

智能化技术在石油钻井经济成本控制中的应用与效果研究

杨志军（中国石油集团西部钻探工程有限公司玉门钻井分公司，陕西 西安 710021）

摘要：随着能源行业数字化转型的深入推进，文章以智能化技术在石油钻井经济成本控制中的应用为研究对象，深入分析大数据、人工智能、数字孪生、机器学习等新兴技术在钻井效率提升、资源合理配置及风险预测方面价值，提出从钻井参数实时优化、轨迹智能规划到全程监控系统应用方法，旨在构建数据驱动的钻井决策体系，进而降低综合成本、缩短钻井周期、提升安全环保指标，推动石油钻井向精准化、智能化方向发展的智能技术与传统钻井工艺的融合成为行业焦点。

关键词：智能化技术；石油钻井；经济成本控制

中图分类号：TE28

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）030-0076-03

Application and Effect Research of Intelligent Technology in Economic Cost Control of Petroleum Drilling

Yang Zhijun (China Petroleum Western Drilling Engineering Co., Ltd. Yumen Drilling Branch, Xi'an Shaanxi 710021, China)

Abstract: With the deepening of digital transformation in the energy industry, this article takes the application of intelligent technology in the economic cost control of oil drilling as the research object. It deeply analyzes the value of emerging technologies such as big data, artificial intelligence, digital twins, and machine learning in improving drilling efficiency, rational allocation of resources, and risk prediction. It proposes a method for real-time optimization of drilling parameters, intelligent trajectory planning, and full process monitoring system application, aiming to build a data-driven drilling decision-making system, thereby reducing comprehensive costs, shortening drilling cycles, improving safety and environmental protection indicators, and promoting the integration of intelligent technology and traditional drilling processes in the direction of precision and intelligence development of oil drilling, which has become the focus of the industry.

Keywords: intelligent technology; Oil drilling; Economic cost control

在全球能源需求持续增长与油价波动的双重压力下，面临降本增效严峻挑战的石油企业，因传统钻井技术依赖经验判断，难以应对复杂地质条件下精准作业需求，致使钻井周期延长、资源浪费和安全风险增加；而随着大数据、人工智能等新一代信息技术迅猛发展，为石油行业提供全新成本控制思路的智能化钻井，其在钻井中应用的研究，对提升作业效率、降低资源消耗、保障安全生产具有重要实践意义。

1 智能化技术在石油钻井经济成本控制中的应用价值

1.1 有利于钻井效率提升与优化

智能化技术通过构建钻井过程实时数据监测网络，整合钻压、转速、泥浆性能等关键参数并借助AI算法进行动态分析，能够精准识别传统钻井中因参数匹配不合理导致的低效工况，及时调整作业方案以减少无效钻进时间，同时依托数字化钻井模型提前模拟不同地质条件下的最优作业路径，避免反复试钻造成的效率损耗，为石油钻井经济成本控制提供效率支撑^[1]。

1.2 有利于资源配置合理化管理

依托物联网与大数据技术搭建的石油钻井资源管

理平台，可实时追踪钻机设备、钻具耗材、作业人员等各类资源的使用状态与分布情况，通过构建多维度资源需求预测模型，结合钻井工程进度计划自动匹配资源供给，避免因资源储备过量导致的闲置浪费或资源短缺引发的工期延误，同时通过资源使用效率数据分析优化资源调度方案，实现资源利用效率最大化与成本最小化的平衡。

1.3 有利于风险预测与成本降低

智能化技术通过整合石油钻井历史事故数据与实时工况参数，构建AI风险识别与预警模型，能够提前识别井涌、卡钻、井壁坍塌等潜在安全风险，在风险萌芽阶段发出预警并给出针对性干预方案，避免事故发生后高额的抢险修复成本与工期延误损失，同时将风险管控从事后处理转向事前预防，显著降低因风险事件引发的额外经济成本，强化石油钻井经济成本控制的风险抵御能力。

2 智能化技术在石油钻井经济成本控制中的应用要点

2.1 大数据驱动钻井参数实时优化

通过对钻井过程中每分钟可产生高达3.2GB且涵

盖钻压、转速、泥浆流量等 84 个关键参数的实时数据流进行深度分析与处理, 大数据技术为钻井参数优化构建了数据驱动的决策支持系统, 这些海量数据经由边缘计算单元初步过滤与压缩后传输至数据中心; 智能钻井系统采用多变量协同优化模型持续分析参数相关性, 根据不同地层特性建立参数响应曲线库, 为不同钻井阶段提供最佳参数组合建议, 其核心部分集成了以地质参数与钻井工况作为输入、输出最优钻井参数组合且基于历史钻井数据训练的神经网络模型^[2]。钻井参数优化系统采用如下钻速优化模型计算最佳参数组合:

$$ROP = K \cdot WOB^a \cdot RPM^b \cdot \frac{1000}{UCS^c} \cdot \frac{HSI^d}{MW^e}$$

其中,

ROP 表示机械钻速,

WOB 为钻压,

UCS 为岩石单轴抗压强度,

HSI 为液压功率指数,

MW 为泥浆密度,

K 与 a 、 b 、 c 、 d 、 e 为拟合系数。

通过闭环控制方式不断对比实际钻进效果与预测值差异并持续调整模型参数以确保优化建议始终适应当前地层条件与钻具状态来实现钻井效率与钻具寿命动态平衡的钻井参数优化系统。

2.2 人工智能辅助钻井轨迹规划

在钻井轨迹规划中, 结合引入智能决策机制打破传统经验驱动规划局限的人工智能, 基于深度强化学习构建且能整合 16TB 地震数据与 352 口历史井数据、建立精度达 $5 \times 5 \times 0.5\text{m}$ 地下构造模型的智能轨迹规划系统, 其核心算法采用改进的蒙特卡洛树搜索方法, 在三维空间内探索可能钻井路径时同时考虑地质安全边界、工程技术约束与经济目标函数, 在轨迹规划过程中, AI 系统能识别包括断层、高压流体带与不稳定地层的地质异常体与高风险区域, 并自动生成多条候选轨迹且进行风险评分。关键技术点在于智能系统采用动态规划方法将钻井轨迹划分为多个决策节点并在每个节点处依据实时获取的地质信息与钻井反馈动态调整后续轨迹以实现闭环优化, 且轨迹规划系统与旋转导向工具深度集成建立从规划到执行的无缝连接使轨迹控制精度可达 0.38 度从而大幅提升复杂地质条件下定向井实施精度, 以及人工智能轨迹规划技术使复杂构造区块的井眼轨迹设计从传统经验判断转变为数据驱动的精确规划为钻井工程提供更可靠与经济的技术路径^[3]。

2.3 数字孪生技术构建钻井模型

通过构建整合了地质模型、钻井设备参数与动力

学仿真以形成完整虚拟钻井系统, 且基于多尺度融合方法构建, 包含宏观地质结构与微观钻井动力学, 空间分辨率可达 0.1m、时间精度为 1ms, 使工程师能在虚拟环境观察细微钻井行为, 并采用分层设计, 底层为地质建模模块、中层为钻井动力学仿真引擎、顶层为无人机交互与决策支持界面的高保真虚拟钻井系统, 数字孪生技术为钻井工程决策提供全面的仿真支持环境, 实现钻井全过程的可视化与预演。钻井过程的实时动力学模拟主要通过以下离散元方法计算钻头—岩石相互作用:

$$F_i = \sum_{j=1}^n (K_n \delta_{nij} \vec{n}_{ij} + K_s \delta_{sij} \vec{s}_{ij}) - \eta_i \vec{v}_i$$

该公式中,

F_i 表示作用于岩石颗粒 i 上的合力,

K_n 与 K_s 分别为法向与切向刚度系数,

δ_{nij} 与 δ_{sij} 为颗粒 i 与 j 间的法向与切向位移,

\vec{n}_{ij} 与 \vec{s}_{ij} 为对应的单位向量[→],

η_i 为阻尼系数,

\vec{v}_i 为颗粒速度。

数字孪生模型能够模拟钻井过程中的关键物理现象, 如钻具振动、井壁失稳、流体冲刷等, 为工程师提供直观的风险预警。

2.4 机器学习预测钻井故障概率

通过对设备运行状态与环境条件实时分析以识别潜在故障征兆, 从而为钻井过程提供前瞻性风险管理能力的机器学习技术, 以及采用深度学习与时序分析方法处理来自 62 个关键测点包括振动谱、电机电流、温度变化等多维参数的连续监测数据且已积累超过 24,000h 设备运行记录作为训练基础的预测性维护系统, 其核心算法结合长短期记忆网络 (LSTM) 与卷积神经网络 (CNN), 能够同时捕捉参数的时序变化特征与多参数间的相关模式以形成全面的设备健康评估^[4]。

采用增量学习方法且能不断吸收新的故障案例与运行数据以优化预测模型准确性与适用范围的机器学习系统, 其技术架构含数据采集层、特征提取层、模型训练层与预测决策层并通过边缘计算实现实时处理能力, 且故障预测结果以风险热图形式呈现来直观显示各设备组件健康状态与预计故障时间以为维护决策提供量化依据。

2.5 智能传感网络实现全程监控

通过分布式传感器构建钻井作业神经系统并实现钻井过程全方位实时监控的智能传感网络, 由 178 个高精度传感器组成部署于现代钻井平台的传感网络,

形成多层级监测体系覆盖从地面设备到井下工具的完整钻井系统；采用硅基 MEMS 技术与光纤分布式感测技术的核心传感器，在高温高压环境下保持稳定工作，温度耐受范围达 -40°C 至 175°C 、压力耐受达 120MPa；通过脉冲泥浆遥测技术的井下测量系统，实现数据传输速率达 12bits/s，解决深井条件下信息获取难题。

依托改进的电磁波传输系统实现地面与井下双向数据通信，即使在金属套管环境中也能保持信号质量稳定，通信可靠性达 99.3%。采用三层设计的智能传感网络数据处理架构，其中传感器节点层负责原始数据采集与初步过滤，边缘计算层执行近实时数据融合与异常检测，云平台层进行深度分析与可视化展示。通过无线自组织网络实现传感器之间连接，网络拓扑能根据工况自动调整，确保在节点失效情况下维持系统完整性。核心监测内容涵盖钻机运行参数、井筒环境、岩石特性、钻具状态等关键信息，这些数据经可视化平台直观呈现，为钻井工程师提供全面工况感知能力以辅助钻井决策制定与调整。

2.6 区块链技术优化供应链管理

区块链技术采用 HyperledgerFabric 联盟链架构，联合钻井物资供应商（如贝克休斯、宝钢股份）、物流商（如中远海运）、油田甲方（如中石油西部钻探）搭建分布式账本系统，实现钻杆、钻井液、钻头等关键物资从生产、运输、入库到使用的全生命周期溯源。系统通过智能合约预设物资质量标准（如钻杆屈服强度 $\geq 800\text{MPa}$ 、钻头使用寿命 $\geq 200\text{h}$ ），物资到货后自动比对检测数据与合约标准，达标后触发自动付款流程，未达标则启动责任追溯机制。在某页岩气田应用中，该技术通过链上调取供应商历史资质记录完成资质审核，省去重复提交纸质材料的流程；通过智能合约自动执行采购订单，实现订单状态的实时同步^[5]。系统采用哈希算法对物资流转数据加密，每个区块包含前一区块的哈希值以确保数据不可篡改。

3 智能化技术在石油钻井经济成本控制中的应用效果

某西北油田于 2023 年在复杂地质条件下实施的深层气藏开发项目中，全面应用了智能钻井系统和大数据分析技术，通过集成实时钻井参数监测、智能决策支持系统和自动化钻井设备，项目取得了显著的经济效益和技术突破，为行业智能化转型提供了有力支撑。

3.1 钻井周期显著缩短

该西北油田深层气藏项目 12 口平均井深超 5000m 的深井，传统钻井模式下因需反复适配复杂地层调整参数，单井平均周期需 68 天，依托集成的实时钻井

参数监测系统与智能决策支持平台，可动态匹配钻压、转速与泥浆性能，减少因地质判断滞后导致的无效钻进与起下钻次数，单井平均周期缩短至 45 天，较传统模式每口井节省 23 天，大幅提升项目整体推进效率。

3.2 综合成本大幅降低

该项目借助智能钻井系统对资源的精准调控，单井设备租赁费用因周期缩短减少 18 万元，钻头、钻井液等耗材因参数优化降低损耗，单井耗材成本节省 25 万元，同时自动化钻井设备减少 3 名现场操作人力，单井人工成本降低 9 万元，12 口井累计实现综合成本降低 768 万元，直接体现智能化技术对钻井经济成本的控制价值。

3.3 安全环保指标明显提升

该项目实施前同类深井易因地层压力突变引发井涌风险，且钻井废液处理不彻底，应用智能系统后通过实时压力监测提前规避 6 次潜在安全隐患，实现 12 口井零安全事故，同时智能废液处理模块将钻井废液回收利用率提升至 92%，单井减少废液外排 150m³，安全环保表现优于行业平均水平。

4 结束语

综上所述，智能化技术以数据驱动决策、智能预测风险、优化资源配置等方式对石油钻井经济效益和安全水平的显著提升，以及实际项目应用中智能钻井系统对钻井周期的有效缩短、综合成本的降低、安全环保指标的提升，表明未来需通过加强智能钻井标准体系建设、深化跨学科技融合，推动量子计算、边缘智能等前沿技术在钻井领域创新应用，并注重培养复合型人才，构建更智能、高效、安全、绿色石油钻井新模式，以全面提升油气资源开发的经济性和可持续性。

参考文献：

- [1] 葛宪勇. 自动化与智能化钻井技术应用探讨 [J]. 西部探矿工程, 2024, 36(7):65-67.
- [2] 李忠明. 探究石油钻井技术智能化发展 [J]. 电子乐园, 2021(2):0323-0323.
- [3] 刘显锋. 智能化石油钻井技术发展思考 [J]. 电子工程学院学报, 2019, 8(9):1.
- [4] 曹建. 石油钻井自动化智能化新技术研究 [J]. 石化技术, 2019, 26(2):1.
- [5] 万康, 马志超, 郭青松, 等. 人工智能技术在石油钻井工程事故预警中的应用 [J]. 录井工程, 2022, 33(2):6.

作者简介：

杨志军 (1980-) 男，汉族，甘肃张掖人，本科，助工，研究方向：钻井工程。