

Adaptive improvement and efficiency enhancement of intelligent drilling technology in complex-structured strata

Bo Ai Rui Liu

Western Drilling Pipe Tools and Well Control Technology Service Branch of China National Petroleum Corporation, Karamay, Xinjiang, 834000, China

Abstract

This study focuses on the challenges of drilling efficiency and safety that arise when oil and gas exploration and development expand into deep and complex strata. It centers on the adaptive optimization of the intelligent drilling technology system, integrating core technologies such as high-precision measurement-while-drilling, intelligent guidance control, and adaptive wellbore stability, and incorporating real-time decision optimization algorithms based on machine learning for research. Through research and analysis, this efficiency improvement strategy has significantly enhanced the adaptability of the technical system in complex geological environments such as faults, high and steep structures, salt-gypsum layers, and fracture zones. By optimizing the configuration of drilling parameters, achieving advanced risk early warning, and intelligent guidance control, a coordinated improvement in engineering operation efficiency and economic benefits has been achieved. This research aims to provide practical and feasible technical improvement plans and performance verification basis for the large-scale promotion and application of intelligent drilling technology in complex geological scenarios.

Keywords

Intelligent Drilling technology; Complex structural bottom layer; Measurement while drilling; Adaptive control

智能钻井技术在复杂构造地层中的适应性改进及效能提升

艾波 刘锐

中国石油集团西部钻探管具与井控技术服务分公司, 中国·新疆 克拉玛依 834000

摘要

此次研究针对油气勘探开发向深层复杂构造地层拓展时所引发的钻井效率与安全难题, 围绕智能钻井技术体系的适应性优化, 整合高精度随钻测量、智能导向控制及自适应井壁稳定等核心技术, 融入基于机器学习的实时决策优化算法进行研究。通过研究分析, 此效能提升策略能够大幅增强了该技术体系在断层、高陡构造、盐膏层及破碎带等复杂地质环境中的适配能力, 通过优化钻进参数配置、实现风险超前预警及智能化导向控制, 达成了工程作业效率与经济效益的协同提升。此次研究旨在为智能钻井技术在复杂地质场景下规模化推广应用, 提供切实可行的技术改进方案与效能验证依据。

关键词

智能钻井技术; 复杂构造底层; 随钻测量; 自适应控制

1 引言

传统的钻井技术通常依托于有限的地质资料与间断性测井数据, 在应对该类地层时, 往往表现出机械钻速偏低、卡钻与井漏等井下复杂事故高发等问题, 从而会导致钻井周期延长、工程成本高。以信息化、自动化与智能化为核心特征的智能钻井技术, 被公认为破解上述技术难题的核心发展路径。此技术通过井下实时数据采集、地面高速传输、智能分析决策与自动化执行的全流程协同, 对钻井过程的闭环进行优化。但是现有智能钻井系统在遭遇极端非均质、强各向异性的复杂构造地层时, 凸显出模型失准、决策滞后、控制

指令与地层动态响应失配等关键问题^[1]。因此, 开展面向复杂构造地层的智能钻井技术靶向性适应性优化, 同步量化评估其效能提升幅度, 对于促进钻井技术革新升级、支撑复杂油气资源高效开发具有重要的现实价值与紧迫性。本文系统剖析了智能钻井技术在复杂构造地层中面临的核心技术挑战, 构建了从感知层、决策层到执行层的系统性改进方案, 并依托真实区块的现场应用数据, 深入验证了技术改进后的综合效能提升效果。

2 智能钻井技术体系核心组成及挑战

智能钻井技术并非孤立的单项技术, 而是融合先进传感技术、数据传输技术、智能算法与自动化执行单元的综合技术体系。其核心构成可划分为以下三个层次。

【作者简介】艾波(1972—), 男, 中国四川内江人, 工程师, 从事钻井工程研究。

2.1 感知与测量层

该层次承担钻井过程与地层环境多维数据的实时采集功能，核心技术装备涵盖高精度随钻测量系统、随钻测井系统、随钻地震与地层压力测试技术。其中，高精度随钻测量系统可提供井斜、方位、工具面等几何参数，测量精度达 $\pm 0.1^\circ$ ，分辨率为 0.01° ，并同步采集近钻头振动、扭矩、压力等工程力学参数。随钻测井系统集成电阻率、伽马、密度、中子、声波等传感器阵列，可对地层岩性、物性、含油性及孔隙压力进行实时评价。当前主流先进系统的数据采样频率达10Hz，地层分辨率为0.1米。随钻地震与地层压力测试技术通过钻井振动或专用震源开展随钻地震成像，结合随钻压力测试技术实时更新地层孔隙压力与破裂压力剖面。

2.2 数据传输与决策层

该层次承担井下海量数据向地面的高速可靠传输功能，并依托智能算法开展实时数据分析与决策制定。在高速数据传输技术方面，通过采用电磁波遥测技术或改进型泥浆脉冲遥测技术。新一代高速泥浆脉冲遥测系统的传输速率已提升至40bps以上，可充分满足多参数实时上传需求^[1]。在智能决策中心部署于地面终端或云端服务器，集成数据融合平台与智能决策算法模块。其核心技术逻辑为运用机器学习算法与数字孪生技术，将实时采集数据与地质模型、力学模型进行耦合分析，实现井筒稳定性预测、钻头磨损状态诊断、最优钻井参数推荐及钻井风险预警等功能。

2.3 执行与控制层

该层次依据决策层输出的指令，通过自动或半自动控制模式调控井下作业工具，达成精准钻井作业目标。旋转导向系统可在不中断旋转钻进作业的前提下，通过可调式稳定器或指向式钻头结构，对井眼轨迹进行连续精准调控，其造斜率可控范围常规为 $0-15^\circ/30m$ 。自动钻井系统接收决策层下发的优化参数，借助顶驱、泵组等设备的自动控制回路，实现恒参数或变参数优化钻进作业。自适应井壁稳定工具包括当量循环密度自动调节系统、智能堵漏材料投放装置等，用于实时防控井壁失稳与漏失风险。

2.4 复杂构造地层对智能钻井提出的主要挑战

复杂构造地层的独特地质禀赋对上述技术体系各环节均形成严峻挑战。于断层破碎带、盐膏层塑性蠕变区域，井下振动剧烈且呈非规则性，致使MWD/LWD传感器采集信号的信噪比显著降低，甚至出现信号跳变与失真现象。现有基于常规地层建立的钻速预测模型与井壁稳定性模型，在复杂构造环境中精度显著衰减；地应力方向在短距离范围内易发生剧烈波动，导致基于初始地应力模型的轨迹优化与稳定性预测功能失效。在破碎性地层条件下，旋转导向系统的导向力传递效率衰减，轨迹控制精度降低，实际造斜率与设计值的偏差幅度可达30%。

3 面向复杂构造的智能钻井技术适应性改进方案

3.1 多源异构数据融合与抗干扰设计

引入基于深度学习的信号处理算法，构建面向强振动

噪声的随钻信号自适应滤波与重构模型^[2]。该模型借助长短期记忆网络学习噪声与有效信号的时空特征，在四川威远区块页岩气井现场试验中，使强振动环境下方位伽马信号的恢复率由65%提升至92%。部署近钻头多物理场融合测量短节，于钻头后方1.5米范围内集成声波传感器、微电阻率成像传感器及三轴应变传感器。基于声波速度差异时序数据、微电阻率图像各向异性特征及应变反演方法，实现对半径0.5米范围内地层裂缝产状与地应力方向的近实时辨识。现场应用结果显示，该技术可提前2-5米识别断层界面或裂缝发育带。发展分布式光纤声波传感与井筒成像技术，将光纤缆嵌入智能钻杆或套管结构，实现对全井筒长度范围内温度与声波振动信号的连续式、分布式测量。该技术能够捕捉钻井液漏失位置、套管外窜流等微弱物理信号，在荷兰格罗宁根气田应用于诱发地震活动监测，定位精度达米级水平。

3.2 基于机器学习的自适应实时优化与预警

构建“数字孪生-实时数据”双驱动自适应决策模型，建立涵盖区域地质构造、地应力场及岩石力学特性的高精度初始数字孪生模型。钻井作业过程中，基于实时随钻监测数据，例如机械钻速、扭矩、压力、成像数据等，借助在线机器学习算法，对孪生模型中关键不确定参数进行持续反向标定与动态更新。更新后的数字孪生模型用于超前模拟钻井作业过程，实现钻井参数优化与风险预警。研发基于时序模式识别的早期风险智能预警系统，摒弃传统单一参数超阈值报警模式，聚焦多参数，例如如扭矩、立压、返砂量、气体含量的时序协同变化模式分析。该系统借助卷积神经网络进行特征提取，可识别“小幅持续立压下降伴随返砂量减少”等表征裂缝性漏失起始阶段的微弱前兆模式。在塔里木盆地库车山前克深区块超深井现场应用中，实现重大漏失风险平均提前15分钟预警，预警准确率达85%。

3.3 高鲁棒性导向与自适应井控

研发强扰动环境下鲁棒自适应导向控制算法，针对导向力传递不确定性难题，将旋转导向系统的导向执行机构建模为含参数摄动与外部干扰的非线性系统。采用滑模变结构控制与模糊逻辑融合的设计方法，构建自适应控制器，使其对地层抗力变化具备强鲁棒性。准噶尔盆地南缘高泉背斜高陡构造的实钻数据表明，改进后系统在破碎地层中实际造斜率与设计值的平均偏差由28%缩减至9.5%。集成智能循环当量密度调控与实时堵漏系统，实现井下压力随钻测量、水力模型实时计算与地面自动节流管汇、智能堵漏材料加注装置的协同联动。该系统可依据实时ECD监测数据与漏失预警信息，在1-2个循环周期内自动调节泵排量与节流阀开度，并触发预定配方及粒径的堵漏材料加注流程。在南海东部莺歌海盆地某高温高压裂缝性气田的现场应用中，该系统使中等及以上级别漏失的处理时间平均缩短58%。

4 改进后智能钻井技术的效能提升分析

通过集成上述系统性改进方案，构建的“增强型智能钻井系统”已在多个复杂构造区块开展规模化先导性试验。

以S省盆地龙门山前带某超深层页岩气区块——XY区块10口井的对比试验数据为依托，对系统效能提升效果进行详细分析：对照组为5口采用改进前常规智能钻井技术的邻井，试验组为5口应用增强型智能钻井系统改进后的试验井。

4.1 钻井效率显著提升

改进后对数据进行分析，XY区块智能钻井技术改进前后主要指标对比如表1所示。机械钻速得到提升，其核心驱动因素为自适应决策模型输出的实时最优钻压转速组合，以及鲁棒导向控制技术降低了因轨迹纠偏导致的非生产性滑动钻进时长^[4]。在水平段施工中，机械钻速从12.1m/h提升至15.8m/h。优化了轨迹控制精度，近钻头测量技术与鲁棒导向控制的协同作用，实现系统对地层变化的超前感知及轨迹调整指令的高精度执行，有效保障了优质储层钻遇率。显著减少了复杂事故，早期风险预警系统与智能井控系统的联动运行，将漏失、卡钻等主要井下复杂事故的处置模式从“事后处理”转变为“事前预防”与“事中快速处置”相结合的防控体系，大幅压缩了事故处置时长。其中，井漏类复杂情况时间占比从7.2%降至1.8%。优化了综合钻井成本，钻井周期缩短与材料消耗减量，直接转化为显著的经济效益。初步测算，该区块单井综合钻井成本降幅约为15%-20%。

表1 XY区块智能钻井技术改进前后主要指标对比

评估指标	改进前(5口井均值)	改进后(5口井均值)	提升幅度
平均机械钻速(m/h)	8.7	10.95	+25.8%
井眼轨迹控制精度	靶心距平均8.5m	靶心距平均5.1m	+40.0%
复杂事故时效(%)	12.4%	4.03%	-67.5%
平均单井钻井周期(d)	78.5	64.2	-18.2%
钻井液漏失量(m ³ /井)	1250	580	-53.6%
优质储层钻遇率(%)	82.3%	95.6%	+13.3个百分点

4.2 安全与地质认知能力增强

基于时序模式识别的智能预警系统，在XY区块试验井中累计触发17次有效预警信号，涵盖9次井漏前兆信号、5次钻具失效风险前兆及3次气侵早期信号，所有预警均得到及时响应与处置，有效规避了事故升级风险。以X-2井为例，系统提前18分钟预警钻具托压加剧态势，现场技术人员及时优化钻井参数，成功规避一起潜在卡钻事故。多源近钻头融合测量技术的应用，使地质工程技术人员可实时获取高分辨率地层成像数据与裂缝发育信息。X-3井钻井作业期间，系统提前3米识别出一厚度仅0.8米的关键优质小层，随即启动轨迹调整流程，确保该小层被全程钻穿，经测试该小层产量贡献率达30%。这一成效主要得益于近钻头电阻率成像技术所具备的厘米级分辨率地层界面识别能力。

4.3 技术集成与协同效应可视化

下图呈现了改进后的增强型智能钻井系统在复杂构造地层工况下，核心技术与数据流的协同运行机制，构建了“感

知-决策-执行-优化”的增强型闭环体系。该图系统展现了增强型智能钻井体系的完整工作流程。

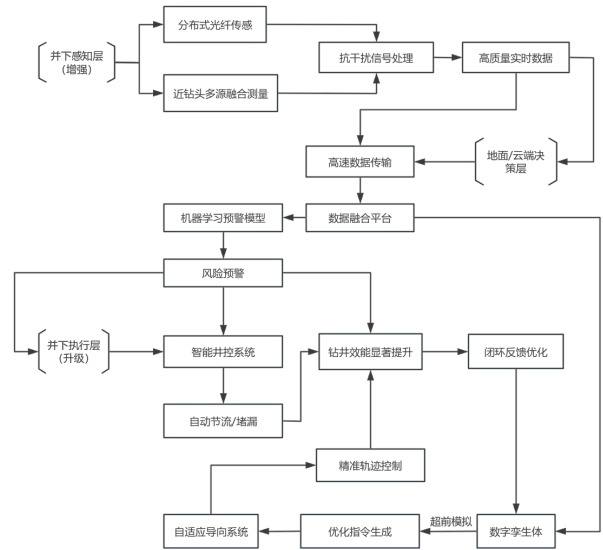


图1 增强型智能钻井系统集成架构与闭环工作流程示意图

5 结语

面对复杂构造地层带来的严峻钻井技术挑战，本文对智能钻井技术感知层、决策层、执行层的系统性适应性进行优化，成功研发了一套增强型智能钻井技术体系。通过聚焦于提升数据抗干扰处理与多源融合能力、引入机器学习驱动自适应实时决策机制、以及增强执行机构的鲁棒性与动态响应速率。S省盆地XY区块的现场应用实践验证，该技术体系可有效抵御复杂地层的不确定性干扰，实现钻井作业效率、井眼轨迹控制精度的全方位提升，综合技术经济效益突出。实践表明，以实时数据驱动与智能算法为核心的技术优化路径，是充分释放智能钻井技术潜力、破解复杂构造钻井技术瓶颈的关键举措。未来，随着井下边缘计算能力的提升与人工智能模型的迭代升级，智能钻井技术有望实现更深层次的自主优化与全流程闭环控制，为全球复杂油气资源的高效开发提供更为强劲的技术支撑。

参考文献

- [1] 徐志远,罗青桂,唐山.智能钻井技术现状与发展趋势探讨[J].石化技术,2025,32(09):192-194.
- [2] 孙虎,郭阳,张媛,等.智能化钻井完井技术研究与工程实践[J].钻采工艺,2025,48(01):46-54.
- [3] 苏延鹤.智能钻井液监测技术研究现状及发展趋势[J].西部资源,2024,(02):62-66.DOI:10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2024.02.011.
- [4] 苏延鹤.智能钻井液监测技术研究现状及发展趋势[J].西部资源,2024,(02):62-66.DOI:10.16631/j.cnki.cn15-1331/p.2024.02.011.