

引用格式:沈杰,张剑飞,王金龙,等.联合建模技术在深层页岩气双复杂地区深度偏移成像中的应用[J].油气藏评价与开发,2021,11(1):22-28.
Shen Jie, Zhang Jianfei, Wang Jinlong, et al. Application of joint modeling technology in depth migration imaging of deep shale gas in dual complex area[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2021, 11(1): 22-28.
DOI:10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2021.01.004

联合建模技术在深层页岩气双复杂地区 深度偏移成像中的应用

沈杰,张剑飞,王金龙,李立红,林娜,王鹏

(中国石化西南油气分公司勘探开发研究院,四川成都610041)

摘要:永川新店子“双复杂”区近地表因素变化大,构造复杂,资料信噪比低,导致准确成像难度大。页岩气勘探开发过程中,面临新店子背斜构造内幕不清、局部小断层成像不准、水平井设计轨迹与实钻不符等问题。常规网格层析反演方法在低信噪比区速度建模中适用性较差,既难以求准浅层速度,消除复杂近地表对成像的影响,又难以在中深层实现有效数据驱动,准确更新中深层速度。针对“双复杂”地区深度域建模问题,采用全偏移距初至层析反演求取近地表速度,选取合适界面,将浅层与中深层模型进行融合。在网格层析迭代过程中,应用构造模型对速度进行约束,实现了速度低频量与构造分布相契合及高频收敛。应用结果表明,浅中深融合建模与构造约束网格层析技术的联合应用弥补了通常方法的不足,形成的最终速度场精度更高,“双复杂”地区成像得到较明显改善,更有力地支撑了该区勘探开发。

关键词:双复杂;速度建模;层析反演;速度融合;构造约束;高斯束偏移

中图分类号:TE122

文献标识码:A

Application of joint modeling technology in depth migration imaging of deep shale gas in dual complex area

Shen Jie, Zhang Jianfei, Wang Jinlong, Li Lihong, Lin Na, Wang Peng

(Research Institute of Petroleum Exploration and Development, Sinopec Southwest China Oil and Gas Company, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: In the “dual complex” area of Xindianzi, Yongchuan, all the reasons that the near surface factors vary greatly, the structure is complex, and the signal-to-noise ratio of data is low make the accurate imaging difficult. During the shale gas exploration and development, there are some problems of Xindianzi such as unclear anticline structure, inaccurate imaging of local small faults, and inconsistency of horizontal well design trajectory with actual drilling. The conventional grid tomography inversion method has poor applicability in velocity modeling of low signal-to-noise ratio area. It is difficult not only to obtain the quasi shallow velocity and eliminate the influence of complex near surface on imaging, but also to realize effective data driving in the middle and deep layers and update the velocity accurately in the middle and deep layers. In order to solve the problem of depth domain modeling in “dual complex” area, full offset first break tomography inversion is used to obtain near surface velocity, then the appropriate interface is selected to fuse the models of shallow and medium depth. In the iterative process of grid tomography, the constraints on velocity by the construction model can realize the corresponding between low-frequency velocity and structural distribution, and get high-frequency convergence. The application results show that the joint application of shallow, medium and deep fusion modeling and structural constraint grid tomography technology make up for the shortcomings of the conventional methods, the resulting final velocity field is more accurate, and the imaging of the “dual complex” area is obviously improved. The results strongly support the exploration and development of this area.

Key words: dual complexity, velocity modeling, tomographic inversion, velocity fusion, structural constraint, gaussian beam depth migration

收稿日期:2020-09-25。

第一作者简介:沈杰(1984—),男,硕士研究生,副研究员,主要从事地震资料处理工作。地址:四川省成都市高新区(南区)吉泰路688号,中国石化西南科研基地,邮政编码:610041。E-mail:14520800@qq.com

基金项目:“十三五”国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”(2016ZX05002);“十三五”国家科技重大专项“南海相页岩气勘探潜力与目标评价”(2017ZX05036-003)。

永川地区位于四川盆地泸州—开江隆起带,属华蓥山褶皱带向南呈帚状撒开的低背斜群,该背斜群整体为狭长梳状构造,大多呈北东向排列,断层发育,该区是页岩气热点探区。工区主体构造新店子背斜地形起伏大,近地表岩性复杂,背斜区断裂发育,属典型“双复杂”地区,地震资料准确成像难度大。在勘探开发过程中,面临新店子主体背斜构造内幕不清、局部小断层成像不准、水平井设计轨迹与实钻不符等问题,这些问题给资料解释人员和钻井设计与跟踪人员造成了困扰,严重制约了生产。

叠前深度偏移技术是解决速度横向变化剧烈的复杂构造成像问题的较理想技术^[1-6],该技术成功应用的关键是建立准确的工区深度—速度场^[7-10]。

速度建模技术按算法来划分主要包括2类:基于射线的速度建模和基于波场延拓的速度建模^[11-14]。基于射线的速度建模方法主要包括线性层析反演和非线性层析反演^[15-17]。基于波场延拓的速度建模最新进展主要是全波形反演(FWI)^[18-20]。当前,市场上流行的速度建模方法是线性层析反演建模,该方法主要包括沿层层析与网格层析^[21-22]。沿层层析方法的优点是便于速度的沿层,可使得速度分布与构造分布一致,缺点是速度分辨率不够高。网格层析反演方法的优点是可以全局寻优弥合误差,不受纵横向限制,对各类资料适用性都较好,缺点是更新后速度与地质构造的契合度不够高。因此,需要将二者优点进行结合。

线性层析反演建模方法,主要基于在共成像点道集上拾取剩余曲率和在偏移剖面上拾取构造倾角来进行层析反演,反演效果依赖于拾取信息精度。通常因为浅层覆盖次数不足,剩余曲率难以准确拾取,特别是复杂地区,导致难以通过层析反演方法有效更新浅层速度。浅层速度不准势必影响速度模型精度,并且累计误差影响浅中深最终成像精度。因此,需要在速度建模过程中进一步提高浅层模型精度。

在“双复杂”地区,存在资料信噪比低、波场复杂以及残余静校正等问题,导致层析反演方法难以有效运用。本文充分挖掘现有技术,采用浅中深融合建模思路建立“双复杂”地区深度域速度模型。采用全偏移距初至层析反演求取更准确的近地表深层速度;通过地质构造模型对网格层析反演迭代更新过程进行约束,既使得速度剩余高频量在网格层

析中逐渐收敛,又保证速度低频趋势与地质构造保持一致;针对局部低信噪比地区采用一维叠加扫描技术求取最佳成像速度。该方法弥补了通常层析反演方法的不足,更加适用于“双复杂”地区,进一步提高了该区模型精度和最终成像质量。

1 研究区概况

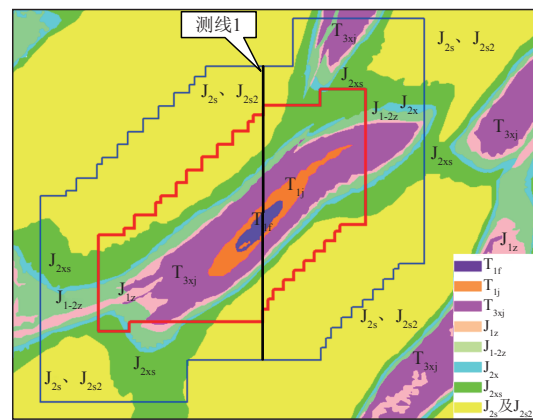
分析研究区资料可知影响成像的不利因素主要有以下3点。

1) 新店子背斜区静校正问题

背斜地表两翼山势较陡,顶部中间较为平坦,最高海拔720 m,相对高差最大达300余米。工区地表岩性分布较复杂,多处分布煤矿采空区,低速带速度横向变化剧烈,静校正问题突出。

2) 新店子背斜区资料信噪比低

背斜顶部主要出露三叠系灰岩、泥灰岩及疏松砂岩(图1),翼部地层倾角变化大,岩层破碎,断裂发育,激发、接收条件较差,再加上煤矿采空区及周边干扰源的影响,导致背斜区资料信噪比低。



注:红线为炮点范围,蓝线为检波点范围

图1 新店子背斜区地表岩性出露

Fig. 1 Surface lithology exposed in Xindianzi anticline area

3) 新店子背斜区构造复杂

研究区位于大型帚状构造尾部,受剪切和侧向挤压联合作用,推覆同时伴随走滑,基底断裂和走滑断层共同造成该区的高丘状褶皱面貌。背斜区表层、深部地震地质条件极为复杂,属典型的“双复杂”区,由于地层运动,主要目的层龙马溪组抬升变浅,表层出露地层由侏罗系变为三叠系,主体构造极为高陡,断裂发育(图2)。

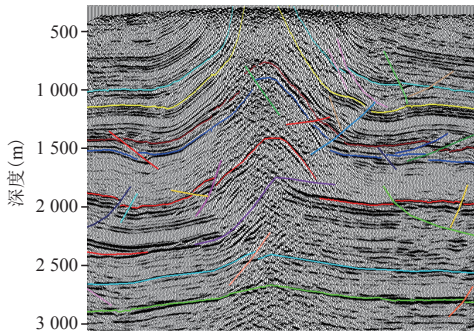


图2 新店子工区典型构造样式剖面(图1中测线1)
Fig. 2 Typical structural style profile of Xindianzi work area (Testing line 1 in Fig. 1)

综上所述,研究区深度域准确成像,首先需尽量做好偏移前预处理,主要包括初至拾取与近地表速度反演、静校正、提高信噪比、能量补偿、数据规则化等。

2 联合建模技术与偏移方法

针对页岩气“双复杂”地区成像存在的难题,建立了以小平滑地表浅中深融合模型约束网格层析反演速度建模技术为核心的深度域成像流程,流程最后采用高斯射线束体偏移进行深度域成像(图3)。

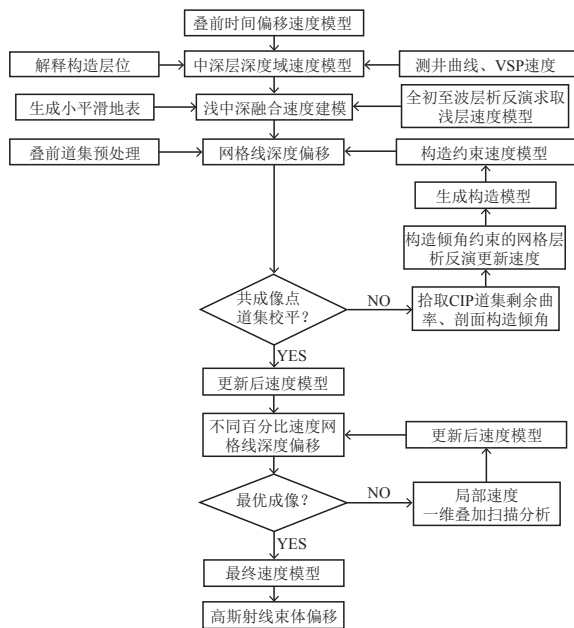


图3 基于浅中深融合和构造约束的网格层析速度建模技术流程

Fig. 3 Technical process of grids tomographic velocity modeling based on shallow, medium and deep fusion and structural constraint

2.1 浅层层析反演建模

收集工区单炮初至,剔除异常值。输入全偏移距初至,采用层析反演方法,多轮迭代求取浅层近地表速度场(图4),在X、Y、Z三个方向对速度模型进行适当平滑。收集高程数据,采用一定平滑半径对真地表进行平滑处理,求取小平滑地表(图5),并用小平滑地表取代浅层速度模型的真地表。

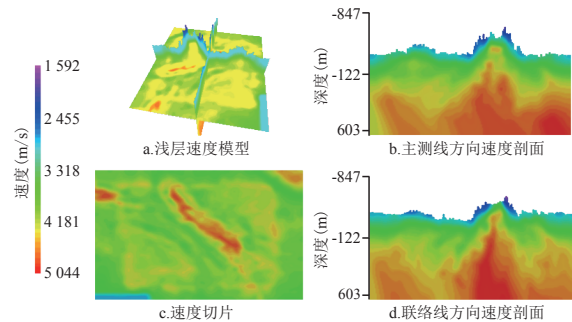


图4 全偏移距初至层析反演求取的工区近浅层速度模型
Fig. 4 Velocity model of near shallow layer in work area obtained by full offset first break tomography inversion

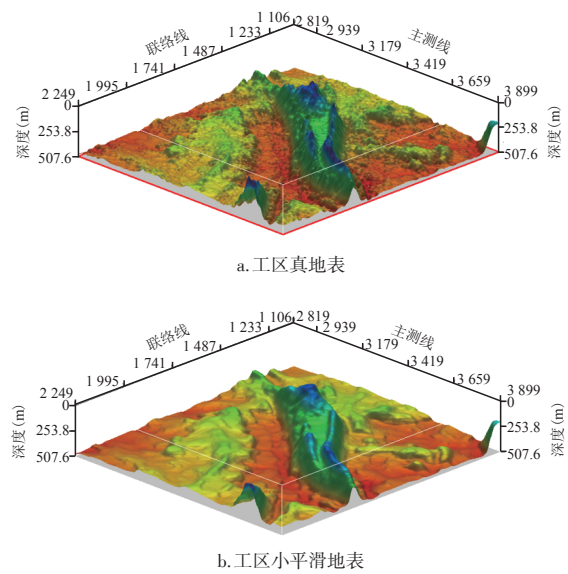


图5 工区真地表与小平滑地表
Fig. 5 True surface and slightly smooth surface in work area

2.2 模型约束网格层析反演(中深层速度建模)

2.2.1 初始速度建模

合理构建初始速度模型是做好网格层析反演更新速度的基础。在分析工区地质和测井等资料基础

上,通过融合测井纵波速度、解释构造层位、叠前时间偏移时深转换后的层速度构建中深层初始速度模型。使得纵向上,初始速度模型与测井速度趋势一致(图6),能够较准确描述地层速度的纵向变化;横向上,速度的分布与构造保持一致。速度模型网格为 $80\text{ m}\times 80\text{ m}\times 10\text{ m}$ 。

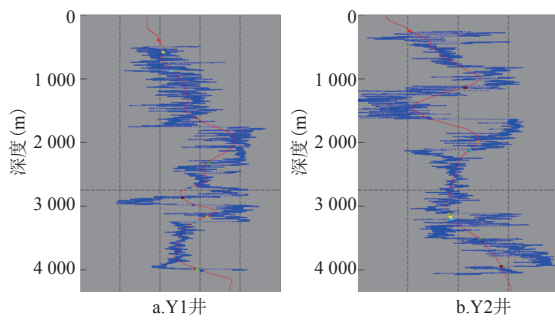


图6 测井纵波速度曲线与初始速度叠合显示
Fig. 6 Overlay display of log P-wave velocity curve and initial velocity

2.2.2 模型约束网格层析反演

通常构造倾角约束的各向同性速度网格层析反演的步骤是:首先进行网格线深度偏移,输出共成像点道集和叠加剖面,分别拾取剩余曲率和构造倾角,利用剩余曲率反映的深度速度误差信息,运用构造倾角约束的网格层析成像反演修正速度体。如此进行多轮迭代,直至共成像点道集“拉平”。

构造模型约束网格层析反演实现步骤:在运用构造倾角约束网格层析反演修正速度体后,按照一定网格点提取速度体,同时利用更新后的速度生成工区新的构造模型,然后利用提取的速度体进行构造模型约束插值,形成构造模型约束的速度模型

(图7)。该模型兼具更新后模型高频量更加收敛与低频速度趋势符合构造走向的优点。

2.3 浅中深融合建模

融合建模的关键是数据、速度模型、静校正量三者保持对应。

因为偏移起始面是小平滑地表,所以需将道集数据炮点、检波点从浮动基准面校到小平滑面上。分析2.1节中全偏移距初至反演速度模型,结合中深层速度,确定可靠的层析反演射线包络面,作为速度拼接面。将近地表速度模型与深度域中深层速度模型进行拼接融合(图8)。计算小平滑地表浅层模型的静校正量,将道集反应用此静校正量,保留预处理阶段的所有高频量。

2.4 一维叠加扫描分析

由于主体背斜构造资料信噪比低,难以准确拾取道集内的剩余曲率和剖面构造倾角,影响网格层析反演精度。采用一维叠加扫描技术对不同速度场成像进行扫描,选取最优成像速度。首先拾取并生成等深度层位,然后生成不同百分比速度模型,在三维体内拾取控制点相干谱,拾取最优成像速度。

2.5 高斯射线束体偏移

高斯射线束偏移算法既具备克希霍夫偏移算法的灵活高效和适应性,又能有效克服多值走时、焦散等问题。其成像精度与单程波偏移算法相当,还能突破单程波偏移的倾角限制,成像回转波^[23]。与逆时偏移相比,高斯束算法对速度模型依赖性相对较低,也更加适用于从起伏地表进行偏移^[24]。

进行高斯射线束体偏移成像之前,需对射线束

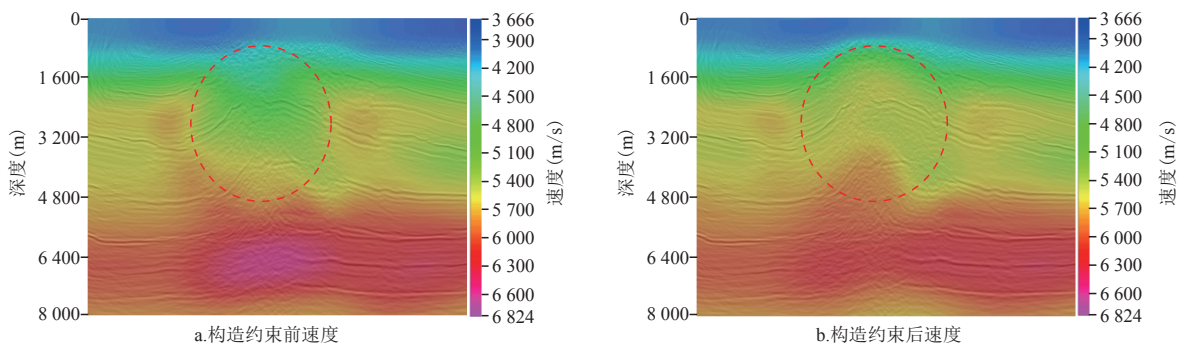


图7 构造约束前后的工区速度模型(与剖面重叠)
Fig. 7 Velocity model of work area before and after construction constraints(Overlap with profile)

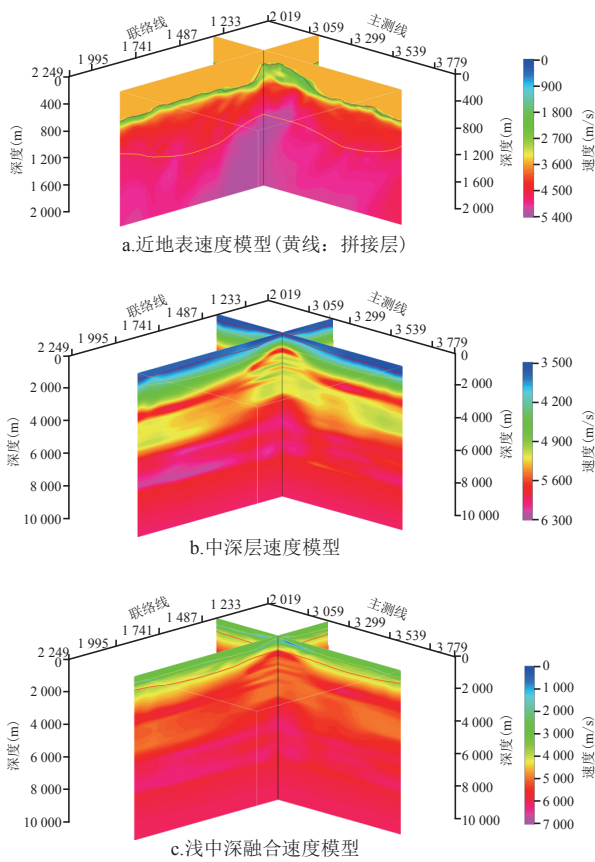


图8 基于小平滑地表的浅中深融合速度建模
 Fig. 8 Shallow, medium and deep fusion velocity modeling based on slightly smooth surface

宽度、偏移孔径、地面射线出射角度、地面下射线展开角度、偏移频率扫描范围等多参数进行充分测试,优选最佳成像参数组合。

3 应用效果

新店子背斜“双复杂”区深度域准确成像,既需

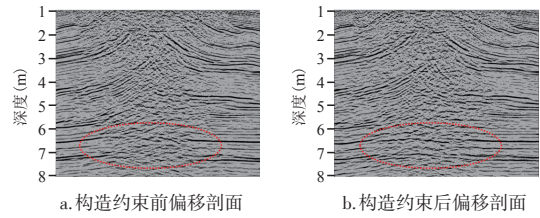


图9 构造约束前后后偏移剖面
 Fig. 9 Migration profile before and after structural constraints

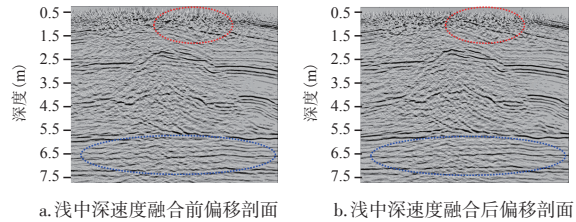


图10 浅中深速度融合前后偏移剖面
 Fig. 10 Migration profile before and after shallow, medium and deep velocity fusion

要准确刻画浅层中低频速度的变化,又需要准确构建深层构造模型,求取中高频偏移成像速度,最后实现拟真地表(小平滑地表)的体偏移成像。这要求具备时间域、深度域一体化处理思路,同时充分与解释人员结合。

与通常构造倾角约束的网格层析方法相比,构造模型约束方法建模偏移对寒武系及以下地层成像效果更好,表明该方法建立的速度模型精度更高(图9)。

与通常以中深层为主的网格层析反演方法相比,浅中深融合速度模型的偏移剖面,在新店子背斜区浅层倾斜地层与深层灯影组标志层成像更好(图10)。

从合成地震记录标定看,合成地震道与井旁地震道吻合较好,振幅能量强弱适中,与井旁地震道一致性较好(图11),地震成果深度精度较高。由图12

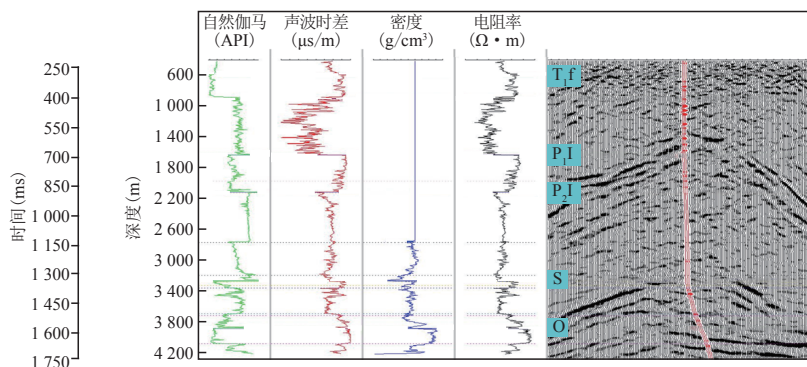


图11 Y3井合成记录标定
 Fig. 11 Synthetic record calibration of Well-Y3

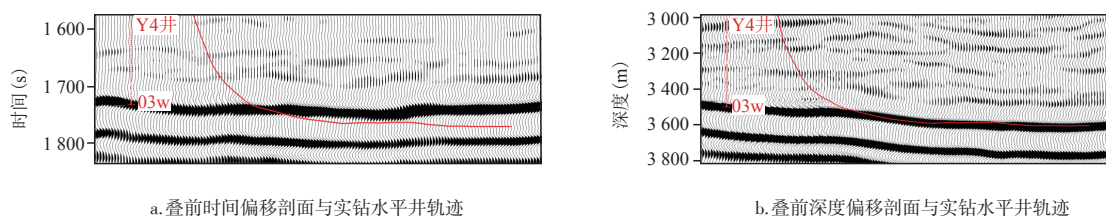


图12 叠前时间偏移与叠前深度偏移剖面与实钻井轨迹对比

Fig. 12 Comparison of pre-stack time migration and pre-stack depth migration profile with actual drilling trajectory

可出,叠前时间偏移地层存在一定的倾角误差,深度域成果精度更高,目的层产状与实钻轨迹更吻合,更有力于支撑后续水平井轨迹设计及钻井跟踪调整。

4 结论与认识

针对永川页岩气勘探开发存在的难题,开展深度域速度建模研究。常用的倾角约束的网格层析建模方法在该地区应用存在局限性,采用全偏移距初至波层析反演求取近地表速度场,在对叠前道集数据反应用低频静校正量基础上,实现了基于小平滑地表的浅中深融合速度建模。同时,在网格层析反演过程中对速度使用构造模型约束,既保证高频量能够得到有效收敛,又使得低频量能够契合地质构造。该技术较好地弥补了通常方法的不足,更加适用于“双复杂”地区深度域建模,有效提高了研究区地震成果质量,有力地支撑构造解释、水平井轨迹设计及钻井跟踪调整。

参考文献

[1] 巫芙蓉,郭海洋,刁永波,等.塔里木盆地秋里塔格构造带双复杂构造地震处理技术[J].天然气工业,2019,39(4):28-36.
Wu Furong, Guo Haiyang, Diao Yongbo, et al. Seismic processing technologies for double complex structures in the Qiulitage structural belt, Tarim Basin[J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(4): 28-36.

[2] 徐敏,杨晓,王静,等.叠前深度偏移技术在复杂断块井位目标优化中的应用[J].中国石油勘探,2015,20(3):73-78.
Xu Min, Yang Xiao, Wang Jing, et al. Application of Pre-stack Depth Migration Technology for Optimization of Well location Target in Complicated Faulted Block Structure[J]. China Petroleum Explora, 2015, 20(3): 73-78.

[3] 张宇,闫更平,王林,等.塔中M工区低信噪比地震资料处理技术对策[J].油气藏评价与开发,2017,7(1):14-19.
Zhang Yu, Yan Genping, Wang Lin, et al. Treatment technologies

and countermeasure of low signal-to-noise ratio seismic data in M block of mid-Tarim area[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2017, 7(1): 14-19.

[4] 陈骁,董霞,曾鸣,等.叠前深度偏移在复杂构造成像研究中的应用——以川东三岔坪高陡构造为例[J].天然气工业,2013,33(3):15-18.
Chen Xiao, Dong Xia, Zeng Ming, et al. Application of prestack depth migration to complex structure imaging: A case study from the Sanchaping high-steep structure in the eastern Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2013, 33(3): 15-18.

[5] 赵路子,张光荣,陈伟,等.深层复杂地质构造带地震勘探关键技术——以四川盆地龙门山断褶带北段为例[J].天然气工业,2018,38(1):39-48.
Zhao Lu, Zhang Guangrong, Chen Wei, et al. Key seismic survey technologies for deep complex geological structures: A case study of the northern section of the Longmenshan Fault Fold Belt in the Sichuan Basin[J]. Natural Gas Industry, 2018, 38(1): 39-48.

[6] Jones I F, Goodwin M C, Berranger I D, et al. Application of anisotropic 3D reverse time migration to complex north sea imaging[C]// paper SEG-2007-2140 presented at the 2007 SEG Annual Meeting, 23-28 September, 2007, San Antonio, Texas, USA.

[7] 李源,刘伟,刘微,等.各向异性全速度建模技术在山地地震成像中的应用[J].石油物探,2015,54(2):157-164.
Li Yuan, Liu Wei, Liu Wei, et al. Application of anisotropic full velocity modeling technology in mountain seismic imaging[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2015, 54(2): 157-164.

[8] 聂法健.基于地震层位约束的速度建模技术在普光气田的应用[J].非常规油气,2017,4(2):1-7.
Nie Fajian. Application of velocity modeling technology based on seismic horizon constraint in Puguang Gas Filed[J]. Unconventional Oil & Gas, 2017, 4(2): 1-7.

[9] 符力耘,肖又军,孙伟家,等.库车坳陷复杂高陡构造地震成像研究[J].地球物理学报,2013,56(6):1985-2001.
Fu Liyun, Xiao Youjun, Sun Weijia, et al. Seismic imaging studies of complex high and steep structures in Kuqa depression[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2013, 56(6): 1985-2001.

[10] 潘兴祥,秦宁,曲志鹏,等.叠前深度偏移层析速度建模及应

- 用[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(6):3080-3085.
Pan Xingxiang, Qin Ning, Qu Zhipeng, et al. Tomography velocity modeling and application of prestack depth migration[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(6): 3080-3085.
- [11] 张敏,李振春. 偏移速度分析与建模方法综述[J]. 勘探地球物理学进展, 2007, 30(6):421-427.
Zhang Min, Li Zhenchun. Review of migration velocity analysis and modeling methods[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2007, 30(6): 421-427.
- [12] 马彦彦,李国发,张星宇,等. 叠前深度偏移速度建模方法分析[J]. 石油地球物理勘探, 2014, 49(4):687-693.
Ma Yanyan, Li Guofa, Zhang Xingyu, et al. Analysis of velocity modeling method for prestack depth migration[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2014, 49(4): 687-693.
- [13] 薛花,杜民,文鹏飞,等. 网格层析速度反演方法在准三维西沙水合物中的应用[J]. 物探与化探, 2017, 41(5):846-851.
Xue Hua, Du Min, Wen Pengfei, et al. The application of grid tomography method to quasi three dimensional of Xisha hydrate [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2017, 41 (5): 846-851.
- [14] 管文胜,段文胜,查明,等. 利用基于模型的层析速度反演进行低幅度构造成像[J]. 石油地球物理勘探, 2017, 52(1): 87-93.
Guan Wensheng, Duan Wensheng, Zha Ming, et al. Low amplitude structural imaging using model-based tomographic velocity inversion[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2017, 52 (1): 87-93.
- [15] 王兆旗,李立胜,叶月明,等. 倾角约束的非线性层析反演速度建模技术[J]. 物探化探计算技术, 2018, 40(2):156-161.
Wang Zhaoqi, Li Lisheng, Ye Yueming, et al. Dip constrained non-linear tomography inversion technology for velocity modeling[J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 40(2): 156-161.
- [16] 李振伟,杨镔,倪瑶,等. 基于立体层析反演的偏移速度建模应用研究[J]. 石油物探, 2014, 53(4):444-452.
Li Zhenwei, Yang Kai, Ni Yao, et al. Application of migration velocity modeling based on stereo tomography inversion[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2014, 53(4): 444-452.
- [17] 金昌昆,张建中. 地震立体层析成像的实现方法及效果分析[J]. CT理论与应用研究, 2014, 23(6):939-950.
Jin Changkun, Zhang Jianzhong. Implementation methods of stereotomography and analysis of influence factors on its results [J]. CT Theory and Applications, 2014, 23(6): 939-950.
- [18] 胡光辉,杜泽源,何兵红,等. 近地表复杂区早至波全波形反演建模技术与应用[J]. 石油物探, 2019, 58(6):811-818.
Hu Guanghui, Du Zeyuan, He Binghong, et al. Full waveform inversion based on early arrival waves and its application incomplex near-surface area[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2019, 58(6): 811-818.
- [19] 尹力,方伍宝,李振春,等. 测井模型约束全波形反演的应用[J]. 大庆石油地质与开发, 2015, 34(3):156-160.
Yin Li, Fang Wubao, Li Zhenchun, et al. Application of the well logging model constraining the full waveform inversion[J]. Petroleum Geology and Oilfield Development in Daqing, 2015, 34(3): 156-160.
- [20] 杨午阳,王西文,雍学善,等. 地震全波形反演方法研究综述[J]. 地球物理学进展, 2013, 28(2):766-776.
Yang Wuyang, Wang Xiwen, Yong Xueshan, et al. The review of seismic full waveform inversion method[J]. Progress in Geophysics, 2013, 28(2): 766-776.
- [21] 任俊兴,孟庆利,杨帆. 基于构造约束的逐层网格层析速度建模技术在南川地区的应用[J]. 油气藏评价与开发, 2020, 10(1):17-21.
Ren Junxing, Meng Qingli, Yang Fan. Application of structural constraint grid tomography velocity modeling in Nanchuan area[J]. Reservoir Evaluation and Development, 2020, 10(1): 17-21.
- [22] 彭海龙,赫建伟,任婷,等. 基于地质构造约束的3D速度建模方法在琼东南盆地深水复杂断块区域成像中的应用[J]. 物探与化探, 2018, 42(3):537-544.
Peng Hailong, He Jianwei, Ren Ting, et al. The application of 3D velocity modeling based on geological constraint in Qiongdongnan basin deep water complex fault block area[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2018, 42(3): 537-544.
- [23] 谢飞,李佩,黄中玉,等. 高斯射线束叠前深度偏移成像研究[J]. 石油物探, 2013, 52(1):65-71.
Xie Fei, Li Pei, Huang Zhongyu, et al. Research on Gaussian ray beam prestack depth migration imaging[J]. Geophysical Prospecting for Petroleum, 2013, 52(1): 65-71.
- [24] 杨晓东,秦宁,王延光. 常用叠前深度偏移方法特点分析与实例对比[J]. 地球物理学进展, 2015, 30(2):740-745.
Yang Xiaodong, Qin Ning, Wang Yanguang. Analysis and examples of commonly used prestack depth migration methods[J]. Progress in Geophysics, 2015, 30(2): 740-745.

(编辑 尹淑容)