

基于逆散射理论的地震波速度正则化反演

段晓亮 王一博 杨慧珠

Regularized seismic velocity inversion based on inverse scattering theory

Duan Xiao-Liang Wang Yi-Bo Yang Hui-Zhu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 078901 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.078901

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.078901>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I7>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

带有分数阶热流条件的时分数阶热波方程及其参数估计问题

[Parameters estimation for a one-dimensional time fractional thermal wave equation with fractional heat flux conditions](#)

物理学报.2014, 63(14): 140202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.140202>

构造 Birkhoff 表示的广义 Hojman 方法

[General Hojman's method for the construction of Birkhoffian representation](#)

物理学报.2013, 62(9): 090205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.090205>

相位差图像复原技术研究

[Phase diversity image restoration](#)

物理学报.2012, 61(23): 230203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.230203>

基于双带宽高斯滤波器的磁共振弹性图局域频率估算算法研究与实现

[Study and realization of local frequency estimation algorithm in magnetic resonance elasto-graphy based on dual-bandwidth Gaussian filters](#)

物理学报.2011, 60(9): 090204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.090204>

原油期货与现货价格联动性的复杂网络拓扑性质

[Analysis on the topological properties of the linkage complex network between crude oil future price and spot price](#)

物理学报.2011, 60(6): 068902 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.60.068902>

基于逆散射理论的地震波速度正则化反演*

段晓亮^{1)†} 王一博²⁾ 杨慧珠¹⁾

1) (清华大学航天航空学院, 北京 100084)

2) (中科院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

(2014年5月6日收到; 2014年11月8日收到修改稿)

本文基于逆散射理论利用正则化有限差分对比源反演算法对地震波传播速度进行反演, 该方法是基于波动方程的频率域波形反演算法, 利用非线性共轭梯度法, 通过最小化目标优化函数不断迭代更新速度模型. 由于地球物理反演问题的病态性和不稳定性, 通过基于反演参数总变差的正则化处理, 使反演问题变为良性问题且算法具有较强的抗噪声干扰能力. 反演过程中使用了频率-空间域9点差分正演算子以及PML吸收边界条件. 与其他反演算法相比, 由于背景模型在反演迭代过程中保持不变, 可以避免在每次迭代过程中重新构造正演算子及矩阵分解等相关计算过程, 使得该算法非常适合于大规模三维反演计算. 此外, 本文采用基于MPI的并行计算, 进一步提高了反演计算的效率. 二维CSEG模型反演结果表明该方法可以反演得到高分辨率的地震波速度重建结果, 为地震勘探数据处理及解释提供准确的速度信息.

关键词: 反演, 地震波速度, 逆散射, 正则化

PACS: 89.30.aj, 93.85.Rt, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.64.078901

1 引言

随着人类社会对油气资源需求量的不断增加, 地震波勘探目标已经从地质条件相对简单的地区向复杂构造地区迈进, 寻找隐蔽油气藏成为今后油气勘探的重点. 在复杂地区隐蔽油气藏的高精度勘探中, 散射波地震勘探技术逐渐引起了人们的重视. 散射波是由地下非均匀体扰动引起的波场畸变现象, 与反射波相比, 散射波的产生条件更加宽泛^[1], 反射波是散射波的一种特例, 散射波在地下介质中的传播过程符合惠更斯原理, 传统的各种波动形式如反射波、绕射波、折射波等都是散射波在不同条件下的特殊表现形式. 对于地下小尺度的地质体, 地震波入射到这些地质体时会产生散射波而不是反射波, 所以散射波理论更适合描述小尺度的地质体, 利用散射波信息可以识别反射波无法识别的小尺度地质构造, 因此散射波的研究对未来油气

勘探活动具有重要意义. 李灿苹等^[2]对随机非均匀介质中的散射波特征及其振幅特征进行了分析, 结果显示散射波分布于整个地震记录中. 尹军杰等^[3]对基于散射成像的地震采集参数论证和观测系统的优化设计进行了研究并应用于实际勘探活动中.

传统的基于一次反射假设的反射波地震勘探技术认为一次反射波以外的其余信息都是噪声而将这些地震波信号除去, 散射波地震勘探技术将这些包含有地下构造特征的非一次反射地震波信息作为有效信息加以利用. 散射理论是一种扰动理论, 该理论建立了介质物性参数扰动与相应的波场扰动之间的关系. 散射波地震勘探理论认为不论地下非均匀体的具体形态如何, 只要与周围介质之间存在速度和密度差异, 就可以形成散射波并被记录下来, 可以利用这些散射波场信息对地下不均匀体进行反演成像.

地球物理领域中的反演问题从本质上来说是

* 国家自然科学基金 (批准号: 41174094) 和国家科技重大专项 (批准号: 2011ZX05004-003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: gfkjdxdl@aliyun.com

病态和非线性的, 地球物理学家们提出了一系列的反演方法, 这些方法大致可以分为线性反演和非线性反演两类. 线性反演方法将问题作线性近似得以求解, 如Born近似^[4]以及Rytov近似^[5]等, 这些算法只有在某些特定情况下才能得到合理的反演结果. 由于线性反演方法固有的局限性, 国内外学者提出了一系列非线性反演方法, 按反演方法是否具有全局搜索能力, 可以分为两类: 第一类是基于目标函数局部微分特性的局部线性化迭代方法, 如共轭梯度法、高斯-牛顿法等梯度类算法^[6], 该方法将非线性反演问题近似为局部线性问题, 计算效率较高, 但由于梯度的局部性特征, 该方法在目标函数存在多极值的情况下, 反演容易陷入局部极值, 对初始模型的选取比较苛刻; 第二类为随机搜索完全非线性反演方法, 如蒙特卡洛法^[7]、模拟退火法^[8]、神经网络方法^[9]等, 该方法在模型空间中随机的全局搜索, 不会陷入局部极值, 对初始模型的选取要求不严格, 缺点是收敛速度较慢.

波形反演方法^[10]可以高分辨率的重建地下构造, 反演可以在时间域进行^[11], 也可以在频率域进行^[12]. 对比源反演算法^[13]是一种高效的非线性波形反演方法, 该方法主要应用于电磁波反演领域^[14], 近几年有学者将该方法应用于地震波反演领域^[15]. 对比源反演算法首先由Van den Berg等提出^[16], 该方法是基于积分方程的反演算法, 当背景模型为均匀介质或简单层状介质时算法具有较高的效率, 此时利用可以解析表达的格林函数进行积分近似求解, 然而当背景模型为非均匀介质时, 需要数值计算格林函数, 这将大大增加反演的计算量. 丁亮等^[17]基于有限元对比源逆成像法对非均一背景金属圆柱腔体进行了微波断层成像研究. Abubakar等将积分型对比源反演算法进一步推广到有限差分对比源算法(finite difference contrast source inversion, FDCSI)^[18,19], 使算法适应于背景模型为任意非均匀介质的情形, 提高了反演结果的分辨率.

逆散射问题就是通过对散射体外部物理场的探测来估计其内部结构以及介质物性参数信息, 近几十年来逆散射理论在基础理论和正反演技术方面都取得了很大的发展, Beylkin利用逆散射方法对介质不连续界面进行了反演成像研究^[20], Bleistein等将Born逆散射理论应用于地震波勘探领域^[21], 建立了以小扰动理论为基础的速度反演

理论, 杨文采将逆散射理论与迭代线性化反演方法相结合, 导出了波动方程逐次线性化迭代方法^[22], 丁科等利用逆散射理论对含有多次波的地震数据进行奇性反演^[23]. 徐基祥等^[24]对逆散射成像方法在未来复杂构造成像方面的潜力进行了展望, 为散射波勘探的实现提供了前期技术储备.

地球物理反演问题是病态的, 通常应用正则化技术使问题得以求解^[25], 正则化反演的目标函数分为两部分: 第一部分为数据拟合, 第二部分为模型约束. 常见的Tinhonov正则化是线性正则化^[26], 附加的约束条件是使反演结果更加平滑; 另外一种正则化方法为减小模型反演参数的总变差, 该方法主要应用于图像处理和电磁反演领域, 该方法可以同时保持反演模型的平滑特性和边缘保持特性^[27]. Rudin等提出以总变差作为图像平滑性的度量值^[28], 建立了基于总变差的图像复原方法. Askan等将总变差正则化应用于全波形反演中^[29], Hu等将基于总变差的加权正则化方法应用于频率域地震波全波形反演中^[30]. 本文在地震波速度反演过程中将对比度总变差项作为优化目标函数的附加约束项, 使反演过程更加稳定.

2 问题描述

逆散射理论示意图如图1所示, 我们将地表放置检波器的区域称为数据域S, 将地下勘探目标称为反演目标域D, 数据域S和目标域D的总和称为总区域T. 假设有一个不同于真实模型的背景模型, 引入一个变量 $\chi(r)$, 该变量表示真实模型相对于背景模型的物性参数扰动, 本文研究对象为地震波在介质中的传播速度参数. 当目标域中的任一点背景模型与真实模型地震波传播速度相同时, 有 $\chi(r) = 0$, 当两者速度不同时, 有 $\chi(r) \neq 0$, 反演过程中不断更新 $\chi(r)$ 的值, 并最终得到目标区域的真实速度分布.

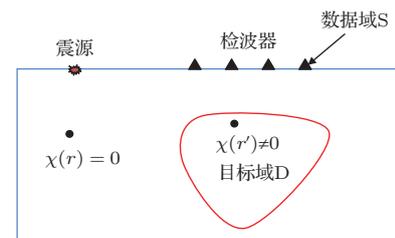


图1 逆散射理论示意图

3 反演算法

3.1 有限差分对比源反演算法

频率-空间域各向同性介质中的地震波传播满足 Helmholtz 方程

$$[\nabla^2 + k^2(r)] p_j(r) = -Q(r, r_j^s), \quad r \in T, \quad (1)$$

式中, $p_j(r)$ 表示第 j 炮产生的空间位置 r 处的总波场值, ∇^2 表示拉普拉斯算子, $k(r)$ 表示空间位置 r 处的波数, T 表示地下半空间, $Q(r, r_j^s)$ 表示位于 $r_j^s = (x_j^s, z_j^s)$ 处的震源项, 本文震源项为给定主频 f_p 的雷克子波.

将真实模型的总波场 p_j 写成背景波场 p_j^{bac} 和散射波场 p_j^{sca} 之和,

$$p_j = p_j^{\text{bac}} + p_j^{\text{sca}}. \quad (2)$$

背景波场满足 Helmholtz 方程

$$[\nabla^2 + k_b^2(r)] p_j^{\text{bac}}(r) = -Q(r, r_j^s), \quad r \in T, \quad (3)$$

其中 $k_b(r)$ 为空间位置 r 处的背景模型波数.

将 (3) 式从 (1) 式中减去, 利用 (2) 式, 可以得到散射波场 $p_j^{\text{sca}}(r)$ 满足的方程

$$[\nabla^2 + k_b^2(r)] p_j^{\text{sca}}(r) = -k_b^2(r) w_j(r), \quad r \in T. \quad (4)$$

此处引入一个新变量 $w_j(r)$, 称为对比源, 由下式定义给出:

$$w_j(r) = \chi(r) p_j(r). \quad (5)$$

由 (4) 式可以将对比源看作是产生散射波的源项, 其中 $\chi(r)$ 称为对比度, 由下式定义:

$$\begin{aligned} \chi(r) &= \left[\frac{k(r)}{k_b(r)} \right]^2 - 1 \\ &= \frac{c^{-2}(r) - c_b^{-2}(r)}{c_b^{-2}(r)}, \quad r \in D, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $c(r)$ 表示地震波在真实模型中的传播速度, $c_b(r)$ 表示地震波在背景模型中的传播速度, 从对比度的定义式可以看出, 对比度表示真实模型相对于背景模型地震波传播速度的相对扰动量.

方程式 (4) 可以用有限差分算子表示为

$$\mathbf{H}_b(p_j^{\text{sca}}(r)) = -k_b^2(r) w_j(r), \quad r \in T, \quad (7)$$

算子 \mathbf{H}_b 表示频率-空间域波动方程有限差分正演算子, 上式的解 $p_j^{\text{sca}}(r)$ 可以写为

$$p_j^{\text{sca}}(r) = \mathbf{H}_b^{-1} [-k_b^2(r) w_j(r)]$$

$$= \mathbf{L}_b [w_j(r)], \quad r \in T. \quad (8)$$

算子 \mathbf{L}_b 表示为

$$\mathbf{L}_b [\cdot] = \mathbf{H}_b^{-1} [-k_b^2(r)(\cdot)]. \quad (9)$$

本文使用频率-空间域 9 点差分格式 [31] 构建正演算子 \mathbf{L}_b , 在正演模拟过程中利用频率域 PML 边界条件吸收计算区域边界产生的人为反射 [32].

定义数据域方程

$$p_j^{\text{sca}}(r) = \mathbf{M}^S \{ \mathbf{L}_b [w_j(r')] \}, \quad r \in S, r' \in T, \quad (10)$$

其中算子 \mathbf{M}^S 表示从总计算域 T 中选取地表检波器接收到的波场数据.

背景波场可以写为

$$p_j^{\text{bac}} = p_j - p_j^{\text{sca}} = p_j - \mathbf{M}^D \{ \mathbf{L}_b [w_j] \}. \quad (11)$$

在 (11) 式两边乘以对比度 χ , 定义反演域方程

$$\chi p_j^{\text{bac}} = w_j - \chi \mathbf{M}^D \{ \mathbf{L}_b [w_j] \}, \quad (12)$$

其中算子 \mathbf{M}^D 表示从总计算域 T 中选取反演目标域 D 中的波场数据.

传统反演算法的目标优化函数由数据域误差构成, 对比源反演算法的目标优化函数由数据域误差和反演域误差组合而成, 使反演算法更加稳定. 对比源反演算法利用非线性共轭梯度法在最小化目标优化函数的过程中不断更新对比源 w , 总波场 p 和对比度 χ , 进而最终得到模型的速度参数分布, FDCSI 算法的目标优化函数为

$$\begin{aligned} F(\chi, w_j) &= F^S(w_j) + F^D(\chi, w_j) \\ &= \frac{\sum_j \| f_j - \mathbf{M}^S \{ \mathbf{L}_b [w_j] \} \|_S^2}{\sum_j \| f_j \|_S^2} \\ &\quad + \frac{\sum_j \| \chi p_j^{\text{bac}} - w_j + \chi \mathbf{M}^D \{ \mathbf{L}_b [w_j] \} \|_D^2}{\sum_j \| \chi p_j^{\text{bac}} \|_D^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

上式中右端第一项表示数据域误差项, 第二项表示反演域误差项, f_j 为地表检波器接收到的散射波数据.

数据域 S 和反演域 D 中的内积分别定义为

$$\begin{aligned} \| u_j \|_S^2 &= \int_S u_j(r) u_j^*(r) dr, \\ \| u_j \|_D^2 &= \int_D u_j(r) u_j^*(r) dr, \end{aligned} \quad (14)$$

其中 u_j 表示数据域 S 或反演域 D 中的任意元素, 式中 $*$ 表示取复共轭.

利用非线性共轭梯度法, 对比源 $w_{j,n}$ 由下式更新:

$$w_{j,n} = w_{j,n-1} + \alpha_{j,n}^w v_{j,n}, \quad (15)$$

其中下标 n 为迭代步数, $\alpha_{j,n}^w$ 为迭代步长, $v_{j,n}$ 表示 Polak-Ribiere 搜索方向, 定义如下:

$$\begin{aligned} v_{j,0} &= 0, \\ v_{j,n} &= g_{j,n}^w \\ &+ \frac{\sum_j \langle g_{j,n}^w, g_{j,n}^w - g_{j,n-1}^w \rangle_D}{\sum_j \|g_{j,n-1}^w\|_D^2} v_{j,n-1}, \end{aligned} \quad (16)$$

其中 $g_{j,n}^w$ 表示第 n 迭代步中目标优化函数关于对比源 w_j 的梯度, 对比源反演算法目标优化函数由数据域误差和反演域误差组合而成, 其中数据域误差函数 $F^S(w_j)$ 关于对比源 w_j 的 Frechet 导数为

$$\begin{aligned} &\frac{\partial F^S(w_j)}{\partial w_j} \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{F^S(w_j + \varepsilon g_j) - F^S(w_j)}{\varepsilon} \\ &= \mathbf{R} \langle -2\eta^S \mathbf{L}_b^* \{ \mathbf{M}^{S*} [\rho(w_j)] \}, g_j \rangle_D, \end{aligned} \quad (17)$$

其中 \mathbf{R} 表示取复数的实部, $\rho(w_j)$ 为数据域误差,

$$\rho(w_j) = f_j - \mathbf{M}^S \{ \mathbf{L}_b [w_j] \}. \quad (18)$$

反演域误差函数 F_n^D 关于对比源 w_j 的 Frechet 导数为

$$\begin{aligned} &\frac{\partial F_n^D(\chi_{n-1}, w_j)}{\partial w_j} \\ &= \lim_{\varepsilon \rightarrow 0} \frac{F_n^D(\chi_{n-1}, w_j + \varepsilon g_j) - F_n^D(\chi_{n-1}, w_j)}{\varepsilon} \\ &= \mathbf{R} \langle -2\eta_n^D (r(w_j) \\ &\quad - \mathbf{L}_b^* \{ \mathbf{M}^{D*} [\chi_{n-1}^* r(w_j)] \}), g_j \rangle_D, \end{aligned} \quad (19)$$

其中 $r(w_j)$ 为反演域误差, 表示为

$$\begin{aligned} r(w_j) &= \chi_{n-1} p_j^{\text{bac}} - w_j \\ &+ \chi_{n-1} \mathbf{M}^D \{ \mathbf{L}_b [w_j] \}. \end{aligned} \quad (20)$$

由 (17) 式, (19) 式以及梯度的定义 [33], 目标函数 $F(\chi, w_j)$ 关于对比源 w_j 的梯度为

$$\begin{aligned} &g_{j,n}^w \\ &= \left. \frac{\partial F(\chi_{n-1}, w_j)}{\partial w_j} \right|_{w_j=w_{j,n-1}} \\ &= -\eta^S \mathbf{L}_b^* \{ \mathbf{M}^{S*} [\rho_{j,n-1}] \} \\ &\quad - \eta_n^D (r_{j,n-1} - \mathbf{L}_b^* \{ \mathbf{M}^{D*} [\chi_{n-1}^* r_{j,n-1}] \}), \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} \eta^S &= \left(\sum_j \|f_j\|_S^2 \right)^{-1}, \\ \eta_n^D &= \left(\sum_j \|\chi_{n-1} p_j^{\text{bac}}\|_D^2 \right)^{-1}. \end{aligned}$$

在梯度的计算中, 要用到算子 \mathbf{L}_b 的伴随算子 \mathbf{L}_b^* , 此处为正演算子矩阵的共轭转置. 算子 $\mathbf{M}^{S*}, \mathbf{M}^{D*}$ 分别表示算子 $\mathbf{M}^S, \mathbf{M}^D$ 的伴随算子, 其中 \mathbf{M}^{D*} 是将反演域中的数据映射到总计算域 Γ 中, 算子 \mathbf{M}^{S*} 是将数据域中的数据除以反演域离散单元的面积 $\Delta x \Delta z$ 然后再映射到总计算域 Γ 中.

将 (15) 式代入 (13) 式, 令 $\frac{\partial F}{\partial \alpha_{j,n}^w} = 0$, 得到迭代步长 $\alpha_{j,n}^w$ 为

$$\begin{aligned} &\alpha_{j,n}^w \\ &= -\sum_j \langle g_{j,n}^w, v_{j,n} \rangle_D \left(\eta^S \sum_j \|\mathbf{M}^S \{ \mathbf{L}_b [v_{j,n}] \}\|_S^2 \right. \\ &\quad \left. + \eta_n^D \sum_j \|v_{j,n} - \chi_{n-1} \mathbf{M}^D \{ \mathbf{L}_b [v_{j,n}] \}\|_D^2 \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (22)$$

更新对比源 $w_{j,n}$ 以后更新总波场 $p_{j,n}$ 为

$$p_{j,n} = p_{j,n}^{\text{bac}} + \mathbf{M}^D \{ \mathbf{L}_b [w_{j,n}] \}. \quad (23)$$

最后对比度 χ 由最小化反演域误差项的分子得到

$$\chi_n^c = \frac{\sum_j \mathbf{R}(w_{j,n} p_{j,n}^*)}{\sum_j |p_{j,n}|^2}. \quad (24)$$

地球物理反演问题是病态和不稳定的, 正则化技术通过引入一定的约束条件使问题变为良性问题, 可以提高反演算法的稳定性和抗干扰能力, 本文引入基于对比度总变差的正则项:

$$\begin{aligned} F_n(\chi, w_j) &= (F^S(w_j) + F_n^D(\chi, w_j)) \\ &+ \lambda F_n^R(\chi), \end{aligned} \quad (25)$$

其中正则化系数 λ 取 0.0005, $F_n^R(\chi)$ 是基于对比度总变差的正则项, 由下式定义:

$$F_n^R(\chi) = \int_D b_n^2(r) (|\nabla \chi(r)|^2 + \delta_n^2) dr, \quad (26)$$

其中加权系数 $b_n^2(r)$ 为

$$b_n^2(r) = \frac{1}{V (|\nabla \chi_{n-1}(r)|^2 + \delta_n^2)}, \quad (27)$$

其中 V 表示反演域面积, 系数 δ_n^2 的值为

$$\delta_n^2 = \frac{F_n^D(\chi_{n-1}, w_{j,n-1})}{\Delta x \Delta z}. \quad (28)$$

添加正则项后, 由于正则项只与对比度值有关, 所以迭代过程中更新对比源 $w_{j,n}$ 和总波场值 $p_{j,n}$ 的过程没有变化, 更新对比度值时在前面得到的对比度 χ_n^c 的基础上, 利用非线性共轭梯度法更新对比度值 χ_n 为

$$\chi_n = \chi_n^c + \alpha_n^x d_n, \quad (29)$$

其中 d_n 为 Polak-Ribire 搜索方向. 与前面梯度计算方法类似, 正则化目标优化函数 $F_n(\chi, w_j)$ 关于对比度 χ_n 的梯度为

$$g_n^x = \eta_n^D \sum_j (\chi_n^c p_{j,n} - w_{j,n}) p_{j,n}^* - \lambda \nabla \cdot (b_n^2 \nabla \chi_n^c). \quad (30)$$

系数 α_n^x 由最小化下式得到:

$$\alpha_n^x = \min_{\alpha^x} [F_n(\chi_n^c + \alpha^x d_n, w_{j,n})]. \quad (31)$$

上式中 F_n 可以写为关于 α^x 的二次多项式, 令 $\frac{\partial F_n(\alpha^x)}{\partial \alpha^x} = 0$ 即可以得到更新系数 α_n^x 的值.

经过上述一次迭代过程, 计算第 n 迭代步的目标优化函数值, 如果没有达到预先设定的误差限, 则迭代继续进行直到满足收敛条件, 最后根据对比度值由 (6) 式得到反演目标域中的速度分布.

3.2 初始模型选取

在反演问题中, 初始模型的选取对反演能否得到正确结果至关重要, 本文采用反传播方法得到反演迭代的初始值^[34], 迭代初始值 $w_{j,0}$, $p_{j,0}$, χ_0 分别由下式给出:

$$w_{j,0} = \frac{\|L_b^*(M^{S*}[f_j])\|_D^2}{\|M^S\{L_b[L_b^*(M^{S*}[f_j])]\}\|_S^2} \times L_b^*(M^{S*}[f_j]), \quad (32)$$

$$p_{j,0} = p_j^{\text{bac}} + M^D\{L_b(w_{j,0})\}, \quad (33)$$

$$\chi_0 = \frac{\sum_j R[w_{j,0} p_{j,0}^*]}{\sum_j |p_{j,0}|^2}. \quad (34)$$

4 数值算例

为了验证有限差分对比源反演算法对复杂地质模型的适应能力, 我们以国际上标准的 CSEG

起伏地表模型为测试对象, 该模型是 Amoco 和 BP 公司设计的加拿大起伏地表逆掩断层模型, 真实速度模型见图 2 所示, 模型速度范围为 3600—6000 m/s, 该模型横向速度变化剧烈, 可以产生较强的散射波, 逆掩断层发育, 存在负向构造. 模型在 x 和 z 方向被离散为 332×142 个等间距网格, 网格间距为 15 m, 震源采用主频为 7.5 Hz 的雷克子波, 我们采用四个频率 (4 Hz, 12 Hz, 16 Hz, 20 Hz) 依次进行反演. 地震数据由均匀分布于地表的 83 炮产生, 炮间距为 60 m, 检波器布置在地表所有网格点上. 假设初始背景模型速度分布为由上到下线性增加, 速度范围为 4000—6000 m/s, 初始背景速度模型见图 3 所示. 反演过程中将低频的反演速度模型作为下一个高频反演的背景模型, 反演迭代初始值由反传播方法给出, 反演计算过程中采用了基于 MPI 的并行算法, 大大提高了反演的计算效率.

本文利用基于对比度总变差的正则化 FDCSI 算法进行速度反演, 为了测试正则化反演算法的抗干扰能力, 在每个单频反演中将检波器散射波数据加入 5% 的随机噪声:

$$d'_j(r) = d_j(r) + 0.05(a + bi)\max(d_j(r)), \quad (35)$$

其中 r 表示地表检波器的位置, $d'_j(r)$ 表示第 j 炮产生的含有随机噪声的位于地表 r 处的检波器散射波数据, $d_j(r)$ 表示不含噪声的散射波数据, a, b 为 $(-1, 1)$ 之间的随机数.

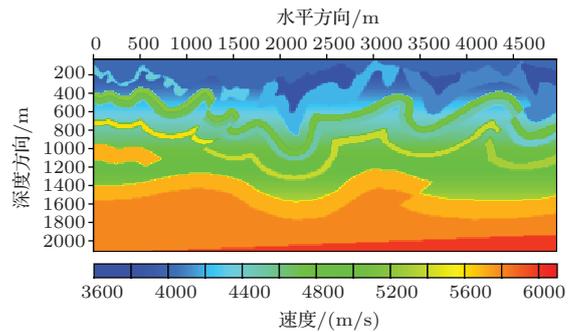


图 2 (网刊彩色) CSEG 真实速度模型

单频反演结果见图 4 所示, 从图中可以看出: 随着反演频率不断提高, 反演重建速度模型的分辨率也逐渐提高, 从反演结果可以看出整个模型包括深层部分的重建速度分布都比较准确, 模型中的速度异常体可以得到比较准确的反演成像, 一些小尺度构造也可以得到有效识别, 对算法进行正则化处理可以提高反演过程的稳定性, 在有噪声干扰的情

况下也可以得到正确的反演结果, 可以看出正则化 FDCSI 算法能够满足速度变化剧烈的地质构造速度建模的要求, 可以用于今后复杂构造地区隐蔽油气藏的勘探开发.

如图 5 所示, 我们比较了 CSEG 真实模型与 20 Hz 反演重建模型在不同水平位置处沿深度方向的速度分布情况, 水平位置分别位于地表 $x = 1995$ m, $x = 2985$ m 处. 从图中速度分布曲线可以看出, 反演重建模型与真实模型深度方向速度分布符合较好, 反演速度模型基本上真实的反映了真实模型的速度分布情况.

此外我们计算了真实模型和 20 Hz 反演模型位于地表不同位置处检波器的时间响应曲线图, 结果见图 6 所示, 炮点位于地表 $x = 2865$ m 处, 检波器

分别位于地表 $x = 1365$ m, 4500 m 处, 从结果可以看出, 两者地表检波器接收到的时间域响应也非常相近, 说明反演重建速度模型合理准确, 进一步验证了算法的可靠性.

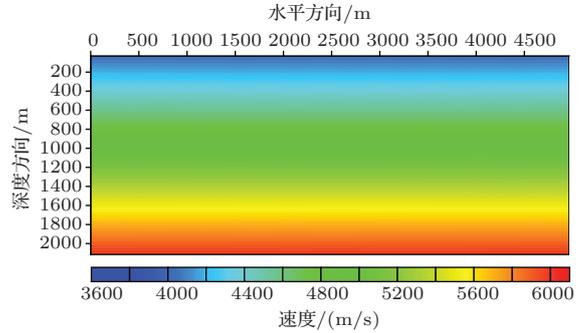


图 3 (网刊彩色) 反演初始背景速度模型

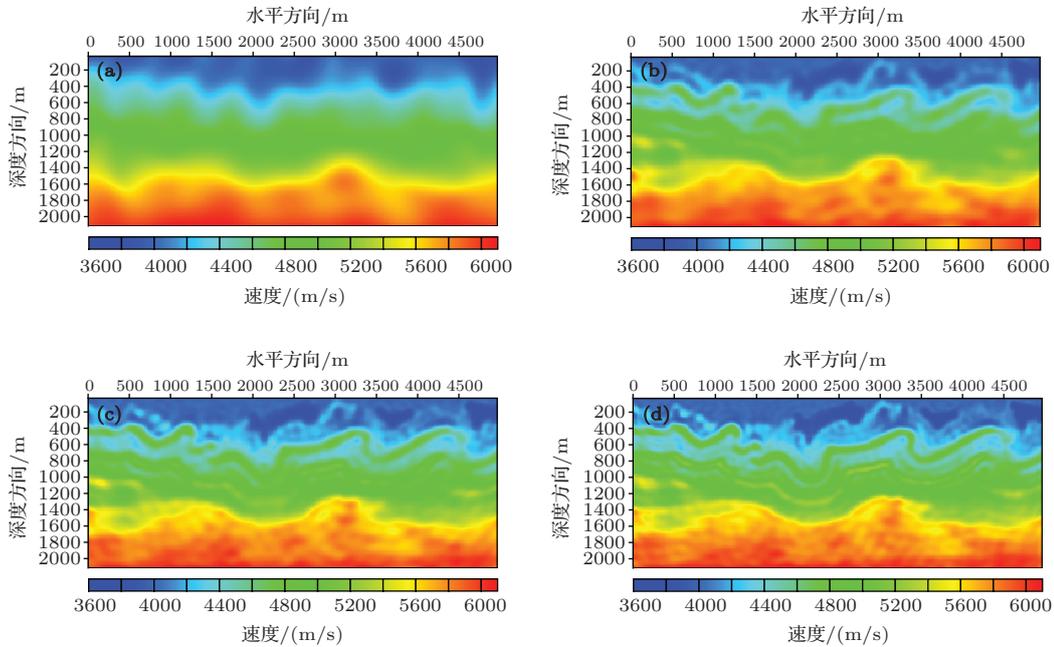


图 4 (网刊彩色) CSEG 模型不同频率反演结果 (a) $f = 4$ Hz; (b) $f = 12$ Hz; (c) $f = 16$ Hz; (d) $f = 20$ Hz

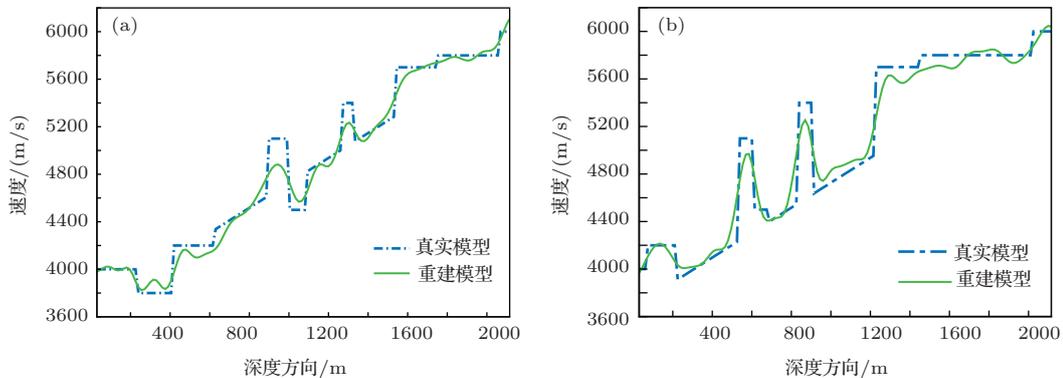


图 5 (网刊彩色) CSEG 真实模型与 20 Hz 反演模型不同水平位置沿深度方向速度分布对比曲线 (a) 地表水平位置 $x = 1995$ m; (b) $x = 2985$ m

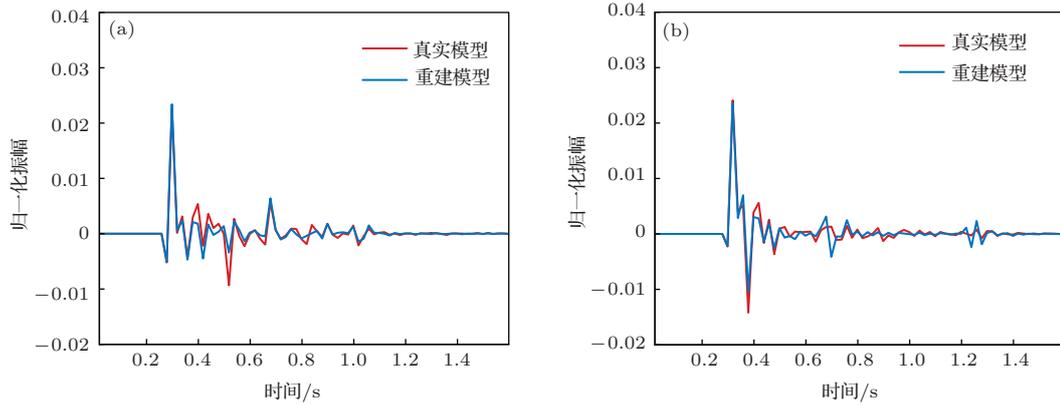


图6 (网刊彩色) CSEG 真实模型与 20 Hz 重建模型地表不同位置检波器时间响应曲线对比图 (a) 检波器位于地表 $x = 1365$ m; (b) $x = 4500$ m

通过 CSEG 模型速度反演结果可以看出, FD-CSI 算法适应于非均匀背景模型的情形, 反演过程中将低频反演结果作为高频反演的背景模型, 这样做的好处是可以使背景模型更加接近于真实模型, 通过迭代反演不断更新波场值和速度模型. 该算法的每一步迭代都是基于双程声波方程的, 这与现今比较流行的全波形反演有相似之处, 区别在于全波形反演在每次迭代中都需要重新构造正演系数矩阵用来计算波场值和梯度值, 而 FD-CSI 反演算法在每一个单频反演过程中背景模型是不变的, 避免了重新构造正演矩阵的过程, 大大减少了反演过程中相关正演模拟的计算量, 使该算法适合于大规模三维地质构造速度反演问题.

5 结 论

FD-CSI 算法是基于全声波方程的波形反演算法, 从散射波场信息中反演介质物性参数分布. 基于对比度总变差的正则化处理可以使算法更加稳定, 进一步提高了算法的抗干扰能力. 由于 FD-CSI 算法在反演过程中背景模型是不变的, 所以只需在迭代的初始阶段构造正演系数矩阵, 而在后面的迭代步中不需要重新构造正演矩阵, 大大提高了反演计算的效率, 使算法可以适应实际大规模三维油气勘探的需要.

由 CSEG 模型反演结果可以看出, FD-CSI 算法可以适应复杂地质模型速度参数反演重建的需要, 可以为隐蔽油气藏的勘探开发提供准确的速度参数信息. 本文反演参数为地震波在介质中的传播速度, 下一步工作可以将算法拓展到同时反演速度和密度参数, 这样可以对油气储层进行更为全面的

描述.

参考文献

- [1] Li C P, Liu X W, Wang X C, Yang L 2005 *Progress in Exploration Geophysics* **28** 81 (in Chinese) [李灿苹, 刘学伟, 王祥春, 杨丽 2005 勘探地球物理进展 **28** 81]
- [2] Li C P, Liu X W, Li M F, Wang X C 2006 *Geophysical Prospecting For Petroleum* **45** 134 (in Chinese) [李灿苹, 刘学伟, 李敏锋, 王祥春 2006 石油物探 **45** 134]
- [3] Yin J J, Liu X W, Huang X J, Li W H, Hu D H, Jia L M 2005 *Geophysical Prospecting For Petroleum* **44** 58 (in Chinese) [尹军杰, 刘学伟, 黄雪继, 李文慧, 胡东海, 贾烈明 2005 石油物探 **44** 58]
- [4] Oristaglio M 1985 *J. Opt. Soc. Am. A* **2** 1987
- [5] Devaney A J 1981 *Opt. Lett.* **6** 374
- [6] Virieux J, Operto S 2009 *Geophysics* **74** WCC127
- [7] Wang J Y 2007 *Chinese Journal of Engineering Geophysics* **4** 81 (in Chinese) [王家映 2007 工程地球物理学报 **4** 81]
- [8] Sen M K, Stoffa P L 1991 *Geophysics* **56** 1624
- [9] Zhang Y, Paulson K V 1997 *Geophys Prospect* **45** 725
- [10] Yong Ma, Dave Hale 2012 *Geophysics* **77** R207
- [11] Moghaddam M, Chew W C 1992 *IEEE T Geosci Remote* **30** 147
- [12] Pratt R G 1999 *Geophysics* **64** 888
- [13] Van den Berg P M, Abubakar A 2001 *Prog In Electromagn Res.* **34** 189
- [14] Abubakar A, Van den Berg P M 2004 *J. Comput. Phys.* **195** 236
- [15] Abubakar A, Van den Berg P M, Fokkema J T 2003 *Geophys Prospect* **51** 285
- [16] Van den Berg P M, Kleinman R E 1997 *Inverse Probl.* **13** 1607
- [17] Ding L, Liu P G, He J G, Amer Z, Joe L 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 044102 (in Chinese) [丁亮, 刘培国, 何建国, Amer Z, Joe L 2014 物理学报 **63** 044102]
- [18] Abubakar A, W Hu, Van den Berg P M, Habashy T M 2008 *Inverse Probl.* **24** 1

- [19] Abubakar A, Wenyi Hu, Habashy T M, Van den Berg P M 2009 *Geophysics* **74** WCC47
- [20] Beylkin G 1985 *J. Math. Phys.* **26** 99
- [21] Bleistein N, Gray S H 1985 *Geophys Prospect* **33** 999
- [22] Yang W C 1995 *Geophysical Prospecting For Petroleum* **34** 114 (in Chinese) [杨文采 1995 石油物探 **34** 114]
- [23] Ding K, Song S G 2004 *Oil Geophysical Prospecting* **39** 287 (in Chinese) [丁科, 宋守根 2004 石油地球物理勘探 **39** 287]
- [24] Xu J X, Wang P, Lin B 2006 *China Petroleum Exploration* **4** 61 (in Chinese) [徐基祥, 王平, 林蓓 2006 中国石油勘探 **4** 61]
- [25] Scales J A, Docherty P, Gersztenkorn A 1990 *Inverse Probl.* **6** 115
- [26] Hansen P C 1998 *Rank-deficient and discrete ill-posed problems: Numerical aspects of linear inversion* (Vol. 1) (Philadelphia: Society for Industrial & Applied Mathematics Press) P99
- [27] Vogel C R, Oman M E 1996 *SIAM J Sci Comput* **17** 227
- [28] Rudin L I, Osher S, Fatemi E 1992 *Physica D: Nonlinear Phenomena* **60** 259
- [29] Askan A, Bielak J 2008 *B SEISMOL SOC AM* **98** 2975
- [30] Wenyi Hu, Abubakar A, Habashy T M 2009 *Geophysics* **74** R1
- [31] Churl-Hyun J, Changsoo S, Jung H S 1996 *Geophysics* **61** 529
- [32] Chew W C, Weedon W H 1994 *Microw Opt. Technol. Lett.* **7** 599
- [33] Miao J H 2008 *Ph. D. Dissertation* (Kassel: Kassel University)
- [34] Haak K F 1999 *Ph. D. Dissertation* (Delft: Delft University)

Regularized seismic velocity inversion based on inverse scattering theory*

Duan Xiao-Liang^{1)†} Wang Yi-Bo²⁾ Yang Hui-Zhu¹⁾

1) (School of Aerospace, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

2) (Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

(Received 6 May 2014; revised manuscript received 8 November 2014)

Abstract

In this paper, the regularized finite difference contrast source inversion algorithm based on inverse scattering theory is utilized to invert the seismic velocity distribution in the underground medium, and this algorithm is a waveform inversion method in frequency domain based on wave equation. Velocity distribution is updated iteratively by minimizing the cost function using the nonlinear conjugate gradient method. The geophysical inversion problem has the characters of ill-posedness and instability, we handle this problem by adding an additional regularization item based on total variation of inversion parameter, making the inversion problem become a well-posed problem, and the algorithm has the ability of anti-noise interference. In the inversion process we use the frequency-space domain 9-point difference propagation operator under PML absorption boundary condition. Compared with other inversion algorithm, the construction of forward modeling operator and other matrix factorization calculation process can be avoided in each iterative step because the background medium remains unchanged throughout the inversion process, this makes the algorithm more suitable for large-scale three-dimensional inversion. In addition, the MPI parallel computation is applied, by which the efficiency of inversion process is improved greatly. The two-dimensional CSEG model inversion results show that this algorithm can obtain high resolution seismic velocity reconstruction, and provide an accurate velocity information for seismic data processing and interpretation.

Keywords: inversion, seismic velocity, inverse scattering, regularization

PACS: 89.30.aj, 93.85.Rt, 02.30.Zz

DOI: 10.7498/aps.64.078901

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41174094), and the National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China (Grant No.2011ZX05004-003).

† Corresponding author. E-mail: gfkjdxdl@aliyun.com