

石油钻井机械智能化改造实践路径研究

李春啸

中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司, 中国·陕西 西安 710018

摘要: 针对我国石油钻井机械存量设备多、智能化改造碎片化、数据孤岛突出等现实问题, 本文对钻井机械智能化改造的发展现状及应用价值进行梳理, 分析老旧硬件适配差、软件兼容性差、核心技术短板、复合型人才缺乏等主要问题, 从硬件模块化升级、软件平台一体化建设、全系统协同集成、智能运维体系革新等角度提出智能化改造的实践路径, 提出分阶段梯度推进的方式。从工程实践中可以看出, 此种途径可以明显提高钻井作业速度, 并且可以加强安全风险控制。研究可以给国内油田钻井装备智能化升级和油气行业数字化转型提供实践上的借鉴。

关键词: 石油钻井机械; 智能化改造; 钻井工程

Research on Practical Implementation Paths for Intelligent Upgrading of Petroleum Drilling Machinery

Li Chunxiao

China National Petroleum Corporation Sichuan Qingyun Drilling Engineering Co., Ltd. – Changqing Drilling Corporation, China Shaanxi Xi'an 710018

Abstract: Addressing practical challenges faced by China's petroleum drilling machinery sector—such as the large inventory of existing equipment, the fragmented nature of intelligent transformation initiatives, and prominent data silos—this paper examines the current state and application value of intelligent transformation in drilling machinery. It analyzes key challenges—including inadequate compatibility of legacy hardware, poor software interoperability, gaps in core technologies, and a shortage of versatile talent—and proposes practical implementation pathways for intelligent transformation through approaches such as hardware modularization upgrades, integrated software platform development, full-system collaborative integration, and innovation in intelligent operation and maintenance (O&M) systems, advocating a phased, stepwise implementation strategy. Engineering practice demonstrates that this approach can significantly enhance drilling operation efficiency while strengthening safety risk management. This study provides actionable insights for the intelligent upgrading of drilling equipment in domestic oilfields as well as for the digital transformation of the oil and gas industry.

Keywords: Petroleum drilling machinery; Intelligent upgrade; Drilling engineering

0 引言

近几年来, 国内各大石油企业开始着手对钻井装备进行智能化改造, 陆续投入了智能钻机、自动化管柱作业设备、随钻智能监测系统等新型装备, 但是改造过程中存在硬件改造碎片化、软件系统不兼容、数据孤岛严重、成套化改造体系缺失等问题, 大部分钻井场景仍然处在半自动化作业阶段, 智能化改造落地效果良莠不齐。因此, 本文以石油钻井机械作业特点和行业发展现状为基础, 对智能化改造存在的问题进行梳理, 提出系统的、可以落实的智能化改造实践路径, 确定改造的重点、实施步骤和应用场景, 为石油钻井机械智能化规模化改造提供实践基础。

1 石油钻井机械智能化改造现状与核心价值

1.1 行业改造发展现状

目前, 国外石油钻井智能化技术已经形成了规模化应

用体系, 斯伦贝谢、哈里伯顿等国际企业已经实现了随钻智能感知、钻井参数自适应优化、设备故障自诊断、井下闭环控制等核心技术的落地, 构建起了一套一体化智能钻井作业体系, 钻井作业的自动化、智能化水平处于行业领先水平。国内智能钻井改造起步较晚, 但是发展速度很快, 中石化、中石油、中海油等龙头企业陆续开展钻井机械智能化升级试点, 自主研发的自动化钻机、旋转导向系统、钻井大数据管控平台逐步进入现场使用, 浅层常规钻井场景实现了管柱自动化作业、钻井参数实时监测等基础智能化功能^[1]。

但是就整体而言, 我国石油钻井机械智能化改造还处在初级阶段, 存在着明显的不均衡发展问题。一方面新建钻井设备智能化配置参差不齐, 老旧存量设备占比较高, 大多数服役时间超过十年的传统钻机只能完成基本的机械

操作,没有智能感知、数据传输和自动控制的功能,改造难度大;另一方面,智能化改造大多只针对单个设备进行升级,缺少井上井下、设备与系统、作业与运维一体化的集成方案,数据互通性差,智能决策能力弱,不能发挥出智能化改造的提质增效作用。

1.2 智能化改造核心价值

可以提高钻井作业的效率,降低开发成本。传统的钻井作业依靠人工的经验来控制参数,反应迟缓、精确度不高,容易造成钻进偏差、重复作业等问题。智能化改造可以实现钻井参数的实时采集、智能分析、自主优化,配合自动化管柱作业设备,可以大大缩短起下钻、钻井调控等工序的时间,根据现场实践数据可知,智能化改造后钻井设备单井钻井周期比改造前减少 20% 到 30%,人力成本和作业损耗大幅度降低。

其次就是提高安全控制能力来降低作业风险。石油钻井作业属于高危工况,高空作业、井下复杂工况、设备突发故障等很容易造成安全事故。智能化改造依靠智能感知系统对井下工况、设备运行状况和作业环境实施动态监测,达成故障预知、危险工况自动锁定、异常参数智能调节,缩减人工干预次数,把人员安全风险削减 30%~50%,较好地避开坍塌、井喷、设备失灵等潜在危险。

促进行业数字化转型,助力绿色低碳发展。智能化改造能够使钻井全过程的数据化、可视化控制得以实现,依靠大数据分析来改良钻井工艺和设备运行方式,削减设备能耗、钻井废液和废料的排放量,凭借设备全生命周期智能运维来缩减设备的故障损耗以及资源浪费,从而达成工程效益和生态效益的统一,符合油气行业绿色智能化的发展趋向。

2 石油钻井机械智能化改造现存关键问题

2.1 老旧设备硬件适配性差,改造碎片化严重

我国油田用的钻井机械中,大量的老旧传统钻机还担负着主力作业的任务,这些设备的设计年限较早,硬件结构陈旧,没有智能传感器、数据传输模块预留安装接口,机械传动和控制系统都是传统的手动控制方式。开展智能化硬件升级时需要机械结构进行针对性的改造,加装感知和传输设备,改造难度大、成本高,大部分老旧设备只能做局部智能化改造,不能实现全自动、智能化闭环作业。

2.2 软件系统兼容性不足,数据孤岛问题突出

智能化钻井作业的关键是数据互通和智能决策,但是目前我国钻井机械配套的软件系统存在着标准不统一、接口不兼容的问题。不同的厂家智能设备使用不同的管控系

统,数据采集维度、传输协议、存储格式都不一样,地面设备和井下随钻设备的数据不能实时互通,作业数据、设备运维数据、地质数据分散在各个独立系统里,造成严重的

2.3 核心技术自主化程度低,技术体系不完善

我国高端智能钻井装备及核心技术创新能力还存在一定的技术短板,高精度随钻测量仪器、井下智能导向系统、高端伺服控制系统、智能决策算法等关键技术及核心部件还有一部分依赖进口。国外设备价格昂贵、运维响应慢、技术垄断风险大,阻碍了国内智能化改造的规模化发展^[9]。

2.4 专业人才匮乏,运维管理体系滞后

智能化钻井机械是机械工程、人工智能、大数据、自动控制、石油工程等多领域技术相结合而形成的,对操作人员和运维人员的综合专业能力要求很高。目前油田一线作业人员大多有传统的钻井操作经验,但是缺少智能设备的操作、数据分析和系统维护的能力,不能充分发挥智能设备的性能优势。同时企业现有的运维管理体系仍然适合传统的机械设备运维模式,没有建立智能化设备的专项运维机制,缺少常态化的设备校准、系统更新、数据运维流程,智能设备长时间运行之后容易出现感知精度下降、系统卡顿、数据偏差等状况,影响智能化作业的稳定性。

3 石油钻井机械智能化改造系统化实践路径

3.1 基础硬件智能化升级,补齐设备能力短板

硬件升级是智能化改造的基础,根据新旧设备不同制定不同的改造方案,使所有的钻井核心设备具备智能感知、自动调节的基本能力。对新建钻井设备严格按照智能化标准进行高精度传感器、智能伺服控制系统、数据传输模块、自动化执行机构的配置,并安装动力猫道、钻台机械手、二层台排管装置等自动化设备,使管柱输送、对接、起下钻等工序实现自动化作业,从源头保证设备智能化水平。

对存量老旧设备用模块化精准改造的方式避免由于更换造成的资源浪费。主要完成三个模块的改造工作,即感知模块升级、控制模块升级和传输模块升级。一是对顶驱、泥浆泵、绞车、井筒等关键部位加装压力、温度、振动、位移等高精度传感器,并配以近钻头地质导向仪器、随钻测量系统,实现地层参数、设备运行参数、井眼轨迹参数的全方位实时采集;二是更换传统的人工操作方式,安装智能控制器和伺服驱动系统,使钻井钻压、转速、流量等参数可以自动调节;三是搭建 5G+ 物联网无线传输网络,改善数据传输链路,保证井下、地面数据实时稳定传输,

解决老旧设备数据采集滞后、传输中断的问题。

3.2 软件系统迭代优化，破除数据孤岛壁垒

以数据互通、智能决策为依托，推进软件系统标准化、一体化改造，创建起统一的钻井智能化管控平台。首先统一设备数据接口和传输标准，对现有的各种智能设备的管控系统进行适配改造，打通不同厂家、不同类型设备的数据壁垒，实现地质数据、作业数据、设备运维数据、环境数据的集中汇聚、统一存储、共享互通，构建钻井全流程数据库^[3]。

其次，对平台的核心功能进行优化，把大数据分析以及人工智能算法模型嵌入其中，开发出钻井参数智能优化、设备故障智能预警、井眼轨迹智能调控、作业风险智能识别等主要功能。利用历史钻井数据和实时工况数据，用机器学习算法对钻井参数进行动态优化，适应不同的地层工况；根据设备运行数据建立故障诊断模型，可以提前预测出设备的潜在故障，并且可以准确地找到问题所在，代替了传统的依靠人工进行事后检修的方法。另外建立可视化监控界面，对钻井作业全过程进行可视化、数字化的控制，提高作业管控的准确性。

3.3 全系统协同集成改造，构建智能作业体系

经过软硬件基础改造之后，推进多设备、多工序、全场景的系统协同集成，冲破单一设备智能化的束缚，塑造起“感知 - 决策 - 调控 - 运维”一体化智能钻井体系。一是实现井上井下闭环协同控制，依靠随钻测量、智能导向和地面管控系统，创建起井下工况感知、云端智能决策、地面设备自动调节的闭环作业模式，精确调整井眼轨迹，改善钻井精度，适应复杂地层、深井、超深井钻井作业需求。

二是实现多设备联动协同作业，利用集成控制系统统筹调度顶驱、绞车、泥浆循环系统、自动化排管设备等核心装备，使起下钻、钻进、固井等各个工序紧密衔接，克服了传统作业中设备独立运行、工序衔接滞后、人工配合误差大的缺点，大幅度提高了钻井作业的连续性和稳定性。第三，用数字孪生技术建立钻井机械数字孪生模型，把物理设备和虚拟模型联系起来，用虚拟仿真技术模拟各种工况下设备的运行状态，提前对作业方案进行优化，预测作业风险，完成钻井作业的仿真预判、动态优化、全生命周期可视化管控。

3.4 运维体系智能化革新，保障长效稳定运行

适应智能化钻井设备运行需要，革新传统的运维管理

方式，创建起智能化的全生命周期运维体系。一方面建立设备智能运维机制，依靠管控平台对设备的运行状况实施动态监控，借助故障预警模型开展预防性维修工作，代替传统的定时检修、应急处置方式，精确找到故障所在部位并判定产生故障的原因，缩减设备故障的发生频率，提升设备的使用寿命，削减运维费用^[4]。另外建立设备数据更新机制，每周采集现场作业数据和操作人员的反馈，每三个月对系统进行一次算法更新以及功能升级，从而提高系统的适用性。

另一方面，创建专业人才培养体系，展开“理论加实操”的专项培训，包含智能设备操作、数据剖析、系统运维、故障查找等内容，塑造起一支具备智能钻井技术的专门队伍。同时创建校企合作、政企联动培养机制，定向培养具有石油工程专业知识和数字化、智能化技术能力的复合型人才，完善人才考核和激励制度，解决智能化改造人才缺口问题，为智能化设备长效稳定运行提供人才支持。

4 结语

石油钻井机械智能化改造，是石油钻井行业实现安全高效开采、推进数字化转型的必然之路。目前我国改造还存在着硬件适配、数据互通、技术及人才等各方面的现实限制，不能直接照搬国外模式，应该从存量设备的实际条件出发，走硬件升级、软件赋能、系统集成、运维配套的梯度化改造之路。后续要加快行业技术标准的制定和完善，攻克自主核心智能装备的研发难题，健全人才和迭代保障机制，不断推进人工智能、数字孪生等技术同钻井工程深度融合，促进复杂油气资源的高效开发，给油气行业高质量、绿色化发展提供装备支持。

参考文献：

- [1] 顾其锐. 石油钻井自动化智能化新技术探究[J]. 中国石油和化工标准与质量, 2026,46(11):175-177.
- [2] 裴志君, 宋先知, 李根生. 石油钻井钻速预测研究现状与未来展望[J]. 石油科学通报, 2025,10(6):1252-1266.
- [3] 魏民越. 自动化钻井设备在石油钻井工程中的应用[J]. 新疆有色金属, 2025,48(5):53-54.
- [4] 王永红. 石油钻井机械设备现场管理质量的提升措施分析[J]. 张江科技评论, 2025(4):128-130.

作者简介：李春啸（1978.06-），男，汉族，甘肃省庆阳市，大学本科，中级，研究方向：钻井机械。