

最小二乘叠前时间偏移在川东南复杂构造成像中的应用

袁茂林

(中国石化勘探分公司油气勘探管理部,四川成都610041)

摘要:地震偏移成像本质上是地下反射系数经过Hessian算子滤波后的模糊化结果,成像分辨率和振幅保真度较低。为了消除Hessian算子的影响,将地震成像看作最小二乘意义下的反演问题,通过引入一对互为共轭关系的叠前时间偏移/反偏移算子,采用共轭梯度法迭代求取与地震数据相匹配的反射系数最优解。理论模型和实际资料处理表明,最小二乘叠前时间偏移(LS-PSTM)能够压制偏移噪声并提高成像分辨率和振幅保真度,有利于改善川东南地区茅口组岩溶缝洞体、高陡构造以及断裂成像质量。

关键词:成像分辨率;振幅保真度;叠前时间偏移;岩溶缝洞;高陡构造;断裂

中图分类号:P631 **文献标志码:**A

Application of least-squares migration in imaging of complex structures in Southeast Sichuan

YUAN Maolin

(Oil and Gas Exploration Management Department of Sinopec Exploration Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: Seismic migration imaging is essentially the fuzzy result of underground reflection coefficient filtered by Hessian operator, and the imaging resolution and amplitude fidelity are low. In order to eliminate the influence of the Hessian operator, the seismic imaging is regarded as an inversion problem in the sense of least squares, by introducing a pair of pre-stack time migration/demigration operators that are conjugate relations with each other, the conjugate gradient method is used to iteratively obtain the optimal solution of the reflection coefficient matching the seismic data. The theoretical model and actual data processing show that the least-squares pre-stack time migration (LS-PSTM) can suppress the migration noise and improve the imaging resolution and amplitude fidelity, which is beneficial to improve the imaging quality of karst fractures and caves, high-steep structures, and faults in the Maokou Formation in southeastern Sichuan.

Key words: imaging resolution; amplitude fidelity; pre-stack time migration; cave-cleft bodies; steep-dip structures; faults

针对岩性油气藏、复合型油气藏以及隐蔽性油气藏等复杂的勘探目标,不仅要求构造成像精确,而且对岩性成像提出了更高的要求。地震偏移技术在实际生产中存在如下问题:陆上震源子波时空变化剧烈、有限的波场带宽、数据不规则及稀疏性等,这些客观因素往往会导致偏移结果的振幅保真度和成像分辨率较低,难以满足岩性解释的需求。理论上,在油气勘探领域被广泛应用的互相关成像算子仅仅是正演算子的共轭,而不是它的逆。因此,常规的地震偏移只能对地下构造进行模糊成像,往往提供欠估计的反射系数信息。本质上,偏移成像是地下反射系数经过Hessian算子滤波后的结果。为了消除Hessian算子对成像结果的模糊化影响,可以将地震成像看作最小二乘框架下的线性

波形反演(最小二乘偏移,LSM)问题,在数据空间域估计出分辨率较高、振幅信息可靠的地下反射系数的像,从而有利于后续的AVA/AVO反演、叠前反演以及岩性解释等工作。

Tarantola^[1]早在1984年提出了基于最小二乘反演的地震成像思路。LeBras和Clayton^[2]、Lambare等^[3]、Nemeth等^[4]以及Duquet等^[5]对最小二乘偏移技术进行了完善。但是,最小二乘偏移技术在工业

收稿日期:2021-05-06;改回日期:2021-07-12。

第一作者简介:袁茂林(1990—),硕士,工程师,主要从事地震采集与地震反演成像工作。E-mail: yuanml.ktnf@sinopec.com。

基金项目:国家科技重大专项“页岩气勘探地震资料采集处理技术研究”(编号2017ZX05036-005-006)。

界仍然没有得到广泛应用,影响其推广应用的因素主要有两个:一方面是计算效率较低,其计算工作量大约是常规地震偏移的 $N \times 2$ 倍(N 是反演迭代的次数,次)^[6-8]。另一方面,在实际资料处理中,子波问题、速度问题、资料信噪比问题、资料振幅一致性问题等等都会影响最小二乘偏移质量,尤其是实现最小二乘叠前深度偏移的难度非常大,主要原因如下:①陆地震源子波吸收衰减强,其时空变化剧烈,导致实际采集的地震记录与模拟的地震记录振幅匹配度较低^[9];②叠前深度偏移成像对速度模型的精度要求极高,高精度深度域速度模型建立已经成为深度域成像的最大难题^[10];③地震资料中存在的多种噪声、多次波等干扰不在数据匹配的理论框架内,成为LSM方法迭代反演难以有效收敛甚至不收敛的阻碍因素^[11]。

基于以上分析,将一对互为共轭数学关系的叠前时间偏移及反偏移算子引入到共轭梯度的最小二乘反演框架中,通过编写C语言程序实现了最小二乘叠前时间偏移(LS-PSTM)技术。通过模型数据和实际资料处理验证了本文方法可以有效压制成像噪声、提高成像分辨率以及补偿常规偏移的成像振幅,在川东南复杂构造区具有良好的应用效果。

1 基本原理

在born近似的线性化条件下,地震正演可以表达为如下矩阵的数学形式^[12]:

$$d = Lm \tag{1}$$

其中, d 为地震数据; m 为地下的反射系数; L 为叠前时间反偏移算子。

同样地,线性化地震正演的共轭算子也可以写成矩阵的数学形式:

$$m_{\text{mig}} = L^T d \tag{2}$$

此处, m_{mig} 表示反射系数的成像结果; L^T 为叠前时间偏移算子^[13]。

将式(1)带入式(2),得到

$$m_{\text{mig}} = L^T Lm \tag{3}$$

从式(3)可以看出, m_{mig} 是地下反射系数 m 经过Hessian算子 $L^T L$ 滤波后的模糊成像,为了消除Hessian算子 $L^T L$ 对地震成像的影响,可以将地震成像看作最小二乘框架下的线性波形反演问题,其目标是反偏移数据 d 与地震数据 d_0 之间的误差最小,从而最优化地估计出地下反射系数。定义如下目

标误差泛函^[14]:

$$f(m) = \| Lm - d \|^2 \tag{4}$$

该泛函要求反演成像一定要使反偏移数据遵循地震数据的振幅变化规律,因此,数据预处理阶段需要对数据进行单炮能量一致性校正。

为了求解式(4)所示的目标误差泛函,可以采用共轭梯度类算法:

$$\begin{cases} \Delta d = LM_{k-1} - d_0 \\ g_k = L^T \Delta d \\ \beta_{k-1} = \frac{g_k g_k}{g_{k-1} g_{k-1}} \\ z_k = g_k + \beta_{k-1} z_{k-1} \\ \alpha_k = \frac{[z_k]^T g_k}{[Lz_k]^T LZ_k} \\ m_k = m_{k-1} - \alpha_k z_k \end{cases} \tag{5}$$

其中, Δd 是数据残差; m_k ($m_0=0$)是第 k 次迭代的反演成像结果; g_k 是梯度; β_{k-1} 为更正因子; z_k 为共轭梯度; α_k 为迭代的步长。当数据残差减小到低于预设阈值时,迭代算法自动停止^[15]。

LS-PSTM技术流程如图1所示,从流程图可以看出,LS-PSTM计算量为常规叠前时间偏移的 $N \times 2$ 倍。

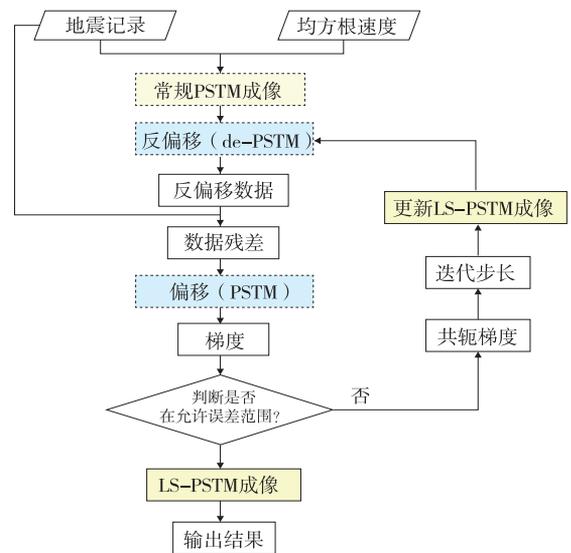


图1 最小二乘叠前时间偏移技术流程

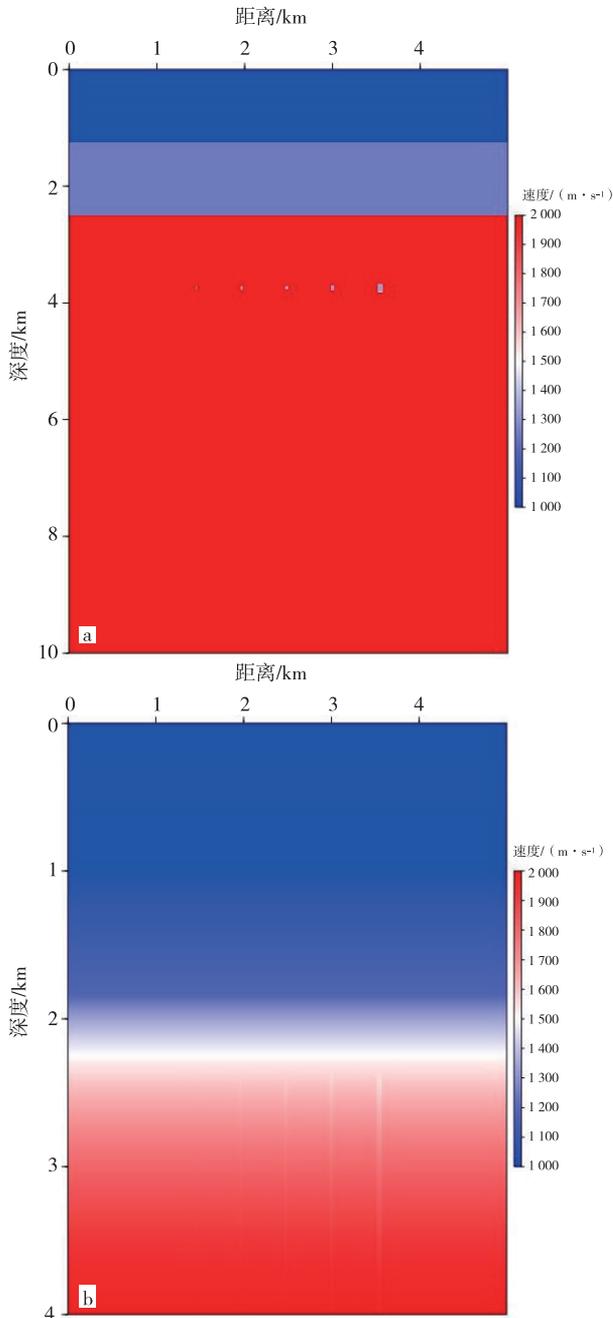
2 测试与应用

2.1 缝洞体模型测试

为了验证本文发展的最小二乘叠前时间偏移技术的正确性、有效性和适应性,在编程实现LS-PSTM算法的基础上,采用缝洞体模型进行测试。

图2a为层速度模型,模型大小为1 000×2 001,

纵横向间隔为5 m,可以看到在两个水平层下面有五个尺度大小不一的缝洞体,最小缝洞体尺度为5 m×5 m,缝洞体是异常低速度。图2b为迭代反演使用的均方根速度场。



a.层速度; b.均方根速度

图2 速度模型

为了比较真实地模拟实际地震数据,采用波动方程高阶有限差分算子进行正演。地震数据总共350炮,炮间隔10 m,每炮151道接收,道间隔10 m,每道有2 001个采样点,采样率2 ms。图3是地震数据的单炮记录,可以看出,除了有效的反射波和绕射波之外,记录中还存在两组多次波,分别来自第

二层反射界面和缝洞体。

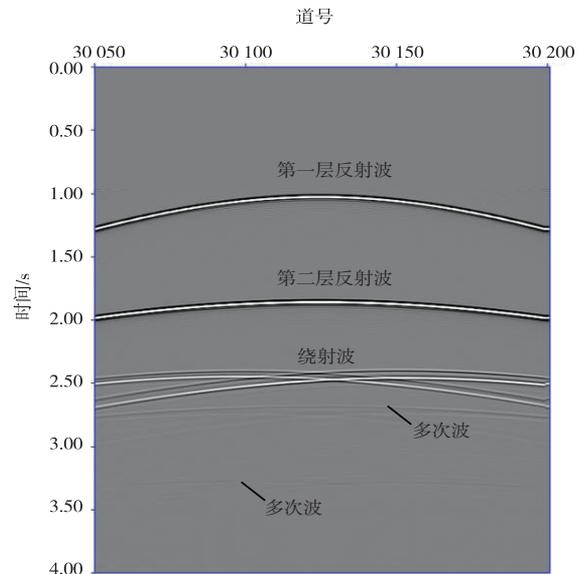
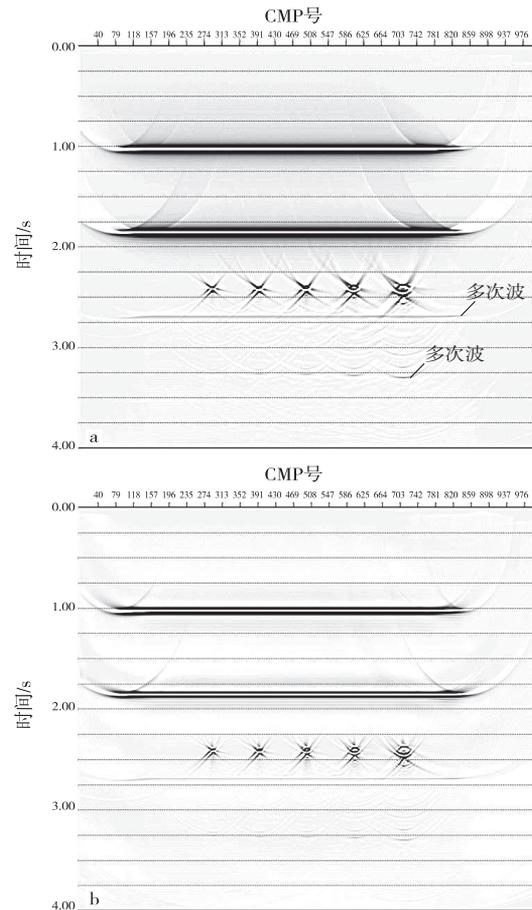


图3 地震单炮记录

根据式(5)所示的共轭梯度算法,采用上述模型和地震记录进行LS-PSTM,并且在实际计算过程中隔炮隔道对数据进行抽稀。图4a和图4b分别为常规PSTM结果和LS-PSTM结果。



a.叠前时间偏移; b.最小二乘叠前时间偏移

图4 成像结果

可以看出,常规 PSTM 成像分辨率较低,振幅不均衡,而且缝洞体成像能量聚焦性较差,且存在较严重的多次波成像和偏移噪声。LS-PSTM 成像分辨率更高,补偿了成像振幅,多次波和偏移噪声在一定程度上得以压制,缝洞体成像能量更加聚焦,缝洞体刻画更加清晰,这一特点同样可以延伸应用到断裂、高陡构造侧翼(传播距离大、衰减多)以及小尺度岩溶缝洞体成像中。

为了定量地分析成像分辨率与成像振幅,接下来计算常规 PSTM 和 LS-PSTM 结果的频谱。从图 5 可以看出,常规 PSTM 结果缺少反射的高频成分,导致频谱带宽很窄,表明成像分辨率很低。此外,常规 PSTM 成像振幅是欠估计的。相反,LS-PSTM 恢复了反射系数的高波数成分,拓宽了频带,并且没有损失有效的低频信息,表明 LS-PSTM 能够提高成像分辨率。而且,LS-PSTM 有效地补偿了成像振幅,达到保幅成像的目的。

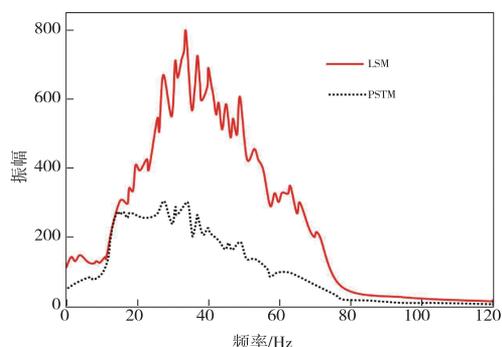


图5 频谱

收敛曲线是检验 LS-PSTM 的有效指标。图 6 是 15 次迭代的反演收敛率曲线,可以看出,在最初的几次迭代中,数据残差降低得很快,接着收敛速度开始减慢,并且保持继续降低的趋势。然而,由于地震数据中存在严重的多次波干扰,导致迭代收敛速度明显减慢。

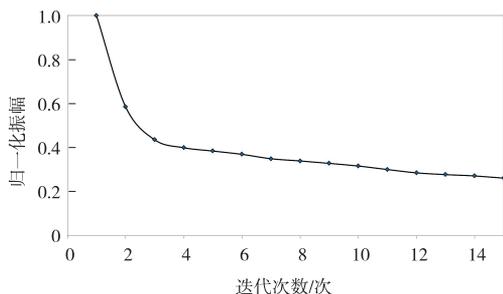


图6 收敛曲线;数据残差经过归一化处理

2.2 川东南实际资料应用

为了分析验证本文发展的最小二乘叠前时间偏移技术在实际生产中的应用效果,针对川东南岩

溶缝洞储层及高陡构造页岩气勘探,开展了实际地震资料处理。

2.2.1 岩溶缝洞体成像

川东南茅口组发育规模断层岩溶缝洞体,油气高产富集条件优越,是实现少井带动高效勘探的有利目标。但是,实际地震资料目的层分辨率较低、振幅能量相对较弱,岩溶缝洞异常识别困难。

图 7a 是川东南实际资料常规 PSTM 结果,图 7b 是川东南实际资料 LS-PSTM 结果。从图 7a 可以看出,常规 PSTM 成像分辨率较低,振幅保真度较低,无法识别二叠系反射层(Tp2)茅口组岩溶缝洞储层。从图 7b 可以看出,LS-PSTM 不仅提高了茅口组成像分辨率,突出了岩溶缝洞异常,岩溶缝洞体成像更加清晰,而且补偿了成像振幅,保持了常规 PSTM 结果的波组特征和振幅强弱相对关系,层间信息更加丰富,能够有效地支持岩溶缝洞地质评价工作。

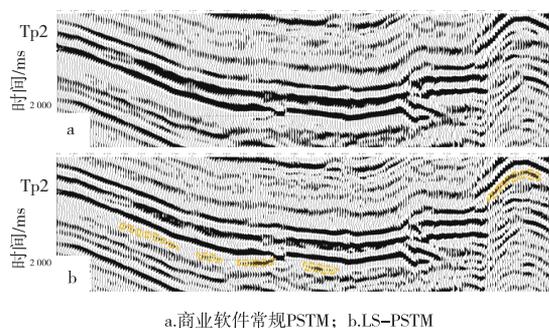


图7 川东南实际资料地震成像

为了定量地分析成像分辨率与成像振幅,接下来计算常规 PSTM 和 LS-PSTM 结果的频谱。从图 8 可以看出,PSTM 结果的主频为 26 Hz,缺少反射系数的高频成分,导致频谱带宽很窄,表明成像分辨率很低。相反,LS-PSTM 恢复了地下反射系数的高频成分,且没有损失低频成分,拓宽了频带,并且地震资料的主频提高至 31 Hz,表明 LS-PSTM 能够提高成像分辨率。

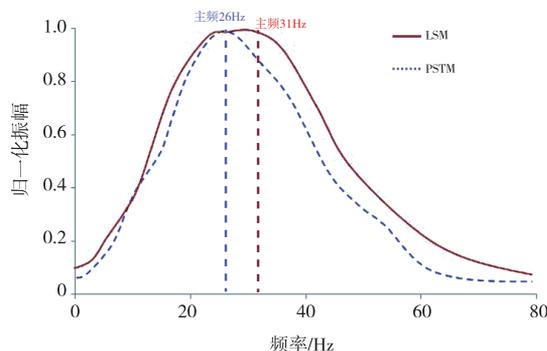


图8 频谱对比

图9是20次迭代反演的收敛率曲线,收敛曲线是检验LS-PSTM稳定性的有效指标。从图9可以看出,在最初的几次迭代中,数据残差降低得较快,接着收敛速度开始减慢,并且保持继续降低的趋势,说明LS-PSTM过程是稳定且收敛的。

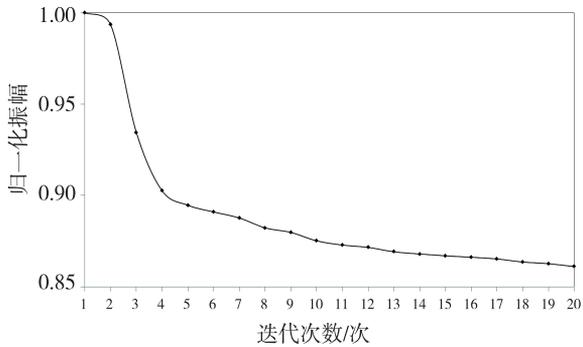
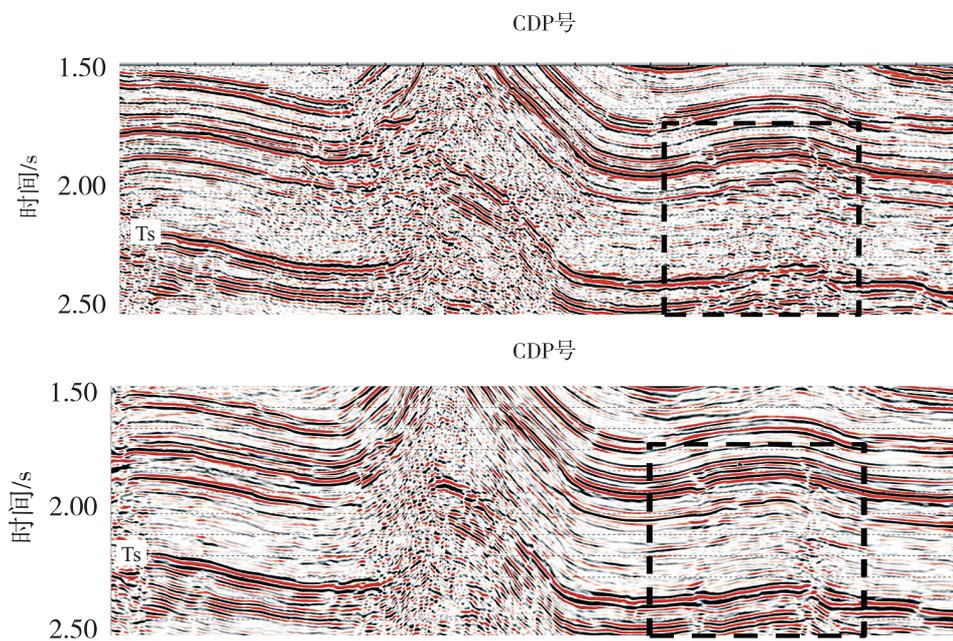


图9 收敛曲线:数据残差经过归一化处理

2.2.2 高陡构造成像

川东南高陡构造钻井、野外露头显示,高陡构造主体具有较好的页岩气勘探潜力。但是,由于受多期构造运动的影响,构造变化剧烈,地层倾角变化大,地层速度纵横向变化快,地震波场极其复杂,地震成像困难。

图10是川东南高陡构造成像处理结果,图10a是商业软件常规PSTM结果,图10b是LS-PSTM结果。对比可以看出,LS-PSTM压制了偏移噪声,改善了高陡构造成像质量,高陡构造内幕波组特征更加清晰,断背斜顶部成像较完整,有利于志留系(Ts)页岩气保存条件评价工作。此外,向斜区Ts反射层波组连续性好,断层位置更加明确,基底断裂成像分辨率更高(图中黑色虚线方框所示),有利于二叠系茅口组储层评价工作。



a. 商业软件常规PSTM; b. LS-PSTM

图10 川东南实际资料地震成像

3 结论与认识

将地震成像看作最小二乘框架的反演成像问题,构建了互为共轭关系的偏移/反偏移算子,利用共轭梯度法进行最小二乘叠前时间偏移(LS-PSTM),在数据空间域计算出分辨率较高、振幅信息可靠的地下反射系数的像。通过缝洞体模型数据测试验证了LS-PSTM技术的正确性和有效性,相比于常规PSTM,更能够提高成像信噪比、成像分辨率以及振幅保真度。

将LS-PSTM技术应用于川东南实际资料处理中,取得良好的应用效果。①LS-PSTM提高了二叠系茅口组成像分辨率,突出了岩溶缝洞异常;②LS-PSTM改善了高陡构造成像质量以及向斜区志留系反射层波组连续性,并且提高了向斜区基底断裂成像分辨率。

随着勘探目标日趋复杂,实际生产对地震成像精度的要求越来越高。LS-PSTM技术展现了解决复杂构造成像难题的能力,伴随计算机运算能力不断提升,LS-PSTM技术具有良好(下转第104页)

- 理论与实践[J]. 天然气地球科学, 2013, 24(6): 1091-1101.
- [2] 付金华, 牛小兵, 淡卫东, 等. 鄂尔多斯盆地中生界延长组长7段页岩油地质特征及勘探开发进展[J]. 中国石油勘探, 2019, 24(5): 601-614.
- [3] 刘克强. “一趟钻”关键工具技术现状及发展展望[J]. 石油机械, 2019, 47(11): 13-18.
- [4] 薛启龙, 丁青山, 黄蕾蕾. 旋转导向钻井技术最新进展及发展趋势[J]. 石油机械, 2013, 41(7): 1-6.
- [5] 常海军, 李祥群, 张娜, 等. 河南油田页岩油长水平段水平井钻井实践[J]. 复杂油气藏, 2013, 6(2): 66-70.
- [6] 雷静, 杨甘生, 梁涛, 等. 国内外旋转导向钻井系统导向原理[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2012, 39(9): 53-58.
- [7] 王敏生, 光新军. 定向钻井技术新进展及发展趋势[J]. 石油机械, 2015, 43(7): 12-18.
- [8] 光新军, 王敏生. 新型旋转导向工具在页岩气开发中的应用[J]. 石油机械, 2014, 42(1): 27-31.
- [9] 王勇茗, 余世福, 周文军, 等. 长庆致密油三维水平井钻井技术研究与应用[J]. 西南石油大学学报(自然科学版), 2015, 37(6): 79-84.
- [10] 闫吉增. 涇河油田非均质储层三维水平井钻井技术[J]. 石油机械, 2018, 46(6): 13-19.
- [11] 闫林, 陈福利, 王志平, 等. 我国页岩油有效开发面临的挑战及关键技术研究[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(3): 63-69.
- [12] 付金华, 李士祥, 牛小兵, 等. 鄂尔多斯盆地三叠系长7段页岩油地质特征与勘探实践[J]. 石油勘探与开发, 2020, 47(5): 870-883.
- [13] 李作会, 孙铭新, 韩来聚. 旋转自动导向钻井技术[J]. 石油矿场机械, 2003, 32(4): 8-10.
- [14] 王土权, 张荆洲, 焦延安, 等. 旋转地质导向系统在中国大陆水平井的首次应用[J]. 西部探矿工程, 2006, 18(5): 208, 211.
- [15] 薛让平, 李录科, 杨光. 三维水平井难度系数的界定与应用[J]. 钻采工艺, 2019, 42(1): 96-98.
- [16] 王植锐, 王俊良. 国外旋转导向技术的发展及国内现状[J]. 钻采工艺, 2018, 41(2): 37-41.
- [17] 李萌, 于兴胜, 罗西超, 等. 螺杆钻具的前沿技术[J]. 石油机械, 2011, 39(9): 19-22, 46.
- [18] 柳伟荣, 倪华峰, 王学枫, 等. 长庆油田陇东地区页岩油超长水平段水平井钻井技术[J]. 石油钻探技术, 2020, 48(1): 9-14.

(编辑 韩 枫)

(上接第47页)的推广应用前景。

参考文献:

- [1] TARANTOLA A. Linearized inversion of seismic reflection data [J]. Geophysical Prospecting, 1984, 32(6): 998-1015.
- [2] LEBRAS R, CLAYTON R W. An iterative inversion of back scattered acoustic waves [J]. Geophysics, 1988, 53(4): 501-508.
- [3] LAMBARÉ G, VIRIEUX J, MADARIAGA R, et al. Iterative asymptotic inversion in the acoustic approximation [J]. Geophysics, 1992, 57(9): 1116-1233.
- [4] NEMETH T, WU C, SCHUSTER G. Least-squares migration of incomplete reflection data [J]. Geophysics, 1999, 64(1): 208-221.
- [5] DUQUET B, MARFURT K J, DELLINGER J A. Kirchhoff modeling, inversion for reflectivity, and subsurface illumination [J]. Geophysics, 2000, 65(4): 1195-1209.
- [6] 黄建平, 李振春, 刘玉金, 等. 复杂介质最小二乘叠前深度偏移成像方法[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6): 2977-2983.
- [7] 周华敏, 陈生昌, 任浩然, 等. 基于照明补偿的单程波最小二乘偏移[J]. 地球物理学报, 2014, 57(8): 2644-2655.
- [8] 袁茂林, 黄建平, 邓聪, 等. 基于高斯束的对角Hessian在保幅成像中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 31(3): 1268-1273.
- [9] 任浩然, 黄光辉, 王华忠, 等. 地震反演成像中的Hessian算子研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2429-2436.
- [10] 陆基孟. 地震勘探原理[M]. 北京: 中国石油大学出版社, 2009.
- [11] DAI W, FOWLER P, SCHUSTER G T. Multisource least-squares reverse time migration [J]. Geophysical Prospecting, 2012, 60(4): 681-695.
- [12] STOLT R H, BENSON A. Seismic migration: theory and practice [M]. London: Geophysical Press, 1986.
- [13] 刘玉金, 李振春, 吴丹, 等. 局部倾角约束最小二乘偏移方法研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(3): 1003-1011.
- [14] YUAN M L, HUANG J P, LI Z C. Least-squares Gaussian beam migration [C]. Madrid, Spain: European Association of Geoscientists & Engineers, 2015: 1-5.
- [15] CLAERBOUT J F. Earth soundings analysis: processing versus inversion [M]. Cambridge: Blackwell Scientific Publications, 2004.

(编辑 杨芝文)