

水平井入窗井段井斜角计算方法研究

吴玉友

中石化西南油气分公司产能建设及勘探项目部, 四川 德阳

收稿日期: 2025年4月8日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年7月7日

摘要

水平井入窗是石油钻井施工过程中的重点, 由于地下地质体存在预测误差, 储层埋深、厚度、地层倾角均存在一定的不确定性, 并且着陆位置、造斜率、揭开储层顶的井斜角等对入窗效果有明显影响, 因此, 如何开展井斜角的优化是当前面临的难题之一。研究表明, 明确入窗阶段着陆位置、造斜率等关键参数的确定原则, 建立揭开储层顶所需要的井斜角迭代计算方法, 形成入窗阶段井斜角计算流程与方法, 能有效降低施工风险, 为水平井入窗的施工提供技术支持。

关键词

水平井, 着陆位置, 造斜率, 井斜角

Research on the Calculation Method of Wellbore Inclination Angle in the Window Section of Horizontal Wells

Yuyou Wu

Capacity Construction and Exploration Project Department of Sinopec Southwest Oil and Gas Branch, Deyang Sichuan

Received: Apr. 8th, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jul. 7th, 2025

Abstract

Window entry is a key point in the construction process of horizontal wells. Due to the prediction errors of underground geological bodies, there are certain uncertainties in reservoir burial depth, thickness, and dip angle. In addition, the landing position, build-up rate, and wellbore inclination angle that reveal the top of the reservoir have a significant impact on the window entry effect. Therefore, how to optimize the wellbore inclination angle is one of the current challenges. Research

has shown that clarifying the principles for determining key parameters such as landing position and build-up rate during the window entry stage, establishing an iterative calculation method for well inclination angle required to uncover the reservoir top, and forming a calculation process and method for well inclination angle during the window entry stage can effectively reduce construction risks and provide technical support for horizontal well window entry construction.

Keywords

Horizontal Well, Landing Position, Build-Up Rate, Well Inclination Angle

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

石油钻井水平井钻井工艺能有效提高单井产量，因此得到了广泛的应用[1]。水平井施工过程中，入窗是关键环节之一，以合理态势入窗，不仅能确保靶前距合理，还能为后续施工奠定良好的基础，一直是研究的热点，并且在钻井轨迹方案设计、钻具组合优选等方面已经取得了较多技术成果，形成了多井段控制、软着陆轨迹控制等方法，在优化入窗轨迹方面取得了明显成效[2]-[5]。但是，这类研究的重点是确保工程施工能力能满足地质需求，以地质目标已经确定为前提，来设计出一条便于钻井施工的最优轨迹，由于物探预测精度有误差，导致地下地质体的实际特征与预测有差异，往往在施工过程中，在邻近入窗井段需要大幅度变更轨迹，为钻井施工带来了难题[6]。针对上述问题，本文介绍了一种水平井入窗井段井斜角计算方法，为水平井的入窗提供可靠的依据。

2. 技术难点分析

2.1. 技术现状

为了确保水平井顺利施工，早期的研究重点是如何按给定的空间位置钻达目标点，刘修善等人研究了软着陆轨迹控制方法，将井身轨迹划分为“直线段-曲线段-曲线段-直线段”，便于钻井施工[2][3]。黄根炉等人把入窗阶段划分为探储层顶界与中靶两个阶段，重点研究了储层提前或推后时探储层顶界的轨迹优化方法，确保入靶时靶前距最短[6]。随着水平井的大量应用，各油田均推广了水平井地质导向技术，通过应用旋转导向工具，提升轨迹控制能力，特别是全角变化率的控制能力得到明显提升，并且广泛应用方位伽马、元素录井等随钻测录井技术，可靠识别标志层，落实地层倾角，为层层逼近目标地质体提供了依据[7][8]。陈康、于鹏玺等人研究了入窗最佳井斜角的确定方法[9][10]，但重点只考虑了随钻工具的最大造斜率的影响因素。李晓强等人研究了水平井地质导向着陆段技术，分析了着陆前的难点和不确定因素，建立了从储层顶到着陆位置的入窗井斜角计算公式[11]。这些技术的应用，提高了水平井的入窗准确性。

2.2. 难点分析

由于地下地质体的深度、厚度、地层倾角的预测存在一定的误差[12]，确定入窗时的井斜角往往只考虑了部分影响因素，得到不合理的结论，容易导致轨迹复杂化。

(1) 地下地质体存在预测误差

水平井钻探的目标地质体一般厚度较薄，河道砂体普遍小于 20.00 m [9]-[11]，页岩气井靶窗往往只有 4.00~6.00 m [7] [8]，超出了地震资料的分辨极限[12] [13]，只能提供宏观方向的指导，在水平井入窗着陆阶段，设计轨迹按预测的储层深度进行规划(图 1(a))，但实钻过程中，普遍会遇到目的层垂深提前或推后等情况[6]，容易导致靶前距大幅度延长(图 1(b))，或者出现穿底导致的复杂轨迹(图 1(c))，造成后期钻井施工难度明显升高，甚至入窗失败造成回填，不利于提速提效。

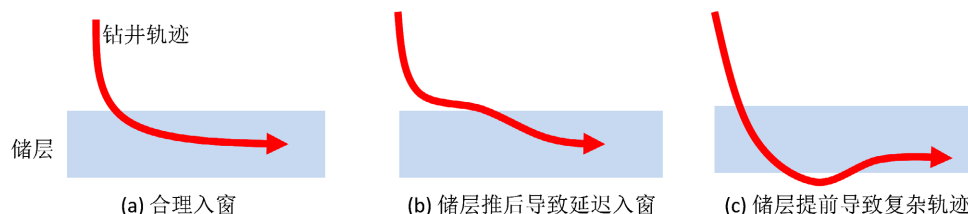


Figure 1. Schematic diagram of horizontal well trajectory entering the window

图 1. 水平井入窗轨迹示意图

(2) 入窗井段井斜角的影响因素多

由于储层的深度存在不确定性，合理确定揭开储层顶需要的井斜，是入窗是否成功的关键[6] [10] [11]。不同的地层倾角对入窗也有明显影响，如果地层呈下倾状态，钻头下行的视垂厚大于钻头在地层中穿行的真垂厚(图 2(a))，反之，如果地层呈上倾状态，钻头上行的视垂厚小于钻头在地层中穿行的真垂厚(图 2(b))，真垂厚、视垂厚之间的关系与地层倾角、井斜角密切相关[14]，还没有成熟的计算方法来确定揭开储层顶的井斜角，给工程施工带来了极大的风险。

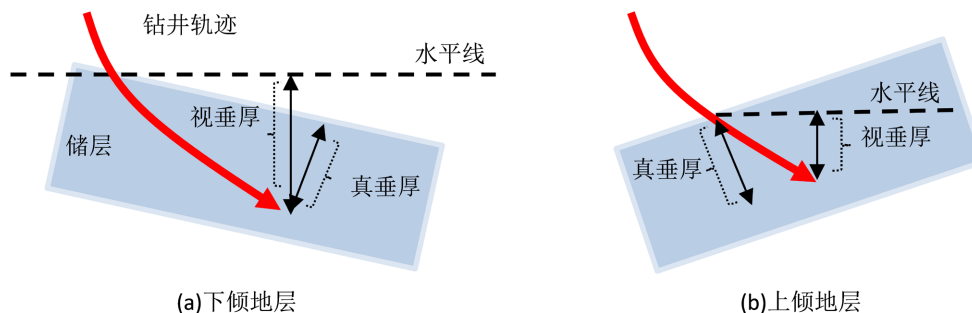


Figure 2. Schematic diagram of the relationship between apparent vertical thickness and true vertical thickness of different strata

图 2. 不同地层的视垂厚与真垂厚关系示意图

3. 入窗井斜角计算方法研究

水平井入窗阶段过程中，储层埋深、储层厚度、地层倾角、着陆位置、工具造斜率、井斜角均对入窗效果有明显影响[9]-[11]。因此，开展入窗井斜角优化工作，涉及了地震解释、轨迹计算、轨迹优化全过程。

3.1. 入窗段井斜角计算流程

通过现场实践，总结了入窗段井斜角的计算流程(图 3)。通过开展地震解释与反演，结合多井地层对比，初步预测储层的埋深、储层厚度及地层倾角，根据实钻的录井资料，不断修正预测储层的埋深及地层倾角；利用最新的地层倾角数据，预测进入靶点时需要的井斜角；按照入窗原则(靶点在储层中的相对

位置)预测着陆位置(靶点垂深), 依据工具的造斜能力和完井作业允许的最大全角变化率, 选择合适的造斜率, 反算揭开储层顶所需要的井斜角。实钻过程中, 根据钻遇地层情况, 不断的迭代、预测、反算, 达到优化入窗段井斜角的目的。

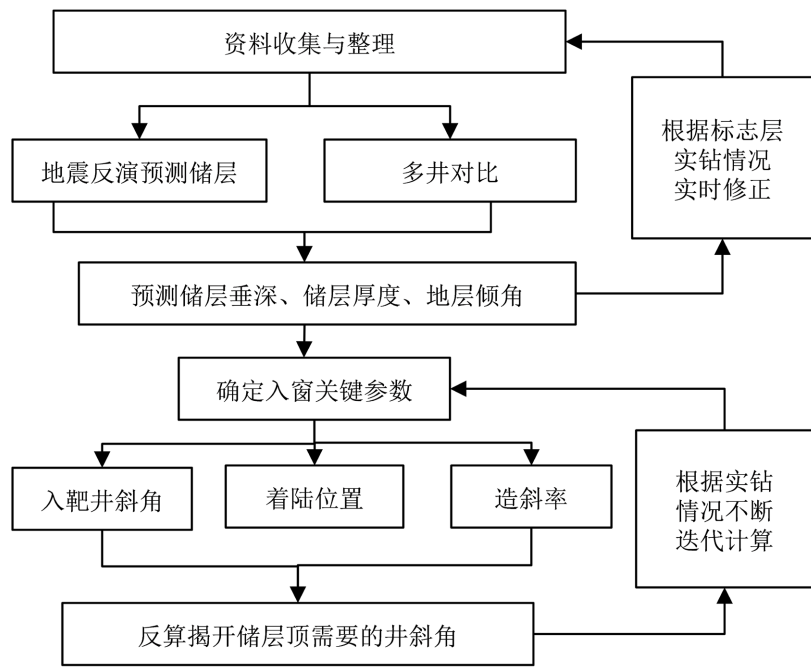


Figure 3. Flow chart for calculating the inclination angle of the window well
图 3. 入窗井斜角计算流程图

3.2. 储层埋深等地质参数的预测

储层埋深、储层厚度及地层倾角等是影响水平井入窗的主要地质参数, 钻前一般采用地震解释与反演的方法进行预测[12] [13]。通过常规地震剖面、波阻抗反演等手段, 获得储层位置、发育规模等信息, 采用制作合成记录的方式, 将地震时间剖面与钻井的井深联系起来, 通过读取时间剖面上的时间差, 或者直接将时间域的地震数据转换为深度域的地震数据, 预测待钻水平井的储层顶底的埋深, 进而获得储层厚度信息, 并测量出地层倾角。采用多井对比的方法来减少地震预测的误差, 通过对比, 将重要地质界线、特殊岩性等作为纵向上的特征标志层, 根据实钻资料, 与钻前预测进行对比[7], 及时根据实钻资料修正时深关系, 重新转换深度域地震剖面, 并再次读取储层埋深、厚度与地层倾角等地质参数。通过多个标志层“层层逼近”的方式, 不断修正预测数据与实钻数据之间的误差。

3.3. 入窗关键施工参数的确定原则

着陆位置、造斜率和入靶井斜角等是入窗阶段的关键施工参数, 需要逐一落实[11]。理想状态下的着陆位置一般位于储层中部, 由于实钻过程中存在深度预测误差, 井斜控制难以做到完全精准的程度, 如果着陆点过浅, 容易导致上穿出层, 反之, 若着陆点过深, 容易下穿出层, 因此有必要优选一个范围(公式 1), 将着陆点控制于该范围内, 有利于着陆, 并预留一定的轨迹调整空间。

造斜率的选择主要取决于工具的施工能力以及后续完井作业的需求, 选择二者中的最小值, 并乘以一定的附加系数, 作为最终选择的造斜率(公式 2)。以页岩气工区为例, 完井作业要求的造斜率不超过 25°/100 m, 而旋转导向等工具的造斜率一般不高于 25°/100 m, 为了确保地层突变需要预留一定的施工能

力, 按 90% 的附加系数相乘后取值, 实际钻进过程中采用的造斜率为 $20 \sim 22^\circ/100 \text{ m}$ 。

入靶井斜角与地层倾角紧密相关(公式 3), 如果地层水平, 需要 90° 井斜角入靶, 如果地层下倾, 入靶井斜角低于 90° , 反之如果地层上倾, 入靶井斜角高于 90° 。

$$H_a = \begin{cases} H_0 + \alpha_1 \times H, & \text{着陆位置上限, 位于储层上部} \\ H_0 + \alpha_2 \times H, & \text{着陆位置下限, 位于储层下部} \end{cases} \quad (1)$$

$$K = \begin{cases} \beta \times K_{\text{工具}}, & K_{\text{工具}} \leq K_{\text{完井}} \\ \beta \times K_{\text{完井}}, & K_{\text{工具}} > K_{\text{完井}} \end{cases} \quad (2)$$

$$Inc = 90 - \gamma \quad (3)$$

式中 H_a 为着陆垂深(m), H_0 为储层顶部垂深(m), H 为储层真垂厚(m), α_1 为着陆位置上限系数, 无量纲, 推荐取值为 $\frac{1}{3}$, α_2 为着陆位置下限系数, 无量纲, 推荐取值为 $\frac{2}{3}$; K 为造斜率($^\circ/100 \text{ m}$), $K_{\text{工具}}$ 为工具的最大造斜率($^\circ/100 \text{ m}$), $K_{\text{完井}}$ 为水平井施工允许的最大造斜率($^\circ/100 \text{ m}$), β 为附加系数, 无量纲, 推荐取值为 90%; Inc 为入靶井斜角($^\circ$), γ 为地层倾角(下倾为正数, 上倾为负数)。

3.4. 揭开储层顶所需的井斜角计算方法

李晓强等人利用三角函数建立了着陆段入窗井斜角的计算公式[11], 该公式考虑了揭开储层顶、入靶点两个位置的井斜角。在实际施工过程中, 揭开储层顶到入靶是不断增斜的过程中, 这个过程中不断变化的井斜角会影响后续的参数计算。为了获得更准确的计算结果, 本文采用循环迭代计算的方法(图 4)。

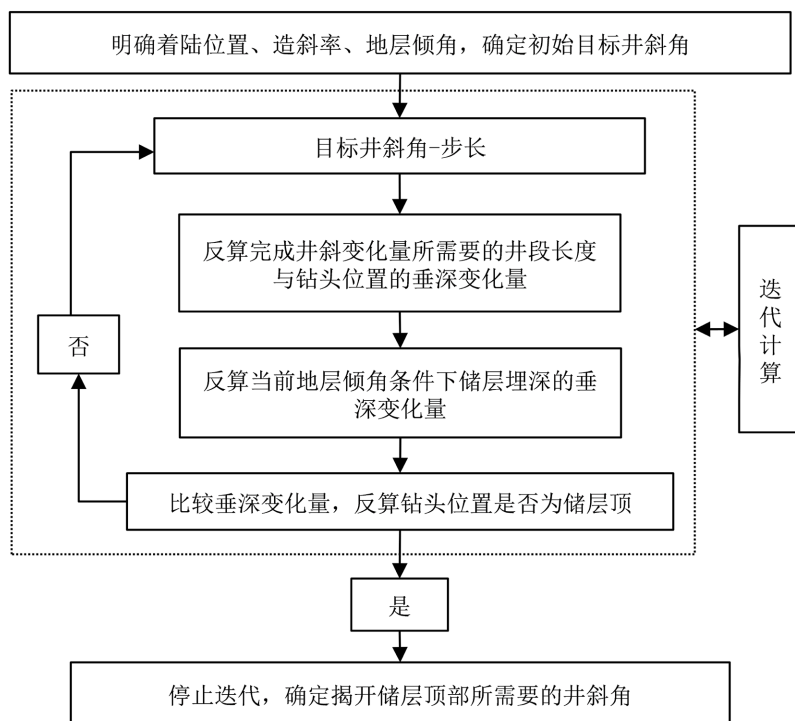


Figure 4. Shows the iterative back calculation process of the wellbore inclination angle required to uncover the top of the reservoir

图 4. 揭开储层顶所需的井斜角迭代反算流程图

假设目前钻头位置已经位于理想的入靶点, 根据公式 1~3 确定造斜率和理论的入靶井斜角度。把入

靶井斜角作为初始井斜角, 设定一个井斜角变化的步长, 用初始井斜角减去步长, 获得目标井斜角, 利用刘修善等人推导的校正平均角法计算公式[2][3], 反算出按当前造斜率实现井斜变化量所需要的井段长度, 并以当前的井斜角、地层倾角分别计算出钻头位置和储层埋深的垂深变化量, 通过比较两个垂深变化量, 反算出钻头位于储层中的相对位置, 判断钻头位置是否为储层顶。如果钻头位置没有回退到储层顶, 则把当前的目标井斜角继续减去步长, 得到新的目标井斜角, 再次计算各项参数, 并再次进行比较, 直到钻头位置回退到储层顶之上, 则停止迭代计算。采用这种迭代计算的方法, 计算过程中考虑了不断变化的井斜角的影响, 因此有效地提高了计算的可靠性, 井斜角变化的步长对计算精度有明显影响, 步长取值越小, 精度越高, 但计算量也就越大, 实钻过程中推荐取值在 $0.10^{\circ}\sim 1.00^{\circ}$ 之间。

4. 应用效果

通过研究建立的水平井入窗井斜角计算方法在四川盆地中浅层致密砂岩气井、深层碳酸盐岩气井、海相页岩气井中均进行了应用, 通过井斜角计算流程, 重点通过迭代反算揭开储层顶所需要的井斜角范围, 计算结果有效指导了水平井的入窗工作, 下面以 A 井为例, 分析应用效果。

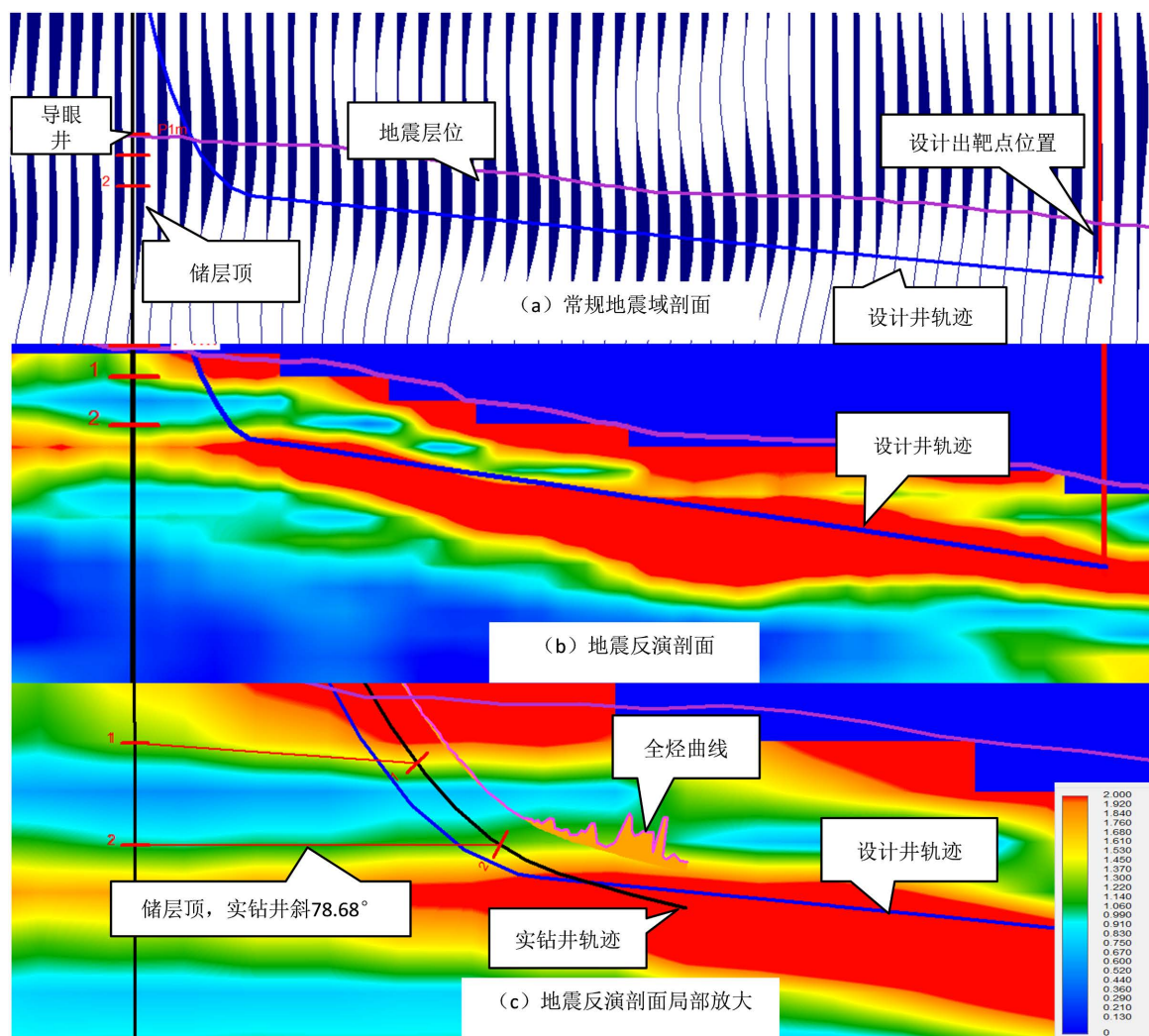


Figure 5. Optimization effect diagram of the trajectory of the A well entering the window section

图 5. A 井入窗井段轨迹优化效果图

A 井主要目的层为二叠系碳酸盐岩地层, 导眼井钻遇 5.10 m 厚的含气灰岩, 有气测异常, 业主针对该段储层设计了侧钻水平井, 设计 A 靶点垂深 4610.00 m, 入靶井斜角 89°, 入窗点位于优质储层顶部(图 5(a))。针对导眼井资料, 开展了地震解释与孔隙度反演(图 5(b)), 反演结果表明优质储层横向上具有非均质性, 入窗附近的优质储层厚度有增加的趋势, 地层先近似水平, 再转为下倾, 反演剖面上读取的入窗段储层垂厚约为 8.00 m, 地层倾角约为 0°。根据入窗段关键施工参数的确定原则, 造斜率 K 以完井工具允许的最大造斜率 33.33°/100 m 为上限, 附加 90% 的系数后确定为 30.00°/100 m, 由于地层近水平, 根据地层倾角确定入靶井斜角为 90.00°, 设计的着陆位置为优质储层顶部, 如果储层埋深推后, 将导致入窗难度极大, 因此将着陆位置限定为优质储层内的 $\frac{1}{3} \sim \frac{2}{3}$ 范围内, 即进入储层内 2.64~5.36 m 真垂厚着陆。将迭代计算的井斜步长取为 0.10°, 计算结果表明, 揭开储层顶部需要的最小井斜角为 76.40°, 最大井斜角为 80.50°。

实钻过程中, 根据工区多井对比, 选取了岩性、元素、测井曲线有明显变化的特征层作为标志层, 实钻各个标志层特征较为清楚, 侧钻井段的埋深与导眼井变化不大, 前期基本按设计轨迹施工, 进入了关键的入窗井段后, 以 29.91~30.19°/100 m 的造斜率快速增斜至 77.00°以后, 采用微增斜的方式继续钻进, 以 78.68°井斜角揭开储层顶(图 5(c)), 后续按选定的造斜率继续增斜至井斜角 89.00°, 顺利着陆于储层中部, 根据地震剖面上后续地层下倾 1.00°的实际情况, 不再继续增斜, 顺层稳斜钻进, 着陆后气测显示明显 ΣCn 1.47↑16.13%, 达到了地质目的。

如果不采用本方法, 本井将以设计接近 89.00°的井斜角揭开储层并沿着储层顶部穿行, 实钻表明储层顶部气测异常微弱, 同时如果储层埋深推后, 将对后期轨迹的调整带来极大的风险, 轨迹调整的空间较小, 容易导致后期轨迹的复杂化, 为后续施工埋下了隐患。采用本方法后, 获得了较为可靠的揭开储层顶的井斜角范围, 实钻过程中容易控制轨迹, 确保在储层中部位置着陆, 预留了后期的调整空间, 为工程施工提供了便利。

5. 结论与认识

(1) 由于地下地质体复杂多样, 存在预测误差, 特别是储层埋深、储层厚度、地层产状等关键属性的差异, 对水平井入窗与准确着陆影响较大, 需要开展入窗井斜角计算与优化工作, 涉及了地震解释、地质认识、定向轨迹计算、轨迹控制等全过程。

(2) 通过研究建立了水平井入窗井段井斜角的计算方法, 明确了水平井入窗井段着陆位置、造斜率、入靶井斜角等关键参数的确定原则, 并重点建立了揭开储层顶所需的井斜角迭代反算流程与方法。应用实例表明方法可靠, 计算结果能有效指导水平井钻井施工。

参考文献

- [1] 张锦宏. 中国石化石油工程技术现状及发展建议[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(3): 9-17.
- [2] 刘修善. 井眼轨道几何学[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [3] 韩志勇. 定向钻井设计与计算[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2011.
- [4] 张焱, 吴爽, 刘坤芳, 等. 定向井待钻井眼轨迹最优化设计方法研究[J]. 石油钻探技术, 1999, 27(6): 11-13.
- [5] 张焱, 刘坤芳, 曹里民, 等. 水平井待钻井眼轨迹最优化设计方法研究[J]. 石油学报, 2001, 22(1): 100-104.
- [6] 黄根炉, 赵金海, 赵金洲, 等. 基于地质导向的水平井中靶优化设计[J]. 石油钻采工艺, 2004, 26(6): 1-3.
- [7] 刘旭礼. 页岩气水平井钻井的随钻地质导向方法[J]. 天然气工业, 2016, 36(5): 69-73.
- [8] 唐诚, 王志战, 陈明, 等. 基于 X 射线荧光元素录井的深层页岩气精准地质导向技术[J]. 石油钻探技术, 2019, 47(6): 103-110.

- [9] 陈康. 临盘油田水平井最佳入窗井斜角的确定[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2019, 39(4): 102-103.
- [10] 于鹏玺. 断块薄油层水平井入窗模型研究与应用[J]. 西部探矿工程, 2016, 28(10): 18-21.
- [11] 李晓强, 王静, 杨志华. 水平井地质导向着陆段技术分析[J]. 测井技术, 2021, 45(2): 191-195.
- [12] Ashcroft, W. (2011) *A Petroleum Geologist's Guide to Seismic Reflection*. Wiley-Blackwell Press.
- [13] 张勇. 油气藏地震正演模型与分析[M]. 北京: 石油工业出版社, 2009.
- [14] 李振鹏, 马存飞, 刘春艳, 等. 地层视垂直厚度分析在油田小层对比中的应用[J]. 断块油气田, 2018, 25(5): 626-630.