

基于地震干涉的最小二乘逆时偏移

刘畅¹, 张奎华², 芮拥军¹, 朱莉¹, 李凌云¹, 王彦军¹, 孙瑞艳¹

(1. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司 物探研究院, 山东 东营 257000;

2. 中国石油化工股份有限公司胜利油田分公司, 山东 东营 257000)

摘要:最小二乘逆时偏移(LSRTM)通过迭代压制逆时偏移的噪音,提升逆时偏移的成像精度,但计算时间随迭代次数的增多而增加。本研究将地震干涉引入最小二乘逆时偏移技术中,形成一套面向地质目标体的成像技术,以降低最小二乘逆时偏移的计算量。先采用地震干涉对地震数据进行预处理,将观测系统整体下移到地下校准面,得到地下校准面激发和接收的虚拟炮记录;再输入该虚拟炮记录,在地下校准面之下的模型实施最小二乘逆时偏移成像处理。该成像策略在不降低成像精度的同时,只针对校准面以下的靶区进行成像,提升了计算效率,实现了靶区成像,并通过2个模型试算验证了地震干涉可以下沉观测系统,为成像提供良好的地震数据,获得良好的成像结果,该成像方法可有效提高最小二乘逆时偏移的计算效率。

关键词:地震干涉;最小二乘逆时偏移(LSRTM);靶区成像;观测系统下沉;格林函数

中图分类号:P631

文献标志码:A

Least-squares reverse time migration based on seismic interferometry

LIU Chang¹, ZHANG Kuihua², RUI Yongjun¹, ZHU Li¹,

LI Lingyun¹, WANG Yanjun¹, SUN Ruiyan¹

(1. Geophysical Research Institute, Shengli Oilfield Company Limited, SINOPEC, Dongying 257000, China;

2. Shengli Oilfield Company Limited, SINOPEC, Dongying 257000, China)

Abstract: Least-squares reverse time migration (LSRTM) suppresses the noise of reverse time migration (RTM) through iterations and improves the imaging accuracy of RTM, but the computation time also increases as the number of iterations increases. This study introduced seismic interferometry into LSRTM to develop a geological target-oriented imaging technique so as to reduce the computational cost of conventional LSRTM. Seismic interferometry was adopted to preprocess the seismic data and the entire observation system was moved down to the underground calibration surface, thereby generating the virtual shot records triggered and received at the calibration surface. The records were then input into the LSRTM imaging process, which was conducted in the model below the underground calibration surface. This imaging strategy images only the target area below the calibration surface without reducing the imaging accuracy, thereby improving computational efficiency and realizing target area imaging. Two model tests verified that seismic interferometry could sink the observation system, provide good seismic data for imaging, and obtain good imaging results. The imaging method proposed in this study can effectively improve the computational efficiency of least-squares reverse time migration.

Key words: seismic interferometry; least-squares reverse time migration(LSRTM); target-area imaging; observation system sinking; Green's function

常规地面地震勘探对井周高陡构造、盐丘高速体等复杂地质目标的成像分辨率较低,难以满足精细勘探需求,且易受近地表干扰与多次波串扰的叠加影响,制约了深层复杂储层的精准刻画^[1-4]。为解决这一

收稿日期:2025-10-29

基金项目:新型油气勘探开发国家科技重大专项(2024ZD1400100)

作者简介:刘畅(1995—),男,山东东营人,博士研究生,主要从事地震波传播与成像研究. E-mail:843134767@qq.com

技术瓶颈,本研究将地震干涉技术与最小二乘逆时偏移(least-squares reverse time migration,LSRTM)技术相结合,旨在不降低计算精度的前提下,实现成像效率的显著提升。

地震干涉技术通过对双炮记录进行互相关、褶积、反褶积或互相干等运算生成新地震记录,在复杂介质成像中得到广泛探索与应用。Claerbout^[5]最早提出该技术原理,最初在水平层状介质条件下开展声波日光成像研究;Schuster^[6]基于费马原理推导出干涉理论的等效形式,为深部地质体的速度分布预测提供了理论基础。在井间成像与复杂构造探测领域,Xiao 等^[7]提出利用垂直井间观测系统的转换波实现盐丘侧翼成像的方法;鲁统祥等^[8]采用任意广角方程逆时延拓的高阶有限差分格式,完成纵波资料的叠前逆时深度偏移;陈可洋^[9]开展了小面元叠前逆时偏移处理的实践探索,为复杂构造精细成像提供了技术参考。在波场模拟与偏移算子优化方面,何兵寿等^[10]推导了弹性波场逆时延拓的高精度有限差分算子,为提升波场模拟精度奠定了基础。盛军等^[11]提出的多尺度 X-CT(X-ray computed tomograph)扫描成像技术、任显卓等^[12]研发的岩土材料层析成像孔隙网络构建算法,为多尺度地质体表征提供了新手段;陈可洋^[13]系统分析了起伏地表条件下模拟炮集记录的波场传播特征,为复杂地表地震数据的处理提供了理论支撑。在地震干涉技术的拓展应用与改进方面,李奇等^[14]通过地震干涉法及台阵处理技术,成功提取不同探测尺度的体波信号,拓展了该技术的应用场景;王立歆等^[15]研发的可控震源散射面波干涉预测与匹配相减技术、范占锋等^[16]提出的多源地震干涉法隧道断层预测技术,实现了干涉技术在工程勘探领域的创新应用;陈学磊等^[17]将地震干涉法引入海底地震仪数据成像处理,牟新刚等^[18]通过实测信号信噪比模型修正两道信号的相干系数,进一步提升了干涉成像的稳定性与精度。此外,杨子涵等^[19]提出的基于非局部自相似先验的近偏移距地震数据递推重建算法、张盼等^[20]总结的主被动源联合勘探技术优势与研究进展,为解决地震数据采集缺陷、提升复杂目标探测能力提供了重要参考。地震干涉技术经过多年发展,已构建了基础理论体系,在复杂构造成像、波场模拟、多尺度地质表征等领域取得突破。研究者通过优化观测系统、改进偏移算法与波场算子,拓展了在油气勘探、工程探测、海洋勘探等场景的应用,同时结合多源联合、数据重建等手段提升成像精度。相关研究覆盖了从理论推导、方法创新到跨领域应用的全链条,为复杂介质与复杂目标探测提供了多元技术支撑。但以往的研究只针对地震干涉技术进行完善,并未与最小二乘逆时偏移这种需要反复迭代更新的技术相结合,导致地震干涉技术的应用面较窄。

由于最小二乘逆时偏移需每次均在全模型内反复求解波动方程,计算量巨大,本研究将地震干涉技术引入最小二乘逆时偏移,并在计算效率方面进行优化,把观测系统下移至校准面,校准面之上部分因可被省略而无需计算,因此提升了计算效率。

1 方法原理

1.1 上下行波场的定义

格林函数 $G(x, x_A, t)$ 可用来表示震源 x_A 激发、 x 接收、传播时间为 t 的波场。由于本研究在频率域完成计算,因此定义该格林函数的傅里叶变换为:

$$\hat{G}(x, x_A, \omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(-i\omega t) G(x, x_A, t) dt. \quad (1)$$

式中: i 为虚数单位, ω 为角频率,符号“ $\wedge$ ”为频率域内的变量。

点 x_A 处的波动方程可写为:

$$\rho \partial_j (\rho^{-1} \partial_j \hat{G}(x, x_A, \omega)) + \frac{\omega^2}{c^2} \hat{G}(x, x_A, \omega) = -i\omega \rho \delta(x - x_A). \quad (2)$$

式中: c 和 ρ 分别表示传播速度和质量密度; ∂_j 表示在 x_j 方向的偏导数, j 代表空间维度的方向; δ 表示单位函数。

在波阻抗为零的均匀介质中,格林函数由以下公式给出:

$$\hat{G}(R) = -\rho \frac{e^{ikR}}{4R}. \quad (3)$$

式中: k 为波数, R 为地震波传播距离。

实际情况中,地下更多的是非均匀介质。地震干涉需要人为定义地下校准面,因此,震源位于地表、检波点位于地下校准面的地震波称为下行波,震源位于地下校准面、检波点位于地表的地震波称为上行波。本研究通过上行波、下行波与常规地面地震数据进行互相关,把观测系统下移至地下校准面。

对于空间内任意一点 A,上行波场和下行波场分别可写为:

$$\hat{G}^-(x, x_A, \omega) = R(x, x_A, \omega) s_A(\omega), \quad (4)$$

$$\hat{G}^+(x, x_A, \omega) = \delta(x - x_A) s_A(\omega) + r \hat{G}^-(x, x_A, \omega). \quad (5)$$

式中: $s_A(\omega)$ 为震源谱, r 为自由地表的反射系数, $R(x, x_A, \omega)$ 为非均匀介质的反射响应。

1.2 单一格林函数地震干涉

实际勘探中,垂直井间地震资料较少,地表地震资料较多,因此需要发展适用于地表地震资料的地震干涉方法。图 1 描述了单一格林函数干涉成像方法的输入、输出观测系统。图 1(a)描述了地表观测系统,地表 X 点激发、Y 点接收;图 1(b)描述了输入观测系统,地表 X 点激发,地下校准面 B_1 、 B_2 点接收;图 1(c)描述了第 1 步重校准后的观测系统,地下校准面 X 点激发,地表 Y 点接收;图 1(d)描述了第 2 步重校准后的观测系统,地下校准面 B_1 点激发、 B_2 点接收。图中,红色五角星表示震源点,蓝色倒三角表示检波点,红色线 S_1 表示校准面,黑色实线 S_0 表示地表。

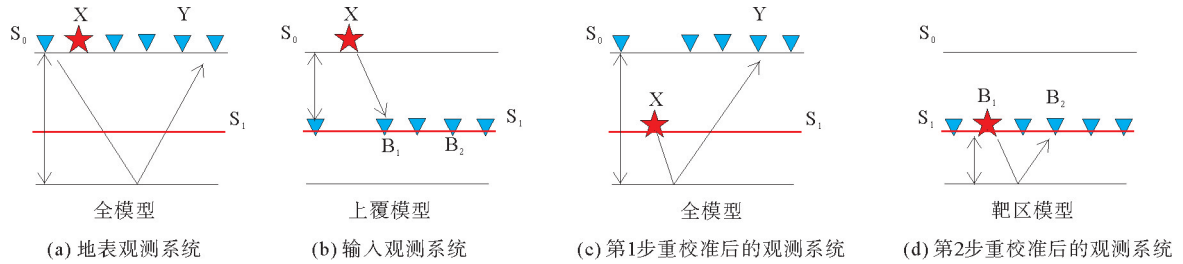


图 1 单一格林函数干涉成像方法的输入、输出观测系统

Fig. 1 Input and output observation system for single Green's function interferometric imaging

完整的格林函数是直达波和单次反射波的叠加,可写为:

$$\hat{G}(x, x_A, \omega) = \hat{G}(|x - x_A|) s_A(\omega) + r [\hat{G}^+(x, x_A, \omega) + \hat{G}^-(x, x_A, \omega)]. \quad (6)$$

在频率域中,无损非均匀介质中的声压和速度遵循动力学方程

$$i\omega\rho\hat{v}_j + \partial_j\hat{p} = \hat{f}_j, \quad (7)$$

以及应力-应变方程

$$i\omega o\hat{p} + \partial_j\hat{v}_j = \hat{q}. \quad (8)$$

式中: $\hat{p}$ 为声压, $\hat{v}_j$ 为速度, ∂_j 为 x_j 方向的偏导数, ρ 为介质的质量密度, o 为可压缩性, $\hat{f}_j$ 为外部体积力密度, $\hat{q}$ 为震源。

在物理学中,交互量通常指两个或多个系统之间相互作用的量或度量,可用来描述声源向介质中注入声波的效果以及介质中声波的传播和反射。在本研究中,交互量指声学介质和声源之间的相互作用量或相互作用强度,可表示为 $\partial_i \{ \hat{p}_A \hat{v}_{i,B} - \hat{v}_{i,A} \hat{p}_B \}$, 下标 A 和 B 用于区分两个独立的平面位置点,下标 i 表示空间分量。

当震源项分别为 $\hat{f}_j$ 和 $\hat{q}$ 时, $\hat{p}$ 和 $\hat{v}_j$ 分别是动力学方程和应力-应变方程的解。本研究介质为无损介质,可以应用时间反转不变性原理。在频率域中,时间反转被复共轭代替。因此,当震源项分别为 $\hat{f}_j^*$ 和 $-\hat{q}^*$ (星号表示复共轭)时, $\hat{p}^*$ 和 $-\hat{v}_j^*$ 分别是动力学方程和应力-应变关系的解。相关类型互易定理可以表示为:

$$\int_D (\hat{p}_A^* \hat{q}_B + \hat{v}_{j,A}^* \hat{f}_{j,B} + \hat{q}_A^* \hat{p}_B + \hat{f}_{j,A}^* \hat{v}_{j,B}) d^3x = \oint_{\partial D} (\hat{p}_A^* \hat{v}_{j,B} + \hat{v}_{j,A}^* \hat{p}_B) n_j d^2x. \quad (9)$$

式中, D 表示积分平面,则点 A 和点 B 的瞬时点源的应力-应变方程可表示为:

$$\hat{q}_A(x, \omega) = \delta(x - x_A), \quad (10)$$

$$\hat{q}_B(x, \omega) = \delta(x - x_B). \quad (11)$$

式中, x_A 和 x_B 均在 D 平面中, 外部力均为零。因此, 可用声学格林函数表示点 A 和点 B 的波场, 即:

$$\hat{p}_A(x, \omega) = \hat{G}(x, x_A, \omega), \quad (12)$$

$$\hat{v}_{j,A}(x, \omega) = -[i\omega\rho(x)]^{-1}\partial_j\hat{G}(x, x_A, \omega), \quad (13)$$

$$\hat{p}_B(x, \omega) = \hat{G}(x, x_B, \omega), \quad (14)$$

$$\hat{v}_{j,B}(x, \omega) = -[i\omega\rho(x)]^{-1}\partial_j\hat{G}(x, x_B, \omega). \quad (15)$$

将式(10)~(15)代入式(9)中, 得到单一格林函数地震干涉公式:

$$\hat{G}_h(x_A, x_B, \omega) = \oint_{\partial D} \frac{-1}{i\omega\rho(x)} [\hat{G}^*(x, x_A, \omega)\partial_j\hat{G}(x, x_B, \omega) - \partial_j\hat{G}^*(x, x_A, \omega)\hat{G}(x, x_B, \omega)] n_j d^2x, \quad (16)$$

$$\hat{G}_h(x_A, x_B, \omega) \equiv \hat{G}(x_A, x_B, \omega) + \hat{G}^*(x_A, x_B, \omega). \quad (17)$$

式中, 下标 h 表示输出。

把式(4)~(6)分别应用到图 1(a)~1(c)中, 得到式(18)~(20):

$$\hat{G}^-(x_A, x_Y, \omega) = R(x_A, x_Y, \omega)s_A(\omega), \quad (18)$$

$$\hat{G}^+(x_X, x_B, \omega) = \delta(x_H - x_{H,X})s_X(\omega) + r\hat{G}^-(x_X, x_B, \omega), \quad (19)$$

$$\hat{G}(x_X, x_Y, \omega) = \hat{G}(|x_X - x_Y|)s_Y(\omega) + r[\hat{G}^+(x_X, x_Y, \omega) + \hat{G}^-(x_X, x_Y, \omega)]. \quad (20)$$

式中, 下标 H 表示平面内的任意一点。

1.3 双重格林函数地震干涉

与传统的地震干涉方法只校准 1 次不同, 本研究提出双重格林函数干涉成像方法。图 2(a)~2(c)展示了该方法的 3 种不同输入观测系统, 图 2(d)展示了该方法的输出观测系统, 图 3 则更直观地展示了该方法如何实现观测系统的下移处理, 即在传播路径 X-B-A-Y 中消去路径 X-B 和路径 A-Y。这一过程可用式(21)表达:

$$\begin{aligned} \hat{G}_h(x_B, x_A, \omega) = & \oint_{\partial D} \frac{-1}{i\omega\rho(x)} \left[\oint_{\partial D} \frac{-1}{i\omega\rho(x)} (\hat{G}_{BX}^* \partial_j \hat{G}_{YX} - \partial_j \hat{G}_{BX}^* \hat{G}_{YX}) n_j d^2x_X \cdot \partial_j \hat{G}_{AY} - \right. \\ & \left. \partial_j \oint_{\partial D} \frac{-1}{i\omega\rho(x)} (\hat{G}_{BX}^* \partial_j \hat{G}_{YX} - \partial_j \hat{G}_{BX}^* \hat{G}_{YX}) n_j d^2x_X \cdot \hat{G}_{AY} \right] n_j d^2x_Y. \end{aligned} \quad (21)$$

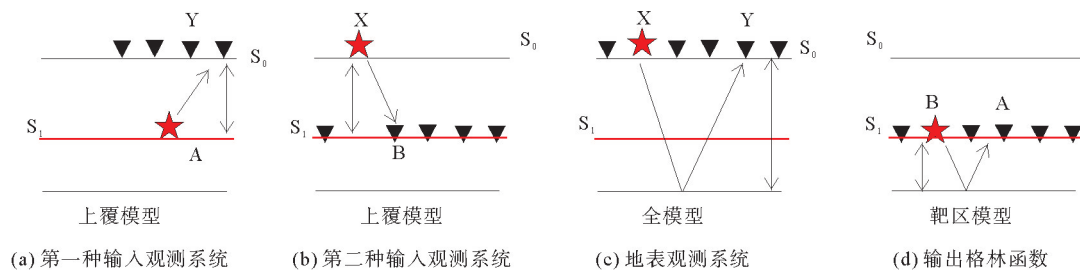


图 2 双重格林函数干涉成像方法的输入、输出观测系统

Fig. 2 Input and output observation system for double Green's function interferometric imaging

由于上述过程均在频率域中完成, 而后续的成像工作需在时间域完成, 因此需要将重校准得到的炮记录转换到时间域。这一过程可表达为:

$$d_{\text{obs}}(x_r, t, x_s) = \text{ifft}[\hat{G}_h(x_B, x_A, \omega)]. \quad (22)$$

式中: ifft 表示逆傅里叶变换, d_{obs} 表示计算得到的虚拟炮记录, x_r 表示检波点位置坐标, x_s 表示震源点位置坐标。

当校准面的上覆介质较为复杂时,两种水平井格林函数相差较大,若继续采用单一格林函数地震干涉,会导致重校准精度低,成像效果差。鉴于此,本研究提出如图 2 所示双重格林函数地震干涉成像方法,输入两种格林函数,即上行波格林函数和下行波格林函数。区别是,图 1 侧重于描述干涉的全过程,而图 2 侧重于描述两种输入观测系统、而非一种。图 3 描述了双重格林函数干涉成像方法,图 3 中蓝色线表示要消除的地震波传播路径。

1.4 基于地震干涉的最小二乘逆时偏移

在 1.3 小节已得到校准面处激发接收的虚拟炮记录,但该炮记录中并不含有校准面上覆模型的地质体信息。因此在本小节的计算过程中只需输入虚拟炮记录和目标区(校准面下侧模型)速度模型完成最小二乘逆时偏移即可,完全规避了校准面上侧的近地表模型的计算。

传统声波最小二乘逆时偏移的反偏移算子为:

$$\left(\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right) u_0(x, t, x_s) = f(x, t, x_s), \quad (23)$$

$$\left(\frac{1}{v^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right) \delta u(x, t, x_s) = m(x) \frac{1}{v_0^2} \frac{\partial^2 u_0(x, t, x_s)}{\partial t^2}, \quad (24)$$

$$d_{\text{cal}}(x_r, t, x_s) = \delta u(x_r, t, x_s). \quad (25)$$

式中: u_0 表示目标区背景波场, δu 表示目标区残差波场, v_0 表示目标区背景速度,下标 cal 表示正演模拟。根据伴随状态理论,偏移算子可写为:

$$\left(\frac{1}{v_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2\right) u^R(x, t, x_s) = \Delta d(x_r, t, x_s). \quad (26)$$

式中, u^R 表示目标区伴随波场, Δd 表示目标区数据残差,可写为:

$$\Delta d(x_r, t, x_s) = d_{\text{cal}}(x_r, t, x_s) - d_{\text{obs}}(x_r, t, x_s), \quad (27)$$

梯度公式可写为:

$$g(x, x_s) = \frac{2}{v_0^2} \int_0^{t_{\text{max}}} \frac{\partial^2 u_0(x, t, x_s)}{\partial t^2} u^R(x, t, x_s) dt. \quad (28)$$

式中, t_{max} 表示炮记录接收时长。本研究采用互相关成像条件计算反射系数模型:

$$m(x, x_s) = \int_0^t \frac{\partial^2 u_0(x, t, x_s)}{\partial t^2} u^R(x, t, x_s) dt. \quad (29)$$

基于地震干涉的最小二乘逆时偏移(seismic interferometry least-squares reverse-time migration, SI-LSRTM)的所有迭代步骤,包括正向和反向波场传播,均仅在校准面以下的目标区模型中进行,这也是本研究方案能节省计算量的根本原因。

2 数值模拟

2.1 层状模型

首先通过层状模型验证本研究方法的有效性和精度。速度场和扰动模型如图 4 所示。校准面选择 250 m。模型横向和纵向网格点数分别为 400 和 200,网格距均为 5 m。合成地震数据共 20 炮,时间采样点数为 2 000,采样间隔为 0.5 ms。

图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)分别展示了地面地震、上激发下接收、下激发上接收炮记录。本研究方法需要输入图 5 所示的 3 种炮记录。可以看出图 5(b)和图 5(c)基本一致,这是因为校准面上侧是均匀介质。

图 6(a)展示了通过层状模型输出的干涉炮记录,图 6(b)展示了校准面以下的速度模型正演模拟得到的去掉直达波的实际炮记录。对比图 6 可以发现,本研究干涉的效果较好,基本还原了真实构造。图 7 展示了层状模型靶区 LSRTM 第 1 次迭代的结果,其中图 7(a)展示了传统 LSRTM 的靶区部分,即图 5(a)

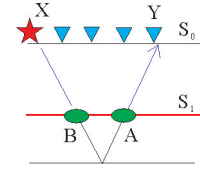


图 3 双重格林函数干涉成像方法

Fig. 3 Graph of double Green's function interferometric imaging

在全模型成像的靶区部分,图 7(b)展示了层状模型靶区 SI-LSRTM 方法,即图 6(a)的靶区成像。图 8 展示了层状模型靶区 LSRTM 第 30 次迭代的结果。

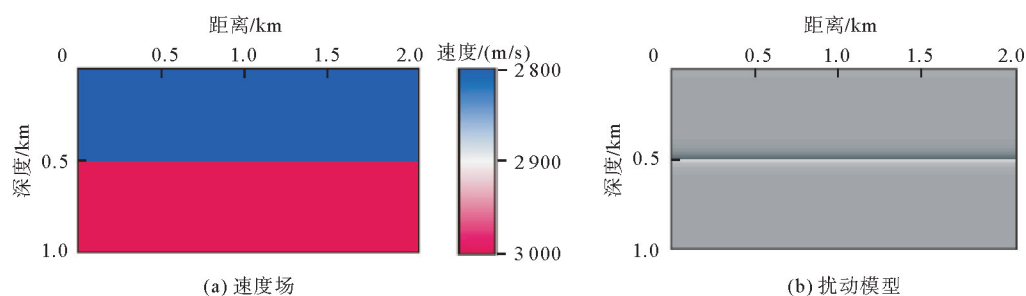


图 4 层状模型

Fig. 4 Layered model

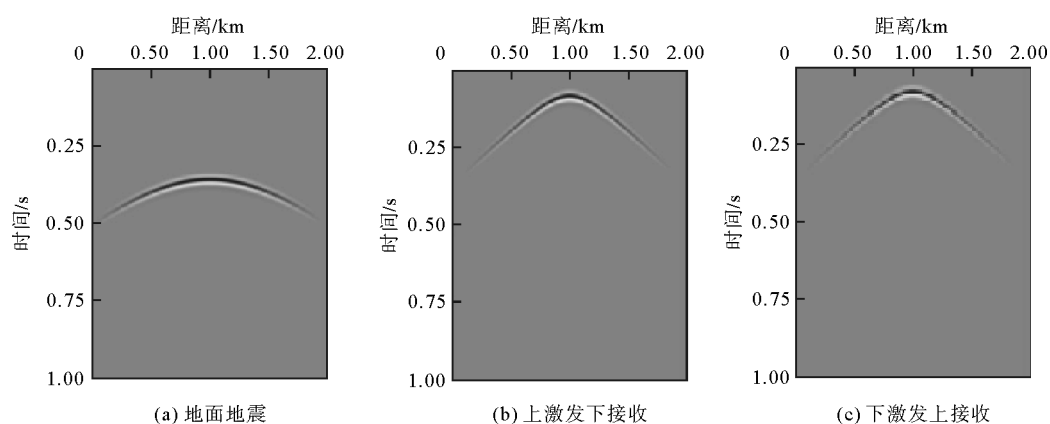


图 5 层状模型干涉输入

Fig. 5 Layered model interference input

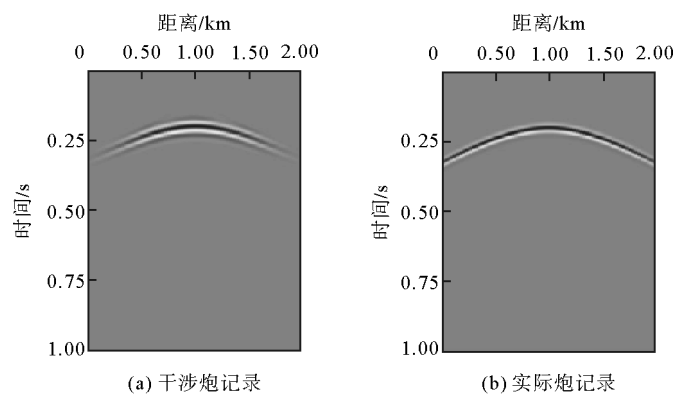


图 6 层状模型干涉输出

Fig. 6 Layered model interference output

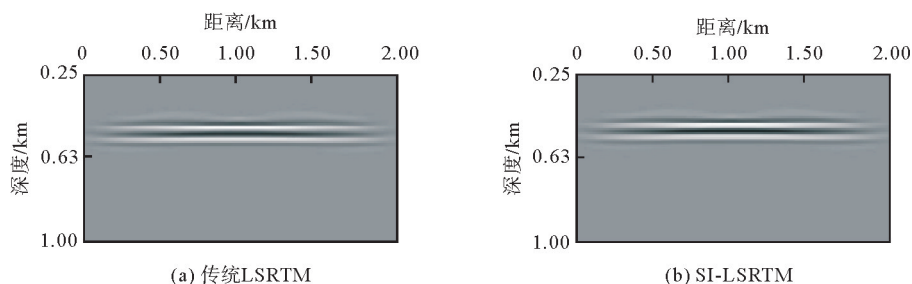


图 7 层状模型靶区 LSRTM 第 1 次迭代

Fig. 7 The 1st iteration of LSRTM for the target zone in layered model

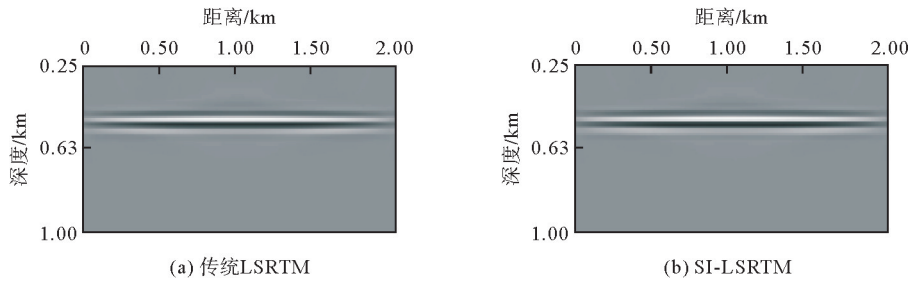


图 8 层状模型靶区 LSRTM 第 30 次迭代

Fig. 8 The 30th iteration of LSRTM for the target zone in layered model

对比图 7 和图 8 可以看出,传统 LSRTM 和本研究提出的 SI-LSRTM 的成像结果一致,但 SI-LSRTM 显著提升了成像分辨率。由于省去了校准面以上的部分,因此计算效率得到了提升,同时保留了成像精度。传统算法的计算时间是 853 s,本算法的计算时间是 641 s。在该模型中,由于选择的校准面深度是 250 m,模型总纵向深度 1 000 m,目标区占全模型的四分之三,因此提升的效率为 25%。

图 9 展示了图 7 的单道对比效果,具体而言,抽取图 7 的横向 1 010 m,纵向 600~1 800 m。其中,红线代表 LSRTM,蓝线代表扰动模型,绿线代表 SI-LSRTM。图 10 展示了图 8 的单道对比效果,具体而言,抽取图 8 的横向 1 010 m,纵向 600~1 800 m,可以看出两种方法的成像效果一致,但 SI-LSRTM 规避了上覆模型的计算,计算效率得到了提升。

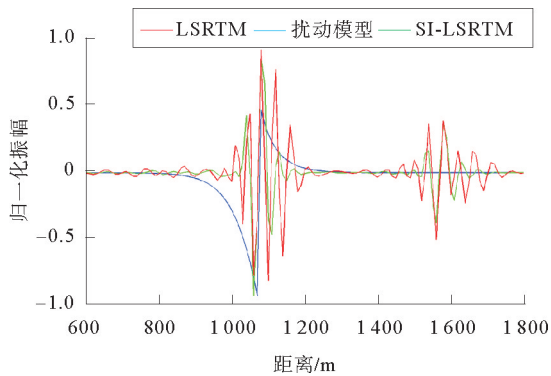


图 9 层状模型靶区 LSRTM 第 1 次迭代单道对比

Fig. 9 Single-trace comparison of the 1st LSRTM iteration for target zone in layered model

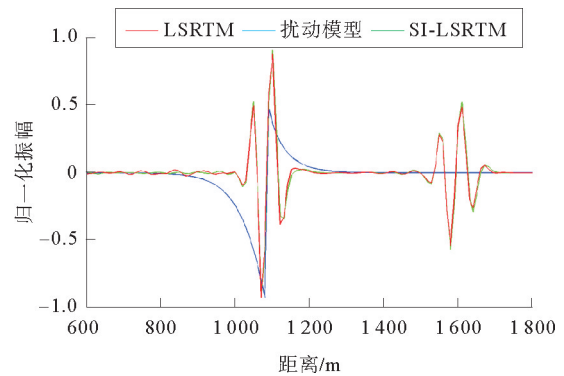


图 10 层状模型靶区 LSRTM 第 30 次迭代单道对比

Fig. 10 Single-trace comparison of the 30th LSRTM iteration for target zone in layered model

2.2 盐丘模型

通过盐丘模型可验证复数域逆时偏移成像误差校正的正确性,速度场和扰动模型如图 11 所示。校准面选择 680 m。模型横向网格点数为 650,纵向网格点数为 170,网格距均为 8 m。合成地震数据共 65 炮,时间采样点数为 4 000,采样间隔为 0.5 ms。

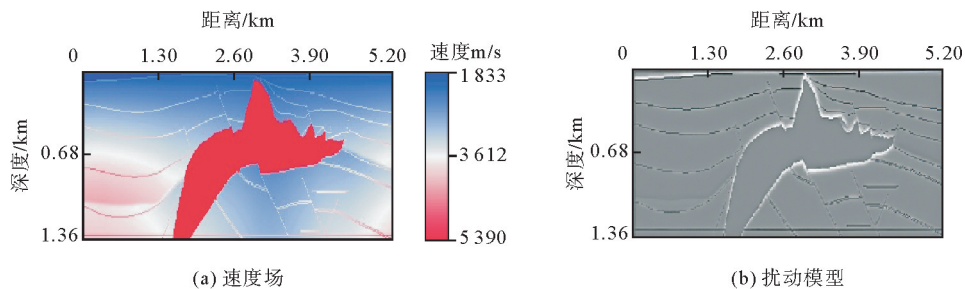


图 11 盐丘模型

Fig. 11 Salt dome model

图 12(a)、12(b)、12(c)分别展示了地面地震、上激发下接收、下激发上接收炮记录。图 13(a)展示了通过盐丘模型输出的干涉炮记录,图 13(b)展示了校准面以下的速度模型正演模拟得到的去掉直达波的实际炮记录,由图 13 可以发现,本研究的干涉效果较好,基本还原了真实构造。

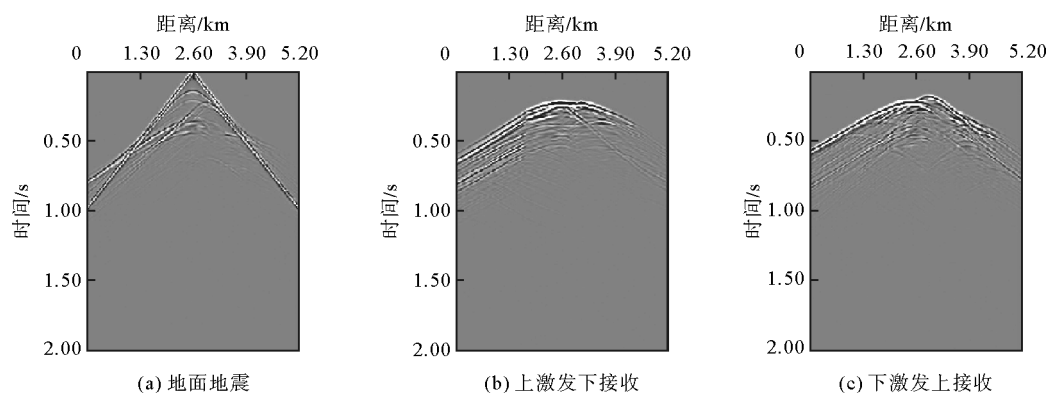


图 12 盐丘模型干涉输入

Fig. 12 Salt dome model interference input

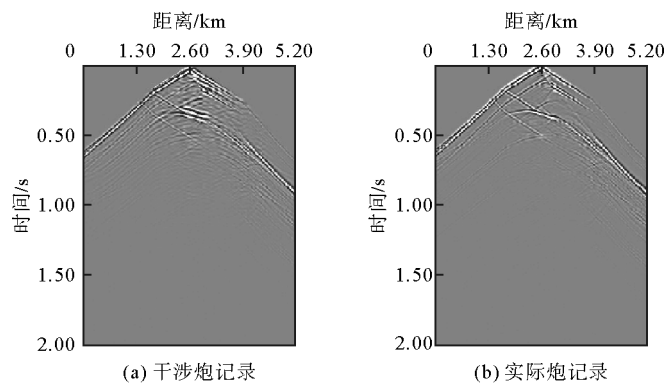


图 13 盐丘模型干涉输出

Fig. 13 Salt dome model interference output

图 14 展示了盐丘模型靶区 LSRTM 第 1 次迭代的结果,其中图 14(a)展示了传统 LSRTM 的靶区部分,也就是图 12(a)在全模型成像的靶区部分,图 14(b)展示了图 13(a)的靶区成像。图 15 展示了盐丘模型靶区 LSRTM 第 30 次迭代的结果。对比图 14(a)与图 14(b)和图 15(a)与图 15(b)可以看出,传统 LSRTM 和本研究提出的 SI-LSRTM 的成像结果一致。对比图 15(a)与图 14(a)和图 15(b)与图 14(b)可以看出,SI-LSRTM 对于成像分辨率的提升效果显著。传统算法的计算时间是 9 472 s,本算法的计算时间是 4 825 s。在该模型中,由于选择的校准面深度是 680 m,模型总纵向深度 1 360 m,目标区占全模型的二分之一,因此提升效率为 50%。由于省去了校准面以上的部分,计算效率得到了提升,同时保留了成像精度。

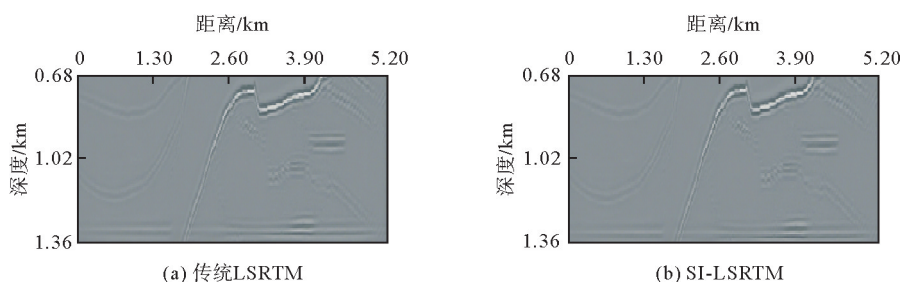


图 14 盐丘模型靶区 LSRTM 第 1 次迭代

Fig. 14 The 1st iteration of LSRTM for target zone in salt dome model

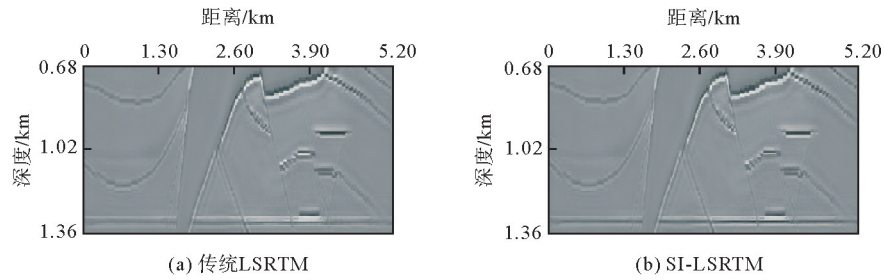


图 15 盐丘模型靶区 LSRTM 第 30 次迭代

Fig. 15 The 30th iteration of LSRTM for target zone in salt dome model

图 16 展示了图 14 的单道对比效果,具体而言,抽取图 14 的横向 2 568 m,纵向 700~1 300 m;图 17 展示了图 15 的单道对比效果,具体而言,抽取图 15 的横向 2 568 m,纵向 700~1 300 m;再次验证了 SI-LSRTM 在保证成像精度的同时提高了计算效率。

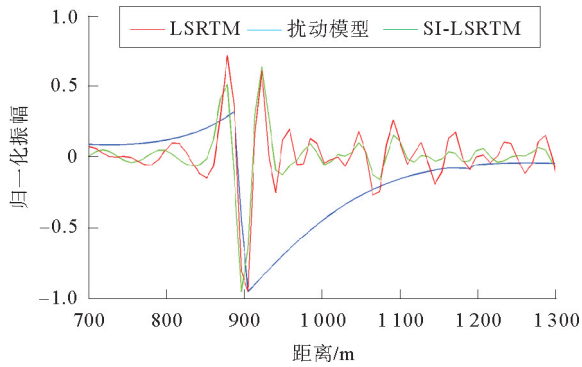


图 16 盐丘模型靶区 LSRTM 第 1 次迭代单道对比

Fig. 16 Single-trace comparison of the 1st LSRTM iteration for target zone in salt dome model

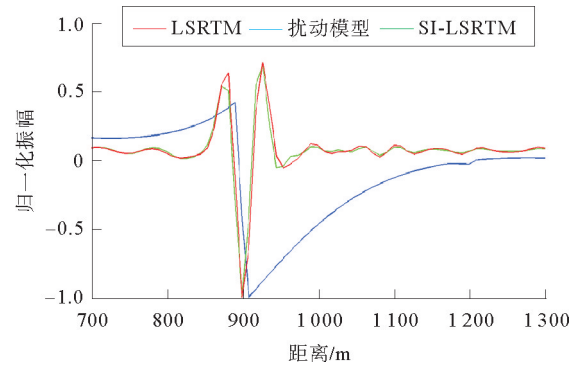


图 17 盐丘模型靶区 LSRTM 第 30 次迭代单道对比

Fig. 17 Single-trace comparison of the 30th LSRTM iteration for target zone in salt dome model

3 结论

1) 基于层状与盐丘模型试算,验证了 SI-LSRTM 方法的优越性。输入三类炮记录生成干涉炮记录,与实际炮记录对比,干涉效果良好,可还原真实构造。两类模型靶区 LSRTM 迭代测试显示,SI-LSRTM 与传统 LSRTM 成像结果一致,迭代后分辨率有所提升。效率方面,层状模型效率提升 25%,盐丘模型提升 50%。该方法省去校准面以上计算区域,在保证成像精度的同时,有效提升靶区成像效率。

2) 将地震干涉应用到地面地震剖面数据,先后消除地面到地下校准面的地震波路径和地下校准面到地面的地震波路径,提出双重格林函数的地震干涉技术。输出的虚拟炮记录不含校准面上侧模型的地震波信息。

为提高方法的实用性,下一步应研发基于模糊速度场地震干涉最小二乘逆时偏移技术。为提高计算效率可将本研究技术发展成像域。

参考文献:

[1] 刁瑞,葛大明,孔庆丰,等.基于地震干涉的复杂构造局部成像[J].物探与化探,2025,49(4):869-877.

DIAO Rui,GE Daming,KONG Qingfeng,et al. Local imaging of complex structures based on seismic interferometry

- [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(4): 869-877.
- [2] 燕新跃, 谷丙洛, 孙志广, 等. 面向井周高陡构造的 VSP 地震干涉成像方法研究[J]. 地质评论, 2024, 70(5): 1874-1882.
YAN Xinyue, GU Bingluo, SUN Zhiguang, et al. Seismic interferometry for high-steep structures around wells[J]. Geological Review, 2024, 70(5): 1874-1882.
- [3] 丁泽政, 曲英铭, 李振春, 等. VTI 介质 VSP 数据地震干涉成像方法[J]. 石油物探, 2025, 64(3): 502-509.
DING Zezheng, QU Yingming, LI Zhenchun, et al. VSP interferometric imaging in VTI media[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2025, 64(3): 502-509.
- [4] 张宏, 姜大建, 刘鑫, 等. 地震干涉法分阶多次波逆时偏移[J]. 物探与化探, 2025, 49(4): 855-868.
ZHANG Hong, JIANG Dajian, LIU Xin, et al. Reverse time migration of order-divided multiples based on seismic interferometry[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2025, 49(4): 855-868.
- [5] CLAERBOUT J. Synthesis of a layered medium from its acoustic transmission response[J]. Geophysics, 1968, 33(2): 264-269.
- [6] SCHUSTER G. Fermat's interferometric principle for target-oriented travel time tomography[J]. Geophysics Letter, 2005, 70(4): U47-U50.
- [7] XIAO X, SCHUSTER G T. Redatuming CDP data below salt with VSP green's function[C]//SEG/New Orleans 2006 Annual meeting, Expanded Abstracts, 2006, 25: 3511-3515.
- [8] 鲁统祥, 何兵寿, 沈骥千. 任意广角方程逆时偏移及其在煤田资料中的应用[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2013, 32(1): 18-25.
LU Tongxiang, HE Bingshou, SHEN Jiqian. Reverse-time migration of arbitrarily wide angle wave equations and its application in the coal field seismic data[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2013, 32(1): 18-25.
- [9] 陈可洋. 两种不同偏移起始面逆时成像处理及效果分析: 以起伏地表理论模型为例[J]. 油气藏评价与开发, 2016, 6(6): 14-17.
CHEN Keyang. Reverse time migration processing and its application effect analysis of two kinds of different migrated initial surface: Take a relief surface theoretical model as an example[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2016, 6(6): 14-17.
- [10] 何兵寿, 张晓明, 张会星. 非零井源距 VSP 多分量地震资料逆时偏移[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2010, 29(2): 1-7.
HE Bingshou, ZHANG Xiaoming, ZHANG Huixing. Reverse-time migration of VSP multi-component seismic data with non-zero offset[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2010, 29(2): 1-7.
- [11] 盛军, 杨晓菁, 李纲, 等. 基于多尺度 X-CT 成像的数字岩心技术在碳酸盐岩储层微观孔隙结构研究中的应用[J]. 现代地质, 2019, 33(3): 653-671.
SHENG Jun, YANG Xiaojing, LI Gang, et al. Application of multiscale X-CT imaging digital core technique on observing micro-pore structure of carbonate reservoirs[J]. Geoscience, 2019, 33(3): 653-671.
- [12] 任显卓, LINDEN Joost van der, NARSILIO Guillermo. 基于岩土材料层析成像的孔隙网络构建算法[J]. 现代地质, 2019, 33(2): 345-356.
REN Xianzhuo, LINDEN Joost van der, NARSILIO Guillermo. Developing a pore network construction algorithm for computerized tomography images of geomaterials[J]. Geoscience, 2019, 33(2): 345-356.
- [13] 陈可洋. 松辽盆地地震资料小面元叠前插值逆时偏移处理[J]. 油气藏评价与开发, 2015, 5(4): 12-16.
CHEN Keyang. Seismic data small bin prestack interpolation reverse time migration processing in Songliao Basin[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2015, 5(4): 12-16.
- [14] 李奇, 张智, 侯爵, 等. 背景噪声提取体波方法研究进展[J]. 地震科学进展, 2021, 51(10): 433-451.
LI Qi, ZHANG Zhi, HOU Jue, et al. Research progress of the extraction body waves from ambient noise[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2021, 51(10): 433-451.

- [15] 王立歆,陈国金,崔树果,等. 基于地震干涉法的可控震源黑三角噪声压制技术及应用[J]. 石油物探,2021,60(6):925-936.
WANG Lixin, CHEN Guojin, CUI Shuguo, et al. Suppression of “black triangle” noise from vibroseis data[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2021, 60(6): 925-936.
- [16] 范占锋,蔡建华,赵伟. 基于多源地震干涉法隧道断层位置预测数值模拟[J]. 科学技术与工程,2021,21(28):11981-11988.
FAN Zhanfeng, CAI Jianhua, ZHAO Wei. Numerical simulation of predicting location of a tunnel fault based on multi-source seismic interferometry[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(28): 11981-11988.
- [17] 陈学磊,王祥春,刘振东,等. 天然气水合物勘探中 OBS 资料地震干涉法技术[J]. 地质学报,2024,98(9):2686-2693.
CHEN Xuelei, WANG Xiangchun, LIU Zhendong, et al. OBS data seismic interferometry technique in gas hydrate exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 2024, 98(9): 2686-2693.
- [18] 牟新刚,周奇,周晓,等. 一种高频拓展的改进地震干涉算法研究[J]. 仪器仪表学报,2021,42(4):59-66.
MOU Xingang, ZHOU Qi, ZHOU Xiao, et al. Study on an improved seismic interference algorithm with high frequency extension[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42(4): 59-66.
- [19] 杨子涵,黄娟,凡帆,等. 基于非局部自相似性的近偏移距地震数据重建[J]. 石油学报,2025,46(6):1144-1156.
YANG Zihan, HUANG Juan, FAN Fan, et al. Reconstruction of near-offset seismic data based on non-local self-similarity[J]. Acta Petrolei Sinica, 2025, 46(6): 1144-1156.
- [20] 张盼,韩立国,巩向博,等. 金属矿地震勘探方法技术研究进展[J]. 吉林大学学报(地球科学版),2023,53(6):1969-1982.
ZHANG Pan, HAN Ligu, KONG Xiangbo, et al. Research progress on seismic exploration methods and technologies for metal mines[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2023, 53(6): 1969-1982.

(责任编辑:高丽华)