

石油钻井数字化管理对作业效率与经济效益的提升研究

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: 随着石油勘探开发向复杂地质条件拓展, 本研究探讨石油钻井数字化管理对作业效率与经济效益的提升作用。研究通过分析物联网、大数据、人工智能和自动化控制四大关键技术 in 钻井领域的应用, 系统考察了数字化管理在优化钻井设计流程、提升设备运行效率和提高作业协同效率方面的具体表现, 构建多维度量化模型评估其经济效益。研究表明, 数字化管理能显著缩短钻井周期、降低设备维修与原材料成本、提高储层钻遇率和油田采收率, 实现钻井作业降本增效。

关键词: 石油钻井; 数字化管理; 物联网技术; 人工智能; 经济效益

中图分类号: TE28 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 030-0040-03

Research on the improvement of operational efficiency and economic benefits through digital management of petroleum drilling

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

Abstract: With the expansion of petroleum exploration and development towards complex geological conditions, this study explores the role of digital management in petroleum drilling in improving operational efficiency and economic benefits. The study analyzed the application of four key technologies, namely the Internet of Things, big data, artificial intelligence, and automation control, in the field of drilling. It systematically examined the specific performance of digital management in optimizing drilling design processes, improving equipment operation efficiency, and enhancing operational collaboration efficiency. A multidimensional quantitative model was constructed to evaluate its economic benefits. Research has shown that digital management can significantly shorten drilling cycles, reduce equipment maintenance and raw material costs, improve reservoir drilling encounter rates and oilfield recovery rates, and achieve cost reduction and efficiency improvement in drilling operations.

Keywords: oil drilling; Digital management; Internet of Things technology; artificial intelligence; economic benefits

全球能源需求持续增长与常规油气资源递减的双重压力下, 石油行业正面临深层、超深层复杂地质条件下的勘探开发挑战。传统钻井模式依赖经验判断, 在成本控制、安全管理和效率提升方面日益捉襟见肘。数字化转型成为石油钻井领域突破瓶颈的关键路径, 国内外油企纷纷加大智能化钻机研发与部署力度。数字化管理有望重塑钻井作业流程, 构建以数据驱动的智能决策体系, 实现降本提质增效, 为油气田高质量开发提供有力支撑。

1 石油钻井数字化管理的关键技术

1.1 物联网技术

物联网技术借由各类传感器, 构建起石油钻井设备与作业环境间的紧密感知网络, 实现对钻压、扭矩、泵压等关键设备运行参数, 以及硫化氢、可燃气体浓度等环境要素的实时采集。在数据传输环节, 工业级无线 Mesh 网络、卫星通信或 5G 专网各施其职, 将井场采集的数据精准、高效地传送到监控中心, 达成远程实时监控。同时, 边缘计算节点被引入, 在本地对海量原始数据进行初步筛选与处理, 极大减轻数据传输压力, 且能针对异常情况做出快速响应, 为钻井作业的安全、稳定运行提供坚实保障, 有效提升设备管

理的精细化程度与故障预警的及时性。

1.2 大数据技术

聚焦于石油钻井领域多源、海量、异构数据 (涵盖地质勘探、设备运行、施工过程及历史案例等多维度数据) 处理的大数据技术, 通过搭建分布式存储架构实现对数据的高效存储; 在分析阶段运用先进的数据挖掘算法与机器学习模型从繁杂数据中深度挖掘有价值的信息, 一方面依据实时钻进数据动态调整钻压、转速等参数以优化破岩过程、提升钻井效率, 另一方面基于历史数据构建预测模型精准识别井漏、井涌等井下复杂情况的早期迹象, 辅助工程人员提前制定应对策略, 达到降低非生产时间、节约作业成本, 助力钻井作业降本增效的目的^[1]。

1.3 人工智能技术

机器学习模型基于大量历史数据与实时监测数据, 对钻井设备故障进行智能诊断, 通过分析设备运行参数的波动趋势与特征模式, 精准定位潜在故障隐患, 提前规划设备维护, 减少突发故障带来的停机损失。深度学习算法则在图像、视频处理领域表现出色, 可对井下作业视频图像进行智能分析, 精确判断钻头磨损状态、地层岩性变化等关键信息。此外, 人工智

能还能基于地质条件、钻井目标等多元因素，自动生成并动态优化钻井方案，实现钻井作业的智能化、自动化控制，推动钻井作业向智能化方向迈进。

1.4 自动化控制技术

在钻井设备端，自动化顶驱、自动送钻装置等能精准调控钻具旋转与钻进速度，确保钻进过程平稳、高效；自动化管柱处理系统可自动完成钻杆装卸、排放等重复性工作，减轻工人劳动强度，提升作业安全性。同时，借助传感器反馈与控制系统的协同运作，实现对钻井流程的自动化闭环控制，如依据预设参数自动调节泥浆泵流量、压力，维持井内压力稳定，保障钻井作业在复杂工况下安全、有序开展，全面提升钻井作业的自动化水平。

2 石油钻井数字化管理对作业效率的提升分析

2.1 优化钻井设计流程

数字化技术通过整合地震、测井、地质勘探等多源数据，运用高性能计算与复杂算法赋能地质建模，构建出对地层结构、岩石力学特性及地质构造等关键信息呈现极为精准且为钻井设计提供坚实数据根基的精细度极高的三维地质模型，在构建过程中以直观可视化方式展现不同深度地层的岩性分布，帮助设计人员清晰洞察断层、裂缝发育带等潜在复杂地质区域，从而提前规划合理井眼轨迹有效规避地质风险。

利用专业模拟软件输入地质模型数据及钻井设备性能参数后，通过对破岩效率、钻头磨损、井壁稳定性等多方面因素综合分析并运用智能算法不断迭代优化，可模拟不同钻井参数组合下的钻进过程并自动生成最优参数方案；在模拟过程中实时呈现钻压、转速、泵压等参数动态变化对钻井进程的影响，据此设计人员深入分析各参数间耦合关系进一步微调方案，以确保钻井作业在高效破岩时最大程度降低设备损耗与井下复杂情况发生概率，显著提升钻井设计的科学性与精准度。

2.2 提升钻井设备运行效率

在井场，各类传感器被密集部署于泵阀、轴承、电机等钻井设备关键部位，实时采集设备运行的振动、温度、压力等关键参数，采集到的数据通过无线传输网络不间断地被传送到数据处理中心，在这运用大数据分析技术和机器学习算法对海量实时数据进行深度挖掘与分析，通过建立设备运行正常参数模型，一旦实时数据偏离正常阈值系统便迅速捕捉异常信号第一时间发出故障预警，如监测到泥浆泵轴承温度短时间内异常攀升时，算法模型能快速判断可能存在的轴承磨损或润滑问题并即刻通知维护人员，将潜在故障扼杀在萌芽状态极大减少设备突发故障导致的停机时间。

2.3 提高钻井作业协同效率

借助数字化信息平台，地质、钻井、泥浆、设备等多部门的数据实现集中汇聚与整合。地质部门将勘探获取的地层结构、岩性特征等数据实时上传至平台，钻井部门则同步更新钻进深度、钻压、转速等施工数据，泥浆部门上传泥浆性能参数，设备部门反馈设备运行状态信息^[3]。各部门人员可通过平台的可视化界面，随时调取所需数据，打破信息壁垒。例如，当钻井过程中遇到地层变化，地质人员能迅速依据实时钻进数据，结合自身掌握的地质信息，为钻井工程师提供调整钻进策略的建议，钻井工程师随即依据建议，联合泥浆与设备人员，调整泥浆配方与设备参数，实现各部门间高效协作，及时应对复杂工况。

在自动化层面，借助自动化控制技术，钻井设备间实现联动配合。如自动送钻装置依据预设参数与实时钻进情况，自动调整钻具下放速度，与顶驱的旋转作业精准匹配，减少人工操作衔接的时间损耗。智能化协同方面，人工智能算法依据各环节实时数据，对作业流程进行动态优化。当监测到井下复杂情况，如井漏迹象初现时，系统自动触发应急预案，智能调度泥浆泵调整泵压，指挥固控设备准备堵漏材料，同时向相关人员发送预警信息。各环节设备与人员依据系统指令协同行动，极大缩短应对复杂情况的反应时间，避免问题恶化，保障钻井作业高效、连续进行，全方位提升钻井作业的协同效率。

2.4 作业效率提升的量化分析

从钻井周期、机械钻速、设备利用率、非生产时间占比等多维度出发，精准定义各指标计算方式。钻井周期以从开钻到完钻的总时长计量，直观反映作业整体效率；机械钻速通过钻进进尺与纯钻进时间的比值算出，体现钻头破岩效率。设备利用率依据设备实际运行时长与计划运行时长的比例确定，反映设备使用充分程度；非生产时间占比则是将诸如设备维修、等待物资等非钻进作业时间，与总作业时间相比，凸显作业流程中的低效环节。各指标相互关联又独立存在，全面勾勒出钻井作业效率的面貌。

在数据收集与分析环节，运用多元渠道采集数据。井场传感器实时捕获设备运行参数、钻进数据；作业记录详细登记各环节起止时间、人员操作情况；历史项目数据库提供过往类似工况下的作业数据作对比。利用统计学方法对收集数据清洗、整理，剔除异常值。借助相关性分析，探究不同因素与作业效率指标间的关联，如分析泥浆性能参数与机械钻速的关系；采用回归分析，构建数学模型预测作业效率，如依据设备运行状态、地质条件等变量预测钻井周期。通过这些量化手段，深度挖掘数据价值，精准衡量数字化管理对作业效率的提升

成效,为持续优化作业流程提供科学依据。

3 石油钻井数字化管理对经济效益的影响分析

3.1 降低钻井成本

借助设备健康状态的动态预测实现的数字化管理,对设备维修成本进行大幅压缩。部署于钻井设备关键部件的传感器,持续采集诸如振动频率、温度波动以及油压变化等运行数据。这些经边缘计算节点初步处理过的数据,会传输至数据中心。基于历史故障数据库与实时参数的人工智能算法,构建起设备健康度评估模型,能够精准预测像轴承、泵阀这类易损部件的剩余使用寿命。如此一来,既避免了传统定期维护中因过度维修而导致的备件浪费,又提前规避了突发故障所造成的高额紧急维修费用,从而使得设备维修成本平均得以降低^[4]。

数字化管理通过钻进过程参数动态优化、大数据平台整合地质分层数据、钻头磨损数据与实时钻进参数并经多变量耦合分析确定不同地层对应最优钻压、转速与泥浆排量组合,以及在钻进至岩性突变层段时系统自动调整泥浆密度与粘度避免井壁坍塌风险减少泥浆材料额外消耗、优化钻头切削参数降低钻头磨损速率延长单只钻头进尺量减少钻头更换频次等方式,减少原材料消耗成本与钻井耗材成本。

3.2 增加石油产量

数字化管理凭借精准的储层识别以及井眼轨迹的优化,达成提升钻井成功率、增加产量的目标。地震数据处理系统与测井数据相结合,构建出三维可视化的储层模型,该模型能清晰呈现储层厚度、孔隙度、渗透率等关键参数的空间分布情况,进而精准锁定优质的储层区域。在钻井过程中,随钻测量技术实时传输井眼轨迹的数据,将其与预设的储层靶区进行动态比对,智能调整导向工具的参数,以此确保井眼始终穿行于储层的核心区域,避免出现传统钻井中因轨迹偏差而错失优质储层的问题,最终实现储层钻遇率的提升以及单井有效产油段长度的显著增加。

数字化管理通过油藏动态监测与开采方案优化,借助部署在油藏内部的光纤传感器与压力监测设备实时采集油藏压力、流体流向、剩余油分布等数据,并经大数据分析平台对这些数据进行动态解析以识别油藏开发过程中的低效区域与剩余油富集区,进而基于分析结果智能调整注采参数(如优化注水井的注水压力与流量)来改善水驱开发效果、推动剩余油向生产井流动,同时针对剩余油富集区制定加密井部署方案以进一步挖掘油藏潜力,最终实现提高采收率增加产量、提升油田采收率。

3.3 经济效益提升的综合评估

多维度量化模型先构建以单井生命周期为测算周

期、纳入钻井设备折旧、耗材采购、人工薪酬等成本项且计入原油产量、销售价格、税费等收益项,通过“单井净收益=(原油产量×销售价格-税费)-(设备成本+耗材成本+人工成本)”的核心公式,将成本降低与产量增加转化为可测算的经济指标,实现经济效益提升的综合评估及精准核算;在数据输入环节,系统自动抓取数字化管理产生的实时成本数据与产量数据,避免人工统计误差,确保核算结果的客观性与时效性^[5]。

综合评估通过引入动态效益对比机制以强化评估结果的参考价值,即选取数字化管理实施前相同区块、相似井型的历史数据作为基准组,并与实施后的实时数据组成对比组,从单井净收益、投资回报率、成本收益率三个核心维度进行纵向对比,同时引入行业平均水平作为横向参照以分析目标井在行业中的效益排名变化,进而通过纵向与横向双重对比清晰呈现数字化管理对经济效益的提升幅度,为企业后续数字化投入决策提供数据支撑及为行业内经济效益评估提供标准化思路。

4 结语

本研究通过系统剖析石油钻井数字化管理的技术体系与实施效果,揭示数字化转型对钻井全流程的深度变革,构建数据驱动的智能决策模式,实现从被动响应到主动预测的管理范式转变,在提质增效方面取得显著成果,指出数字化管理不仅是技术工具的更迭,更是思维方式与组织结构的重塑,推动钻井作业向“少人化、智能化、集成化”方向演进,并建议未来研究聚焦数字孪生技术在复杂地质条件下的应用与验证,进一步拓展数字化管理的深度与广度。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 石油工程作业智能支持中心系统建设与实施[J].中国石油企业,2025,(01):77-80.
- [3] 崔奕,汪海阁,丁燕,等.碳中和愿景下油气钻井的数字化、智能化转型之路[J].石油钻采工艺,2022,44(06):769-776.
- [4] 贺会群,张行,巴莎,等.我国油气工程技术装备智能化和智能制造的探索与实践[J].石油机械,2024,52(6):1-11.
- [5] 李晓明,范玉岳,苏兴华,等.基于大数据分析技术的钻井提效实践研究[J].电脑知识与技术,2023,19(9):66-68.

作者简介:

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