

Discussion on the Theory and Practice of Geosteering While Drilling

Senlin Yin¹, Chen Li², Haiping Guo², Gongyang Chen¹, Wenhui Shi³, Zhangming Hu³, Yan Liu¹, Wei Feng¹, Zhaoliang Liu¹

¹Institute of Mud Logging Technology and Engineering, Yangtze University, Jingzhou Hubei

²Zhundong Oil Production Plant of Xinjiang Oilfield Company, PetroChina, Fukang Xinjiang

³Western Drilling Engineering Company of PetroChina, Karamay Xinjiang

Email: 252499306@qq.com

Received: Feb. 25th, 2017; accepted: Jul. 12th, 2017; published: Aug. 15th, 2017

Abstract

In recent years, the geosteering while drilling (GWD) technology has gone through rapid development of several stages. In light of the inconsistency between the idea of geosteering while drilling and comprehensive reservoir research, the idea of hierarchical modeling and geosteering while drilling was put forward, and it was explained with an example in the study area. The results show that ① the geosteering while drilling is closely related to the three-dimensional geological modeling technology, and it is the developmental direction of intelligent and efficient orientation to introduce the mature three-dimensional geological modeling technology into geosteering; ② the horizontal well hierarchical geosteering is the developmental direction of geosteering theory, and multi-level geosteering corresponds to comprehensive multi-level geological research results; the similarity between geometric orientation and hierarchical orientation is relatively high in stratigraphic-tectonic framework level, but the multi-level of reservoir heterogeneity geometrical guidance, such as reservoir sedimentary facies (reservoir architecture), reservoir parameters and fluid distribution, is not considered almost, which leads to the lower precision in identification of "sweet spot"; ③ the example shows that the geologic multi-level modeling has obvious advantages in geosteering of horizontal well. Framework model, lithofacies model and logging parameter model are established. By comparing the real drilling data with the forecasting model, optimized trajectory can be obtained. This provides a reference for efficient drilling of oil and gas layers and visual drilling monitoring.

Keywords

Geosteering While Drilling, 3D Geological Modeling, Framework Model, Reservoir Model, Fluid Model

随钻地质导向的理论与实践探讨

印森林¹, 李 琛², 郭海平², 陈恭洋¹, 史文辉³, 胡张明³, 刘 岩¹, 冯 伟¹, 刘兆良¹

¹长江大学录井技术与工程研究院, 湖北 荆州

²中石油新疆油田分公司准东采油厂, 新疆 阜康

³中石油西部钻探工程公司, 新疆 克拉玛依

作者简介: 印森林(1983-), 男, 博士, 副教授, 现主要从事油气田开发地质、录井地质等方面的研究工作。

Email: 252499306@qq.com

收稿日期: 2017年2月25日; 录用日期: 2017年7月12日; 发布日期: 2017年8月15日

摘 要

近年来, 随钻地质导向技术发展迅速, 经历了多个发展阶段。针对目前随钻地质导向与油藏综合研究技术思路不一致的情况, 提出了随钻地质层次建模与导向的思想, 并利用研究区实例进行了详细说明。研究表明: ①随钻地质导向与三维地质建模技术关系密切, 把成熟的三维地质建模技术引入到地质导向中来, 是实现智能化、高效化导向的发展方向; ②水平井层次导向是地质导向理论发展的方向, 多层次的导向对应的是地质多层次的科学综合研究成果; 几何导向与层次导向在地层-构造格架层次相似度比较高, 然而在储层沉积相(构型)、储层参数及流体分布等方面多级次的非均质性几何导向则几乎没有考虑, 导致了目前对“甜点”的识别精度不够; ③实例显示了地质多层次建模在水平井导向中优势明显, 建立了格架模型、岩相模型及录井参数模型, 通过实钻数据与预测模型的对比, 给出了最优化的轨迹。上述研究为高效钻遇油气层、可视化钻井监测提供了参考依据。

关键词

随钻地质导向, 三维地质建模, 格架模型, 储层模型, 流体模型

Copyright © 2017 by authors, Yangtze University and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

1. 引言

随钻地质导向技术(geosteering while drilling) [1] [2] [3] [4], 是利用钻井采集数据进行现场分析解释, 完成实时地质导向决策和井身轨迹控制, 保证井眼轨迹高效钻遇目的层的先进技术。多年来, 随钻地质导向有关的地质理论及工程工艺技术发展迅速, 可以梳理总结为以下几个阶段。

第一阶段(20 世纪 80 年代前), 随钻地质导向理论与技术萌芽阶段[5]。随着直井用于开采特殊类油气藏适应性变差, 水平井开始渐渐得到应用。例如我国四川遂宁磨溪构造 1965 年第一口水平井——磨 3 井, 应用了泵冲法技术准确测定了井斜。这标志着井轨迹的监测技术开始慢慢形成, 随钻地质导向理论与技术开始萌芽。

第二阶段(20 世纪 80 年代), 随钻地质导向的技术探索及技术初步形成阶段。开始利用伽马和电阻率测井曲线测量井轨迹参数。后来在几何导向基础上测量参数有所增加, 但传感器一般离钻头 10~30 m, 不能保证井眼一直维持在目的层中。

第三阶段(20 世纪 90 年代), 随钻地质导向的技术大发展阶段。1992 年, 斯伦贝谢公司第一次利用随钻深、浅电阻率和自然伽马指导地质导向作业。哈利伯顿、贝克休斯和挪威国家石油公司(Statoil)等也相继研制出各自的地质导向系统。地质导向技术有了突飞猛进的发展, 随钻测量(measurement while drilling, MWD)传感器已下移至钻头处, 钻头处测量导向工具和井场信息系统功能逐渐完备。之后, 用于地质导向钻井的随钻测井(logging while drilling, LWD)系统形成了定向钻井新概念, 是集电缆测井、钻井和录井技术的结合体。

第四阶段(21 世纪初期), 随钻地质导向的技术成熟与提高阶段。随着地质-工程一体化技术的要求越来越高, 随钻地质导向新技术向储层边界迈进, 提出了随钻储层边界探测工具 PeriScope 及其升级软件, 为地质导向提供了更丰富的随钻测井、测量信息, 以及更快速、稳定的实时数据传输。随后, 井眼随钻高分辨率电阻率成像技术和三维地质导向软件技术的发展, 如井眼轨迹三维可视化[5] [6] [7] [8] [9]、录井曲线三维地质建模[10]、录井导向地层三维可视化[11] [12] [13]等, 推动了地质导向技术的再次升级。至 2010 年, 地质导向技术广泛应用到煤层气藏、致密砂岩气藏、碳酸盐岩气藏、底水油藏、裂缝油藏、复杂断块和薄层油藏等。随着技术水平的提高, 随钻地质导向的服务可以分为几个级别, 不同级别的导向目标、服务价值及技术深入程度差异较大(见表 1)。

Table 1. The service levels of geosteering while drilling
表 1. 随钻地质导向的服务层次

服务级别	随钻导向目标	服务价值	技术深入程度
初级服务	前导模型	起始阶段	数据采集
一级服务	几何随钻导向	初级阶段	构造-地层
二级服务	油藏随钻导向	中级阶段	复杂岩性
三级服务	产量预测导向	高级阶段	复杂岩性、流体

随着随钻地质导向技术的不断发展, 目前的导向目标体越来越精细, 然而, 导向并没有脱离几何导向的范畴(图 1), 采用的模型在分层后依然是均质的, 单层之间没有属性参数的变化, 导向思维依然是曲线对比无限逼近的技术思路。显然这与目前油藏综合研究的发展趋势相去甚远, 基于曲线形态相似的导向具有很好的参考价值, 然而不能是唯一的技术取向。地下地质体是格架-储层-流体-压力的多层次耦合的复杂非均质系统, 应该着力关注研究对象的多层次非均质特点。因此, 深入探讨上述复杂的层次结构模型及三维层次建模技术, 不仅对于随钻地质导向理论发展具有重大意义, 同时对于提高复杂地质结构体随钻导向效率具有实践意义。

2. 随钻地质导向理论

2.1. 三维地质建模技术与随钻地质导向

储层地质建模是用三维模型来定量表征储层非均质性、进行不确定性评价及整合不同规模和精度的数据[14], 其关键是对井间未知区域进行储层预测。储层井间特征的预测是应用已有信息结合相应的建模方法预测储层特征的三维分布。经过近 20 多年的发展, 逐步成为油田储层定量表征的必要手段。储层三

维精细表征与建模系列技术,特别是储层三维随机建模技术在油气田勘探中渐渐受到地质学家及油田工程师的广泛应用[15],取得了系列进展[16] [17] [18] [19]。按照随机模拟中研究对象的差异,可以把随机建模方法分为两大类:基于目标的方法和基于象元的方法。所谓随机建模,是指以已知的信息为基础,以随机函数为理论,应用随机模拟方法,产生可选的、等可能的储层模型的方法[20]。

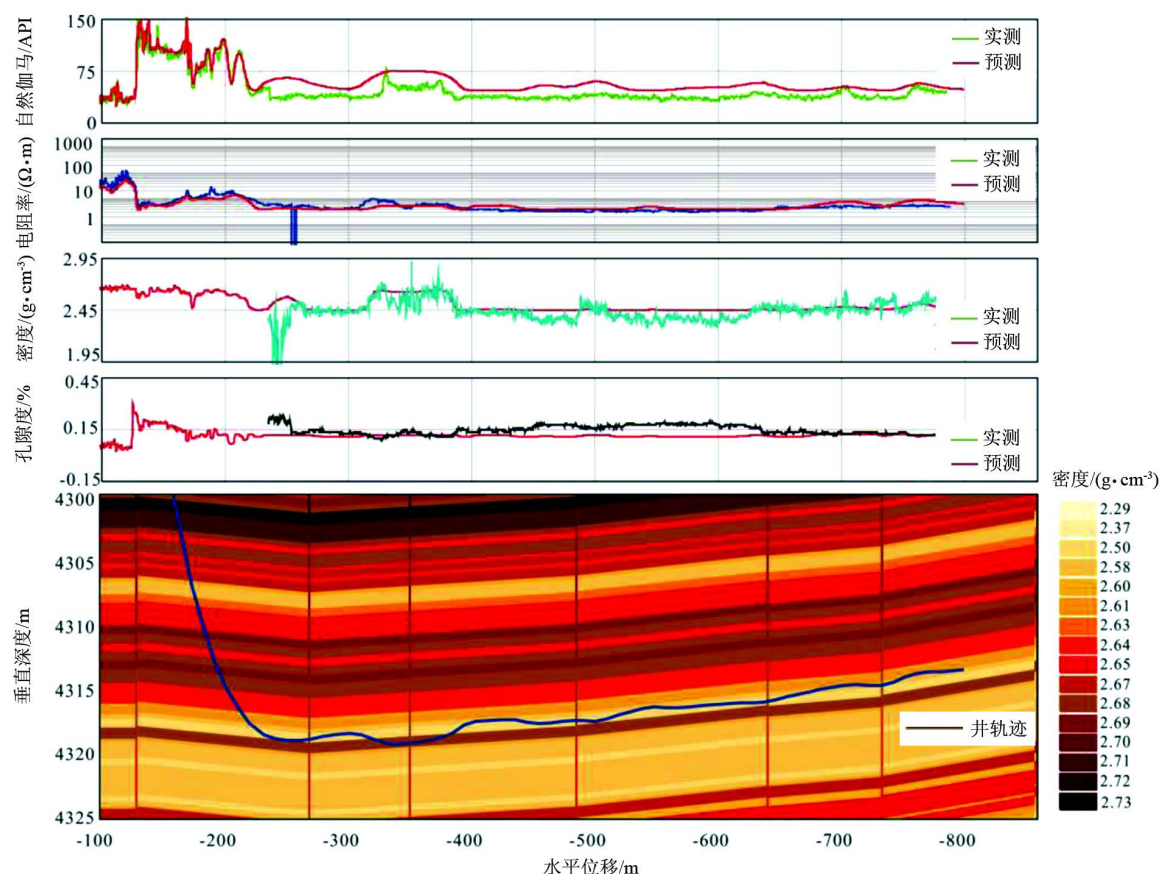


Figure 1. The change of geosteering while drilling curve and the well trajectory

图 1. 随钻地质导向曲线变化及井轨迹

随钻地质导向的过程是基于三维地质模型的实时调整导向。导向过程与模型调整是一个逐步耦合过程,该过程的前提假设是已经建立的模型与真实地质体有差异的事实。三维地质建模过程一个重要的发展方向就是不断降低模型的不确定性,让模型最大限度地逼近地下真实。因此,随钻过程,特别是水平井实时的资料对模型具有重要的检验作用。同时,随着地下确定性资料的增加,模型需要实时的互动调整。

2.2. 随钻导向层次理论

随着勘探开发水平的不断提高,非常规油气储层逐渐成为油气储量-产量的主要目标。已有基于构造模型(二维几何导向)的导向适应性开始变差,如致密油藏、岩性油气藏、火山岩油气藏、低渗透油气藏等。从理论与实践相结合的科学角度探讨地质导向来说,导向应该向更加高级的等级发展,多层次、多维度、多方法的结合是地质导向的必由之路。随钻地质导向应该着眼于层次导向,贴近地质层次研究思路,逐步向精准化方向发展,即格架模型→储层分布模型→流体分布模型→压力分布模型层层递进的思路发展[21](图 2)。

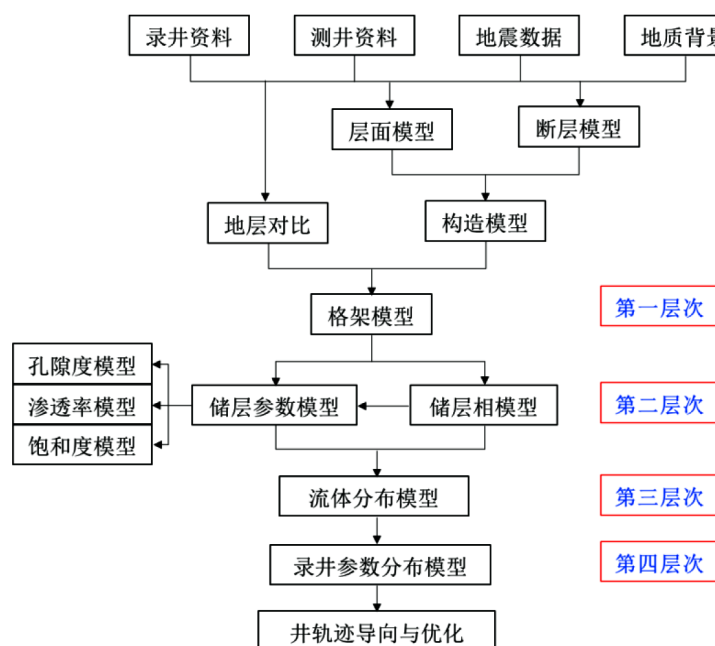


Figure 2. The flow chart of 3D geological modeling and geosteering with drilling

图 2. 三维地质建模与随钻地质导向流程图

2.2.1. 第一层次——格架模型

1) 地层模型。地层模型是在确定不同地区或者不同井之间地层单元的对应关系基础上，建立研究范围内地层空间格架关系。地层模型(狭义)主要是指在一个油田范围的含油层段内部，确定不同井之间的等时地层关系，建立等时地层格架模型，从而为油藏地质分析(构造、储层、流体、压力分布)、油气储量计算、油藏开发设计及动态分析等奠定必要的基础。

2) 构造模型。构造模型由断层模型和一系列层面模型组成，反映了地下目的层的地层起伏交切及其叠置关系。断层模型实际为三维空间上的断层面，它在二维平面上表现为断层面等值线图。

地层模型和构造模型构成了地下目的层的格架模型，反映了地下地层起伏及断层的切割的空间模型，是目前地质导向技术主要攻关的层次。

2.2.2. 第二层次——储层分布模型

1) 储层沉积相(构型)模型。格架模型内部是由不同类型储层沉积相(构型)及储层参数模型组成，是地质研究的核心与关键。储层构型分布模型能反映储层空间变化规律和分布特征，体现了不同类型沉积体(冲积扇、河流、三角洲、滨岸相及海底扇等)的三维形态、规模、方向及其叠置关系。沉积体类型的差异需要采用不同的建模技术，也侧面体现了分布规模及叠置样式的复杂性，同时控制了储层参数分布的差异。储层构型分布模型是三维储层建模的核心，也是地质研究三维模型化的关键。

2) 储层参数模型。储层参数模型体现了储层质量的差异，包括孔隙度模型和渗透率模型，是反映储层质量差异性的参数。储层沉积相内部不同类型成因单元具有不同的储层质量及参数分布特征。储层沉积相与储层参数具有较好的对应关系。因此，目前流行采用沉积相控制下储层参数随机建模方法，建立研究区的三维储层参数模型。模型可以较好地显示物性优劣区。广义的储层参数模型包括了三维裂缝模型。

2.3. 第三层次——流体分布模型

储层内部不同部位赋存了不同含油饱和度的流体。流体分布模型与受控于储层质量和储层参数而有明显的差异特征。在储层沉积相与储层参数(孔隙度)模型的约束下建立三维流体分布模型,精细表征研究区的油气水分布模型。

2.4. 第四层次——压力分布模型

第四层次是压力分布的差异性导致的压力非均质分布模型。研究发现,储层物性差异(非均质)是引起异常高压的本质因素。因此,在储层物性模型约束下,利用单井资料建立地下地层压力分布模型。很多录井参数属于间接反映地层岩性、物性及含油性的参数,在此与压力模型类似,作为第四层次模型,包括气测全烃、油气指数、地层可钻性指数模型等。

3. 水平井地质导向研究实例

3.1. 研究区地质概况

北三台油田西泉 103 井区距阜康市滋泥泉子镇东北约 8 km,研究区被 2 条大断裂分为南、北 2 个构造带(图 3)。石炭系基底为一个近南北走向的古隆起,其中西翼部分被剥蚀,东翼地层东倾,与上覆地层呈不整合接触,形成断层-地层圈闭。目的层石炭系发育一套火山岩储层,岩性主要为安山岩、火山角砾岩、凝灰岩 3 类,油层主要发育在火山角砾岩中。油层孔隙度平均 23.7%,渗透率平均 0.29 mD。西泉 103 井火山岩体自上而下分为 B1、B2 岩体,其中 B1 以安山岩为主,B2 以火山角砾岩为主,为主力油层段,可进一步细分为 B2-1、B2-2 岩体。

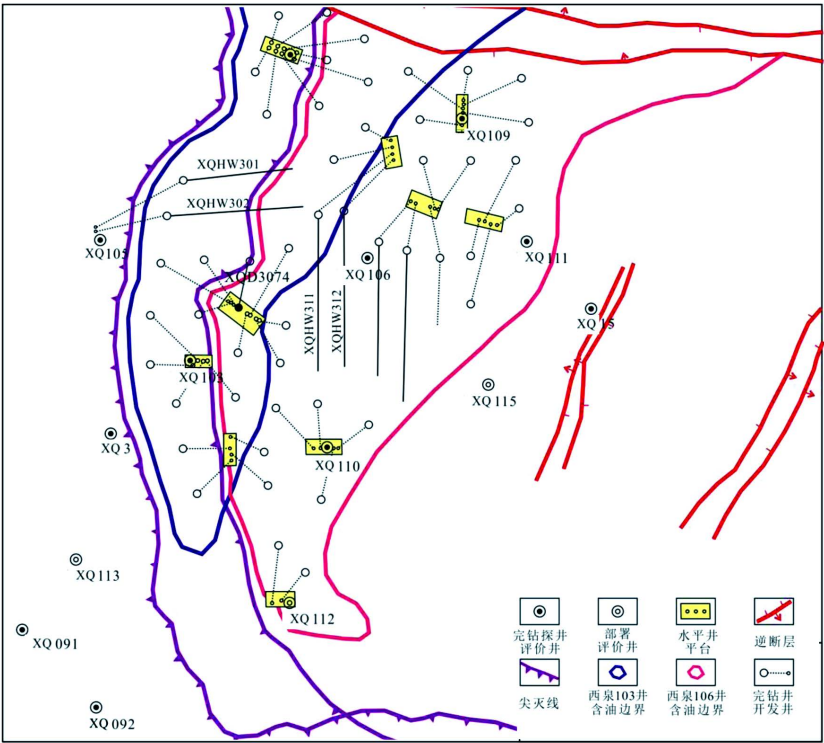
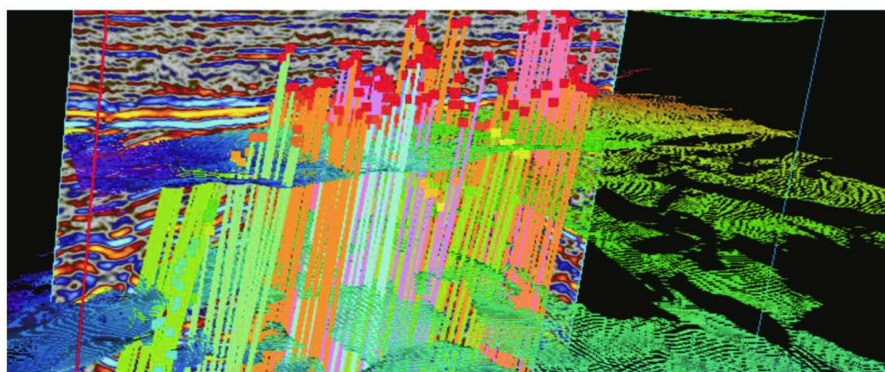


Figure 3. The location of research area
图 3. 研究区位置图

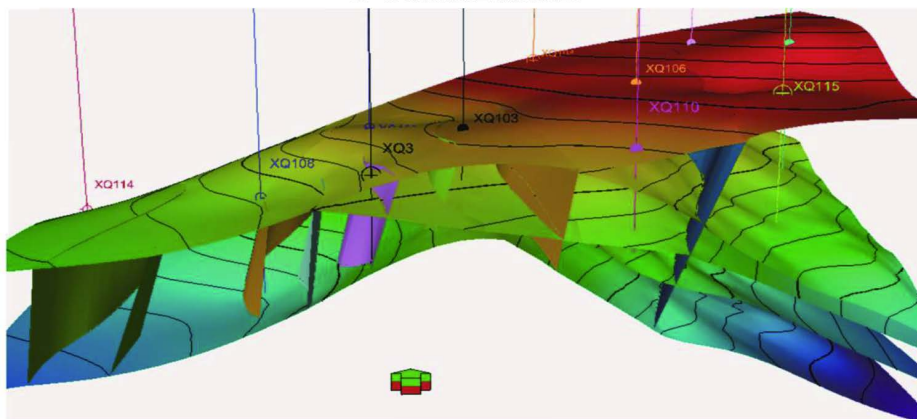
3.2. 三维储层地质建模

3.2.1. 格架模型建立

通过对比研究区连井地层, 分析井震标定合成记录, 确定了时深关系, 建立了层速度模型, 应用层速度模型对时间域地震体进行时深转换。以深度域的地震资料为基础, 对断层和层面追踪, 依据实钻断点和分层数据做校正, 建立地层格架模型(图 4)。



(a) 多数据层面断层模型



(b) 地层-断层模型

Figure 4. The model of stratigraphic framework

图 4. 地层格架模型

3.2.2. 岩相模型

以井数据为基础, 划分了单井的 3 种岩石相类型, 利用序贯指示模拟算法对井间 3 类岩相进行模拟, 建立了研究区三维岩相模型(图 5)。

3.2.3. 录井参数模型

利用三维地质建模的数据处理能力, 在层次模型约束的思路下, 开展录井参数三维建模。建立了研究区地层可钻性指数模型(图 6(a))、油气显示指数模型(图 6(b))、裂缝参数模型(图 6(c))、气测全烃指数模型(图 6(d)), 为下一步随钻导向提供了较好的指导和帮助。

对于油气显示指数模型来说, 油气显示指数是将气测组分轻重比例关系结合荧光显示面积加权处理得出的衡量油气显示好坏的综合指数, 无荧光显示和无 C_2 组分以后的井段不参与计算, 在荧光显示面积相同的情况下, 各组分间比例关系对计算结果产生影响。

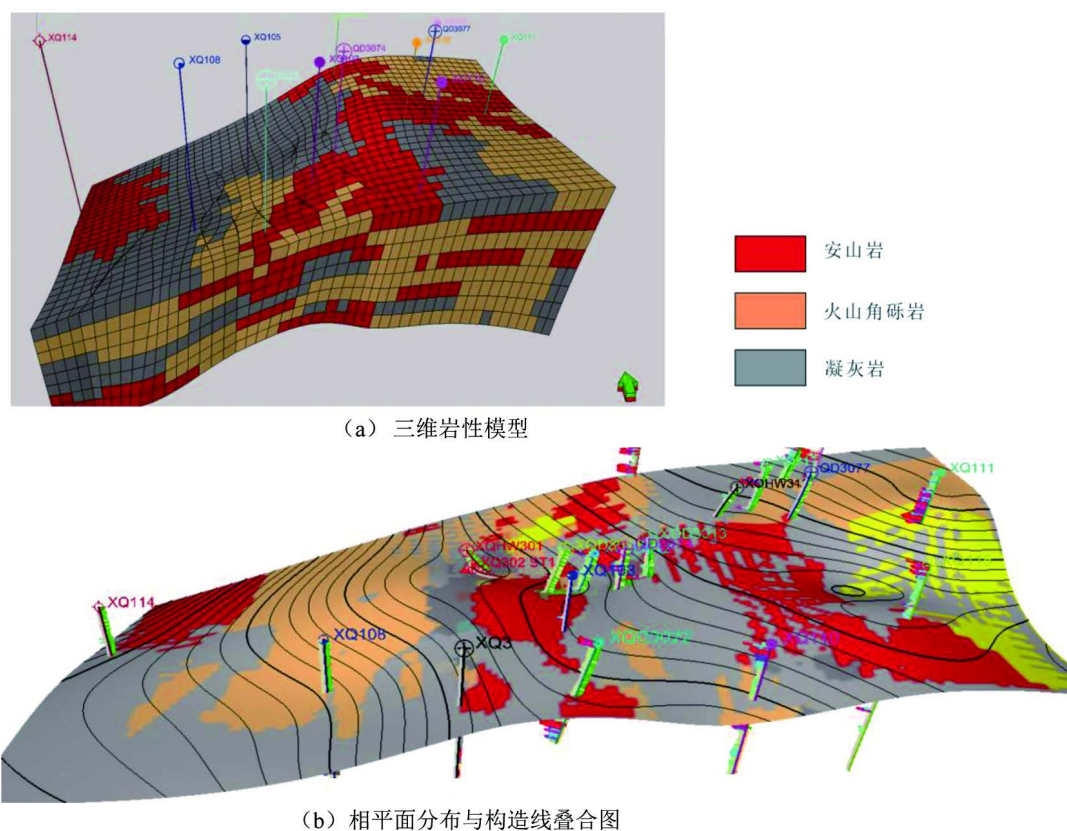


Figure 5. The lithofacies model
图 5. 岩相模型

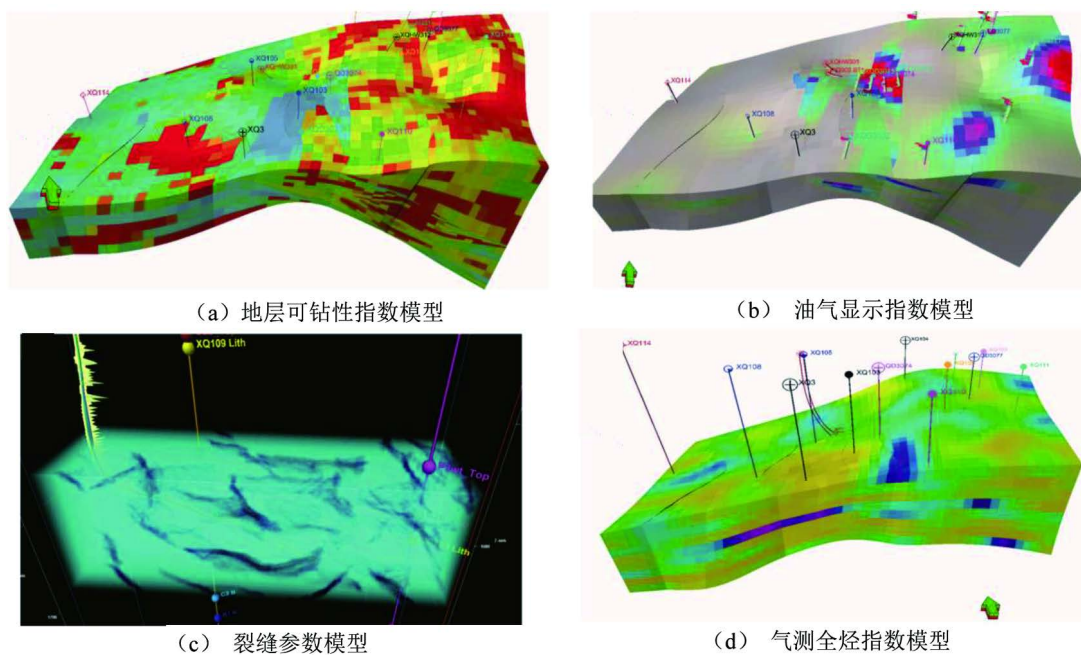


Figure 6. The model of mud logging parameter
图 6. 录井参数模型

3.3. 随钻地质导向过程

利用已有的模型,开展随钻水平井地质导向。目前,对于水平井设计层位一般可以比较准确的钻达。然而,对于是否钻达最有利位置则不能保证。因此基于三维地质模型的导向过程应加强综合性。

1) 井轨迹的设计

西泉 103 井岩体水平井 XQHW301 和 XQHW302 井位于 XQD3074 井附近(图 3), 因此靶点设计海拔参考 XQD3074 井油层发育情况, 其中 XQHW301 井入靶点、终靶点均位于 B2-2 岩体顶面海拔以下 12 m, XQHW302 井入靶点、终靶点均位于 B2-1 岩体顶面海拔以下 30 m。

2) 实钻井眼轨迹与模型预测井眼轨迹对比

目前学者很少直接利用模型来实时导向, 只能通过已经完钻水平井来进行分析。依据油气显示指数模型预测的有利油气三维分布模型显示, 若 XQHW301 井井眼轨迹能向上调整到 B2-2 岩体顶面, 钻进会取得更好的效果(图 7)。XQHW302 井的实钻井眼轨迹与模型预测井眼轨迹相关性非常高, 按照气测全烃指数模型的预测, 若能沿着优化井轨迹(见图 8)钻进, 效果会更好, 油层钻遇率会更高。

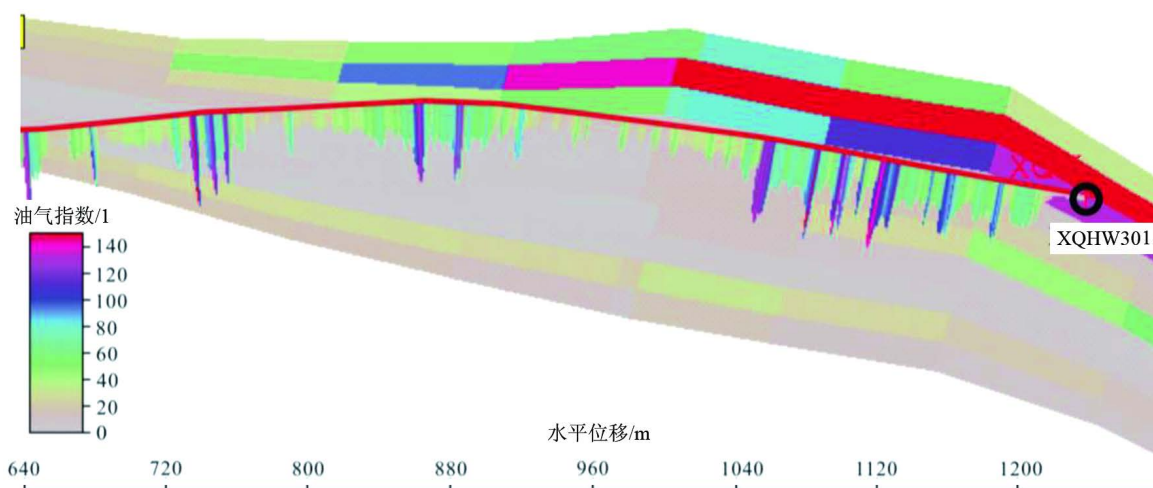


Figure 7. The actual drilling trajectory of Well XQHW301 in the oil and gas displayed index model

图 7. 油气显示指数模型中的 XQHW301 井实钻井眼轨迹

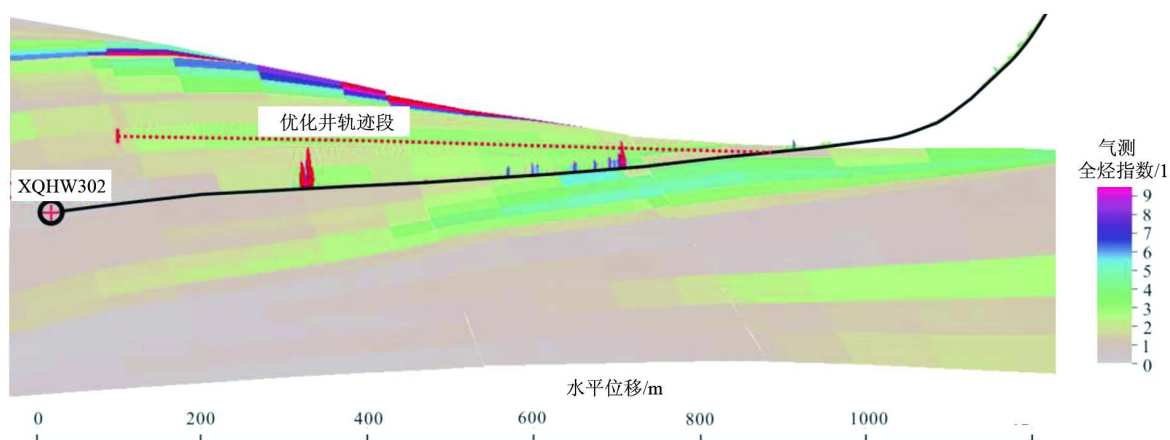


Figure 8. The optimized well trajectory of Well XQHW302 in the gas logging total hydrocarbon index model

图 8. 气测全烃指数模型中的 XQHW302 井优化井轨迹

4. 讨论与结论

目前勘探过程主要是在前期的研究过程中完成的,设计完井位被认为勘探过程已经结束。然而,随着勘探目标越来越精细、复杂性增强(层状油藏向孤立薄层状油藏转换)、含油气显示级别越来越低,勘探应该延伸到钻井过程,即随钻过程中的勘探——随钻勘探。目前的钻井过程是依据钻井设计来完成的,设计本身对地下的认识并不完善,特别是对于成本高、技术要求高的水平井,更加需要在钻井过程中实时监测,调整模型来优化并完成导向过程。

通过上述研究和讨论,得出如下结论:

1) 地质导向与三维地质建模技术关系密切;把相对完善的三维地质建模技术引入到地质导向中来,利用计算机自动完成模型计算、调整是导向智能化、高效化的发展方向。

2) 水平井层次导向是地质导向理论发展的方向,多层次的导向对应的是地质多层次的科学综合研究成果;基于随钻测井曲线相似性对比分析的导向过程与储层不同级次的非均质性理论思想不符合。在地层-构造格架层次相似度比较高,然而在储层沉积相(构型)、储层参数及流体分布等方面多级次的非均质性没有考虑,导致了对“甜点”的识别精度不够精准,导向服务的深度有待加强。

3) 实例显示了地质多层次建模在水平井导向中具有明显优势;建立了格架模型、岩相模型及录井参数模型,通过实钻数据与预测模型的对比,给出了最优化的轨迹。为高效钻遇油气层、可视化监测钻井过程提供了参考依据。

参考文献 (References)

- [1] 时鹏程, 许磊. 地质导向钻井技术综述[J]. 断块油气田, 1998, 5(2): 58-65.
- [2] 时鹏程. 面向地质导向应用的前导模拟技术研究[J]. 测井技术, 2000, 24(6): 415-419.
- [3] 江国法. 地质导向[J]. 测井技术信息, 2000, 13(1): 14-23.
- [4] 徐显广, 石晓兵, 夏宏全. 地质导向钻井技术的现场应用[J]. 西南石油学院学报, 2002, 24(2): 53-55.
- [5] 史清江. 地质导向钻井三维地层建模及其随钻修正方法研究[D]: [硕士学位论文]. 山东: 中国石油大学(华东), 2009.
- [6] 刘玉霞. 地质导向钻井随钻预测方法研究[D]: [硕士学位论文]. 山东: 中国石油大学(华东), 2007.
- [7] 魏微. 复杂结构井井眼轨迹三维可视化[D]: [硕士学位论文]. 陕西: 西安石油大学, 2012.
- [8] 王辉. 基于地质导向钻井的井跟轨道控制方扶与应用研究[D]: [硕士学位论文]. 黑龙江: 大庆石油学院, 2009.
- [9] 亓永民. 基于录井导向的井眼轨迹三维信息处理研究[D]: [硕士学位论文]. 辽宁: 大连海事大学, 2011.
- [10] 王楠. 基于录井曲线数据的三维地质模型构建研究[D]: [硕士学位论文]. 辽宁: 大连海事大学, 2012.
- [11] 黎则光. 录井导向地层三维可视化研究与实现[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连海事大学, 2011.
- [12] 赵伟. 三维可视化水平井模拟油藏地质导向系统的设计与实现[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [13] 姜维寨, 李振宇, 郝紫嫣, 等. 可视化模拟油气藏导向技术的应用[J]. 录井工程, 2016, 27(1): 23-27.
- [14] Caers, J. and Zhang, T. (2004) Multiple-Point Geostatistics: A Quantitative Vehicle for Integrating Geologic Analogs Into Multiple Reservoir Models. American Association of Petroleum Geologists Memoir. *Integration of Outcrop and Modern Analogs in Reservoir Modelling*, **80**, 383-394.
- [15] 尹艳树, 吴胜和. 储层随机建模研究进展[J]. 天然气地球科学, 2006, 17(2): 210-216.
- [16] 吴胜和, 翟瑞, 李宇鹏. 地下储层构型表征: 现状与展望[J]. 地学前缘, 2012, 19(2): 15-23.
- [17] 吴胜和, 杨延强. 地下储层表征的不确定性及其科学思维方法[J]. 地球科学与环境学报, 2012, 34(2): 72-80.
- [18] 印森林, 吴胜和, 冯文杰, 等. 基于辫状河露头剖面的变差函数分析与模拟[J]. 中南大学学报, 2013, 44(12): 4988-4994.
- [19] Deutsch, C.V. and Tran, T.T. (2002) FLUVSIM: A Program for Object-Based Stochastic Modeling of Fluvial Deposi-

tional Systems. *Computers & Geosciences*, **28**, 525-535. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00075-9](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00075-9)

[20] 李少华, 尹艳树, 张昌民. 储层随机建模系列技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2007.

[21] 陈恭洋, 印森林, 刘岩. 录井学理论体系与录井技术发展方向探讨[J]. 录井工程, 2016, 27(4): 5-11.

[编辑] 龚丹

Hans 汉斯

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jogt@hanspub.org