

叠后边界保持块约束共轭梯度波阻抗反演

张赛民¹, 陈灵君²

(1. 成都理工大学 地球物理学院, 成都 610059; 2. 中国石化勘探南方分公司, 成都 610041)

摘要: 为提高地震波阻抗反演的分辨率及运算效率, 提出一种边界保持块约束的叠后波阻抗反演方法。首先, 根据反射系数的稀疏特性, 并利用正则化技术, 避免反演过程的平滑效应构造出波阻抗块约束反演的目标函数; 其次, 推导出用对数波阻抗差值代替反射系数的边界保持的块约束反演系统方程; 再次, 推导出对应反演系统方程的共轭梯度算法和关键的向量计算公式。结果表明: 反演波阻抗呈明显分块特征, 上下岩层界线明显, 分辨率高, 说明反演方法可靠, 该方法具有边界保持、分辨率高、收敛速度快、精度高的特点, 实现简单、高效。

关键词: 边界保持; 块约束; 波阻抗反演; 共轭梯度算法

中图分类号: P631.4

文献标志码: A

Post-stack seismic impedance conjugate gradient inversion based edge preserving blocky constrain

ZHANG Sai-min¹, CHEN Lin-jun²

(1. College of Geophysics, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China;

2. SINOPEC Exploration Southern Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: To improve the resolution of seismic impedance inversion and computational efficiency, a post-stack seismic inversion method based edge preserving blocky constrain was developed. First, according to the sparse characteristic of reflection coefficient, and using regularization technique, the objective function of seismic inversion was constructed to avoid smoothing effect; Secondly, equations of inversion system were deduced based on edge preserving blocky constrain and using the difference of logarithmic impedance in stabilizing the reflection coefficient; Additionally, the conjugate gradient algorithm was deduced, and the key vectors formulas were also derived. The results show that inverted seismic impedance has significant block feature, and the rock bottom line is clear, which indicates that the inversion method is reliable. The features of inversion method are edge preserving, high resolution, fast convergence, and high accuracy, simplicity and efficiency.

Key words: edge preserving; blocky constraining; seismic impedance inversion; conjugate gradient algorithm

目前, 地震反演已成为地震资料处理流程当中极其重要的一个环节, 其反演成果在油气藏描述及油气藏横向预测等研究工作中所起的作用也越来越重大^[1-4]。地球物理学工作者的一项重要任务是提高地震的反演结果的质量, 即提高反演成果的分辨率、精度及稳定性。在学科不同发展时期, 不同学者提出了多种反演方法, 比如早期的地震资料广义线性反演^[5-6]

及目前最为常用的综合利用地质资料、测井资料及地震资料的约束反演^[7-9]等。反演结果质量的好坏最主要的是取决于反演方法本身, 另外还与反演中所用到的数值求解算法密切相关。波阻抗反演结果可以通过两种方式获得: 其一, 先推导出反射系数, 再计算波阻抗; 其二, 构造波阻抗直接反演方程。第一种方法中波阻抗值必然受到第一层的波阻抗的影响, 需做低频

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2011BAB04B08); 国家自然科学基金资助项目(41074085, 40804027)

收稿日期: 2013-05-16; 修订日期: 2013-06-30

通信作者: 张赛民, 讲师, 博士; 电话: 13107417858; E-mail: saiminzhang@126.com

补偿等处理工作。马劲风等^[10-11]讨论过初值的选择与地震波阻抗反演的关系。反射系数存在稀疏特性, 因而波阻抗具有块分布特征, 为提高反演的分辨率, 反演应该对模型参数边界进行保护。

本文作者利用对数波阻抗来构造基于边界保持的反演目标函数, 并推导出块约束非线性反演系统方程, 反演过程利用改进共轭梯度算法。

1 边界保持约束正则化

如一函数的一阶导数是稀疏的, 那么该函数是分块连续的, 这与地震波阻抗的地质分布情况很符合, 因其反射系数存在稀疏特性。这样, 块反演的实施特别适合模型参数是块分布的情况, 也适合模型参数存在尖锐边界的情况。

块反演必须保护模型边界, 避免反演过程的平滑效应, 也就是说, 在目标函数中加入边界保护的正则化函数。这种保护边界的反演技术在图像处理中已成功应用^[12-15], 如 CHARBONNIER^[12]应用于医学图像处理, 近年来该技术也成功应用于一些地球物理反演中, 如 BARONE^[16]应用边界保护正则化技术进行重力数据反演。国内相关的文献资料还很少, 张宏兵等^[17-19]在正则参数控制下进行波阻抗约束反演, 用到了边界保护的思想; 张罗磊等^[20]也用到了边界保护的思想, 利用光滑模型与尖锐边界结合进行 MT 二维反演。

通过正则化技术可以对目标函数施加先验信息约束, 这种正则化函数在 MARKOV 随机域称为势函数^[7]。反演问题目标函数可写为

$$J(\mathbf{m}) = J_1(\mathbf{m}) + \mu J_2(\mathbf{m}) = (\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d})^T(\mathbf{G}\mathbf{m} - \mathbf{d}) + \mu \sum_i \phi^k(D(\mathbf{m})) \quad (1)$$

式中: J_1 为数据项, J_2 为先验项, μ 为平衡系数, ϕ 为势函数, D 为对模型参数求导函数, 波阻抗反演中 $\mathbf{m}$ 为波阻抗, k 为平滑阶数。

2 波阻抗边界保持块约束反演目标函数

根据稀疏脉冲反演的思想, 反射系数反演问题的目标函数为

$$J(R) = (\mathbf{W}\mathbf{R} - \mathbf{S})^T(\mathbf{W}\mathbf{R} - \mathbf{S}) + \mu O(R) \quad (2)$$

式中: R 为反射系数, $\mathbf{W}$ 为子波, $\mathbf{S}$ 为实测地震记录

矩阵, $O(\cdot)$ 为正则项。在反射系数小于 0.3 的情况下, 用对数波阻抗差值来近似反射系数误差很小^[21]。将反射系数用对数波阻抗表示, 即将 $R = D \ln Z$ 代入上式, 有:

$$J(\ln Z) = (\mathbf{W}\mathbf{D} \ln Z - \mathbf{S})^T(\mathbf{W}\mathbf{D} \ln Z - \mathbf{S}) + \mu O(\mathbf{D} \ln Z) \quad (3)$$

为书写方便, 令 $\ln Z = \mathbf{L}$, 上式可写为

$$J(\mathbf{L}) = (\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S})^T(\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S}) + \mu O(\mathbf{D}\mathbf{L}) \quad (4)$$

$O(\cdot)$ 为正则项, 用势函数 ϕ 表示。

式(4)变为

$$J(\mathbf{L}) = (\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S})^T(\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S}) + \mu \sum_{i=1}^M \phi(D(\mathbf{L})) \quad (5)$$

$D(\mathbf{L})$ 可以认为是对模型的求导, 此时模型为波阻抗的对数值。为增加反演目标函数的适应性, 对正则项进行改进, 加入 δ 刻度参数, 并在先验项 $\phi(D(\mathbf{L}))$ 上强加了一个 K 阶平滑, $K=1, 2, 3$ 。当 $K=1$ 时, 先验项求和是在目标点最邻近的水平和垂直方向所有区域进行。对于 $K=2, 3$, 是针对平面和二次曲面的情况, 分别对应于邻近点之间的梯度矢量($K=2$)和 HESSIAN 矩阵($K=3$)。 C 是邻域内数据点集。

式(5)变为

$$J(\mathbf{L}) = (\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S})^T(\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S}) + \mu \sum_{i=1}^M \phi(D_C^K(\mathbf{L})/\delta) \quad (6)$$

在式(6)中包含着两个函数, 第一个函数是关于测量模型与数据的某种一致性, 当第一个函数本身取最小值时, 一致性或鲜明性变得很好, 但解变得不稳定; 第二个函数是一个关于解“光滑性”的测量标准, 当第二个函数取最小值时, 可以获得一个“光滑”或“稳定”的近似解。式(6)中 μ 和 δ 为正则参数, μ 是一种平滑参数, 用于平衡数据项和先验项之间的相互影响; δ 是一种刻度参数, 用于在检测的不连续处(或地层界面)调节梯度值。

为提高波阻抗反演结果的分辨率, 降低多解性, 需要把测井波阻抗信息作为约束项加入到目标函数中, 这样就利用到了测井波阻抗的高、低频成分。式(6)变为

$$J(\mathbf{L}) = (\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S})^T(\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{L} - \mathbf{S}) + \mu_1 \sum_{i=1}^M \phi(D_C^K(\mathbf{L})/\delta) + \mu_2 (\mathbf{L} - \mathbf{L}')^T(\mathbf{L} - \mathbf{L}') \quad (7)$$

式中: $\mathbf{L}'$ 为利用测井信息建立的模型。因反射系数是稀疏的, 根据反射系数存在对数波阻抗差值关系, 推导出了对数波阻抗所满足的目标函数。因波阻抗呈块分布, 这与地震波阻抗的地质分布情况符合, 且在目标函数中用到了边界保持的势函数。至此, 得到了波

阻抗边界保持块约束反演目标函数式(7)。

3 边界保持块约束非线性反演系统方程

目标函数式(7)分成3项:

$$J(\mathbf{L}) = J_1(\mathbf{L}) + J_2(\mathbf{L}) + J_3(\mathbf{L}) \quad (8)$$

其中:

$$J_1(\mathbf{L}) = (\mathbf{WDL} - \mathbf{S})^T (\mathbf{WDL} - \mathbf{S}) \quad (9a)$$

$$J_2(\mathbf{L}) = \mu_1 \sum_{i=1}^M \phi(\mathbf{D}_C^K(\mathbf{L}) / \delta) \quad (9b)$$

$$J_3(\mathbf{L}) = \mu_2 (\mathbf{L} - \mathbf{L}')^T (\mathbf{L} - \mathbf{L}') \quad (9c)$$

取势函数 $\phi = t^2 / (1 + t^2)$, $k=1$, C 域为单道情况, 对上面3个公式分别求导, 则:

$$\nabla J_1(\mathbf{L}) = 2(\mathbf{D}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{D}) \mathbf{L} - 2\mathbf{D}^T \mathbf{W}^T \mathbf{S} \quad (10a)$$

$$\nabla J_2(\mathbf{L}) = 2\mu_1 \mathbf{D}^T \mathbf{Q} \mathbf{D} \mathbf{L} \quad (10b)$$

$$\nabla J_3(\mathbf{L}) = 2\mu_2 (\mathbf{L} - \mathbf{L}') \quad (10c)$$

式中: $\mathbf{Q}$ 为三角矩阵, 为:

$$\mathbf{Q} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{\mathbf{D}\mathbf{L}}{\delta}\right)^2\right]^2} \quad (11)$$

三项合并, 有:

$$\nabla J(\mathbf{L}) = (\mathbf{D}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{D} + \mu_1 \mathbf{D}^T \mathbf{Q} \mathbf{D}) \mathbf{L} - \mathbf{D}^T \mathbf{W}^T \mathbf{S} + \mu_2 (\mathbf{L} - \mathbf{L}') \quad (12a)$$

式(12a)可写成

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{W}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_2}\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}\mathbf{D} \\ \sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D}) \\ \sqrt{\mu_2}\mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \mathbf{L} = \begin{bmatrix} (\mathbf{W}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_2}\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ 0 \\ \sqrt{\mu_2}\mathbf{L}' \end{bmatrix} \quad (12b)$$

设

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{W}\mathbf{D} \\ \sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D}) \\ \sqrt{\mu_2}\mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} \mathbf{S} \\ 0 \\ \sqrt{\mu_2}\mathbf{L}' \end{bmatrix}$$

则式(12b)可简写为 $\mathbf{V}^T \mathbf{V} \mathbf{L} = \mathbf{V}^T \mathbf{B}$ 。

上式可利用共轭梯度算法得到对数波阻抗直接反演解, 而在实际反演中, 通过建立初始模型, 然后计算合成记录与实际地震记录残差加约束项来迭代求解。通过对式(12b)在初始模型位置进行泰勒级数展开, 可推导出反演方程为

$$\begin{bmatrix} (\mathbf{W}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_2}\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}\mathbf{D} \\ \sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D}) \\ \sqrt{\mu_2}\mathbf{I} \end{bmatrix} \cdot \Delta \mathbf{L} = \begin{bmatrix} (\mathbf{W}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D})^T & \sqrt{\mu_2}\mathbf{I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{S} \\ 0 \\ \sqrt{\mu_2}\Delta \mathbf{L}' \end{bmatrix}$$

同样, 上式可简写为 $\mathbf{V}^T \mathbf{V} \Delta \mathbf{L} = \mathbf{V}^T \Delta \mathbf{B}$, 上述推导的公式所施加的保持边界的块约束只是单道时间上的, 同样原理, 很容易对多道加以保持边界的块约束, 即认为横向上地震波阻抗还具有块分布的特点, 这对于断层或岩性变化情况下的地震反演特别适合, 此时, 在反演方程中要实施保持边界的块约束只要在目标函数里加入 $\mu_2 \sum_{i=1}^M \phi(\mathbf{D}_{C_2}^K(\mathbf{L}) / \delta)$ 项即可, 反演非线性系统方程的推导完全类似。

4 边界保持块约束共轭梯度解

利用改进的共轭梯度算法^[22], 可以推导出针对对数波阻抗反演系统方程 $\mathbf{V}^T \mathbf{V} \Delta \mathbf{L} = \mathbf{V}^T \Delta \mathbf{B}$ 的共轭梯度新算法。

共轭梯度递推方程的主要运算量来自矩阵 $\mathbf{V}$ 的形成以及 $\mathbf{V}\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{V}^T \mathbf{p}$ 的计算 ($\mathbf{p}$ 为共轭方向向量)。为了提高递推过程的运算速度和节省内存资源, 可将 $\mathbf{V}\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{V}^T \mathbf{h}$ 分别用向量表示。 $\mathbf{V}\mathbf{p}$ 的计算分3个部分, 其中一部分为 $\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{p}$, $\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D})\mathbf{p}$ 与 $\sqrt{\mu_2}\mathbf{p}$, 其计算结果的元素个数与向量 $\Delta \mathbf{B}$ 相同; $\mathbf{V}^T \mathbf{h}$ 的计算分3部分之和, 即:

$$\mathbf{V}^T \mathbf{h} = (\mathbf{W}\mathbf{D})^T \mathbf{h} + (\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{Q}}\mathbf{D}))^T \mathbf{h} + \sqrt{\mu_2} \mathbf{h} \quad (13)$$

下面将推导 $\mathbf{V}\mathbf{p}$ 和 $\mathbf{V}^T \mathbf{p}$ 的向量计算公式。设子波为 $\mathbf{w} = (w_{-P}, w_{-P+1}, \dots, w_0, w_0, \dots, w_{N-1}, w_N)$, 对矩阵 $\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{p}$ 有:

$$\mathbf{W}\mathbf{D}\mathbf{p}|_i = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M (w_{i+1-j} - w_{i-j}) p_j \quad (14)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M-1$; $j=1, 2, \dots, M$; M 为采样点数。

因子波长有限, 式(14)可写为

$$\mathbf{WD}\mathbf{p}|_i = \sum_{k=0}^{P+N+1} (w_{N-k+1} - w_{N-k})p_{i-N+k} \quad (15)$$

因为 $i=1, 2, \dots, N+1$, $\mathbf{WD}_{i,1} = (-w_{i-1})/2$, 所以

$$\mathbf{WD}\mathbf{p}|_i = -w_{i-1}p_1/2 + \frac{1}{2} \sum_{j=2}^M (w_{i+1-j} - w_{i-j})p_j \quad (16a)$$

因为 $i=M-1-P, \dots, M-1$, $\mathbf{WD}_{i,M} = w_{i+1-M}$, 所以

$$\mathbf{WD}\mathbf{p}|_i = w_{i+1-M}p_M/2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M-1} (w_{i+1-j} - w_{i-j})p_j \quad (16b)$$

至此, $\mathbf{Vp}$ 项中推导出用向量形式计算 $\mathbf{WD}\mathbf{p}$ 公式(15)~(16)。类似上述推导过程 $(\mathbf{WD})^T \mathbf{h}$ 存在:

$$(\mathbf{WD})^T \mathbf{h} = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M-1} (w_{j+1-i} - w_{j-i})h_j \quad (17)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M$; $j=1, 2, \dots, M-1$ 。

因为 $j=1, 2, \dots, N+1$, $(\mathbf{WD})_{1,j}^T = -w_{j-1}$, 所以

$$(\mathbf{WD})^T \mathbf{h}|_1 = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M-1} (-w_{j-1})h_j \quad (18a)$$

因 $j=M-1-P, \dots, M-1$, $(\mathbf{WD})_{M,j}^T = w_{j+1-M}$, 所以

$$(\mathbf{WD})^T \mathbf{h}|_M = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{M-1} (w_{j+1-M})h_j \quad (18b)$$

至此 $\mathbf{Vp}$ 项中推导出用向量形式计算 $(\mathbf{WD})^T \mathbf{h}$ 公式(17)~(18)。

对于 $\mathbf{Vp}$ 项中 $\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{QD}})\mathbf{p}$, 有

$$\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{QD}})\mathbf{p}|_i = \sqrt{\mu_1}\sqrt{\mathbf{Q}}(p_{i+1} - p_i) \quad (19)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M-1$ 。

对于 $\mathbf{Vp}$ 项中 $\sqrt{\mu_2}\mathbf{p}$, 有:

$$\sqrt{\mu_2}\mathbf{p}|_i = \sqrt{\mu_2}p_i \quad (20)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M-1$ 。

同样可以推导出 $(\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{QD}}))^T \mathbf{h}$, $\sqrt{\mu_2}\mathbf{h}$:

$$(\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{QD}}))^T \mathbf{h}|_i = \sqrt{\mu_1}\sqrt{\mathbf{Q}}(h_{i-1} - h_i) \quad (21)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M$ 。

当 $i=1$ 时,

$$(\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{QD}}))^T \mathbf{h}|_1 = -\sqrt{\mu_1}\sqrt{\mathbf{Q}}h_1 \quad (22a)$$

当 $i=M$ 时,

$$(\sqrt{\mu_1}(\sqrt{\mathbf{QD}}))^T \mathbf{h}|_M = \sqrt{\mu_1}\sqrt{\mathbf{Q}}h_{M-1} \quad (22b)$$

$$\sqrt{\mu_2}\mathbf{h}|_i = \sqrt{\mu_2}h_i \quad (23)$$

式中: $i=1, 2, \dots, M$ 。

上述公式(19)~(23)用到的 $\sqrt{\mathbf{Q}}$ 的分量为

$$\sqrt{\mathbf{Q}}|_i = \frac{1}{1 + (\Delta L_i^{k-1} / \delta)^2} \quad (24)$$

至此, 我们推导出用向量形式表示的 $\mathbf{Vp}$ 及 $(\mathbf{WD})^T \mathbf{h}$ 项各个分项式, 整个递推过程完全可以实现向量化运算, 应用共轭梯度算法过程节约了存储空间, 也使计算效率得以加快。值得注意的是: 在实际对数波阻抗反演过程中, 应做好参数归一化, 使得反演系统方程中加入的约束项与地震数据在同一个数量级, 消除单位不同所引起的差异。

5 边界保持块约束反演效果

5.1 理论模型试算

为验证边界保持块约束反演效果, 选择一实测的波阻抗模型制作合成记录, 2 ms 采样, 图 1(a)所示为采用的 35 Hz 雷克子波, 长度为 100 ms, 图 1(b)所示为合成记录, 采样点数 240, 加入了 5% 的高斯随机噪声。

图 2 所示为未加约束意义下的最小二乘反演结果对比图, 该反演结果在边界处解平滑, 没能明显反映出波阻抗值发生变化的情况, 分辨率比较低。图 3 所示为 $\delta=2$, 图 4 所示为 $\delta=0.2$, 图 5 所示为 $\delta=0.02$ 反演结果对比图, 3 种反演结果使用同样的初始波阻抗模型。从图 3~5 可以看出, 整体上, 反演结果反映出了波阻抗分布特征, 但 δ 对反演结果有很大影响, 当 $\delta=2$ 时, 反演解在波阻抗差异变化大的位置解变平滑, 只能看到波阻抗的趋势变化关系, 当 $\delta=0.2$ 时, 对边界的刻画细致, 保持了边界, 达到了理想效果, 当 $\delta=0.02$ 时, 波阻抗反演结果虽然还与波阻抗差异有相

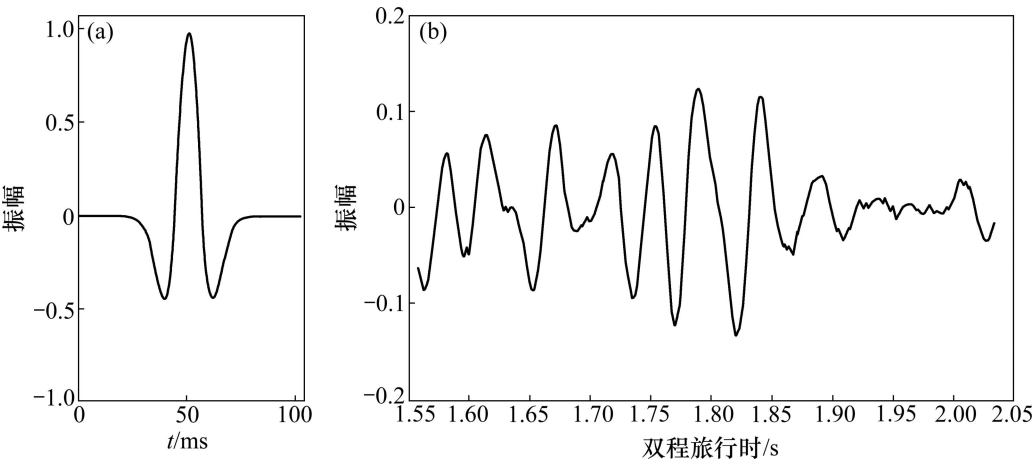


图 1 子波及合成记录: (a) 子波; (b) 合成记录

Fig. 1 Wavelet and synthetic seismogram: (a) Wavelet; (b) Synthetic seismogram

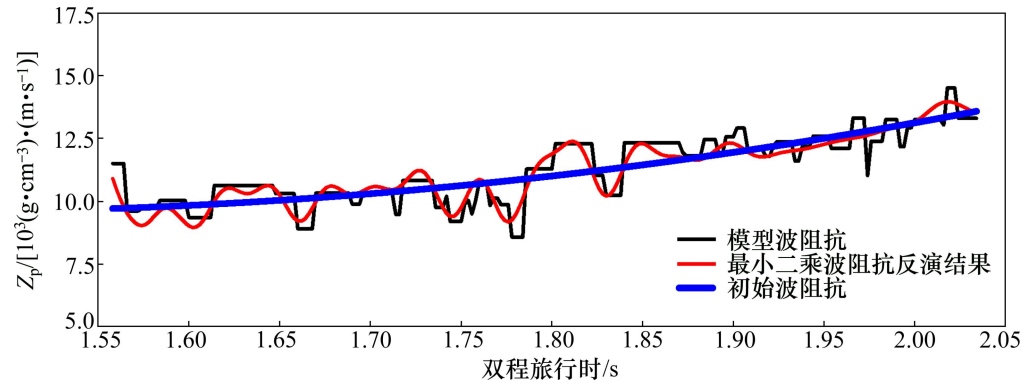


图 2 最小二乘反演结果对比图

Fig. 2 Comparison of least-square inversion results

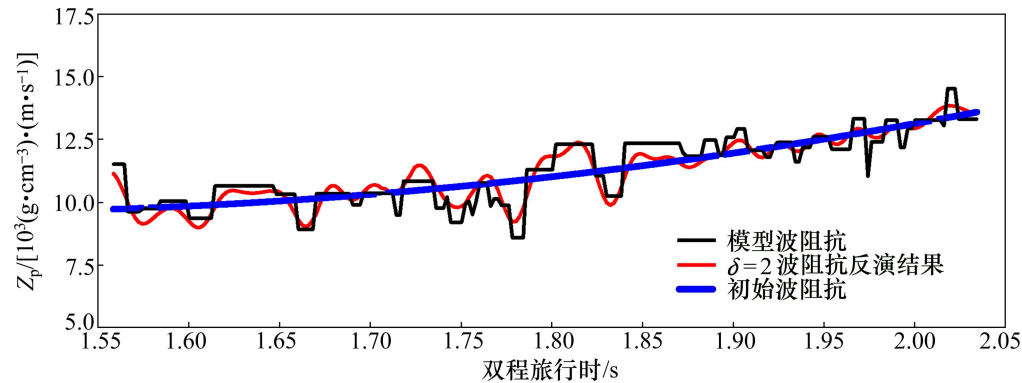


图 3 $\delta=2$ 边界保持块约束反演结果对比图

Fig. 3 Comparison of edge preserving blocky constrain inversion when $\delta=2$

对关系,但个别位置已失真,如在时间 1 760 ms 左右,说明参数的选择过小。从上面分析可以看出,在实际资料反演时,需要针对实际资料情况进行实验来选择合适的 δ 值达到理想反演效果。 δ 的作用在于能提升波阻抗细节变化特征,当选择 δ 较大时,反演时,因反射系数过小,作为噪声平滑掉了, δ 取值太小会引

入太多噪声,使反演结果失真。

5.2 实际资料反演

本文作者从某工区地震数据中抽取一个剖面,应用本文提出的边界保持块约束反演方法进行波阻抗反演,目标函数算法及反演算法与上一节相同。

图 6 所示为原始地震数据, 有一测井经过该剖面, 时间采样间隔 2 ms。因该剖面没有断层, 所有地震道反演使用的子波都为测井位置(时窗在 800~1 100 ms)应用最小二乘法提取的子波。初始模型为地质控制层下测井曲线插值结果。

图 7 所示为边界保持块约束反演的波阻抗剖面,

从图 7 可以看出, 波阻抗呈明显分块特征, 上下岩层界线明显, 分辨率高, 体现出了该工区岩性纵横向分布的特征。结果说明, 本文选取的反演方法可靠。本文提出的算法, 总共迭代次数为 8, 实际上在 5 次左右误差下降至很小, 本文应用的共轭梯度算法在目标函数寻优方面具有快速、有效的特点。

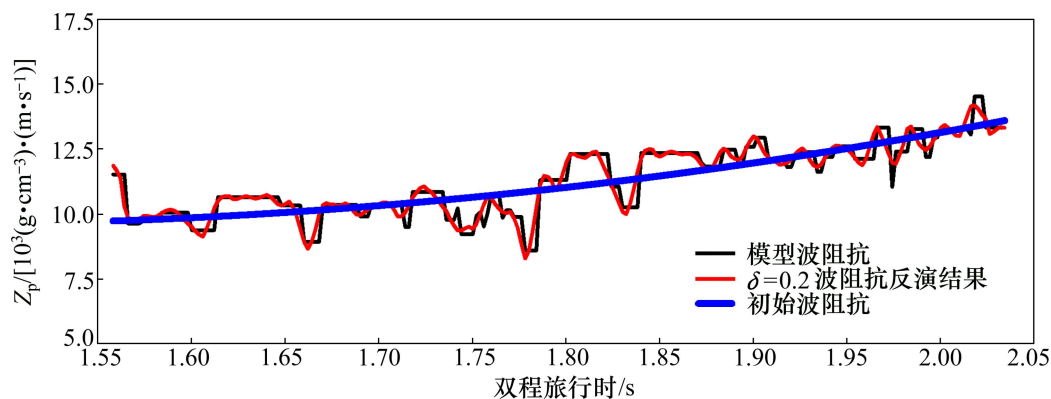


图 4 $\delta=0.2$ 边界保持块约束反演结果对比图

Fig. 4 Comparison of edge preserving blocky constrain inversion when $\delta=0.2$

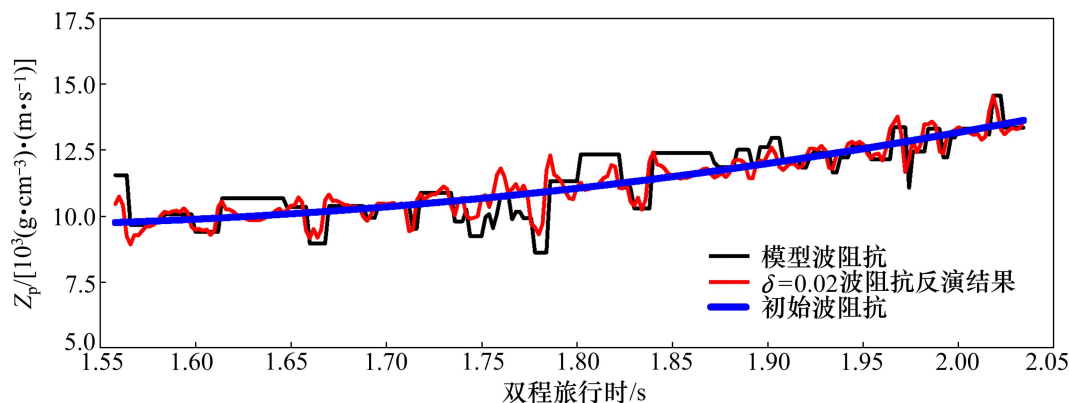


图 5 $\delta=0.02$ 边界保持块约束反演结果对比图

Fig. 5 Comparison of edge preserving blocky constrain inversion when $\delta=0.02$

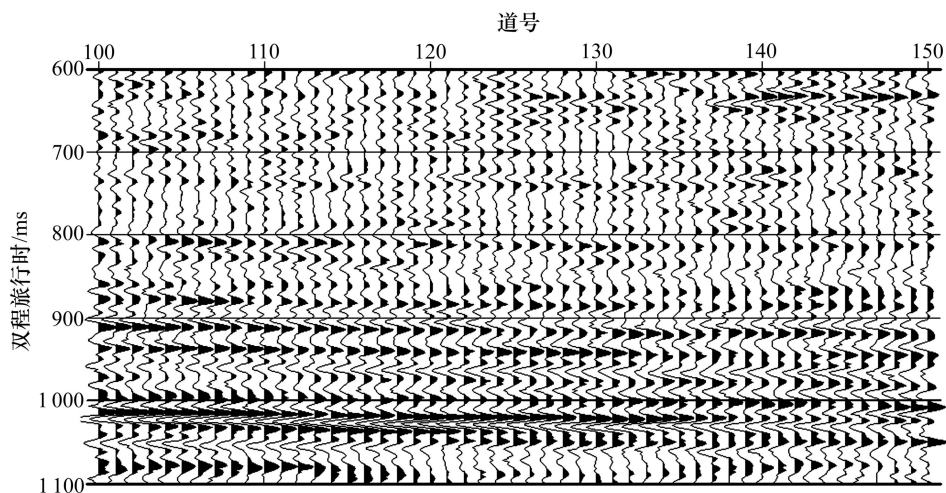


图 6 原始地震剖面

Fig. 6 Section of seismic data

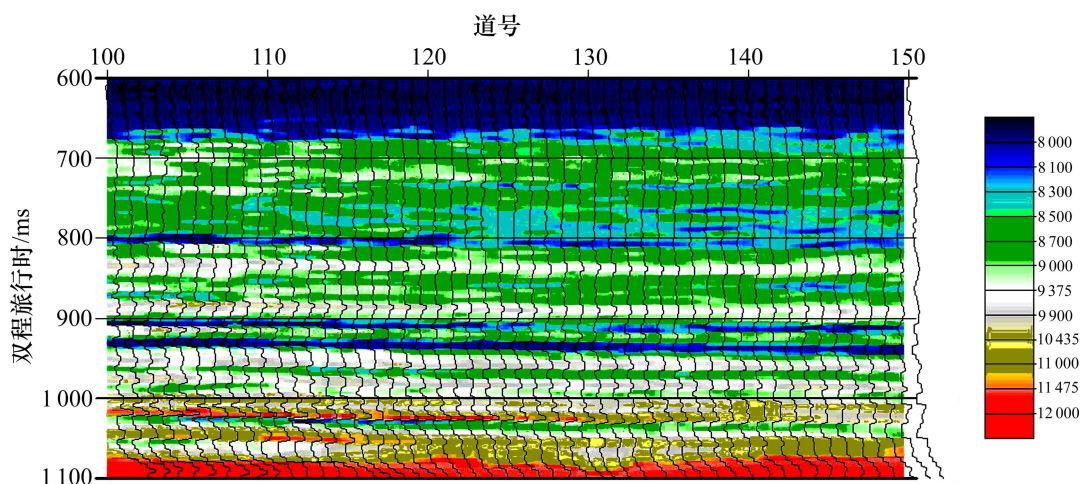


图7 反演的波阻抗剖面

Fig. 7 Section of invert impedance

6 结论

1) 基于地震反射系数呈稀疏特性, 波阻抗反演目标函数中加入边界保护的正则化函数, 提出了边界保持的块约束反演方法。该反演方法能避免常用的最小二乘反演过程出现的平滑效应。

2) 用对数波阻抗来描述反射系数, 得到了用对数波阻抗描述的褶积方程。边界保持块约束项中 $D(L)$ 可以认为是对模型的求导, 此时模型为波阻抗的对数值, 这一特性与反射系数稀疏脉冲反演是一脉相承的, 但同时具有边界保持的特性。

3) 由理论模型及实际野外资料反演可以看出, 边界保持块约束反演达到了很好的效果。较最小二乘解, 其反演结果更忠实于模型, 细节刻画细致, 分辨率得以提高, 但同时反演过程必须注意 δ 的选择。

4) 反演应用改进的共轭梯度算法, 反演过程不需要开辟专门的存储空间存储偏导数矩阵, 全过程实现了向量化运算, 该方法具有存储空间少、运算速度快、精度高、抗病态能力强的特点。

REFERENCES

- [1] 吕琳, 焦养泉, 吴立群, 鲁超, 顾元, 荣辉. 渤海湾盆地西部歧北凹陷东一段储层砂体的空间配置与成因解释[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2012, 43(6): 2269–2280.
LÜ Lin, JIAO Yang-quan, WU Li-qun, LU Chao, GU Yuan, RONG Hui. Spatial combination and genesis of reservoir sandstone in the first member of the Dongying formation in the Qibei sag, the western Bohai bay basin [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2012, 43(6): 2269–2280.
- [2] 单敬福, 纪友亮, 金利红, 王峰, 葛黛薇, 陈欣欣. 塔南—南贝尔凹陷沉南屯组沉积相特征[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2013, 44(1): 241–250.
SHAN Jing-fu, JI You-liang, JIN Li-hong, WANG Feng, GE Dai-wei, CHEN Xin-xin. Sedimentary facies characteristic of Nantun Formation in Tarnan—Southbell depression [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2013, 44(1): 241–250.
- [3] 刘立峰, 孙赞东, 杨海军, 韩剑发, 敬兵, 赵海涛. 缝洞型碳酸盐岩储层地震综合预测——以塔里木盆地中古21井区为例[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2011, 42(6): 1731–1737.
LIU Li-feng, SUN Zan-dong, YANG Hai-jun, HAN Jian-fa, JIANG Bing, ZHAO Hai-tao. Seismic integrative prediction of fracture-cavity carbonate reservoir: Taking ZG21 well area in Tarim Basin as an example [J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2011, 42(6): 1731–1737.
- [4] 郑旭刚. 波阻抗反演及相控砂体雕刻技术在滨5断块储层预测中的应用[J]. 石油天然气学报, 2012, 34(9): 200–202.
ZHENG Xu-gang. The application of wave impedance inversion and phase control sand body carving in reservoir forecasting of fault block Bin 5 [J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2012, 34(9): 200–202.
- [5] 王家映. 地球物理反演理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 1–2.
WANG Jia-yin. Geophysical inversion theory [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002: 1–2.
- [6] 李宏兵. 具有剔除噪音功能的多道广义线性反演[J]. 石油物探, 1996, 35(4): 11–17.
LI Hong-bing. Generalized multi-traces linear inversion with the

- removal of noise [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 1996, 35(4): 11–17.
- [7] 周竹生, 何继善, 陆江南. 地球物理反问题中的随机反演理论[J]. *物探化探计算技术*, 1997, 19(4): 289–297.
ZHOU Zhu-sheng, HE Ji-shan, LU Jiang-nan. Stochastic inversion theory of geophysical inverse problems [J]. *Computing Technology for Geophysical and Geochemical Exploration*, 1997, 19(4): 289–297.
- [8] 卢占武, 韩立国. 波阻抗反演技术研究进展[J]. *世界地质*, 2002, 21(4): 372–377.
LU Zhan-wu, HAN Li-guo. Aacoustic impedance inversion progress [J]. *Global Geology*, 2002, 21(4): 372–377.
- [9] 邸海滨, 郭玉倩, 刘喜武. 基于稀疏约束贝叶斯估计的相对波阻抗反演[J]. *石油物探*, 2011, 50(2): 124–128.
DI Hai-bin, GUO Yu-qian, LIU Xi-wu. Relative acoustic impedance inversion based on Cauchy sparseness constraint Bayesian estimation [J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2011, 50(2): 124–128.
- [10] 马劲风, 王学军. 测井资料约束的波阻抗反演中的多解性问题[J]. *石油与天然气地质*, 1999, 20(1): 7–10.
MA Jin-feng, WANG Xue-jun. Multiple roots in well-restricted impedance inversion [J]. *Oil & Gas Geology*, 1999, 20 (1): 7–10.
- [11] 马劲风, 王学军, 赵圣亮, 赵建勋. 波阻抗初值选择与地震波反演的多解性[J]. *石油地球物理勘探*, 1999, 34(3): 332–340.
MA Jin-feng, WANG Xue-jun, ZHAO Sheng-liang, ZHAO Jian-xun. Choice of initial wave impedance value and the multisolution of seismic trace inversion [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 1999, 34(3): 332–340.
- [12] CHARBONNIER P, FRAUD L B, AUBERT G, BARLAUD M. Deterministic edge-preserving regularization in computed imaging [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 1997, 6(2): 298–311.
- [13] THÉVENAZ P, SAGE D, UNSER M. Bi-exponential edge-preserving smoother [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2012, 21(9): 3924–3936.
- [14] MOLINA R, NUNEZ J, CORTIJO F J, MATEOS J. Image restoration in astronomy: A Bayesian perspective [J]. *IEEE Signal Proc Mag*, 2001, 18(2): 11–29.
- [15] YANG Jun-feng, YIN Wo-tao, ZHANG Yin. A fast algorithm for edge-preserving variational multichannel image restoration [J]. *Siam J Imaging Sciences*, 2009, 2(2): 569–592.
- [16] BARONE P. Fast deconvolution by a two-step method [J]. *SIAM Journal of Sci Comp*, 1999, 21(3): 883–899.
- [17] 张宏兵, 杨长春. 正则参数控制下的波阻抗约束反演[J]. *地球物理学报*, 2003, 46(6): 827–834.
ZHANG Hong-bing, YANG Chang-chun. A constrained impedance inversion method controlled by regularized parameters [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2003, 46(6): 827–834.
- [18] 张宏兵, 杨长春, 尚作萍, 杨青峰. 基于软约束模式的波阻抗反演[J]. *地球物理学进展*, 2006, 21(3): 837–844.
ZHANG Hong-bing, YANG Chang-chun, SHANG Zuo-ping, YANG Qing-feng. Impedance inversion with soft constrained mode [J]. *Progress in Geophysics*, 2006, 21(3): 837–844.
- [19] 张宏兵, 尚作萍, 杨长春, 段秋梁. 波阻抗反演正则参数估计[J]. *地球物理学报*, 2005, 48(1): 181–188.
ZHANG Hong-bing, SHANG Zuo-ping, YANG Chang-chun, DUAN Qiu-liang. Estimation of regular parameters for the impedance inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2005, 48(1): 181–188.
- [20] 张罗磊, 于 鹏, 王家林. 光滑模型与尖锐边界结合的MT二维反演方法[J]. *地球物理学报*, 2009, 52(6): 1625–1632.
ZHANG Luo-lei, YU Peng, WANG Jia-lin. Smoothest model and sharp boundary based two-dimensional magnetotelluric inversion [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2009, 52(6): 1625–1632.
- [21] 张赛民. 基于边界保持块约束叠后波阻抗及叠前AVA三参数同步反演研究[D]. 长沙: 中南大学地球科学与信息物理学院, 2011: 71–72.
ZHANG Sai-min. Research of post-stack impedance inversion and AVA three-term simultaneous inversion based on edge preserving blocky constrain [D]. Changsha: School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, 2011: 71–72.
- [22] 张赛民, 周竹生, 刘海飞. 用改进的共轭梯度算法解波阻抗反演问题[J]. *物探化探计算技术*, 2009, 31(4): 338–343.
ZHANG Sai-min, ZHOU Zhu-sheng, LIU Hai-fei. Acoustic impedance inversion using improved conjugate gradient algorithm [J]. *Computing Technology for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2009, 31(4): 338–343.

(编辑 彭超群)