此, 基于声波方程, 通过修改维纳滤波器, 通过利用参考道构建滤波器, 提出了一种不依赖于子波的全波形反演方法, 能够有效避免波形反演对子波的依赖性。由于滤波器目标子波选取较为自由, 该方法可以与多尺度反演策略有机结合, 实现频率由低到高的递进反演, 能够进一步提高反演的稳定性。理论分析和模型试算证明, 采用不依赖于子波的多尺度反演方法能够有效避免子波提取问题, 在子波错误的情况下可以得到准确的反演结果, 并且能够在保证反演稳定性的基础上提高反演精度, 反演效果优于传统的波形反演方法。

**关键词:** 速度场建模; 全波形反演; 不依赖于子波; 多尺度反演

中图分类号: P631.4

文献标识码: A

文章编号: 1000-3630(2018)-06-0521-07

DOI 编码: 10.16300/j.cnki.1000-3630.2018.06.002

## Acoustic source-independent multi-scale full waveform inversion

ZHOU Min<sup>1</sup>, WU Jie<sup>2</sup>

(1. Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;  
2. State Key Laboratory of Particle Detection & Electronics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** As the most accurate and promising model building method, acoustic full waveform inversion is expected to provide a more effective velocity model. However, full waveform inversion is a data-driving inversion method, which needs accurate source wavelet term and low frequency data. In this paper, a source independent inversion strategy is proposed by modifying the Wiener filter using the reference trace. By filtering the modeled and observed data, the source term can be eliminated from the misfit function. Besides, because the target wavelet in the modified Wiener filter can be chosen relatively freely, the new method is naturally combined with the frequency based multi-scale inversion strategy to further improve the stability of full waveform inversion. The proposed method is applied in practical application to verify its correctness and efficiency. The theoretical analysis and numerical test illustrate that the new method can avoid the source estimating procedure and improve the inversion accuracy and stability of full waveform inversion, which outperforms the conventional full waveform inversion strategy.

**Key words:** velocity model building; full waveform inversion; source-independent; multi-scale inversion strategy

## 0 引 言

高精度的速度场建模是针对复杂介质成像处理和储层预测的关键所在。现阶段常规地震数据处理的流程是: 首先利用走时信息, 通过速度分析和层析等建立背景速度场, 然后通过偏移或者最小二乘偏移对地下介质进行成像。由于仅仅利用走时信

息建立的速度场精度有限, 难以满足高精度成像的需求。近年来被逐渐采用的地震数据反演方法、全波形反演方法在理论上能够充分利用地震数据中不同类型波的走时、振幅等信息, 通过数据匹配来获得半波长级的速度建模精度<sup>[1-2]</sup>, 因此在复杂介质的地震数据处理中具有更好的应用前景。伴随地震数据采集质量以及计算机计算能力的提升, 全波形反演方法被广泛地应用于不同的数据和模型域以及不同的地层介质<sup>[3-6]</sup>。

然而, 全波形反演是一个极强的非线性问题, 地震数据中子波准确与否、数据的频率成分等直接决定了速度场建模的精度<sup>[7-10]</sup>。传统的全波形反演方法将目标泛函直接定义为观测数据与模拟数据

收稿日期: 2018-05-22; 修回日期: 2018-06-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41574106)、国家科技重大专项(2017ZX05008-008-041)、国家重大科研装备研制项目(ZDYZ2012-1-05-03)。

作者简介: 周敏(1993—), 女, 山东潍坊人, 硕士, 研究方向为全波形反演方法。

通讯作者: 武杰, E-mail: wujie@ustc.edu.cn

之间残差的二范数,不对数据进行预处理<sup>[2]</sup>。因此,在反演过程中往往会出现地震子波不匹配、地震数据频率过高导致观测数据与模拟数据不能有效匹配等问题。为了避免子波不准确对全波形反演精度和稳定性的影响,不同学者发展了不依赖于子波的全波形反演方法<sup>[11-12]</sup>。不依赖于子波的全波形反演方法可以分为在时间域和频率域反演两大类,由于在时间域反演不需要频率域中的除法运算,因此具有更高的稳定性<sup>[13]</sup>。将时间域不依赖于子波的全波形反演方法与多炮反演策略相结合,得到了较好的反演效果。针对地震数据主频较高导致波形反演不稳定的问题,现阶段广泛采用多尺度反演策略,通过对地震数据在时间域或者频率域进行滤波,实现对地震数据由低频到高频的递进反演,能够在保证反演稳定性的基础上提高反演精度<sup>[14-15]</sup>。结合优化的频率选择策略<sup>[16]</sup>,多尺度反演的计算效率能够有效提升,并且时间域的多尺度反演方法相对频率域效率更高。

本文在前人工作的基础上,针对实际地震数据中子波难以提取、地震数据主频较高的问题,利用维纳滤波器提出了一种声介质不依赖于子波的多尺度全波形反演方法,一方面避免子波不准确问题对全波形反演的影响,另一方面利用多尺度反演思想,在保证反演稳定性的基础上提高反演精度。本文首先介绍全波形反演的基本理论,在此基础上给出基于维纳滤波器的不依赖于子波的多尺度反演方法;然后通过模型试算证明本文中方法的有效性和正确性;最后详细分析了本文中方法的优缺点。

## 1 理论方法

### 1.1 全波形反演

基于  $L_2$  范数的全波形反演方法的目标泛函为<sup>[1]</sup>

$$\chi(m) = \sum_s \sum_r \int (u_{\text{obs}} - u_{\text{cal}})^2 dt \quad (1)$$

其中,  $u_{\text{obs}}$  和  $u_{\text{cal}}$  分别代表由震源  $s$  激发、在  $r$  接收点位置处、 $t$  时刻的观测数据和正演数据,  $m$  代表模型参数。

目标泛函关于模型参数的梯度项可以通过伴随状态法<sup>[17-18]</sup>求得:

$$\nabla_m \chi \delta m = \langle \hat{u} \nabla_m B(u) \delta m \rangle \quad (2)$$

其中,  $\hat{u}$  表示由伴随震源在检波点位置处反传产生的伴随波场,  $B$  表示波动方程正演算子<sup>[19]</sup>, 本文中将其表示为常密度声波方程。对应于式(1), 伴随震源  $S_{\text{adj}}$  可以表示为<sup>[17-18]</sup>

$$S_{\text{adj}} = u_{\text{obs}} - u_{\text{cal}} \quad (3)$$

全波形反演通过对模型参数的迭代更新求得最优解,其迭代公式可以表示为

$$m_{k+1} = m_k - \alpha_k H_k \nabla_m \chi \quad (4)$$

其中,  $k$  表示迭代次数,  $H_k$  表示对梯度的修正项<sup>[20]</sup>, 可采用共轭梯度法、L-BFGS 方法等对  $H_k$  进行近似计算,本文中采用共轭梯度法;  $\alpha_k$  表示步长,可由抛物插值法获得。

### 1.2 时间域多尺度全波形反演

传统的全波形反演方法直接利用全频带的地震数据,因此在地震数据主频较高或者初始模型不准确的情况下容易陷入局部极小。为了提高全波形反演方法的稳定性,Boonyasiriwate 等<sup>[15]</sup>利用维纳滤波器提出了一种时间域的多尺度全波形反演方法。维纳滤波器的特征在于其可以将原始信号转化为与目标信号十分相似的形式,其在频率域的表示形式为

$$W_{\text{Wiener}}(\omega) = \frac{S_{\text{target}}(\omega) S_{\text{original}}^\dagger(\omega)}{|S_{\text{original}}(\omega)|^2} \quad (5)$$

其中,  $S_{\text{original}}$  表示原始信号的频谱,  $S_{\text{target}}$  表示目标信号的频谱,  $\omega$  表示角频率,  $\dagger$  为共轭算子。在原始子波形式已知的情况下,维纳滤波器能够将原始高频信号转化为低频数据。转化后的地震数据可以表示为

$$U' = W_{\text{Wiener}}(\omega) U(\omega) \quad (6)$$

其中,  $U(\omega)$  表示原始地震数据的频谱。与高效的反演频率选择策略相结合,利用维纳滤波器能够实现现在时间域的高效多尺度反演。

Boonyasiriwate 等<sup>[15]</sup>将每个阶段对模型波数有主要贡献的频率成分定义为子波振幅谱一半所对应的范围。假设当频率为  $f(n)$ 、最大半偏移距为  $h$ 、模型深度为  $z$  时,每个阶段的有效频率范围为  $[f_{\text{min}}(n), f_{\text{max}}(n)]$ , 则对应地下波数的上下界为

$$K_{z_{\text{min}}}(n) = \frac{4\pi f_{\text{min}}(n) \alpha_{\text{min}}}{c_0} \quad (7)$$

$$K_{z_{\text{max}}}(n) = \frac{4\pi f_{\text{max}}(n)}{c_0}$$

其中,  $\alpha_{\text{min}} = z / \sqrt{h^2 + z^2}$ ,  $c_0$  表示背景速度场。为了保证反演波数的连续性,需要满足:

$$K_{z_{\text{min}}}(n+1) = K_{z_{\text{max}}}(n) \quad (8)$$

则相应的频率选择策略为

$$f_{\text{min}}(n+1) = \frac{f_{\text{max}}(n)}{\alpha_{\text{min}}} \quad (9)$$

在子波为雷克子波的假设条件下,设雷克子波的主频率为  $f(n)$ , 则相应的  $f_{\text{max}}(n) = 1.6366 f(n)$ ,

$f_{\min}(n)=0.4816f(n)$ 。在实际应用中,为了保证反演效果,反演频率的选择往往要比理论值更加密集<sup>[21]</sup>。

### 1.3 不依赖于子波的多尺度反演方法

然而,值得注意的是上述时间域的多尺度反演方法必须是以已知地震子波为前提的,在地震子波未知的情况下难以适用。因此必须要采用复杂的子波估计方法来获取子波形式<sup>[22-23]</sup>。为了避免复杂的子波估计过程,本文根据卷积模型对原始的维纳滤波器进行修改。从地震数据中选择一路参考道,参考道在频率域可以表示为子波与反射系数的卷积:

$$U_{\text{ref}}(\omega)=S(\omega)\otimes R_{\text{ref}}(\omega) \quad (10)$$

其中,  $S$  表示地震子波,  $R_{\text{ref}}$  表示参考道的反射系数。相同的地震道可以表示为

$$U(\omega)=S(\omega)\otimes R(\omega) \quad (11)$$

其中,  $R$  为频率域的反射系数。利用参考道来构建的维纳滤波器可以表示为

$$W_{\text{ref}}(\omega)=\frac{S_{\text{target}}(\omega)S^{\dagger}(\omega)R_{\text{ref}}^{\dagger}(\omega)}{|S(\omega)R_{\text{ref}}(\omega)|^2} \quad (12)$$

利用式(12)所示的维纳滤波器对地震数据进行滤波可以得到:

$$U'(\omega)=\frac{S_{\text{target}}(\omega)S^{\dagger}(\omega)R_{\text{ref}}^{\dagger}(\omega)}{|S(\omega)R_{\text{ref}}(\omega)|^2}S(\omega)R(\omega)=\frac{S_{\text{target}}(\omega)R_{\text{ref}}^{\dagger}(\omega)}{|R_{\text{ref}}(\omega)|^2}R(\omega) \quad (13)$$

由式(10)可见,地震子波项在滤波后的数据被消除。对观测数据和正演模拟数据分别构建维纳滤波器,并对数据进行维纳滤波处理,其分别可以表示为:

$$\begin{cases} U'_{\text{cal}}(\omega)=\frac{S_{\text{target}}(\omega)R_{\text{refcal}}^{\dagger}(\omega)}{|R_{\text{refcal}}(\omega)|^2}R_{\text{cal}}(\omega) \\ U'_{\text{obs}}(\omega)=\frac{S_{\text{target}}(\omega)R_{\text{refobs}}^{\dagger}(\omega)}{|R_{\text{refobs}}(\omega)|^2}R_{\text{obs}}(\omega) \end{cases} \quad (14)$$

其中,下标带有 cal 和 obs 的变量分别表示正演模拟数据和观测数据。

目标泛函被定义为滤波后的正演模拟数据和观测数据的残差的二范数:

$$J=\|U'_{\text{cal}}-U'_{\text{obs}}\|_2^2 \quad (15)$$

可见地震子波项在新的目标泛函中被消除。利用伴随状态法<sup>[17-18]</sup>,相应的伴随震源可以表示为

$$S_{\text{adj}}=-W_{\text{calref}}^{\dagger}(U'_{\text{cal}}-U'_{\text{obs}})-\frac{\partial W_{\text{calref}}^{\dagger}}{\partial U'_{\text{cal}}}U_{\text{cal}}^T(U'_{\text{cal}}-U'_{\text{obs}}) \quad (16)$$

其中,  $W_{\text{calref}}$  表示修正的以正演模拟数据为参考道的

维纳滤波器,  $T$  表示转置算子。由于伴随震源的第二项仅仅在参考道位置处存在,因此在本文中,将伴随震源的第二项忽略不计。

与传统的基于维纳滤波器的多尺度反演方法相似<sup>[15]</sup>,由于目标子波的选取具有一定的自由性,因此可以直接实现由低频到高频的多尺度反演方法,即将反演分为几个阶段,在反演的早期采用低频子波作为目标子波,主要保证波形反演避免局部极小,反演地下的低波数大尺度结构;在反演后期采用高频子波,提高全波形反演的反演精度,主要反演高波数组分。因此可以实现在保证反演稳定性的基础上提高反演精度。

对于参考道的选取,主要有采用单一地震记录和采用所有地震记录的叠加作为参考道两种。Choi 等<sup>[11]</sup>在基于卷积的不依赖于子波的声波全波形反演方法中指出,利用全部地震记录的累加作为参考道的反演效果要优于采用单一地震道作为参考道。其主要原因在于 Choi 等<sup>[11]</sup>将不依赖于子波的策略应用于多炮混叠数据反演中,采用多道叠加能够在一定程度上压制随机噪声和减少多炮混叠数据产生的交叉噪声问题。而本文方法在本质上是基于反褶积的,将不依赖于子波的策略应用于单炮数据反演中,故不存在交叉噪声问题;除此之外,多道数据叠加使得参考道的反射系数形式更为复杂,构造的滤波器容易出现不稳定现象,并且由此获得的伴随震源的形式也更为复杂(见式(16)),所以本文采用单一地震记录作为参考道。必须指出的是,由于地震波在传播过程中可能出现衰减或子波畸变等现象,因此距离震源远的地震道相比于近的地震道要更加复杂,在选取地震道时应该优先选取距离震源近的地震道。

## 2 模型试算

为了验证本文方法的正确性和有效性,将文中的方法应用于模型进行反演测试。用时间 2 阶、空间 8 阶的有限差分声波介质正演模拟以及完全匹配层(Perfect Match Layer, PML)边界条件做正演模拟<sup>[24-25]</sup>,模型的纵横向网格均为 10 m。对于观测数据,采用主频为 15 Hz 的高斯子波,在反演过程中假设子波是主频为 15 Hz 的雷克子波。不同子波的形态如图 1 所示。由于观测数据和反演过程中采用的子波形态不同,所以会导致波形反演不稳定。

### 2.1 层状模型测试

将本文中方法应用于如图 2(a)所示的层状真实

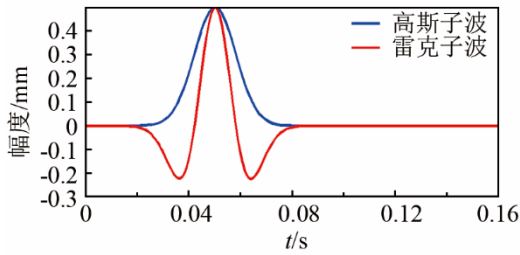


图1 高斯子波和雷克子波的形态对比

Fig.1 A comparison of the Ricker wavelet and the Gaussian wavelet

模型中，其特征为多个速度相同的层状构造相互叠合，速度差异较小，并且存在一定的高陡位置，主要测试声介质全波形反演在存在多个速度差异较小和存在高陡构造情况下的反演能力。采用与上例中相同的观测系统，采用的初始模型由对真实模型进行平滑得到，如图 2(b)所示。图 3 为利用声波波动方程对真实模型进行正演所得到的波场快照，可见在除了直达波之外，由于速度界面的存在，产生了较强的反射声波。众多的反射界面导致波场较为复杂，因此波形反演的难度也相对较大。

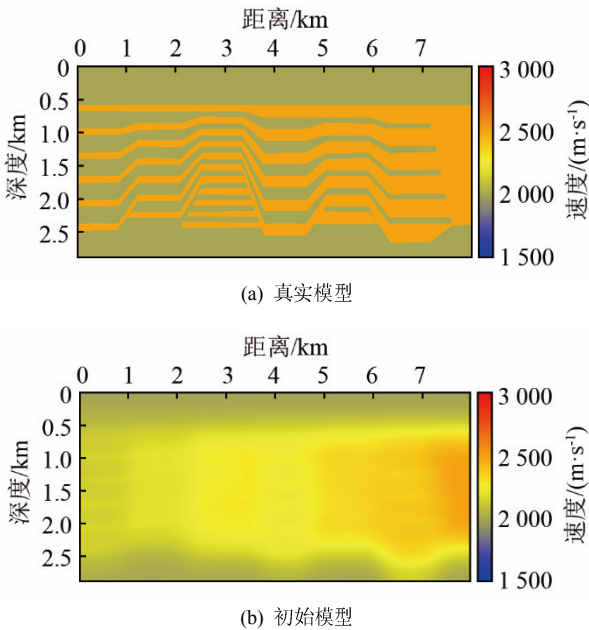


图2 层状模型的真实模型和初始模型

Fig.2 The real model (a) and the initial model for inversion (b) for layered model

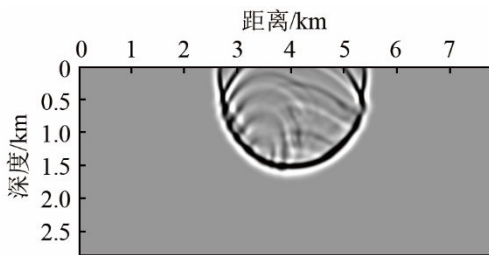


图3 0.8 s 时的波场快照

Fig.3 Snapshot of the wavefield at 0.8 s

图 4 为在子波错误的情况下采用传统全波形反演方法得到的反演结果。由图 4 可见，一方面由于初始模型与真实模型相差较远，另一方面由于反演过程中采用的子波与真实子波不同，反演结果并没有给出有效的地层信息，在模型的浅层存在较强的反演噪声，并且严重影响了深层的反演结果。

图 5 为采用本文中不依赖于子波的多尺度反演方法的反演结果，采用的目标子波是主频为 15 Hz 的雷克子波，由于地震数据主频较高，并且初始模型不够准确，反演结果与真实模型相差较远，并且在浅层存在明显的反演噪声。但是相比较于子波不准确的情况，反演结果有了一定的提升，一些深层的速度层位信息得以解释。

为了进一步提高反演效果，采用多尺度的反演策略，目标子波为雷克子波，其主频由 3 Hz 变化至 15 Hz，变化步长为 2 Hz，所选用的频率间隔要明显小于理论计算值(理论计算所得的反演频率组分别为：6 Hz、15 Hz)，目的是为了避开在波形反演过程中因波数不连续而引起反演异常<sup>[21]</sup>。每个阶段的迭代次数为 5 次，最后一个阶段持续迭代直至模型总迭代次数为 100 次。最终的反演结果如图 6 所示。可见相比较于未采用多尺度策略的反演结果，反演精度有了明确提升，浅层的速度层位被准确刻画，深层的速度层位反演效果也有了明显提升，能够有效反演部分高陡界面。然而，整体而言，深层的反演效果要低于浅层的反演效果，这一方面是因为由于扩散效应，地震波在深层的能量较弱，另一

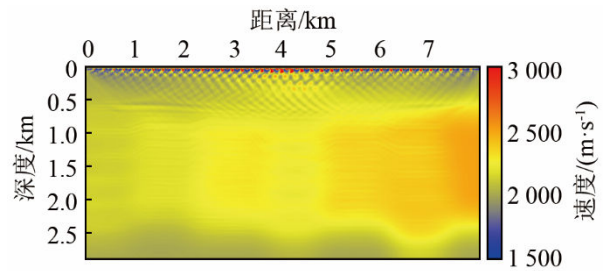


图4 层状模型的传统全波形反演结果  
Fig.4 The inversion result of the conventional full waveform inversion for layered model

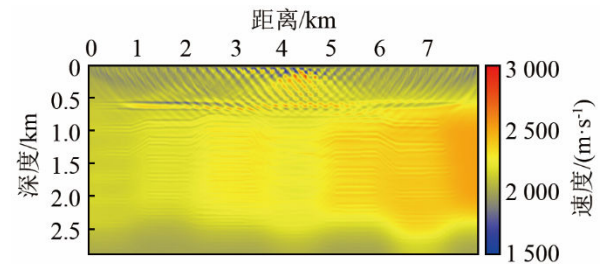


图5 不采用多尺度策略的不依赖于子波的全波形反演结果(层状模型)  
Fig.5 The inversion result of the source-independent full waveform inversion without the multi-scale inversion strategy for layered model

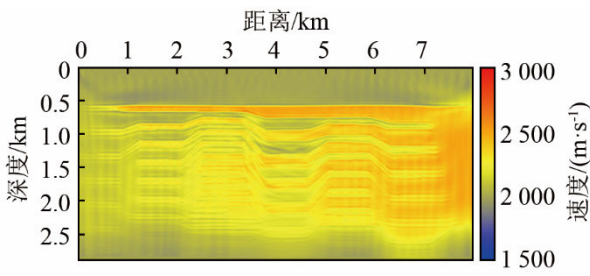


图 6 不依赖于子波的多尺度反演结果(层状模型)

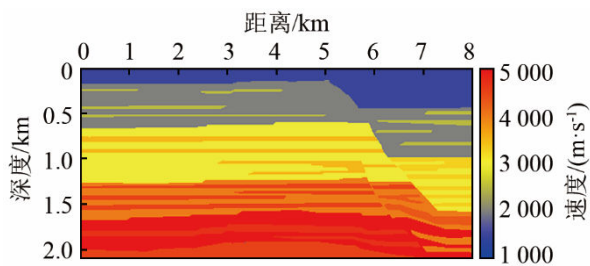
Fig.6 The inversion result of source-independent multi-scale full waveform inversion for layered model

方面是因为地震波在薄互层中的多次传播产生的多次波引起的能量衰减。除此之外，一些深层的高陡界面的反演效果不够理想，主要是由观测系统的偏移距有限导致的。

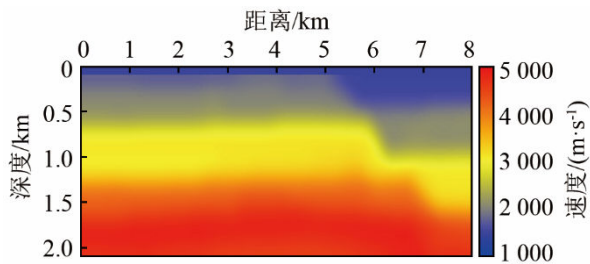
### 2.2 复杂模型测试

为了测试本文方法对复杂模型的适用性，将本文方法应用于如图 7(a)所示的复杂模型中，模型纵横向网格均为 10 m，所采用的观测系统与上例相同，初始模型由对真实模型平滑生成，如图 7(b)所示，浅层水层速度假定为已知。

首先采用传统的全波形反演方法进行反演测试，其反演结果如图 8 所示，可见与前面两例相似，由于子波不准确，在模型的浅层存在明显的反演噪声。子波不同导致的直达波残差是导致浅层的高速反演噪声的主要原因；模型的深层没有任何有效的速度更新，仅仅存在一些高波数的反演噪声，说明在子波不准确的情况下全波形反演难以提供有效的速度场反演。



(a) 真实模型



(b) 初始模型

图 7 复杂模型的真实模型和初始模型  
Fig.7 The real model (a) and the initial model for inversion (b) for complex model

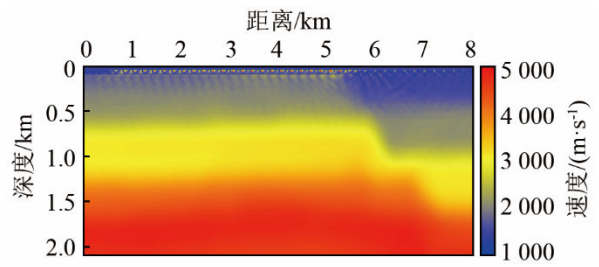


图 8 复杂模型的传统全波形反演结果

Fig.8 The inversion result of the conventional full waveform inversion for complex model

图 9 为采用本文中不依赖于子波的全波形反演方法的反演结果，目标子波为主频为 15 Hz 的雷克子波。由图 9 可见，相比较于常规的全波形反演方法，本文中方法能够有效消除由于子波不准确引起的浅层反演噪声，反演结果中不存在高速噪声。除此之外，模型的浅层存在的一些薄层也被部分刻画。但是整体而言，由于波形反演采用的数据主频较高，并且初始模型与真实模型相差较大，因此在不采用多尺度的情况下波形反演对模型的恢复能力有限。

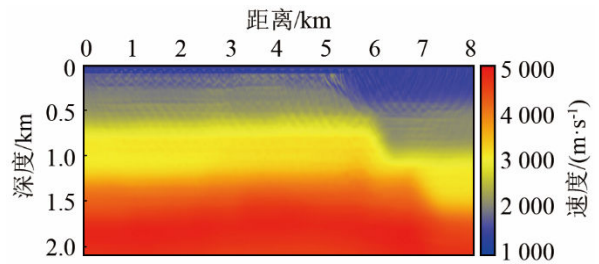


图 9 不采用多尺度策略的不依赖于子波的全波形反演结果(复杂模型)  
Fig.9 The inversion result of the source-independent full waveform inversion without the multi-scale inversion strategy for complex model

为了进一步提升反演效果，采用多尺度的反演策略，目标子波为雷克子波，其主频由 7 Hz 变化到 15 Hz，子波主频变化步长为 2 Hz，每个阶段迭代 10 次，最后一次持续迭代直至总的迭代次数达到 100 次。其最终的反演结果如图 10 所示，由图 10 可见，一方面相比于传统的波形反演，浅层的高速反演噪声被明显消除；模型浅层存在的薄层也被准

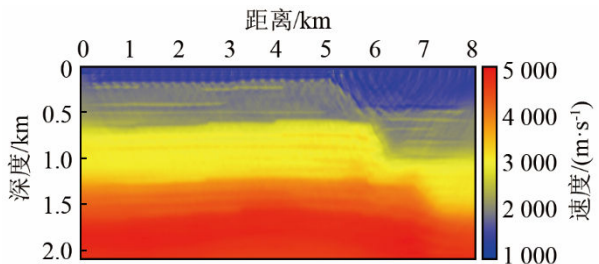


图 10 不依赖于子波的多尺度反演结果(复杂模型)

Fig.10 The inversion result of source-independent multi-scale full waveform inversion for complex model

确刻画,层位位置和厚度比较准确。除此之外,模型中深层的反演效果有了明显提升,中层的薄层也被有效反演,反演结果与真实模型十分接近。然而,在模型深层的速度更新量有效,其主要原因是由于扩散效应,模型深层地震波的能量较弱。右侧断层位置存在一定的反演噪声,其主要原因为观测数据的偏移距较小,接收到的断层位置的反射波能量较弱,因此反演效果不够理想。但是总体而言,本文中多尺度不依赖于子波的反演方法得到的反演效果要明显优于传统方法,验证了本文中方法的有效性。

### 3 讨论与结论

本文采用全波形反演方法对复杂模型进行速度场建模,能够为高精度成像和解释提供更加准确的速度场。针对波形反演中对子波准确度依赖较高和直接利用高频数据反演的不稳定问题,本文通过修改维纳滤波器,实现了一种不依赖于子波的多尺度全波形反演方法,模型试算证明了方法的正确性和有效性,在此基础上得到以下结论:

(1) 由于以数据残差为目标泛函,全波形反演需要准确的子波信息为前提,在子波不准确的情况下,波形反演难以提供有效的速度场更新。

(2) 传统的时间域反演方法在地震数据主频较高时容易出现反演效果不稳定以及周波跳跃的问题。采用反演频率由低到高逐次递进的反演策略是提高波形反演稳定性和反演效果的有效策略。

(3) 本文中方法通过修改维纳滤波器,将不依赖于子波的反演策略与多尺度策略有机结合,一方面避免了波形反演对子波信息的依赖性,另一方面能够在保证反演稳定性的基础上提升反演精度。

然而,本文中方法还有一些需要改进之处。由于本文中方法是基于卷积模型,因此对于时变、空变子波的应用效果可能有限,这将是今后的研究重点之一。除此之外,本文中主要基于声波介质,采用的正演方法为常密度声波波动方程,将方法发展到弹性波等复杂介质也是今后的工作内容之一。

#### 参 考 文 献

- [1] VIRIEUX J, OPERTO S. An overview of full-waveform inversion in exploration geophysics[J]. *Geophysics*, 2009, **74**(6): WCC1-WCC26.
- [2] TARANTOLA A. Inversion of seismic reflection data in the acoustic approximation[J]. *Geophysics*, 1984, **49**: 1259-1266.
- [3] SHIN C, YOUNG H C. Waveform inversion in the Laplace domain[J]. *Geophys. J. Int.*, 2008, **173**(3): 922-931.
- [4] SHIN C, YOUNG H C. Waveform inversion in the Laplace—Fourier domain[J]. *Geophys. J. Int.*, 2009, **177**: 1067-1079.
- [5] 崔永福, 彭更新, 吴国忱, 等. 全波形反演在缝洞型储层速度建模中的应用[J]. *地球物理学报*, 2016, **59**(7): 2713-2725.  
CUI Yongfu, PENG Gengxin, WU Guochen, et al. Application of full waveform inversion velocity model-building technology for the fractured-vuggy reservoir[J]. *Chinese J. Geophys(in Chinese)*, 2016, **59**(7): 2713-2725
- [6] 杨午阳, 王西文, 雍学善, 等. 地震全波形反演方法研究综述[J]. *地球物理学进展*, 2013, **28**(2): 766-776.  
YANG Wuyang, WANG Xiwen, YONG Xueshan, et al. The review of seismic full waveform inversion method[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, **28**(2): 766-776.
- [7] 董良国, 迟本鑫, 陶纪霞, 等. 声波全波形反演目标函数性态[J]. *地球物理学报*, 2013, **56**(10): 3445-3460.  
DONG Liangguo, CHI Benxin, TAO Jixia, et al. Objective-function behavior in acoustic full-waveform inversion[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2013, **56**(10): 3445-3460.
- [8] 王毓玮, 董良国, 黄超, 等. 弹性波全波形反演目标函数性态与反演策略[J]. *石油物探*, 2016, **55**(1): 123-132, 141.  
WANG Yuwei, DONG Liangguo, HUANG Chao, et al. Objective function behavior and inversion strategy in elastic full-waveform inversion[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2016, **55**(1): 123-132, 141.
- [9] 王毓玮, 董良国, 黄超, 等. 降低弹性波全波形反演强烈非线性的分步反演策略[J]. *石油地球物理勘探*, 2016, **51**(2): 288-294.  
WANG Yuwei, DONG Liangguo, HUANG Chao, et al. A multi-step strategy for mitigating severe nonlinearity in elastic full-waveform inversion[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2016, **51**(2): 288-294.
- [10] 董良国, 黄超, 迟本鑫, 等. 基于地震数据子集的波形反演思路、方法与应用[J]. *地球物理学报*, 2015, **58**(10): 3735-3745.  
DONG Liangguo, HUANG Chao, CHI Binxin, et al. Strategy and application of waveform inversion based on seismic data subset[J]. *Chinese Journal of Geophysics*. 2015, **58**(10): 3735-3745.
- [11] CHOI Y, ALKHALIFAH T. Source-independent time-domain waveform inversion using convolved wavefields: Application to the encoded multisource waveform inversion[J]. *Geophysics*, 2011, **76**(5): R125-R134.
- [12] CHOI Y, SHIN C, MIN D J, et al. Efficient calculation of the steepest descent direction for source-independent seismic waveform inversion: An amplitude approach[J]. *Journal of Computational Physics*, 2005, **208**(2): 455-468.
- [13] LEE K H, KIM H J. Source-independent full-waveform inversion of seismic data[J]. *Geophysics*, 2003, **68**(6): 2010-2015.
- [14] BUNKS C, SALECK F M, ZALESKI S, et al. Multiscale seismic waveform inversion[J]. *Geophysics*, 1995, **60**(5): 1457-1473.
- [15] BOONYASIRIWAT C, VALASEK P, ROUTH P, et al. An efficient multiscale for time-domain waveform tomography[J]. *Geophysics*, 2009, **74**(6): WCC59-WCC68.
- [16] SIRGUE L, PRATT R G. Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies[J]. *Geophysics*, 2004, **69**(1): 231-248.
- [17] FICHTNER A, TRAMPERT J. Hessian kernels of seismic data functionals based upon adjoint techniques[J]. *Geophys. J. Int.*, 2011, **185** (2): 775-798
- [18] PLESSIX R E. A review of the adjoint-state method for computing the gradient of a functional with geophysical applications[J]. *Geophys. J. Int.*, 2006, **167**(2): 495-503.
- [19] 杨积忠, 刘玉柱, 董良国. 变密度声波方程多参数全波形反演策略[J]. *地球物理学报*, 2014, **57**(2): 628-643.  
YANG Jizhong, LIU Yuzhu, DONG Liangguo. A multi-parameter full waveform inversion strategy for acoustic media with variable

- density[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2014, 57(2): 628-643.
- [20] 刘璐, 刘洪, 张衡, 等. 基于修正拟牛顿公式的全波形反演[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2447-2451.  
LIU Lu, LIU Hong, ZHANG Heng, et al. Full waveform inversion based on modified quasi-newton equation quasi-newton equation [J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(7): 465-470.
- [21] KIM Y, CHO H, MIN D J, et al. Comparison of frequency-selection strategies for 2D frequency-domain acoustic waveform inversion[J]. Pure & Applied Geophysics, 2010, 168(10): 1715-1727.
- [22] YU H, ZHANG D, HUANG Y. Application of early arrival waveform inversion with pseudo-deconvolution misfit function by source convolution[J]. Inverse Problems in Science & Engineering, 2016, 25(1): 57-72.
- [23] ZHOU C, SCHUSTER G T, HASSANZADEH S, et al. Elastic wave equation travelttime and waveform inversion of crosswell data[J]. Geophysics, 1997, 62(3): 853-868.
- [24] 田坤, 黄建平, 李振春, 等. 多轴卷积完全匹配层吸收边界条件[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(1): 152.  
TIAN Kun, HUANG Jianping, LI Zhenchun, et al. Multi-axial convolution perfectly matched layer absorption boundary condition [J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(1): 143-152.
- [25] 黄建平, 杨宇, 李振春, 等. 几种自由边界实施方法在完全匹配层条件下的对比研究[J]. 地震学报, 2014, 36(5): 964-977.  
HUANG Jianping, YANG Yu, LI Zhenchun, et al. Comparative study among implementations of several free-surface boundaries with perfectly matched layer conditions[J]. Acta Seismologica Sinica, 2014, 36(5): 964-977.



## • 简讯 •

### 《声学技术》评选 2017 年度优秀论文

按照《声学技术》优秀论文评选办法,《声学技术》编辑部对 2013~2015 年度发表于《声学技术》期刊上的论文,根据在知网上的引用率和下载率进行了初步筛选,《声学技术》编辑委员会根据筛选结果进行了两轮推荐。最后经主编确认,选出下列 2 篇为 2017 年度《声学技术》优秀论文。

1. 高阳, 王毅刚, 王金田等人的“声学风洞中的高速列车模型气动噪声试验研究”(声学技术, 2013 年第 32 卷第 6 期)一文及其相关研究工作, 针对某高速列车的缩尺比例的三车编组模型建立了气动噪声试验方法和不同的噪声源的模型处理方法, 并结合流场外自由场传声器和传声器阵列的测量结果, 分析了模型上的主要噪声源特性及对整个模型的贡献量大小。对于认识高速列车气动噪声和改善设计有重要的参考价值。该文引用率较高, 在国内首次进行了高速列车气动噪声的模拟实验研究, 而且此工作与国家重大技术发展密切相关。

2. 蔡建程, 刘志宏, 曾向阳的“气动声学 Lighthill 方程的 Kirchhoff 积分分解分析”(声学技术, 2014 年第 33 卷第 2 期)一文及其相关研究工作, 使用非齐次波动方程的 Kirchhoff 积分公式对 Lighthill 方程进行求解。基于 Kirchhoff 积分公式对于有物体存在于流场中的情况, 详细推导了 Curle 解, 并对 Curle 公式中的各声源项进行了分析。这是一篇基础性研究论文, 文章有助于气动声学初学者正确认识声类比理论, 加深对 Curle 公式的理解。

《声学技术》优秀论文的评选于 2015 年度沪区编委会上提出, 并于 2016 年度编委会上确立了评选原则和评选办法。2017 年进行了第一次评选, 2018 年是第二届评选, 旨在促进声学领域应用基础研究和应用研究的发展, 鼓励青年作者开展创新、系统、深入的研究工作, 写出高质量论文。

《声学技术》编辑部