

◀测井录井▶

doi:10.11911/syztjs.2020135

引用格式: 陆自清. 基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(1): 113-120.

LU Ziqing. Geosteering methods of a dynamic geological model based on Kalman filter [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2021, 49(1): 113-120.

基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法

陆自清^{1,2}

(1. 煤炭科学研究总院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西西安 710054)

摘 要: 针对现有三维地质导向技术被动调整导向较多, 利用随钻信息进行预判功能不强的问题, 提出了基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法。该方法利用区域地质、测井资料建立包含当前构造与属性认识的初始地质模型; 基于卡尔曼滤波方法, 对随钻测量和随钻测井数据进行处理, 形成靶区目标地层的多个模拟结果; 提取与随钻数据匹配程度最高的模拟结果, 计算靶区地层真厚度、地层倾角; 将其输入初始地质模型中, 更新模型构造和地质属性, 并在最新地质模型的控制下及时优化导向钻进策略。鄂尔多斯盆地 YP 油田 YP1 井采用该方法进行了导向钻进, 根据随钻测量和测井数据及时调整井眼轨迹, 使该井 1 901.00 m 长水平段的优质储层钻遇率达到 92.1%。研究和应用结果表明, 基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法可利用随钻信息预判钻遇地层, 主动调整导向策略, 使井眼沿优质储层穿行。

关键词: 地质模型; 水平井; 随钻测井; 卡尔曼滤波; 地质导向; 鄂尔多斯盆地

中图分类号: TE243⁺.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2021)01-0113-08

Geosteering Methods of a Dynamic Geological Model Based on Kalman Filter

LU Ziqing^{1,2}

(1. China Coal Research Institute, Beijing, 100013, China; 2. CCTEG Xi'an Research Institute, Xi'an, Shaanxi, 710054, China)

Abstract: Due to the fact that existing 3D geosteering technology requires passive adjustment, and it has poor predictive qualities with the information while drilling, the author proposed a geosteering method using the dynamic geological models based on a Kalman filter (EnKF). In doing so, the researcher established an initial geological model including the current structure and attribute understanding based on the regional geological and logging data. The data for measurement while drilling (MWD) and logging while drilling (LWD) were processed using the EnKF method to yield many simulation results for the formation in the target area. Best-fit simulation results containing the best matching with the data while drilling were extracted to calculate the true thickness and dip angle of the formation in the target area. These results were input to the initial geological model to update the model structure and geological attributes. The goal was to optimize the geosteering drilling strategies under the control of the latest geological model. This method for geosteering drilling was used in the Well YP1 of the YP Oilfield in the Ordos Basin. The borehole trajectories were adjusted in time according to the MWD and LWD data, so as to get the drilling rate of high-quality reservoirs up to 92.1% in the 1901m long horizontal section of the well. The research and application results showed that the geosteering method incorporating dynamic geological models based on EnKF can use the information while drilling to pre-assess the drilled formation and actively adjust the geosteering strategy, maintaining the borehole travel in the zone of high-quality reservoirs.

Key words: geological model; horizontal well; logging while drilling; Kalman filter; geosteering; Ordos Basin

国内的非常规油气藏大部分资源禀赋差, 源岩 与储层紧邻或源储一体, 钻探、开发对地质导向的

收稿日期: 2020-06-11; 改回日期: 2020-12-04。

作者简介: 陆自清 (1984—), 男, 湖北黄冈人, 2008 年毕业于西北大学物理学专业, 2014 年获西安科技大学地球探测与信息技术专业硕士学位, 在读博士研究生, 主要从事地球物理勘探与工程应用研究。E-mail: luziqing@cctegxian.com。

基金项目: 中国煤炭科工集团有限公司科研项目“矿井水文地质异常构造三维精细建模及水害辅助评价研究”(编号: 2018-TD-MS072)、国家重点研发计划项目“井下随掘巷道动态超前探测技术与装备”(编号: 2018YFC0807804)和天地科技股份有限公司科技创新创业资金专项项目(编号: 2019-TD-ZD003, 2020-TD-ZD002)联合资助。

要求极高,需要水平井的水平段持续钻遇优良储层,以及储层经过大规模压裂改造才可能实现商业开发^[1]。广义的地质导向技术分为2部分,一为钻探装备与工艺,二为以地质物探为基础的地质保障技术。目前,钻探装备、钻井工艺通过引进吸收、自主研发取得了长足的发展,但与之配套的地质物探技术存在勘探成果精度有限、时效性不足的问题,无法满足复杂多样地质条件下,实施高精度水平井钻探的需求^[2-4]。为解决该问题,专家学者们提出了三维地质模型导向技术,该技术融合勘探对地质的认识和随钻测量、测井资料,建立井区高精度地质模型,多角度分析地质状况,与钻井工况结合提供导向钻进建议^[5-8]。王卫等人^[9]将地震和测井信息联合反演结果导入地质模型,形成了井震联合地质导向技术,提高了导向精度;高浩峰等人^[10]采用最近邻算法建立了高精度三维地质模型,提高了优质储层的钻遇率;周明晖等人^[11]以综合精细油藏描述为基础建立了较为精细的油藏地质模型,提高了三维地质模型的精度;吴宗国、文鑫等人^[12-15]利用随钻测井资料对油藏进行实时跟踪,反复检验和完善地质模型,总结了三维地质导向的应用现状,指出以水平井随钻信息为基准的动态地质模型能够为导向钻进提供前瞻性指引,是降本增效的有效途径。概括来说,采用三维地质模型进行地质导向,首先利用全区已知地质资料建立三维地质模型,然后使用随钻测量与测井信息对模型进行实时局部重构与更新,精细刻画水平井作业区域三维空间的构造、储层等关键信息,评估当前靶向目标的地层真厚度、倾向变化,预测钻头前方地层岩性的变化,最终在导向决策地质模型所得结果基础上,综合评估钻井导向情况和工程约束条件,实施地质导向作业,主动调整水平段的井眼轨迹,确保水平段在最佳地质目标中穿行。

三维地质导向技术虽然取得了较大的进展,但其核心是模型的重构,而模型重构大多是单调重复,被动调整导向较多,利用随钻信息进行预判的功能不强,对核心更新机制的研究相对欠缺。集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filter, EnKF)是一种高效自回归滤波器,广泛应用于众多学科(包括同时定位与地图构建技术、气象、水文、油气藏工程等方面^[16-25]),可以对存在不确定信息的动态系统做出有根据的预测。于是,笔者提出了基于卡尔曼滤波的动态地质模型导向方法,并以YP油田大位移水平井YP1井为例,验证了该方法的应用效果。

1 卡尔曼滤波地质导向方法

卡尔曼滤波地质导向方法的导向流程如图1所示。首先,利用已知地质资料建立初始三维地质模型,引入随钻测井数据后,使用随钻测量数据校正井眼轨迹,将井眼轨迹投影到模型中;然后,沿井眼轨迹提取曲线与校正后的实测曲线进行对比,当实测曲线与模拟曲线相似度低时,通过EnKF迭代循环,调整地层因子、转换倾角、改变厚度或增加断层等,修改地层模型,形成模型集,进行迭代优选,使模型正演模拟曲线与随钻测井曲线的相关性不断提高,当二者之差逐渐收敛,模型正演模拟曲线与随钻测井曲线相比达到设定的阈值后,选定当前模型作为模型重构的基准;最后,同化随钻测井信息,更新后得到导向决策地质模型。

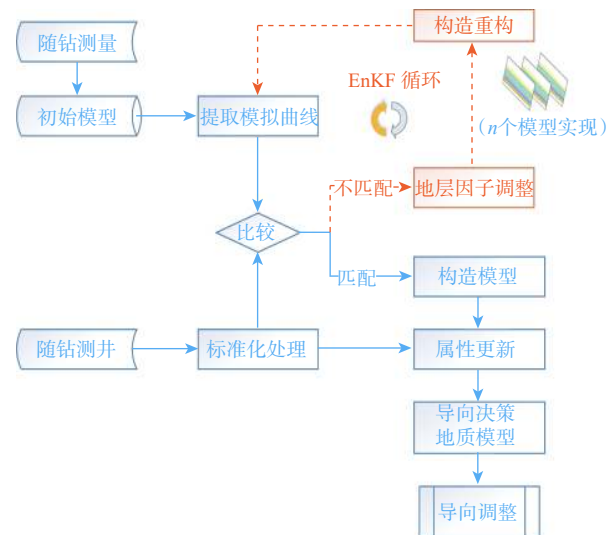


图1 卡尔曼滤波动态地质模型的导向流程

Fig.1 Geosteering flow of the dynamic geological model based on EnKF

1.1 构造模型重构

构造模型重构包括初始模型的建立,随钻测井数据的预处理,循环匹配及构造信息更新。

1.1.1 高精度初始地质模型

建立初始模型过程中,网格剖分精细程度决定着地质分辨率的上限,利用局部加密的方式提高特定区域的分辨率是平衡效率与精度的最佳选择,区域性模型水平向网格设置为20 m×20 m,井台区域水平向网格加密为5 m×5 m,纵向剖分按距离目的层的远近,设定为1-10 m不等,逐级渐变;网格剖分后,结合地震资料,做好小层对比,搭建模型骨架;通过区域性

试验, 提高模型的纵向和横向分辨率, 使用不参与建模的盲井测试, 确定建模过程中的最佳参数。通过上述步骤, 基于序贯高斯模拟方法, 使用区域的软、硬数据, 完成初始模型的建立与二维、三维显示。

1.1.2 随钻测井数据预处理

由于设备与施工条件不同, 井场通过 WITSML 标准实时传输的随钻测井数据并不能直接使用, 即使测井原理相同, 但对同一个地层, 随钻测井曲线响应与常规测井响应之间仍存在一定差异, 需要对随钻测井曲线进行标准化处理, 使其与地质建模中对应的测井曲线统一。常用的方法是选取标准泥岩段, 利用频率直方图法或均值校正法计算随钻测井曲线的校正系数, 构建随钻测井曲线校正模板, 将随钻测井曲线快速标准化, 使同类随钻测井曲线与常规测井响应匹配, 统一基准。

1.1.3 循环匹配及构造信息更新

G.Burgers 等人^[16]提出的 EnKF 是传统卡尔曼滤波器的蒙特卡罗实现, 也是一个无导数的估计与反演算法, 与常规反演不同, 求解梯度函数不需要复杂的反演过程。由于其实现相对简单, 计算成本相对合理, 性能也可靠^[25-29]。预测模型与随钻测井数据的循环匹配等效于预测模型与随钻测井数据的同化过程, EnKF 方法通过周期循环过程实现数据同化, 每一个同化周期都包括 2 个步骤, 即分析和预测。图 2 所示为 EnKF 循环过程, 从每一个周期开始, 都有一个前置初始模型集合, 该集合是由上一个同化周期的初始化或通过分析得出的, 将这一系列前置地质模型的集合称之为预测集合。使用 EnKF 方法实现随钻测井的同化, 多次迭代形成多个后续模型, 并将得到的模型集称之为分析集合。优选分析集合后, 再进行下一个同化周期的预测流程, 使分析集合通过过渡方程及时得到更新。简化静态过渡方程中, 前一个同化周期中优选的后续模型为下一个周期的初始模型。

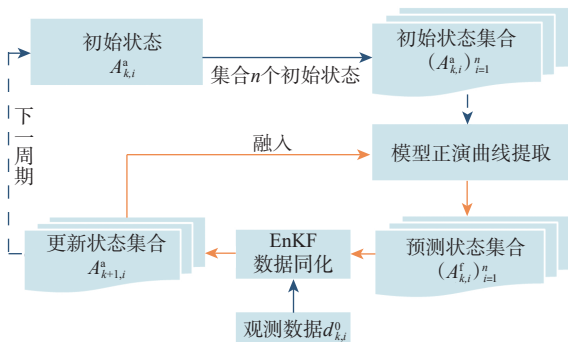


图 2 EnKF 循环过程

Fig.2 EnKF cycle process

导向过程研究的对象是空间位置及其属性值, 随钻测井则是该属性在空间中的实时观测, 设 A 为属性值与空间值的矩阵, $(A_{k,i}^f)_{i=1}^n$ 为第 k 次同化预测集, 其中 f 代表预测过程, i 为模型标记序号, n 为预测集总数。定义 d_k^0 为当前第 k 次同化循环的 LWD 数据, 数集 $d_{k,i}^0 (i=1, 2, \dots, n)$ 为 LWD 数据处理的结果, 满足高斯分布 $N(d_k^0, C_d)$ 。 d_k^0 为 LWD 数据集的数学期望值, C_d 为协方差。在实际应用中, 因为大多数地质数据是非高斯分布的, 要求标准化后的 LWD 数据具备正态分布特征, 需将其进行高斯分布转化, 若随钻测井数据级差较大 (例如随钻电阻率测井), 在转换前还须进行对数转换, 以降低数据变量分布范围和变化程度, 加快收敛速度。

预测过程到分析过程的循环方程式为:

$$A_{k,i}^a = A_{k,i}^f + G_k [d_{k,i}^0 - F_k(A_{k,i}^f)] \quad (1)$$

式中: $A_{k,i}^a$ 为分析集合; a 代表分析过程; F_k 为正演模拟得到的数据集; G_k 为卡尔曼增益矩阵。

$$G_k = S_k^f S_k^d [S_k^d (S_k^d)^T + C_d]^{-1} \quad (2)$$

其中

$$S_k^f = \frac{1}{\sqrt{n-1}} [A_{k,1}^f - \bar{A}_k^f, \dots, A_{k,n}^f - \bar{A}_k^f] \quad (3)$$

$$\bar{A}_k^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n A_{k,i}^f \quad (4)$$

$$S_k^d = \frac{1}{\sqrt{n-1}} [F_k(A_{k,1}^f) - \bar{d}_k^f, \dots, F_k(A_{k,n}^f) - \bar{d}_k^f] \quad (5)$$

$$\bar{d}_k^f = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n F_k(A_{k,i}^f) \quad (6)$$

S_k^f 为预测集合的协方差矩阵的均方根矩阵:

$$S_k^f = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (A_{k,i}^f - \bar{A}_k^f)(A_{k,i}^f - \bar{A}_k^f)^T \quad (7)$$

式中: S_k^d 为正演模拟数据 $F_k(A_{k,i}^f)$ 协方差矩阵的均方差矩阵; \bar{A}_k^f 与 \bar{d}_k^f 分别为第 k 次循环时预测集合与分析集合的数学期望。

在循环迭代过程中, 预测集合是下一个同化循环的分析集合, 简写为:

$$A_{k+1,i}^f = A_{k,i}^a \quad (8)$$

EnKF 处理规模较大的全局数据同化问题时, 为了提高效率, 会减小预测集合总数 n , 这种情况可能会导致样本协方差被低估的问题, 2 个变量的相关性也可能会偏大, 因此需要采用局部网格点距离控制或者方差膨胀约束方法, 以避免产生这种问题。

为使数值化的地层模型满足 EnKF 计算的要求, 设定地层界面由沿着界面的一系列离散点构成, 通常来说, 这一系列的标志点间隔即是初始模型网格的步长。对 EnKF 获得的模型集, 设置目标相关函数 $R_k (i=1, 2, \dots, n)$ 进行检验, 在已钻井井眼轨迹空间中, 计算第 k 个模型实现的正演模拟曲线与 LWD 数据的相关系数, 当 R_k 达到 n 个模型实现中的最佳匹配阈值后, 选取当前模型作为模型重构的基准。

模型优选如图 3 所示, EnKF 循环获得多个地质模型, 假设第 3 个模型的相关性最好, 以其作为模型重构的基准, 从导向模型中返回各地层界面标志点的深度。对于新的地层界面标志点, 采用离散点拟合曲面方程的形式。

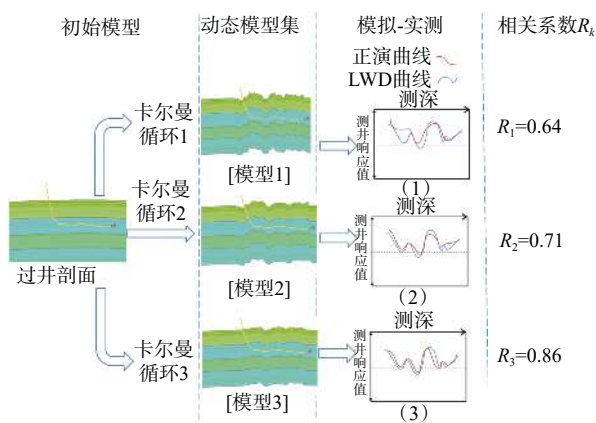


图 3 基于目标模拟与实测间相关系数的模型优选
Fig.3 Model optimization based on the correlation coefficient of target simulation and measurements

最小二乘法拟合地层界面的曲面方程式为:

$$z = f^{H_1}(x, y) \quad (9)$$

式中: f^{H_1} 为当前 H_1 层界面对应的曲面函数, 限定为凸函数, 非封闭。在钻井过程中, 随着不同时刻随钻测井曲线的导入, 使用 EnKF 方法获得新的地层参数后, 地层界面函数 f 亦随之变化。

1.2 地质导向决策

陆相地层分布不稳定, 相变、厚度变化快, 不确定因素多, 导致水平井的井眼轨迹复杂化, 水平井的井眼轨迹不再局限在二维平面内, 而是三维展布, 井眼轨迹越来越难控制。三维动态模型能够给水平井导向提供较为全面的空间信息, 包括定量计算当前的地层真厚度、地层倾角变化, 预测钻头前方地层的属性特征, 综合导向模型及诸如工程约束 (狗腿度)、地层压力、储层类型 (边底水) 等工程地质条件得出最优导向决策。

1.2.1 地层真厚度的求取

地层对比是地质导向的基础, 在造斜、稳斜、入窗、着陆等所有的钻井关键节点, 都必须明确当前钻头所处的地层。在水平段钻进过程中, 导眼井与水平井目标层位地层真厚度 h_r 的对比是控制井眼轨迹的关键要素之一。目前常用的真厚度计算方法如图 4 所示^[30], 其中 θ 为地层倾角, 真垂深厚度 h_n 可由平面坐标 (x_0, y_0) 求得, 对于顶底界面近似平行的地层, 这种方法快速有效。

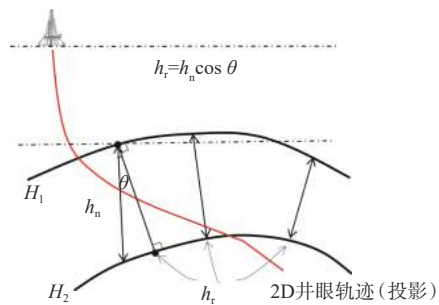


图 4 二维地层真厚度示意
Fig.4 Schematic of the true thickness of 2D formation

h_n 的计算公式为:

$$h_n = f^{H_1}(x_0, y_0) - f^{H_2}(x_0, y_0) \quad (10)$$

式中: h_n 为真垂深厚度, $m; f$ 为曲面对应的函数。

真实三维空间顶底板界面往往是复杂多变的, 如图 5 所示, 井眼轨迹在 H_1 与 H_2 曲面之间的地层钻进时, 显然将钻头位置处的地层真厚度分为 2 部分计算更符合实际情况, 令 $h_r^{H_1}$ 和 $h_r^{H_2}$ 分别代表当前点 (x_0, y_0) 到截交线 L_1 和 L_2 的距离, 则地层真厚度 $h_r = h_r^{H_1} + h_r^{H_2}$ 。

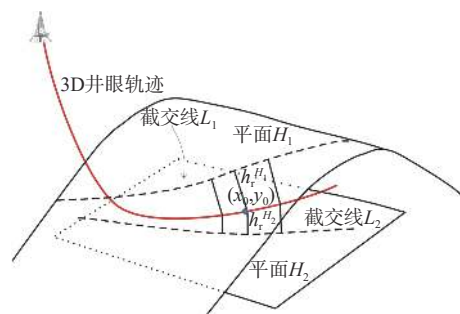


图 5 三维地层真厚度示意
Fig.5 Schematic of the true thickness of 3D formation

如图 5 所示, 设 $h_r^{H_1}$ 为点 (x_0, y_0) 到法平面与平面 H_1 的截交线 L_1 的距离。

$$\begin{cases} y - x \arctan \varphi + C = 0 \\ z - f^{H_1}(x, y) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中, φ 为随钻测量的方位角, ($^{\circ}$)。

式(11)是求取法平面与平面 H_1 截交线 L_1 的方程组, 代入 (x_0, y_0) 后可得到常数 C 。解方程组后, 可求点 (x_0, y_0) 到 L_1 线的距离 $h_r^{H_1}$, 同理可得到法平面与平面 H_2 截交线 L_2 的距离 $h_r^{H_2}$ 。至此, 完成了三维空间中地层真厚度的求取, 并且随着随钻测量信息的导入, EnKF 会循环更新曲面方程, 使地层真厚度不断得以更新与校正。

1.2.2 地层倾角变化

动态调整钻进策略才能保证井眼轨迹处于最佳目标层中。在关键靶点位置, 钻井人员希望得到定量的调整建议。通过分析模型更新前后的地层倾角变化, 确定调整角度。设 EnKF 重构模型前后的地层截交线分别为 L_1 和 L'_1 , 对应倾角为 α_1 和 α'_1 , 如图 6 所示。当 $\alpha'_1 - \alpha_1 > 0$ 时, 靶向上倾, 需增斜; 当 $\alpha'_1 - \alpha_1 < 0$ 时, 靶向下倾, 需降斜; 调整角度为倾角差值 $|\alpha'_1 - \alpha_1|$ 。

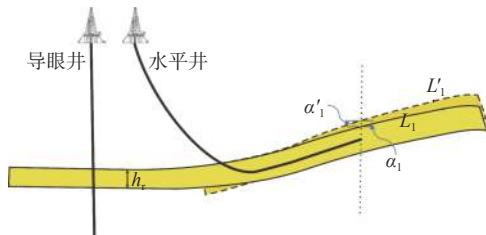


图 6 地层倾角变化

Fig.6 Change of dip angle

1.2.3 属性模型分析

将层位变化反馈到初始模型中, 更新构造模型, 然后在新构造模型约束下, 应用随钻测井数据和当前时刻的地质模型, 更新模型属性值。将构造重构、属性更新后的地质模型作为当前时刻的决策导向地质模型, 因其利用了最新的随钻信息, 能实时反馈钻遇地层的情况, 新的地质模型既反应了地层倾角的变化, 随钻测井曲线对应的属性又丰富了模型的已知信息, 使新模型的地质属性有一定的“超前”预判效果。

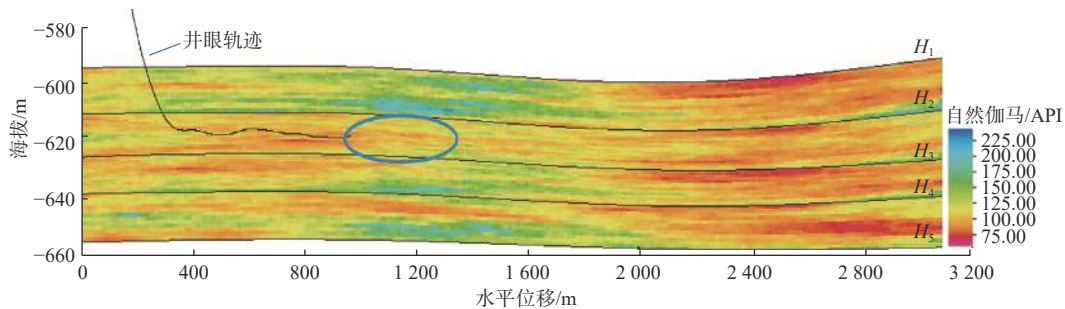


图 7 初始地质模型自然伽马属性剖面

Fig.7 GR attribute profile of the initial geological model

1.2.4 导向决策

总之, 地质导向决策过程是在地质特征和地质模型、施工条件约束下, 通过数据分析与可视化结果剖析当前工况和钻遇地层的情况, 调整靶向, 使井眼在最佳目标层中穿行; 当钻遇泥岩夹层或者褶皱、断层等不利地质情况时, 通过地质模型综合分析, 寻找最优拓扑路径, 制定绕障方案, 快速返回目标层。

2 应用实例

鄂尔多斯盆地 YP 油田的油藏为致密油藏, 主力储层是三叠系延长组, 砂岩分布特征纵向叠置严重, 横向非均质性强, 属于构造-岩性油藏。以 YP1 井为例介绍该导向方法的应用情况。YP1 井的目的层为长 7_1^2 层, 埋藏深度约 2 010.00 m, 水平段设计长度 2 000.00 m, 邻井录井和测井结果显示长 7_1^2 砂体靶窗约 4.00~6.00 m, 水平段应尽可能追踪长 7_1^2 砂体, 避免泥岩层无效进尺, 以免给后续分段压裂造成困难。前期研究成果表明, 自然伽马测井曲线与岩性的相关性较好, 在地质导向过程中选用自然伽马模型作为导向决策主属性模型。

2.1 导向过程

基于邻井资料建立初始地质模型, 提取过水平井伽马剖面(见图 7)构建井眼轨迹导向剖面(见图 8), 其中 H_1, \dots, H_5 代表 5 个地层分界面(对应长 7_1^1 、长 7_1^2 、长 7_2^1 、长 7_2^2 和长 7_2^2 层顶界面), 与网格的交点为地层标志点, 以初始模型为基础导出正演自然伽马测井曲线, 比较正演自然伽马测井曲线与随钻自然伽马测井曲线, 二者吻合度较差(见图 9), 说明初始模型与实钻不符, 亟需调整。当前钻头倾角为 91° , 钻遇岩性由砂岩转为砂质泥岩, 岩性变差。模型中钻头前方中上部自然伽马值较低, 地层起伏变化平缓, 结合邻井同一储层的海拔高度和走向, 保持钻头倾角, 以尽快钻遇中上部低自然伽马储层。

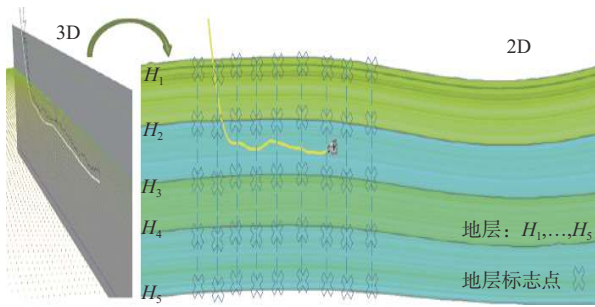


图 8 初始构造导向模型

Fig.8 Initial geosteering model

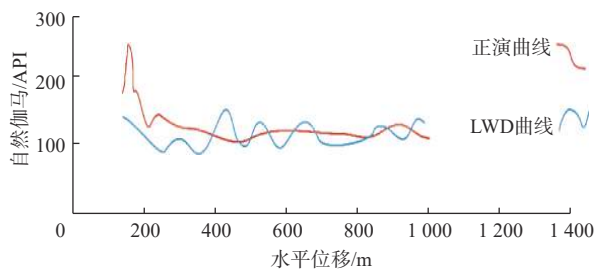


图 9 初始模型正演自然伽马测井曲线与随钻自然伽马测井曲线对比

Fig.9 Comparison of initial model forward GR logging curve and GR logging curve while drilling

利用随钻自然伽马曲线, 基于 EnKF 方法生成预测模型集, 在正演自然伽马测井曲线与随钻自然伽马测井曲线匹配程度最好的构造模型中提取 H_1, H_2, H_3, H_4, H_5 界面标志点的坐标高程, 输入到模型中, 构造亦随之重构。

构造重构后的地质模型, 正演自然伽马测井曲线与随钻自然伽马测井曲线的相关性得到了提高 (见图 10), 新的导向剖面 (见图 11) 突出了地层微

幅构造的变化, 显示钻头所处地层的下伏倾角较原始模型大, 自然伽马属性剖面 (见图 12) 显示钻头前方地层中下部自然伽马值略低, 钻头向下调整钻遇砂岩的可能性较高, 计算当前位置地层倾角变化的幅度后, 建议将钻进倾角减小 1° 钻至下一个靶点。随后的录井、测井结果证明, 依建议向下调整靶向后, 钻遇岩性由泥质砂岩迅速转变为砂岩, 地层构造倾向与导向地质模型基本相符, 油气显示良好。

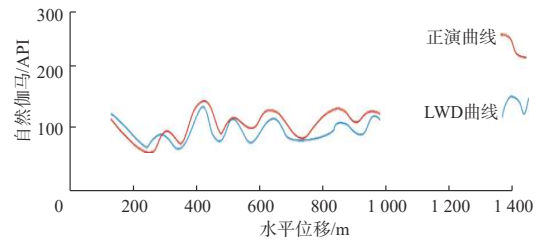


图 10 重构模型正演自然伽马测井曲线与随钻自然伽马测井曲线对比

Fig.10 Comparison of reconstructed model forward logging curve and GR logging curve while drilling

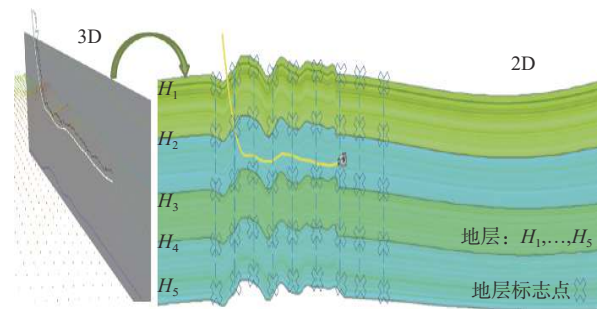


图 11 重构地层的地质导向剖面

Fig.11 Geosteering profile of the reconstructed formation

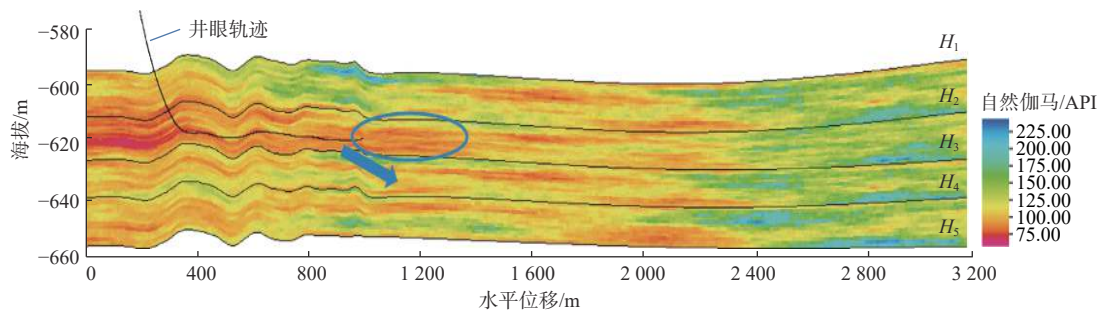


图 12 更新自然伽马属性剖面

Fig.12 Updated GR attribute profile

2.2 完井分析

完钻后, 扣除预留地质口袋, 水平段长 1 901.00 m, 初始模型水平段地层状况分析表明, 钻前地质分析对

地层微幅构造变化的认识并不充分, 初始模型剖面 (见图 7) 与完井地质剖面 (见图 12) 相比差异较大。应用本文建立的动态更新方法, 经过 10 次指定变更

靶向(见图 13, 其中“+”表示将增斜, “-”表示将降斜, 例如 -1° 表示在当前靶点位置调整策略为降斜 1° 钻进)。完井分析显示, YP1 井在钻进水平段过程中, 基本能够提前预判钻头前方的岩性, 防止靶点穿

层, 并避免泥岩隔夹层中的无效进尺。通过随钻伽马地质导向模型, 预测钻前地层倾角变化与实钻基本保持一致, 砂体钻遇率 92.1%, 与采用常规导向技术的其他钻井平台平均砂体钻遇率相比约提高 15%。

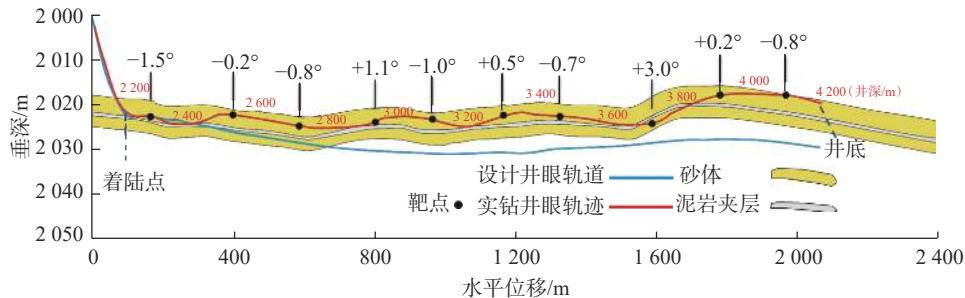


图 13 YP1 井水平段完井剖面

Fig.13 Completion profile of the horizontal section of Well YP1

3 结 论

1) 地质认识—三维建模—随钻驱动更新三步走的导向流程符合生产实际, 形成了地质认识与工程应用的良性循环, 实时上传的测井曲线驱动地质模型实时更新, 解析随钻测井数据中隐含的地质信息, 更新地质认识, 辅助地质导向, 满足井眼轨迹形态复杂的大位移水平段钻井需求, 能降低钻井风险。

2) 基于卡尔曼滤波方法的动态地质模型导向方法与常规随钻测量仪器、测井仪器配合即可, 不需要配备复杂的测量仪器、测井仪器, 适用范围广, 能有效降低钻井成本。

3) 非常规油气资源的井工厂开发模式需要精准地质模型的指导, 通过动态地质模型整合地质认识, 可为同平台水平井优化设计、地层预判、风险预警及井眼轨迹调整提供地质方面的依据。

参 考 文 献

References

- [1] 舒红林, 王利芝, 尹开贵, 等. 地质工程一体化实施过程中的页岩气藏地质建模 [J]. 中国石油勘探, 2020, 25(2): 84-95.
SHU Honglin, WANG Lizhi, YIN Kaigui, et al. Geological modeling of shale gas reservoir during the implementation process of geology-engineering integration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2020, 25(2): 84-95.
- [2] 李建忠, 郑民, 陈晓明, 等. 非常规油气内涵辨析, 源-储组合类型及中国非常规油气发展潜力 [J]. 石油学报, 2015, 36(5): 521-532.
LI Jianzhong, ZHENG Min, CHEN Xiaoming, et al. Connotation analyses source-reservoir assemblage types and development poten-

tial of unconventional hydrocarbon in China[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2015, 36(5): 521-532.

- [3] 鲜成钢, 张介辉, 陈欣, 等. 地质力学在地质工程一体化中的应用 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 75-88.
XIAN Chenggang, ZHANG Jiehui, CHEN Xin, et al. Application of geomechanics in geology-engineering integration[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(1): 75-88.
- [4] 苏义脑. 地质导向钻井技术概况及其在我国的研究进展 [J]. 石油勘探与开发, 2005, 32(1): 92-95.
SU Yinao. Geosteering drilling technology and its development in China[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2005, 32(1): 92-95.
- [5] 张绍槐. 现代导向钻井技术的新进展及发展方向 [J]. 石油学报, 2003, 24(3): 82-85.
ZHANG Shaohuai. New progress and development direction of modern steering drilling techniques[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2003, 24(3): 82-85.
- [6] 中国石油勘探与生产公司, 斯伦贝谢中国公司. 地质导向与旋转导向技术应用及发展 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2012.
PetroChina Exploration and Production Company, Schlumberger China Company. Application and development of geosteering and rotary steerable system technique[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2012.
- [7] 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.
GAO Xiaofei, YAN Zhenghe, ZENG Xianlei. Application of new geosteering technology in thin reservoirs[J]. *Journal of Oil and Gas Technology*, 2010, 32(5): 214-218.
- [8] 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 horizontal geosteering drilling[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2012, 39(5): 620-625.
- [9] 王卫, 王佳琦, 古茜. 井震联合构建三维地质导向模型关键技术研究 [J]. 录井工程, 2018, 29(2): 27-31.
WANG Wei, WANG Jiaqi, GU Qian. Study on key technologies of

- constructing 3D geosteering model by integrated analysis of well logging and seismic data[J]. *Mud Logging Engineering*, 2018, 29(2): 27–31.
- [10] 高浩锋, 成志刚, 万金彬, 等. 水平井高精度三维地质建模技术及应用 [J]. 测井技术, 2018, 42(1): 54–59.
GAO Haofeng, CHENG Zhigang, WAN Jinbin, et al. High precision three-dimensional geological model and its application in the interpretation of horizontal well[J]. *Well Logging Technology*, 2018, 42(1): 54–59.
- [11] 周明晖. 储层地质模型的建立及动态实时跟踪研究 [D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2009.
ZHOU Minghui. Study on reservoir geologic modeling and dynamic real-time tracking[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2009.
- [12] 吴宗国, 梁兴, 董健毅, 等. 三维地质导向在地质工程一体化实践中的应用 [J]. 中国石油勘探, 2017, 22(1): 89–98.
WU Zongguo, LIANG Xing, DONG Jianyi, et al. Application of 3D geosteering in geology-engineering integration practice[J]. *China Petroleum Exploration*, 2017, 22(1): 89–98.
- [13] 文鑫, 戴宗, 唐辉, 等. 珠江口盆地 XJ 油田薄油层水平井三维地质导向技术 [J]. 石油钻探技术, 2016, 44(6): 42–47.
WEN Xin, DAI Zong, TANG Hui, et al. Three-dimensional geosteering horizontal drilling technique in thin reservoirs in the XJ Oilfield, Pearl River Mouth Basin[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2016, 44(6): 42–47.
- [14] 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.
- [15] 陈颖杰, 刘阳, 徐婧源, 等. 页岩气地质工程一体化导向钻井技术 [J]. 石油钻探技术, 2015, 43(5): 56–62.
CHEN Yingjie, LIU Yang, XU Jingyuan, et al. Integrated steering drilling technology for geology engineering of shale gas[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2015, 43(5): 56–62.
- [16] BURGERS G, PETER J V L, EVENSEN G. Analysis scheme in the ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 1998, 126(6): 1719–1724.
- [17] KALMAN R E, BUCY R S. New results in linear filtering and prediction theory[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1961, 83(1): 95–108.
- [18] EVENSEN G. Data assimilation: the ensemble Kalman filter[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2009.
- [19] REICHLER H, MCLAUGHLIN D B, ENTEKHABI D. Hydrologic data assimilation with the ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2002, 130(1): 103–114.
- [20] XIA Chuan'an, HU B X, TONG Juxiu, et al. Data assimilation in density-dependent subsurface flows via localized iterative ensemble Kalman filter[J]. *Water Resources Research*, 2018, 54(9): 6259–6281.
- [21] GEIR N, JOHNSEN L M, ANONSEN S I, et al. Reservoir monitoring and continuous model updating using ensemble Kalman filter[R]. SPE 84372, 2003.
- [22] ANDERSON J L. An ensemble adjustment Kalman filter for data assimilation[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(12): 2884–2903.
- [23] CHEN Yan. Ensemble-based closed-loop production optimization[D]. Norman: The University of Oklahoma, 2008.
- [24] YU Hwa-Lung, KOLOVOS A, CHRISTAKOS G, et al. Interactive spatiotemporal modelling of health systems: the SEKS-GUI framework[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2007, 21(5): 555–572.
- [25] ALYAEV S, BRATVOLD R B, LUO Xiaodong, et al. An Interactive decision support system for geosteering operations[R]. SPE 191337, 2018.
- [26] SUTER E, CAYEUX E, FR I S H A, et al. A novel method for locally updating an earth model while geosteering[J]. *International Journal of Geosciences*, 2017, 8(2): 237–264.
- [27] HAMILL T M, WHITAKER J S, SNYDER C. Distance-dependent filtering of background error covariance estimates in an ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2001, 129(11): 2776–2790.
- [28] ANDERSON J L, ANDERSON S L. A Monte Carlo implementation of the nonlinear filtering problem to produce ensemble assimilations and forecasts[J]. *Monthly Weather Review*, 1999, 127(12): 2741–2758.
- [29] LUO Xiaodong, HOTEIT I. Robust ensemble filtering and its relation to covariance inflation in the ensemble Kalman filter[J]. *Monthly Weather Review*, 2011, 139(12): 3938–3953.
- [30] TEARPOCK D J, BISCHKE R E. Applied subsurface geological mapping with structural methods[M]. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 2002.

[编辑 刘文臣]