

文章编号:1009-9603(2021)05-0057-07

DOI:10.13673/j.cnki.cn37-1359/te.2021.05.006

基于反演多参数体约束地质建模的水平井预警技术

——以玛湖地区致密砂砾岩油藏为例

李晓梅,李 洲,邓振龙,宋 平,楼仁贵,秦 明

(中国石油新疆油田分公司 勘探开发研究院,新疆 克拉玛依 834000)

摘要:针对玛湖地区致密砂砾岩油藏储层横向变化快、井间构造和储层预测难度大、优质储层钻遇率低等问题,采用反演多参数体约束地质建模,实现对优质储层三维空间分布的刻画,为水平井预警调控提供重要的依据。通过在油层之上建立预警标志层,根据标志层实钻数据更新局部速度场、构造和地质模型,提前预警靶点深度和水平段倾角关键参数变化,并根据井轨迹方向岩性韵律预测结果和随钻电阻率变化规律,及时进行水平段出层风险预警,以达到提高入靶精度和优质储层钻遇率的目标。当钻进位置位于正韵律区,电阻率下降反映顶切,有顶出的风险,需要进行预警并采取降斜措施;当钻进位置位于反韵律区,电阻率下降较快,有底出的风险,需要进行预警并采取增斜措施。玛湖地区应用效果表明,基于反演多参数体约束地质建模的水平井预警技术使油层钻遇率提高了7.4%,钻井周期缩短了8.7%。

关键词:致密砂砾岩油藏;地质建模;水平井预警;随钻电阻率;玛湖地区

中图分类号:TE243*.1

文献标识码:A

Early warning technology by geological modeling based on multiparameter constrained inversion for horizontal wells: A case of tight conglomerate reservoirs in Mahu area

LI Xiaomei, LI Zhou, DENG Zhenlong, SONG Ping, LOU Rengui, QIN Ming

(Research Institute of Exploration and Development, Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Karamay, Xinjiang, 834000, China)

Abstract: Due to the fast lateral changes of tight conglomerate reservoirs in Mahu area, difficult prediction of the interwell structures and reservoirs, and low drilling ratios of high-quality reservoirs, the geological modeling based on multiparameter constrained inversion was employed to characterize the three-dimensional spatial distribution of high-quality reservoirs, providing a solid basis for early warning and control of horizontal wells. The early-warning marker bed was established on the oil pay, and the local velocity field and structure as well as the geological model were updated according to the actual drilling data of the marker bed. The changes in key parameters, including target depth and horizontal-section dip angles, were forewarned. According to the prediction results of lithological rhythms along the well trajectory and the variation in resistivity while drilling, the early risk warning of drilling out of high-quality reservoirs in horizontal sections was carried out in time to improve the accuracy of target entry and drilling ratios of for high-quality reservoirs. When the positive rhythm area was drilled, the resistivity drop reflected the topcut, at a risk of top drill-out, which required early warning and a smaller hole angle; when the anti-rhythm area was drilled, the resistivity declined rapidly, at a risk of bottom drill-out, which demanded early warning and a larger hole angle. The application results in Mahu area demonstrate that the early warning technology by geological modeling based on multiparameter constrained inversion for horizontal wells enhances the drilling ratios of oil pays by 7.4% and cut the drilling period by 8.7%.

Key words: tight conglomerate reservoir; geological modeling; early warning for horizontal wells; resistivity while drilling; Mahu area

收稿日期:2021-01-12。

作者简介:李晓梅(1986—),女,河南孟津人,工程师,从事开发地震研究。E-mail:lxmei5@petrochina.com.cn。

基金项目:国家科技重大专项“准噶尔盆地致密油开发示范工程”(2017ZX05070-002)。

新疆准噶尔盆地玛湖地区油气资源丰富,属于超深特低渗透的大型粗碎屑致密砂砾岩油藏,砂砾岩储层结构复杂、非均质性强、低孔低渗透、埋藏深度大,致使其开采难度大^[1],给油藏高效开发带来严峻挑战。水平井可以增大泄油面积、提高油气产量,目前玛湖地区主要采用水平井体积压裂方式进行规模化开发^[2]。如何精确刻画优质储层三维空间分布,并在水平井钻进过程中有效指导井轨迹在优质储层中穿行,预警调整使其规避出层风险,提高优质储层钻遇率是致密砂砾岩油藏开发最为关心的问题。

李一超等研究指出,对不准确的钻前地质导向模型,可以在实际导向中加以修正,但未提及修正方法^[3];张德军提出了一种应用 Workflow 模块更新地质模型的研究思路,其主要应用于构造简单地区^[4];朱晓雨提出用地震与随钻地质结合更新模型参数,主要对地层产状进行了修正,但未涉及储层变化的处理方法^[5]。玛湖地区致密砂砾岩储层横向变化大,初始地质模型往往与实钻差异较大,为解决实钻过程中模型不准确导致优质储层钻遇率低的问题,笔者提出了一种综合应用地震、地质研究成果为水平井轨迹优化调整提供预警措施的方法。采用叠前反演多参数体约束地质建模,实现对优质储层三维空间分布的精细刻画,为水平井预警提供重要依据。通过在油层之上建立预警标志层,根据标志层实钻数据更新局部速度场、构造、地质模型,提前预警水平井钻进关键参数变化,并根据井轨迹方向岩相预测结果和随钻电阻率变化规律,及时进行水平段出层风险预警,以达到提高入靶精度和优质储层钻遇率的目标。

1 井震结合精细刻画致密砂砾岩储层

玛湖地区主要含油层系三叠系百口泉组埋深为 2 812~3 920 m,为整体湖侵背景下的扇三角洲沉积体系^[6],有利储层主要发育在扇三角洲前缘相带,构造整体表现为平缓的单斜,地层倾角为 3°~7°,局部发育微构造。研究区主要为低孔、低渗透致密砂砾岩储层,岩相结构复杂、横向变化大。另外,有效储层与致密层的波阻抗叠置,使叠后波阻抗反演和传统的单参数储层预测难以解决有效储层识别问题。地震数据的多解性,使储层预测往往存在风险,水平段钻进过程中容易出现穿层现象。

采用以地震岩石物理参数分析为基础的叠前储层预测,结合三维精细地质建模既可以大大减少储层预测的多解性,提高预测精度,又可以揭示和表征储层预测中的不确定性。利用采集的宽方位、高密度叠前地震资料,开展以地震岩石物理参数分析为基础的叠前地质统计学反演,获得反映储层特征的纵波阻抗、横波阻抗、纵波速度、横波速度、密度、杨氏模量等多种反演参数体。优选出与岩性、含油性相关性较高的敏感属性,如密度体、纵波速度体和纵横波速度比反演体,进行神经网络融合得到三维岩性概率体。经反演多参数体融合后得到的岩性概率预测结果与井上岩性划分的吻合率达 92%。

将反演多参数体融合得到的岩性概率体作为地质模型的横向趋势约束,综合利用地震横向预测宏观优势和井资料纵向约束精度高的特点,精细预测岩相、物性分布,再结合地质工程储层分类标准,精细刻画储层三维空间分布。

经该方法预测出的优势岩相、含油饱和度、油层分布与井资料吻合性较好,验证井吻合率为 84%。根据研究成果,对储层变化较大的重点区域进行划分,预警提醒井位部署及现场跟踪人员,对储层横向变化较大区域的水平段进行重点关注,优先安排现场跟踪工作。

2 水平段关键参数变化及出层风险预警

水平井预警是指在水平井实施过程中,现场跟踪钻井所揭示的地下情况,尽可能提前发现前方构造及油层变化,对水平井设计参数做出修正,消除一切可能出现的误差^[7],指导调整水平井钻井的前进轨迹,最大限度地实现水平井在优质储层中穿行、减少无效进尺、保证高储层钻遇率的目的^[8]。钻进过程中水平井预警的方法流程(图 1)为:①在井震结合致密砂砾岩储层精细刻画的基础上,建立预警标志层。②对目标区精细地震解释,建立目的层时深转换速度模型,对标志层深度进行预测。③根据标志层实钻数据与预测数据对比,对地震速度场进行修正,利用更新后的速度场进行构造图精细修正,预测靶点和水平段控制点的深度及水平段倾角变化趋势。④在水平段钻进过程中,结合随钻测井曲线,出层后及时进行顶出还是底出判断,从而进行水平井合理预警调整,保证较高的油层钻遇率。

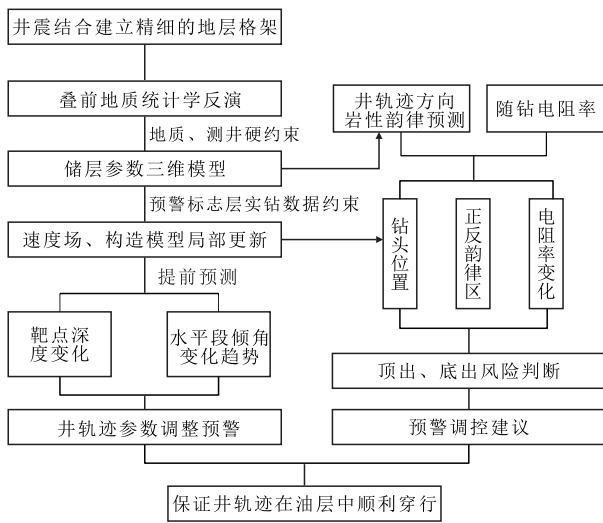


图1 水平井预警流程

Fig.1 Early warning process for horizontal wells

2.1 建立预警标志层

上下接触的地层产状一般具有继承性或规律性,在井口至目的层之间选择分布相对稳定、上下岩性变化明显的地层界面,以及测井曲线上易于识别的具有区域代表性的特征段作为标志层^[9],实时对比钻遇标志层的深度变化,以便提前预测目的层微构造变化,通过实钻标志层逐层预测下伏地层变化,直到确定目的层的位置,将这个标志层称为预警标志层。它的作用是:在井轨迹进入油层段之前,提前定量预示目的层可能的深度、厚度变化,提前预警以便及时调整轨迹准确中靶^[10]。

对比研究区岩性、测井曲线特征,确定在目的油层之上靠近油层的百二段顶部的厚层泥岩作为预警标志层,对应低电阻率、低密度、低声波时差特征,在地震剖面上表现为连续的波谷反射特征,该标志层在研究区分布稳定,易于地震资料横向追踪。

将标志层的设计数据与实钻数据进行对比,更新局部速度场、构造图对下伏地层深度变化进行预测^[11]。根据标志层实钻数据,对地震速度场进行修正,利用更新后的速度场更新构造图和地质模型,预测靶点深度、油层顶底界面深度和水平段前进方向上构造变化趋势。

2.2 井轨迹关键参数预测

2.2.1 靶点深度预测

用2种方法对靶点深度进行预测,第1种方法适用于井区外围控制井少、井间距大的情况,第2种方法适用于开发井网密集、井控程度较高的情况,两者结合对研究区新部署的水平井进行深度预测。

第1种方法为用标志层深度结合地震层速度推

算靶点深度。已知目前实钻井钻至标志层的深度为 H_0 ,从地震时间剖面获取其对应的双程旅行时间 T_0 以及靶点对应的双程旅行时间 T 。通过标志层实钻数据将速度场更新,获得目的层平均速度 V ,可得出实钻井靶点预测深度为:

$$H = H_0 + \frac{T - T_0}{2} \times V \quad (1)$$

这种方法将地震与地质相结合,引入地震构造层面和目的层平均速度控制,比单纯井资料外推计算结果可靠性强。

第2种方法为井震结合校正地质模型的靶点深度。根据已钻井和正钻井的标志层实钻地质分层数据调整井速度与地震速度的误差趋势面,校正原始速度场,以求达到参与校正的井附近速度场是准确的目标。利用校正后的速度场将目的层顶面的时间域数据转换为深度域数据,用来作为井间约束地质模型生成新的构造模型,在更新的构造模型上直接读取靶点位置垂深,进而预测靶点深度。此方法适用于满足以下2个条件的井区:预测井周缘有足够多实钻参考井,参考井均有标准地质分层数据,该方法资料外推能力有限,预测靶点只能在参考井之间才能保证预测精度。

2.2.2 水平段倾角预测

一般水平井水平段的长度达几百米到上千米,难以保证整个水平段钻井轨迹都在油层中。水平段倾角的准确判断对于水平井调控预警非常重要。将钻井资料和地震资料结合,预测水平段的倾角变化趋势,指导实时调整钻头位置^[12-14]。

利用地震剖面预测水平段倾角 在过水平段的地震时间剖面上,按照一定的水平步长 L ,沿水平段目的层拾取地震双程旅行时间 $T_1, T_2, T_3, \dots, T_n$,提取目的层平均速度 V 。根据三角函数计算得到水平段倾角为:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{(T_n - T_{n-1}) \times V}{2L} \quad (2)$$

构造图法预测水平段倾角 根据实钻标志层深度更新速度场,时深转换地震层面约束构造模型,得到地震约束油层顶面构造图,它可以反映沿水平段方向地层倾角的变化。将实钻井轨迹实时投影至更新后的构造图上,根据目前钻头在油层顶面构造图上的投影点位置读出深度值 H_1 ,根据水平段方向与构造等值线的交点,得到下一个深度值 H_2 ,依次类推得到水平井段各点深度 $H_1, H_2, H_3, \dots, H_n$ 。通过测量钻头位置与下一根等值线的水平距离,根据三角函数计算可得出水平段倾角为:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{H_n - H_{n-1}}{L} \quad (3)$$

第1种方法适用于井区外围、缺少控制井的情况,第2种方法适合井网密集、井控程度较高区域。2种方法结合,对水平段倾角进行预测,最大限度降低误差。

2.3 水平井出层风险预警

水平井出层的预警判断至关重要,关系到后续跟踪调整的正确与否^[15-16]。在出层后马上进行预警判断调整,能够减少水平段浪费和调整的难度^[17-18]。

研究区油层电阻率主要为30~60 Ω·m,对于不同的韵律,在顶切、底切油层时,电阻率均有不同的响应特征。根据砂泥岩韵律变化和随钻曲线特征分析,判断水平段顶出还是底出。在井震结合预测的井间砂泥岩韵律变化(图2)的基础上,根据随钻电阻率指示的韵律变化判断水平井轨迹与油层的

关系(图3):对于下砾上泥的正韵律地层,底部电阻率较高,在顶切时电阻率下降,顶出后电阻率呈低值渐变特征;底切时电阻率上升,底出后电阻率立刻下降,呈突变特征。对于下泥上砾的反韵律地层,顶部电阻率较高,顶切时电阻率上升,顶出后电阻率立刻下降,呈突变特征;底切时电阻率下降,底出后电阻率呈渐变特征。对于整个层段发育砂砾岩的均质韵律地层,无论顶切、底切,电阻率均未发生明显变化,而这种情况在实际钻井过程中很少。

如果随钻电阻率偏离油层平均值较大,根据反演井轨迹方向韵律识别结果,及时进行顶出、底出判断,预警调整好合理角度,确保水平井在目标油层中正常钻进^[19-21]。预警调整方法为:①当钻进位置位于正韵律区,电阻率下降反映顶切,有顶出的风险,需要进行预警并采取降斜措施。②当钻进位置位于反韵律区,电阻率下降较快,有底出的风险,

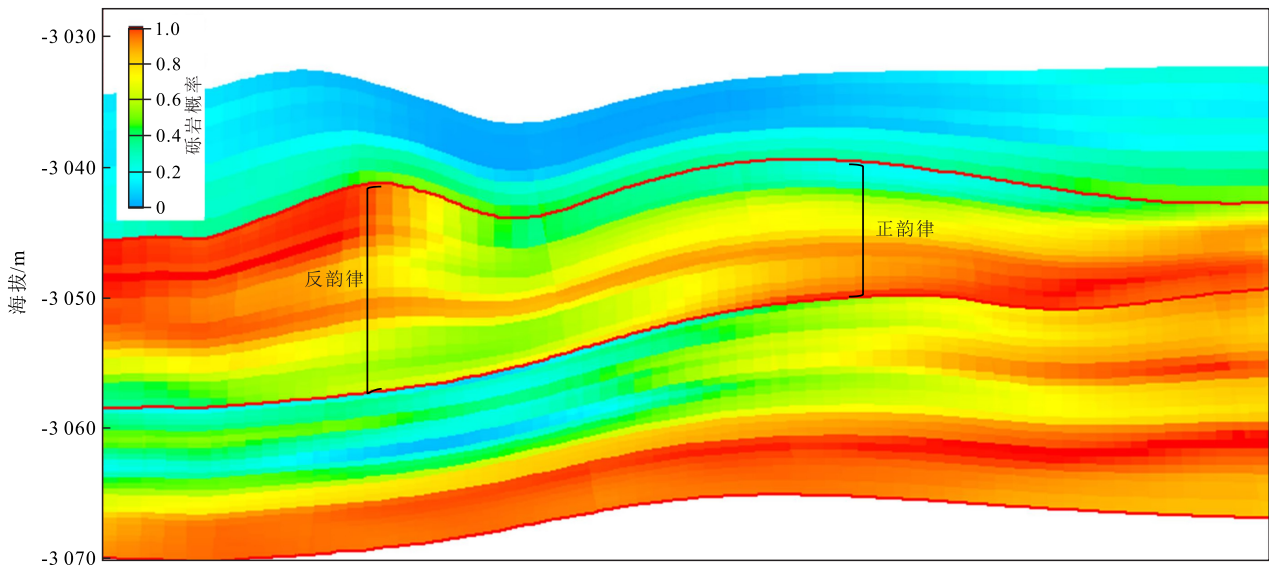


图2 井震结合井间岩性韵律发育情况预测

Fig.2 Prediction of interwell lithological rhythms by well-log and seismic data integration

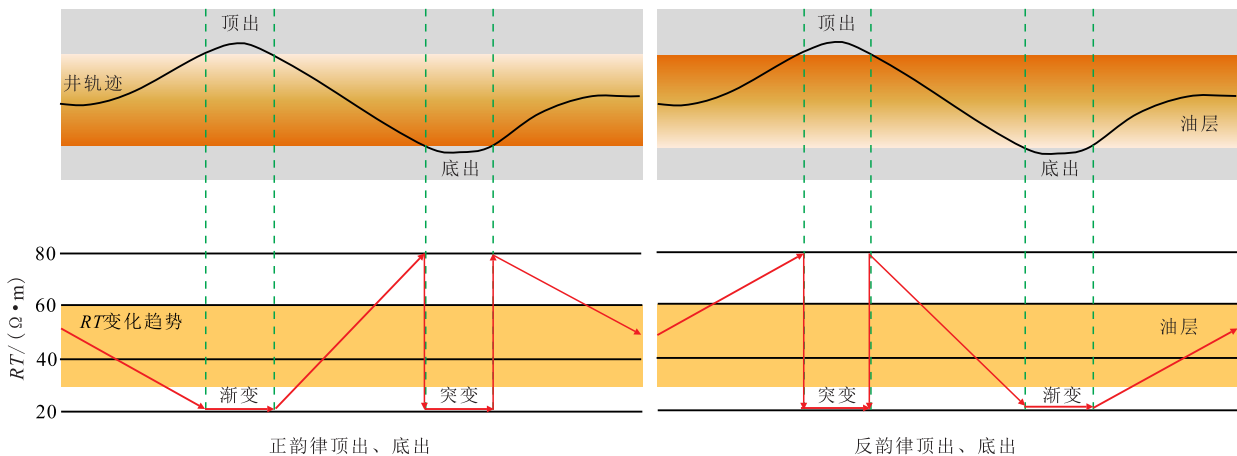


图3 电阻率指示韵律变化特征分析

Fig.3 Analysis of rhythm variations from resistivity indication

需要进行预警并采取增斜措施。

3 应用效果分析

基于反演多参数体约束地质建模的水平井预警技术目前主要在玛2井区规模推广应用,为致密砂砾岩油藏水平井开发、现场跟踪调控、提升油层钻遇率提供了有效支撑。

以 MaHW2008 井为例,该井位于已开发区外围,周围缺少控制井。针对该井开展了井震结合微构造精细刻画,根据预警标志层实钻深度进行了局部构造、模型更新和井轨迹调整,提前预警参数变化。标志层处设计垂深为 3 035 m,目前钻遇深度为

3 038 m。对速度场和构造进行局部更新后,预测该标志层距离 A 靶点垂直深度为 10.5 m,预测 A 靶点深度为 3 048.5 m,实钻深度为 3 049.2 m,有效降低了误差,使该井成功入靶。

当钻至 3 942 m 时电阻率突然下降到 20 Ω·m,电阻率偏离主油层(30~60 Ω·m)幅度较大。结合当前钻头位置和沿井轨迹方向的地层韵律特征(图 4)分析,地震反演显示该处底部砾岩发育,向上渐变为泥岩,为正韵律特征,电阻率渐变下降反映顶切特征(图 5),预警有顶出的风险,建议采取降斜措施。

当钻至 4 240 m 处电阻率下降较快,地震反演显示该处上部砾岩较发育,向下岩性向泥质渐变,

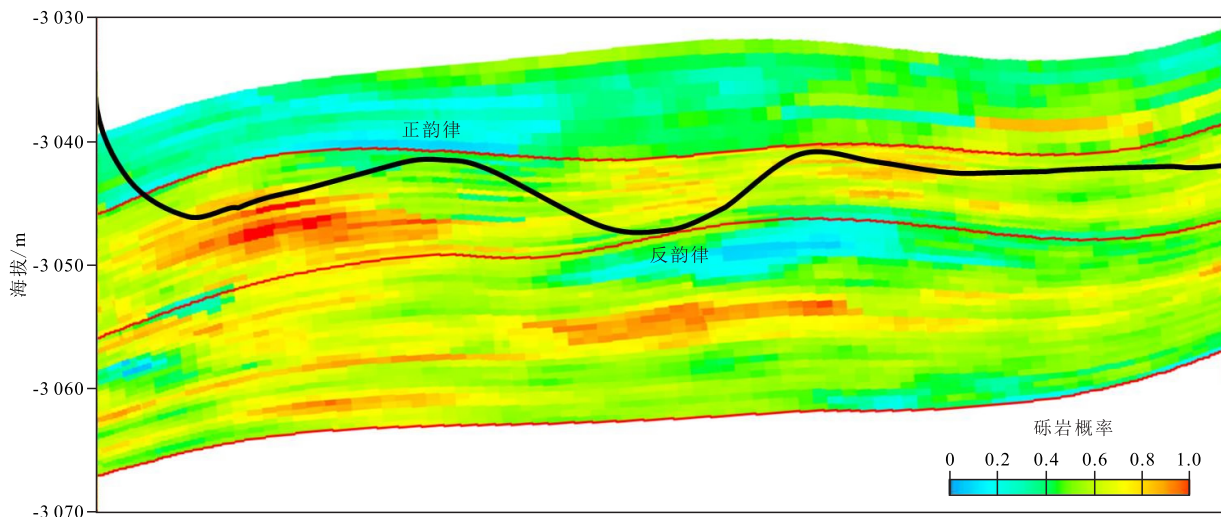


图4 MaHW2008井沿井轨迹方向岩性韵律情况预测

Fig.4 Prediction of lithological rhythms along trajectory of Well MaHW2008

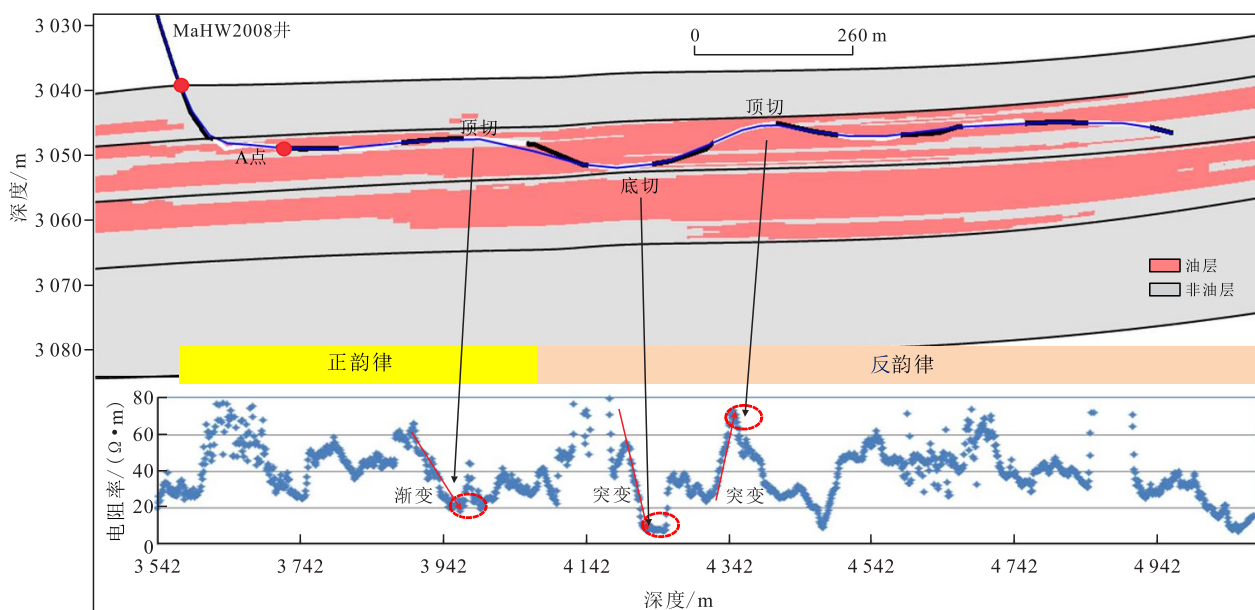


图5 MaHW2008井岩性韵律结合随钻曲线判断出层情况

Fig.5 Determination of drill-out based on lithological rhythms and resistivity curves while drilling in Well MaHW2008

为反韵律特征,认为当前钻进位置位于反韵律区,预警有底出的风险,建议采取增斜措施。

经过3轮次调整使井轨迹回到目的层,该井实钻水平段长度为1 545 m,钻遇油层长度为1 406 m,油层钻遇率为91%。

2019—2020年对玛2井区60余口水平井进行了210次预警调整,平均指令调整次数为3.5次。2019年玛2井区部署实施63口水平井,平均钻遇率达95.9%,与2018年相比,油层钻遇率提高了7.4%。由于轨迹预测准确程度提高,避免了频繁出层、入层的调整,钻井周期由2018年的80.9 d缩短为73.9 d,缩短了8.7%,工作效率得到了较大提高。

4 结论

运用叠前地震反演得到多种参数体,多参数体融合约束地质模型,使储层预测更加合理,有效提高优质储层的识别能力。利用叠前地质统计学反演结合地质、测井资料,可以实现对沿水平井轨迹方向岩性韵律发育情况的合理判断,结合随钻电阻率变化特点,对水平井进行出层风险预警,保证水平井轨迹在储层中顺利穿行。当钻进位置位于正韵律区,电阻率下降反映顶切,有顶出的风险,需要进行预警并采取降斜措施;当钻进位置位于反韵律区,电阻率下降较快,有底出的风险,需要进行预警并采取增斜措施。玛湖地区应用效果表明,基于反演多参数体约束地质建模的水平井预警技术可有效提高油层钻遇率、缩短钻井周期。

符号解释

- H ——靶点预测深度, m;
 H_0 ——标志层实钻深度, m;
 H_n ——沿水平段第 n 个拾取点在构造图上的深度, m;
 L ——水平段相邻2个拾取点之间的步长, m;
 T ——靶点双程旅行时间, s;
 T_0 ——标志层实钻点对应的地震双程旅行时间, s;
 T_n ——沿水平段第 n 个拾取点的地震双程旅行时间, s;
 V ——目的层平均速度, m/s;
 θ ——水平段倾角, ($^\circ$)。

参考文献

- [1] 李国欣,覃建华,鲜成钢,等.致密砾岩油田高效开发理论认识、关键技术与实践——以准噶尔盆地玛湖油田为例[J].石油勘探与开发,2020,47(6):1 185-1 197.
 LI Guoxin, QIN Jianhua, XIAN Chenggang, et al. Theoretical understandings, key technologies and practices of tight conglomerate oilfield efficient development: A case study of the Mahu oilfield, Junggar Basin, NW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2020, 47(6): 1 185-1 197.
- [2] 刘涛,石善志,郑子君,等.地质工程一体化在玛湖凹陷致密砂砾岩水平井开发中的实践[J].中国石油勘探,2018,23(2):90-103.
 LIU Tao, SHI Shanzhi, ZHENG Zijun, et al. Application of geology-engineering integration for developing tight oil in glutenite reservoir by horizontal wells in Mahu sag [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 90-103.
- [3] 李一超,王志战,秦黎明,等.水平井地质导向录井关键技术[J].石油勘探与开发,2012,39(5):620-625.
 LI Yichao, WANG Zhizhan, QIN Liming, et al. Key surface logging technologies in of horizontal geosteering drilling [J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(5): 620-625.
- [4] 张德军.页岩气水平井地质导向钻井技术及其应用[J].钻采工艺,2015,40(4):7-10
 ZHANG Dejun. Geo-steering drilling technology and its application in shale gas horizontal well [J]. Drilling & Production Technology, 2015, 40(4): 7-10.
- [5] 朱晓雨.涪陵页岩气田水平井轨迹调整方法[J].江汉石油职工大学学报,2019,32(3):22-24.
 ZHU Xiaoyu. The method to adjust horizontal wells trajectory in Fuling shale gasfield [J]. Journal of Jiangnan Petroleum University of Staff and Workers, 2019, 32(3): 22-24.
- [6] 杜洪凌,许江文,李响,等.新疆油田致密砂砾岩油藏效益开发的发展与深化——地质工程一体化在玛湖地区的实践与思考[J].中国石油勘探,2018,23(2):15-26.
 DU Hongling, XU Jiangwen, LI Xun, et al. Development and deepening of profitable development of tight glutenite oil reservoirs in Xinjiang oilfield: application of geology-engineering integration in Mahu area and its enlightenment [J]. China Petroleum Exploration, 2018, 23(2): 15-26.
- [7] 高世臣,张丹.多参数概率融合法在叠前地震储层预测中的应用——以苏里格气田苏194区块为例[J].油气地质与采收率,2015,22(6):61-67.
 GAO Shichen, ZHANG Dan. Application of multi-parameter probability fusion method to pre-stack seismic reservoir prediction: A case study of Su194 block in Sulige gas field [J]. Petroleum Geology and Recovery Efficiency, 2015, 22(6): 61-67.
- [8] 许国民,王卫东,高忠敏,等.水平井技术在老区剩余油挖潜中的应用[J].特种油气藏,2007,14(6):80-82.
 XU Guomin, WANG Weidong, GAO Zhongmin, et al. Application of horizontal well technology to produce residual oil [J]. Special Oil & Gas Reservoirs, 2007, 14(6): 80-82.
- [9] 李艳明,陶林本,李旭东.吐哈油田水平井随钻地质导向技术研究[J].吐哈油气,2007,12(4):337-340.
 LI Yanming, TAO Linben, LI Xudong. Studies on geology steering technology while drilling for horizontal well in Tuha basin [J]. Tuha Oil & Gas, 2007, 12(4): 337-340.
- [10] 杨彬,李琳艳,孔健,等.随钻地质建模技术在水平井地质导向中的应用[J].特种油气藏,2020,27(2):30-36.
 YANG Bin, LI Linyan, KONG Jian, et al. Application of geology

- modeling while drilling technology in horizontal well geo-steering [J]. *Special Oil & Gas Reservoirs*, 2020, 27(2): 30-36.
- [11] 朱斗星, 蒋立伟, 牛卫涛, 等. 页岩气地震地质工程一体化技术的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2018, 53(增刊1): 249-255.
ZHU Douxing, JIANG Liwei, NIU Weitao, et al. Seismic and geological integration applied in the shale gas exploration [J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2018, 53(Supplement1): 249-255.
- [12] 赵继勇, 何永宏, 樊建明, 等. 超低渗透致密油藏水平井井网优化技术研究[J]. *西南石油大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(2): 91-98.
ZHAO Jiyong, HE Yonghong, FAN Jianming, et al. Optimization technology for horizontal well pattern in ultra-low permeable tight reservoirs [J]. *Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition*, 2014, 36(2): 91-98.
- [13] 赵静. 吉林油田低渗油藏水平井开发技术[J]. *石油勘探与开发*, 2011, 38(5): 594-599.
ZHAO Jing. Development techniques of horizontal wells in low permeability reservoirs, Jilin Oilfield [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2011, 38(5): 594-599.
- [14] 孙卫锋, 张吉, 马志欣, 等. 里格气田水平井随钻地质导向技术及应用[J]. *岩性油气藏*, 2015, 27(6): 132-137.
SUN Weifeng, ZHANG Ji, MA Zhixin, et al. Geosteering technology of horizontal well and its application in Sulige Gas Field [J]. *Lithologic Reservoirs*, 2015, 27(6): 132-137.
- [15] 纳什 苏珊 史密斯. 国际石油公司页岩气开发技术策略分析与展望[J]. *石油钻探技术*, 2014, 42(5): 1-8.
NASH Susan Smith. An analysis and outlook of technology strategy for shale plays: independents vs. majors [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2014, 42(5): 1-8.
- [16] 孙坤忠, 刘江涛, 王卫, 等. 川东南JA侧钻水平井地质导向技术[J]. *石油钻探技术*, 2015, 43(4): 138-142.
SUN Kunzhong, LIU Jiangtao, WANG Wei, et al. Geosteering drilling techniques of horizontal sidetracking well JA, Southeast Sichuan [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(4): 138-142.
- [17] 狄富春, 吕建云, 赵立文, 等. 提高薄油层水平井油层钻遇率的技术研究[J]. *石油钻探技术*, 2008, 36(2): 25-27.
DI Fuchun, LÜ Jianyun, ZHAO Liwen, et al. Research on increasing horizontal well drilling footage in thin reservoir [J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2008, 36(2): 25-27.
- [18] 窦松江, 赵平起. 水平井随钻地质导向方法的研究与应用[J]. *海洋石油*, 2009, 29(4): 77-82.
DOU Songjiang, ZHAO Pingqi. The research and application of horizontal well geosteering method [J]. *Offshore Oil*, 2009, 29(4): 77-82.
- [19] 高晓飞, 闫正和, 曾显磊. 新型地质导向技术在薄层油藏中的应用[J]. *石油天然气学报*, 2010, 32(5): 214-218, 409.
GAO Xiaofei, YAN Zhenghe, ZENG Xianlei. Application of new geosteering technology in thin reservoirs [J]. *Journal of Oil & Gas Technology*, 2010, 32(5): 214-218, 409.
- [20] 刘敬尧, 李锐. 水平井分级逐层精准地质定向技术在薄层中的应用[J]. *江汉石油职工大学学报*, 2015, 28(5): 9-11.
LIU Jingyao, LI Rui. Application of horizontal well layer-by-layer geological direction technology in thin layers [J]. *Journal of Jianghan Petroleum University of Staff and Workers*, 2015, 28(5): 9-11.
- [21] 王谦, 苏波, 李震, 等. 随钻地质导向在S7-59H井中的应用[J]. *断块油气田*, 2016, 23(2): 252-257.
WANG Qian, SU Bo, LI Zhen, et al. Application of LWD geosteering in S7-59H well [J]. *Fault-Block Oil and Gas Field*, 2016, 23(2): 252-257.

编辑 经雅丽