杜泽源.基于稀疏分解的高波数全波形反演方法[J].石油物探, 2025, 64(5): 890-898
DU Zeyuan.A high-wavenumber full waveform inversion method based on sparse decomposition[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(5): 890-898

基于稀疏分解的高波数全波形反演方法

杜泽源

(中石化石油物探技术研究院有限公司, 江苏南京 211103)

摘要: 复杂储层成像与描述对速度建模精度提出了更高的要求, 高波数全波形反演方法是实现高精度速度建模的有效途径之一。要解决高波数全波形反演中存在的不稳定及局部极值问题, 需要引入多尺度反演策略。采用局部峰值约束的稀疏分解方法, 实现高精度、高时频分辨的时间域地震数据分解, 并构建了基于稀疏分解的全波形反演算法, 实现由低波数至高波数的逐级反演以恢复速度模型, 为储层成像与描述提供高精度速度场。数值模型测试结果表明, 基于稀疏分解的高波数全波形反演不但提高了反演的稳定性, 而且能获得高精度速度模型。实际资料应用结果表明, 高波数全波形反演速度建模在一定程度上可以直接进行储层描述。

关键词: 稀疏表示; 局部峰值约束; 全波形反演; 速度建模; 储层描述

中图分类号: TE; P631 **文献标识码:** A

文章编号: 1000-1441(2025)05-0890-09 **DOI:** 10.12431/issn.1000-1441.2024.0106

A high-wavenumber full waveform inversion method based on sparse decomposition

DU Zeyuan

(*SINOPEC Geophysical Research Institute Co., Ltd., Nanjing* 211103, *China*)

Abstract: Complex reservoir imaging and characterization impose higher requirements on the accuracy of velocity modeling. High-wavenumber full waveform inversion (FWI) is an effective way to realize high-precision velocity modeling. To address the instability and local minima issues inherent in high-wavenumber FWI, appropriate multi-scale inversion strategies are required. This study implements high-resolution time-frequency decomposition of time-domain seismic data through a local peak-constrained sparse decomposition method, and constructs a sparse decomposition-based FWI algorithm. This approach enables multi-scale inversion from low to high wavenumbers to reconstruct the velocity model, thereby providing a high-accuracy velocity field for reservoir imaging and characterization. Numerical model tests show that sparse decomposition-based high-wavenumber FWI enhances inversion stability and yields high-precision velocity models. The application to practical data shows that reservoir description can be directly carried out using the velocity model derived from high-wavenumber FWI to a certain extent.

Keywords: sparse representation, local peak constraint, full waveform inversion (FWI), velocity modeling, reservoir description

全波形反演 (full waveform inversion, FWI) 基于地震波的动力学与运动学信息, 具有较高的速度建模精度[1]。随着油气勘探开发的目标越来越复杂, 基于全波动方程理论的全波形反演在提高储层建模成像精度方面发挥了愈加重要的作用。1984 年, TARANTOLA[2] 提出通过波动方程地震波模拟波场与观测波场的残

收稿日期(Received): 2024-04-30; **接收日期(Accepted):** 2024-08-06。

作者简介: 杜泽源 (1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事全波形反演、储层预测方法及应用等方面的研究工作。E-mail: duzy.swty@sinopec.com

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U19B6003) 和中国博士后科学基金项目 (2019M662004) 共同资助。
This research is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.U19B6003) and the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No.2019M662004).

© The Author(s) 2025. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

差进行逆时传播来计算目标泛函的梯度方向，即最小二乘理论下的时间域全波形反演基础。此后，全波形反演在理论研究方面取得了长足的发展。PRATT 等[3-4]提出了频率域全波形反演，并指出频率域多尺度反演的潜力。近十几年来，伴随着计算机技术的进步，全波形反演得以蓬勃发展，许多学者对全波形反演的基础理论、算法优化和实际应用等多个方面进行了大量研究，并且在海上实际资料中验证了其有效性[5-8]。

实际应用结果表明，全波形反演通过提供高精度速度模型来提高地震成像精度，取得了较好的效果，为复杂地质体成像提供了有效支撑[9-10]。随着勘探开发的深入，地震勘探的主要目标向隐蔽岩性油气藏转变，这类储层预测难度更大，对速度建模精度的要求更高。因此，将具有高精度速度建模优势的全波形反演用于储层预测是发展趋势之一。现阶段，受多种因素限制，全波形反演通常不能满足储层预测的分辨率需求，需要针对性处理手段以提升其预测能力，进行高波数反演是十分必要的。但是高分辨率全波形反演存在稳定性问题及受地震资料品质限制的问题，提升反演结果的可靠性仍然是高分辨率全波形反演面临的最大挑战，这一问题是目前学者研究攻关的重点之一[11]。

为了解决全波形反演的非线性问题和稳定性问题，许多学者提出了不同的应对策略，在反演收敛能力优化和计算效率优化等方面取得了较好的成果。董良国等[12]提出了利用地震数据子集进行全波形反演的方法，可以较好地避免反演中匹配全部地震信息引起的强非线性问题；WU 等[13]为了解决全波形反演初始速度模型精度低从而严重影响反演结果的问题，提出了包络反演的理论框架，在初始速度模型精度较差的情况下，利用包络全波形反演较好地恢复速度模型中低波数分量，从而为常规全波形反演提供精度更高的初始速度模型，大大改善了反演速度模型的精度；王华忠等[14-15]提出了特征波反演思路，主要方法是仅模拟部分特征波场进行匹配，将非线性较强的反问题转化成一个更凸的反问题进行求解；陈生昌等[16]研究了基于时间二阶积分波场的全波形反演方法，在一定程度上解决了低频信息不足的问题，恢复了大尺度速度场；国运东等[17]通过动态平面波编码方法实现背景速度场反演；胡勇等[18]提出了局部尺度走时反演方法，缓解弹性波全波形反演周波跳跃问题。众多学者的研究成果表明，全波形反演要获得稳定可靠的反演结果，多尺度反演策略是目前较为有效的方法[1]。

多尺度全波形反演从大尺度到小尺度逐级反演，这种方法可以有效避免反演陷入局部极值问题，实现稳定反演，提高反演结果的精度。BUNKS 等[19]提出了多尺度波形反演方法，通过大尺度到小尺度的逐级反演来降低陷入局部极值的可能，并且能够显著提高反演的效率。利用滤波方法进行地震数据尺度分解，在时间域多尺度反演中必然涉及的问题是相应多尺度地震数据的匹配，如何选择地震数据的频带及数据分尺度方法十分关键。常规方法是采用带通滤波方法进行数据的分解，这种方法对滤波器的设计要求较高，往往存在滤波假频和有效信号损失的问题。

基于稀疏表示理论的数据分解方法能够较好地实现地震数据分解。利用局部峰值约束的稀疏分解方法，实现高精度、高时频分辨的时间域地震数据分解，构建了基于稀疏分解的全波形反演算法，由低波数至高波数逐级恢复速度模型，为储层成像与描述提供高精度速度模型。利用数值模型验证了基于稀疏分解的高波数全波形反演的稳定性。最后将其应用于某实际工区的地震资料反演，并分析了其应用效果。

1　局部峰值约束数据分解方法

1993 年，MALLAT 等[20]提出的匹配追踪算法将稀疏表示理论引入到地震信号处理领域，为地震数据处理及地震反演等工作带来了很多便利，在地震信号处理领域得到了广泛应用[21-23]。

稀疏表示理论的基本思想是使用原子字典中一定数量的原子进行线性组合，实现对原始信号所蕴含的信息的充分表达。

$$s(t)=\sum_{k=1}^{K}\alpha_k\omega_k(t)=\boldsymbol{\Phi\alpha} \tag{1}$$

其中，$s(t)$为地震信号，$\omega(t)$为基本子波，α_k为基本子波对应的系数，子波字典$\boldsymbol{\Phi}=[\omega_1(t),\omega_2(t),\cdots,\omega_K(t)]$是由以基本子波为列向量构成的维度为$N\times K$的矩阵，$N$为子波长度，矩阵$\boldsymbol{\alpha}=[\alpha_1,\alpha_2,\cdots,\alpha_K]$为信号在子波字典$\boldsymbol{\Phi}$中的表示系数。

匹配追踪算法的实现主要通过原子的匹配，但其冗余性限制了计算效率。为了提高计算效率，1993 年，PATI 等[24]提出了正交匹配追踪算法，每次匹配后的信号残差与之前选出的所有原子正交，避免了在原子匹配时重复匹配原子，更快地寻找到最优原子组合[24]。

定义正交匹配追踪方法的目标泛函为：

$$J = \arg\min \|s(t) - \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\alpha}\|_2^2 \ \ s.t.\ \|\boldsymbol{\alpha}\| < \sigma \tag{2}$$

其中，σ为迭代终止阈值。

正交匹配追踪中系数的求取可通过信号与基本子波的内积计算得到[25]，其目标是寻找与信号残差之间内积最大的基本子波。但是，内积的计算往往度量的是在全局时间尺度上基本子波与残差信号之间的相似性，并不能保证基本子波的波峰与残差信号波峰具有相同的位置，这会导致匹配出的信息不能完全恢复原信号特征。

为了解决波峰不匹配的问题，在子波匹配时，杜泽源等[26]采用局部峰值约束的方法来确定匹配子波参数。设置信号残差波峰与基本子波峰值距离相关的目标函数。为了提高子波匹配效率，在对残差信号及基本子波波峰进行扫描时，首先对残差信号进行希尔伯特变换，扫描残差信号的包络，从而获取信号的局部极大值，以此来控制信号的扫描范围。在这一范围内寻找信号峰值并扫描原子进行匹配。目标函数可以表示为：

$$\begin{cases} T_{\mathrm{Hi}} = |p(|H(R_i(t))|) - p(R_i(t))| \\ T_{\mathrm{si}} = |p(R_i(t)) - p(\omega_{i+1}(t))| \end{cases} \tag{3}$$

其中，T_{Hi}为希尔伯特变换信号目标函数，T_{si}为信号目标函数，$H(R_i(t))$为对残差信号进行希尔伯特变换，$p()$表示信号峰值位置。利用峰值局部范围约束来高效地搜索得到最佳匹配原子。

匹配追踪的另一个关键环节是子波字典的构建。需要根据地震信号的特征，设置一系列子波波形。一般的子波字典构建是将基本子波进行适当的时移、调制等变化来建立。对于地震信号来说，Ricker子波或Morlet小波等常用基本子波基本可以满足数据匹配的需要，能够充分表达地震数据[27-28]。结合全波形反演的反演尺度需要，在构建子波字典时可以考虑控制子波的频率范围，避免子波字典过度冗余造成计算浪费。结合先验频率与局部峰值约束方法，可快速有效地实现地震数据分解。

为验证文中基于先验频率的局部峰值约束匹配追踪算法的效果，实际地震信号分解重构的结果如图1所示。选取某一实际观测地震数据，截取其中一部分，如图1a黑色曲线所示。利用本文提出的信号分解算法对地震信号进行分解，将分解后的子波进行重构，得到重构地震信号，如图1a红色曲线所示。对比两条曲线可以看出，重构地震数据与原始地震数据波形基本吻合。图1b为原始数据与重构数据的残差，可以看出，残差值小于原始数据的1‰，满足计算精度要求。说明本文分解方法能够精确地匹配出最佳子波，实现地震信号的精确分解与重构，效果较好。

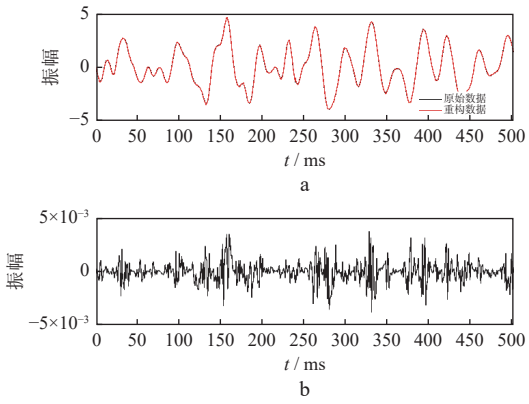

图1 实际地震信号分解重构的结果

a 实际地震数据与重构数据；b 数据残差

Fig. 1 Decomposition and reconstruction results of actual seismic signals

基于稀疏表示理论对地震数据进行多尺度分解，可以将地震数据表示为以下数学形式[1]：

$$\boldsymbol{d}_{\mathrm{obs}}(t) = \boldsymbol{R}\boldsymbol{s}(t) + \boldsymbol{n}(t) \tag{4}$$

其中，$\boldsymbol{d}_{\mathrm{obs}}(t)$为观测地震数据，$\boldsymbol{s}(t)$为稀疏重构数据，$\boldsymbol{n}(t)$为噪声，$\boldsymbol{R}$表示多尺度分解算子。

根据介质分解理论[29]与地震多尺度响应特征[30]，地震数据可以分解成不同尺度的分量。则多尺度稀疏重构的地震数据可以表示为不同尺度地震数据的叠加：

$$\boldsymbol{s}(t) = \boldsymbol{s}^{\delta(f_1)}(t) + \boldsymbol{s}^{\delta(f_2)}(t) + \cdots + \boldsymbol{s}^{\delta(f_C)}(t) \tag{5}$$

其中，$\delta(f_i)$代表不同的尺度频带。设置一系列$\delta(\tau, f, \phi, c)$参数来控制子波字典中的基本子波，其中包含尺度(频率)因子，将相同频率因子的基本子波定义在一个字典子集$\boldsymbol{\Phi}^{\delta(f_i)}$中。

通过匹配追踪算法地震数据的稀疏表示解为$\boldsymbol{s}(t) = \boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\alpha}$，则基于稀疏表示的反演问题在相应尺度频带下可表示为求解目标函数：

$$J = \frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{d}^{\delta(f_i)} - \boldsymbol{R}^{\delta(f_i)}\boldsymbol{\Phi}^{\delta(f_i)}\boldsymbol{\alpha}_i\right\|_2^2 + \lambda\|\boldsymbol{\alpha}_i\|_1 \tag{6}$$

利用本文所述局部峰值约束匹配追踪算法求解多尺度分解目标泛函((6)式)，即可对地震数据稀疏尺度分解，直接得到不同尺度的分量。基于局部峰值约束稀疏表示数据分解的方法具有较好的时频分辨率，而且利用原子字典匹配的方法进行数据分解与

重构不会引入假频，有利于地震数据的多尺度分析或反演。

2　稀疏分解全波形反演方法

L_2 范数形式的全波形反演的目标泛函可表示为：

$$E(\boldsymbol{m})=\frac{1}{2}\|\boldsymbol{d}_{\text{obs}}-\boldsymbol{d}_{\text{cal}}\|_2^2=\frac{1}{2}\|\boldsymbol{d}_{\text{obs}}-\boldsymbol{L}(\boldsymbol{m})\|_2^2 \tag{7}$$

其中，$\boldsymbol{m}$为模型参数，$\boldsymbol{d}_{\text{cal}}$为正演模拟记录，$\boldsymbol{L}$为正演算子。

全波形反演因其强非线性特征，直接进行高波数反演很容易产生周波跳跃问题，容易陷入局部极值，必须通过多尺度的方法逐步反演到高波数。根据介质分解理论，在数据域实现多尺度反演，需利用不同频带的地震数据反演相应尺度下的介质模型参数。

$$E(\boldsymbol{m}_i)=\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{d}_{\text{obs}}^{\delta(f_i)}-\boldsymbol{d}_{\text{cal}}^{\delta(f_i)}\right\|_2^2=\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{d}_{\text{obs}}^{\delta(f_i)}-\boldsymbol{L}(\boldsymbol{m}_i)\right\|_2^2 \tag{8}$$

将多尺度数据稀疏分解与全波形反演相结合：

$$\begin{cases}J^{\delta(f_i)}=\lambda\|\boldsymbol{\alpha}_i\|_1+\dfrac{1}{2}\left\|\boldsymbol{d}^{\delta(f_i)}-\boldsymbol{R}^{\delta(f_i)}\boldsymbol{\alpha}_i\right\|_2^2\\ E(\boldsymbol{m}_i)=\dfrac{1}{2}\left\|\boldsymbol{d}_{\text{obs}}^{\delta(f_i)}-\boldsymbol{L}(\boldsymbol{m}_i)\right\|_2^2\end{cases} \tag{9}$$

基于峰值约束稀疏分解算法构建稀疏分解的全波形反演方法，将地震数据多尺度稀疏分解目标函数的解代入全波形反演目标函数中，建立数据与模型尺度相关的多尺度目标函数。多尺度信号稀疏分解的解为：

$$\tilde{\boldsymbol{d}}^{\delta(f_i)}=\boldsymbol{R}^{\delta(f_i)}\boldsymbol{\alpha}_i \tag{10}$$

则 (9) 式可整理为：

$$E(\boldsymbol{m}_i)=\frac{1}{2}\left\|\boldsymbol{R}^{\delta(f_i)}\boldsymbol{\alpha}_i-\boldsymbol{L}(\boldsymbol{m}_i)\right\|_2^2 \tag{11}$$

(11) 式即为基于稀疏分解的多尺度全波形反演目标泛函。根据地震数据与地层模型尺度关系，从大尺度背景模型开始反演，逐步恢复精细的小尺度扰动模型，从而建立高精度的速度模型。

基于稀疏表示的多尺度全波形反演方法便于在时间域实现，在地震数据多尺度分解时能够避免频谱混叠和干涉的影响，不会引入假频，而且具有较高的时频分辨率。基于稀疏表示的多尺度反演方法与多重网格多尺度方法相结合，能够有效克服周波跳跃问题，避免陷入局部极小，收敛速度快，计算效率也较高。

多尺度反演的频带选择方法采取以下多尺度选取策略[31]：

$$f_{n+1}=\frac{f_n}{\alpha_{\min}} \tag{12}$$

$$\alpha_{\min}=z/\sqrt{h^2+z^2} \tag{13}$$

其中，f_n是当前反演频率，f_{n+1}是下一个要选取的频率，$\alpha_{\min}$是与偏移距h和最大成像深度z有关的参数。当频率为f_n时，垂直波数范围$[k_{z\min}(f_n),k_{z\max}(f_n)]$内的速度分量得以更新，可以通过 (14) 式确定：

$$\begin{cases}k_{z\min}(f_n)=\dfrac{4\pi f_n\alpha_{\min}}{c_0}\\ k_{z\max}(f_n)=\dfrac{4\pi f_n}{c_0}\end{cases} \tag{14}$$

其中，c_0是均匀背景速度。

$$k_{z\min}(f_{n+1})=k_{z\max}(f_n) \tag{15}$$

在时间域反演中，地震数据并不是一个单频分量，其存在一定的带宽，对于给定的带宽会同时存在多个频率。因此，在迭代过程中需要确定每次迭代的数据频带的最小和最大频率，来计算恢复相应的波数范围。

选择一个频带的最小和最大频率的标准取决于所希望两个恢复的波数范围重叠多少，反演含噪声数据时需要更多的频率成分。同样，噪声数据中恢复的波数分量需要更大的重叠区域，这导致在反演中需要更多的频带。

在第 n 个频带中，最小和最大频率$f_{\min}(n)$和$f_{\max}(n)$确定波数范围为：

$$\begin{cases}k_{z\min}(f_n)=\dfrac{4\pi f_{\min}(n)\alpha_{\min}}{c_0}\\ k_{z\max}(f_n)=\dfrac{4\pi f_{\max}(n)}{c_0}\end{cases} \tag{16}$$

类似于 (15) 式，在下一频带处，要更新的最低波数等于当前频带处的最高波数：

$$k_{z\min}(n+1)=k_{z\max}(n) \tag{17}$$

时间域多尺度 FWI 的频率选择策略如图 2 所示。

全波形反演的关键是模型更新量的计算，由梯度类算法获取更新量的核心是计算目标泛函的梯度。通过格林函数法可以有效准确推导目标泛函梯度，求解目标泛函 ((11) 式) 对模型参数的梯度可得：

$$\nabla E(\boldsymbol{m}_i)=\int_{t_0}^{t}-\frac{2}{\boldsymbol{m}_i^3}\frac{\partial^2 u^{\delta(f_i)}}{\partial t^2}\boldsymbol{L}^*\left[\boldsymbol{L}(\boldsymbol{m}_i)-\boldsymbol{R}^{\delta(f_i)}\boldsymbol{\alpha}_i\right],\quad i=1,2,\cdots,M \tag{18}$$

采用梯度法迭代公式进行模型参数迭代更新。

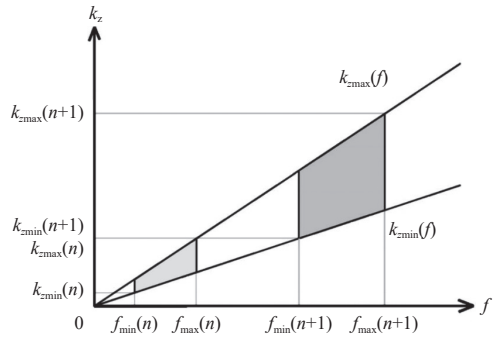

图 2 时间域反演频率选择策略[31]

Fig. 2 Frequency selection strategy in time-domain inversion[31]

$$\boldsymbol{m}_i^{(k)} = \boldsymbol{m}_i^{(k-1)} + \Delta\boldsymbol{m}_i^{(k-1)} = \boldsymbol{m}_i^{(k-1)} - \alpha^{(k-1)}\nabla E(\boldsymbol{m}_i^{(k-1)}),$$
$$i = 1,2,\cdots,M \qquad (19)$$

其中，k为迭代次数，α为迭代步长。

3 模型测试

首先利用数值模型的地震记录分析本文数据分解方法的应用效果。选取某一模拟单炮记录如图 3 所示。地震记录共 301 道，每道数据道长为 1.65 s，采样间隔为 1 ms。使用局部峰值约束数据分解方法对地震记录进行分解与重构。图 4a 和图 4b 分别为地震记录中第 1 道和第 150 道记录的多尺度分解结果，分解尺度为 2 ~ 30 Hz，间隔为 2 Hz。

对稀疏分解的时频道集 (图 4) 数据进行分尺度筛选，将相同尺度的分解道数据重组，可以得到分尺度的地震记录。图 5 展示了 4 个由大尺度至小尺度的分尺度的地震单炮记录。分解得到的多尺度数据为多尺度反演提供了可靠的数据支持。

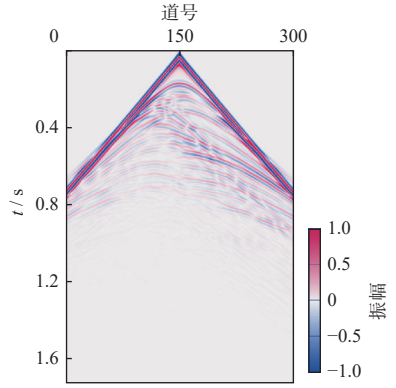

图 3 原始单炮记录

Fig. 3 Original seismic profile

抽取 SEG/EAGE 推覆体模型中 1 条二维线进行模型试算，实际速度模型如图 6 所示。模型大小为：横向 201 个网格点，纵向 116 个网格点，纵、横向网格间距均为 20 m。基于常密度声波波动方程进行正演模拟获得观测地震记录，观测系统参数为：在模型上表面等间隔激发 40 炮，炮间距为 200 m，震源为主频 20 Hz 的 Ricker 子波，时间采样间隔为 0.8 ms，检波点位于模型上表面，间距 20 m，最大偏移距 4 000 m。

利用基于峰值约束稀疏分解的多尺度全波形反演方法进行反演，对实际模型进行高斯平滑得到初始速度模型 (图 7)。图 8a 至图 8c 分别为由低波数向高波数反演的速度模型结果，可以看出低波数反演恢复了速度模型的大尺度背景信息，高波数反演恢复了速度模型的小尺度细节信息，最终得到了精度较高的速度建模结果。从反演结果可以看出，本文方法能够将地质构造及地层速度稳定且精确地反演出来，对于实际资料应用具有较好的指导意义。

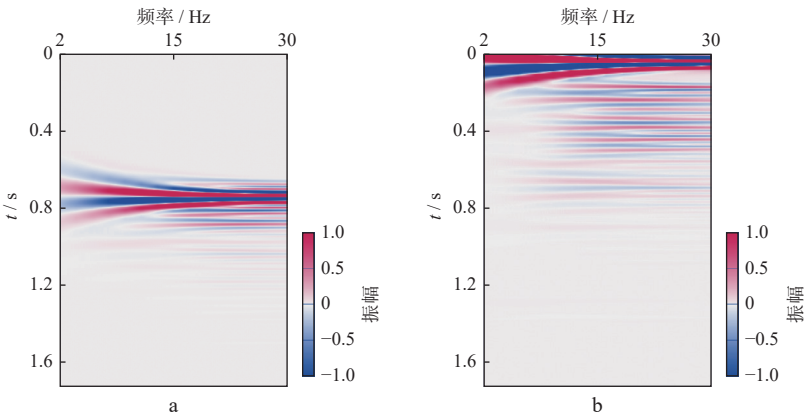

图 4 地震道稀疏分解结果

a 第 1 道分解结果；b 第 150 道分解结果

Fig. 4 Sparse decomposition results of seismic traces

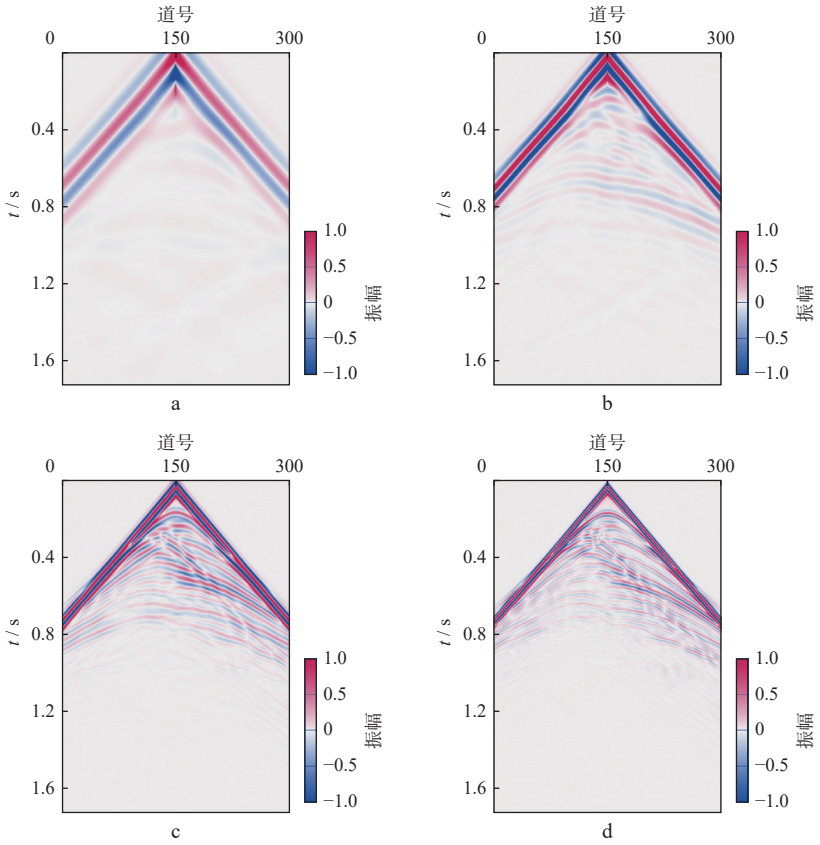

图 5　分尺度地震单炮记录

a 2 Hz 炮集；b 10 Hz 炮集；c 20 Hz 炮集；d 30 Hz 炮集

Fig. 5　Multi-scale seismic shot gathers

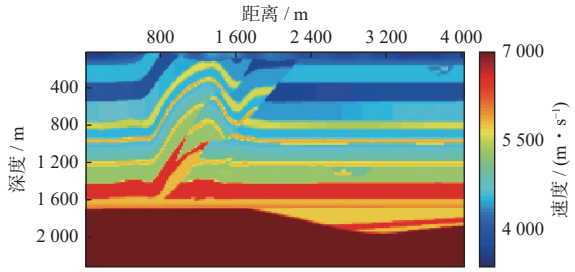

图 6　实际速度模型

Fig. 6　True velocity model

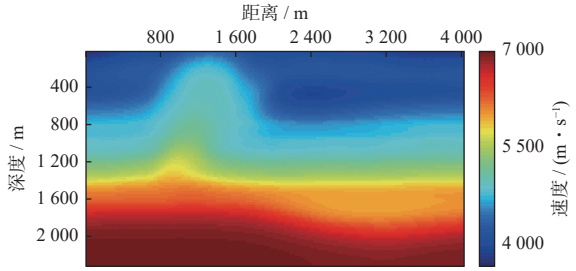

图 7　初始速度模型

Fig. 7　Initial velocity model

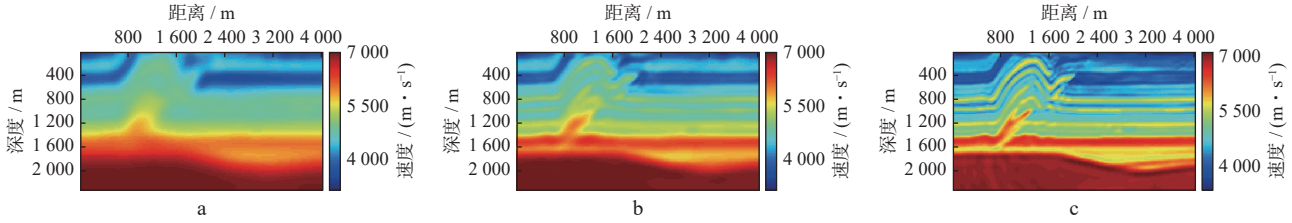

图 8　多尺度反演的速度模型结果

a 低波数反演结果；b 中波数反演结果；c 高波数反演结果

Fig. 8　Multi-scale inversion results

4 实际资料应用

对实际资料进行全波形反演必须采用多尺度全波形反演策略，尤其是对于计算量较大的三维实际资料，需在优化计算效率及存储的基础上开展反演建模。理论上，针对储层进行高波数全波形反演，对储层构造及物性参数精确建模，从而直接进行储层描述，寻找优势储层。

为测试本文方法的有效性，选取某工区二维实际资料进行反演分析。初始速度模型为偏移速度分析速度场，如图 9a 所示。对实际资料进行高波数多尺度全波形反演，共选取了 3 个频带，反演结果如图 9b 至图 9d 所示。对结果进行分析可以看出，随着反演频带的提高，对地层及地质构造的反演刻画逐渐精细。图 9d 箭头指示处为高速砂砾岩储层，随着反演频带的提高，反演结果具有较高的分辨率，可以清楚地刻画砂砾岩体储层的边界及空间展布。图 10 对比了最终的反演结果和测井曲线，反演速度与测井数据吻合性较好，说明在满足一定的频带条件时，利用高波数全波形反演结果的速度异常进行储层预测是可行的，可以对复杂储层进行定量或半定量预测。

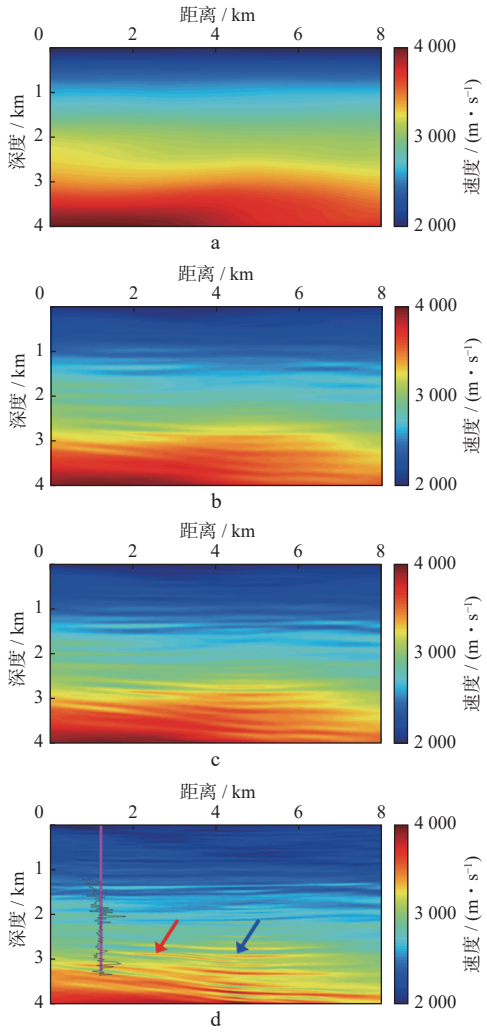

图 9 某二维实际资料高波数全波形反演结果

a 初始模型；b 10 Hz 反演结果；c 16 Hz 反演结果；d 24 Hz 反演结果

Fig. 9 High-wavenumber FWI results of 2D actual data

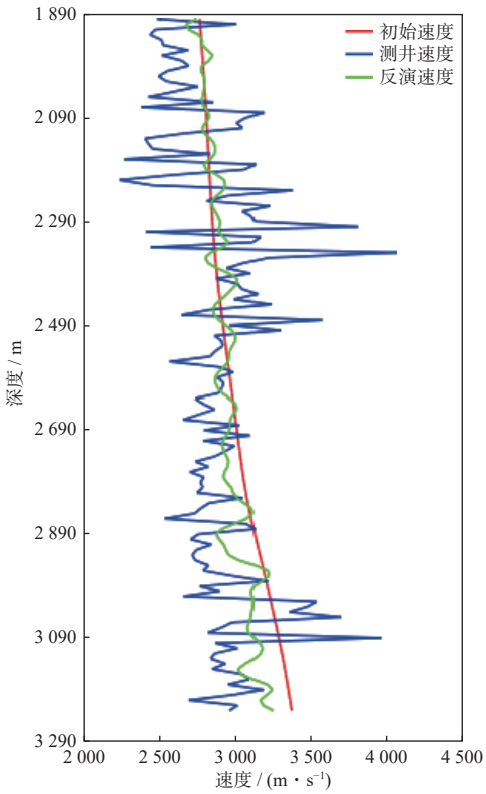

图 10 井旁反演结果对比

Fig. 10 Comparison of inversion results at the well site

5 结论与认识

全波形反演因其强非线性特征，在初始速度模型较差或反演策略选取不当时，容易陷入局部极值。本文利用局部极值约束的匹配追踪算法在稀疏分解中具有高时频分辨率和高精度的优势，建立了地震数据多尺度分解方法。然后，构建了基于稀疏分解的多尺度全波形反演目标泛函，提出分尺度速度模型反演策略。通过多尺度反演，逐级恢复模型中不同尺度成分，避免了陷入局部极小的风险，并具有较高的计算效率。模型测试结果证明了该方法的稳定性和有效性，在实际资料应用中取得了较好的反演结果。表明

采用高波数全波形反演可对特殊岩性体或储层进行半定量预测。

理论上，全波形反演具备较好的储层预测能力，但受限于多重实际因素，在实际应用中往往难以满足全波形反演所需要的条件。因此，多数实际应用场景中全波形反演仅能实现定性的储层预测，直接用于定量储层预测仍面临很多难题。除了需解决全波形反演理论自身非线性的问题外，还需结合其他技术手段，来提高储层预测的精度。

参考文献 (References)

[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(8): 1259-1266.

[3] PRATT R G.Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part 1: Theory and verification in a physical scale model[J].Geophysics, 1999, 64(3): 888-901.

[4] PRATT R G, SHIPP R M.Seismic waveform inversion in the frequency domain, Part 2: Fault delineation in sediments using crosshole data[J].Geophysics, 1999, 64(3): 902-914.

[5] SIRGUE L, BARKVED O I, DELLINGER J, et al.Thematic Set: Full waveform inversion: The next leap forward in imaging at Valhall [J].First Break, 2010, 28(4): 65-70.

[6] FICHTNER A, TRAMPERT J.Resolution analysis in full waveform inversion[J].Geophysical Journal International, 2011, 187(3): 1604-1624.

[7] VIGH D, MOLDOVEANU N, JIAO K, et al.Ultralong-offset data acquisition can complement full-waveform inversion and lead to improved subsalt imaging[J].The Leading Edge, 2013, 32(9): 1116-1122.

[8] GLACCUM K, VIGH D, KOCEL E, et al. Complete full-waveform inversion solution to model building: A Perdido regional case study[J]. Expanded Abstracts of 91st Annual Internat SEG Mtg, 2021: 647-651.

[9] 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 Y F, PENG G X, WU G C, et al.Application of full waveform inversion velocity model-building technology for the fractured-vuggy reservoir[J].Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(7): 2713-2725.

[10] 胡光辉, 李熙盛, 郭丽, 等.构造约束全波形反演及其海上资料应用 [J].石油物探, 2018, 57(4): 592-596.
HU G H, LI X S, GUO L, et al.Structure-constrained full waveform inversion and its application in marine seismic data[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2018, 57(4): 592-596.

[11] 杨顶辉, 董兴朋, 黄建东, 等. 高分辨率全波形地震成像研究——进展、挑战与展望 [J]. 中国科学: 地球科学, 2025, 55(2): 319-347.
YANG D H, DONG X P, HUANG J D, et al. High-resolution full waveform seismic imaging: Progresses, challenges, and prospects[J]. Science China Earth Sciences, 2025, 68(2): 315-342.

[12] 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 L G, HUANG C, CHI B X, et al.Strategy and application of waveform inversion based on seismic data subset[J].Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(10): 3735-3745.

[13] WU R S, LUO J R, WU B Y.Seismic envelope inversion and modulation signal model[J].Geophysics, 2014, 79(3): WA13-WA24.

[14] 王华忠, 冯波, 刘少勇, 等.叠前地震数据特征波场分解、偏移成像与层析反演 [J].地球物理学报, 2015, 58(6): 2024-2034.
WANG H Z, FENG B, LIU S Y, et al.Characteristic wavefield decomposition, imaging and inversion with prestack seismic data[J].Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(6): 2024-2034.

[15] 王华忠, 冯波, 王雄文, 等.特征波反演成像理论框架 [J].石油物探, 2017, 56(1): 38-49.
WANG H Z, FENG B, WANG X W, et al.The theoretical framework of characteristic wave inversion imaging[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2017, 56(1): 38-49.

[16] 陈生昌, 陈国新.时间二阶积分波场的全波形反演 [J].地球物理学报, 2016, 59(10): 3765-3776.
CHEN S C, CHEN G X.Full waveform inversion of the second-order time integral wavefield[J].Chinese Journal of Geophysics, 2016, 59(10): 3765-3776.

[17] 国运东, 孟凡冰, 秦广胜, 等.基于动态平面波的三维多尺度全波形反演方法 [J].石油物探, 2022, 61(4): 616-624.
GUO Y D, MENG F B, QIN G S, et al.3D multi-scale full waveform inversion based on the dynamic plane-wave encoding method[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2022, 61(4): 616-624.

[18] 胡勇, 黄兴国, 符力耘, 等.基于弹性波动方程的局部尺度走时反演 [J].地球物理学报, 2024, 67(10): 3874-3890.
HU Y, HUANG X G, FU L Y, et al.Elastic wave-equation-based local-scale traveltime inversion[J].Chinese Journal of Geophysics, 2024, 67(10): 3874-3890.

[19] BUNKS C, SALECK F M, ZALESKI S, et al.Multiscale seismic waveform inversion[J].Geophysics, 1995, 60(5): 1457-1473.

[20] MALLAT S G, ZHANG Z F.Matching pursuits with time-frequency dictionaries[J].IEEE Transactions on Signal Processing, 1993, 41(12): 3397-3415.

[21] DAVIS G M, MALLAT S G, ZHANG Z F.Adaptive time-frequency decompositions[J].Optical Engineering, 1994, 33(7): 2183-2191.

[22] 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(5): 667-673.
ZHANG F C, LI C H, YIN X Y.Seismic data fast matching pursuit based on dynamic matching wavelet library[J].Oil Geophysical Prospecting, 2010, 45(5): 667-673.

[23] 李京南.基于匹配追踪算法的地震数据提高分辨率方法 [J].石油物探, 2024, 63(3): 571-577.
LI J N.Seismic resolution enhancement based on matching pursuit algorithm[J].Geophysical Prospecting for Petroleum, 2024, 63(3): 571-577.

[24] PATI Y C, REZAIIFAR R, KRISHNAPRASAD P S. Orthogonal matching pursuit: Recursive function approximation with applications to wavelet decomposition[C]//Proceedings of the 27th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers. Pacific Grove: IEEE, 1993: 40-44.

[25] 张繁昌, 李传辉.基于正交时频原子的地震信号快速匹配追踪 [J].地球物理学报, 2012, 55(1): 277-283.
ZHANG F C, LI C H.Orthogonal time-frequency atom based fast matching pursuit for seismic signal[J].Chinese Journal of Geophysics,

2012, 55(1): 277-283.

[26] 杜泽源, 杨森, 陶永慧, 等.基于局部峰值约束的快速正交匹配追踪地震数据分解方法 [J].物探化探计算技术, 2021, 43(4): 420-428.
DU Z Y, YANG S, TAO Y H, et al.Fast orthogonal matching pursuit seismic data decomposition method based on local peak constraint[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2021, 43(4): 420-428.

[27] 张繁昌, 李传辉.地震信号复数域高效匹配追踪分解 [J].石油地球物理勘探, 2013, 48(2): 171-175.
ZHANG F C, LI C H.Complex domain efficient matching pursuit decomposition of seismic signals[J].Oil Geophysical Prospecting, 2013, 48(2): 171-175.

[28] 李海山. 基于稀疏表示理论的地震信号处理方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2013.
LI H S. Seismic signal processing methods based on sparse representation theory[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.

[29] 宗兆云. 基于模型驱动的叠前地震反演方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2013.
ZONG Z Y. Methodologies of model driven inversion with pre-stack seismic data[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2013.

[30] 杜泽源. 多尺度地震全波形反演方法研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2019.
DU Z Y. Methodologies of multi-scale seismic full waveform inversion [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2019.

[31] SIRGUE L, PRATT R G.Efficient waveform inversion and imaging: A strategy for selecting temporal frequencies[J].Geophysics, 2004, 69(1): 231-248.

（编辑：王 晨）