

## 中国石化智能钻井技术进展与展望

曾义金 王敏生 光新军 王果 张洪宝 陈曾伟 段继男

### Progress and Prospects of Sinopec's Intelligent Drilling Technology

ZENG Yijin, WANG Minsheng, GUANG Xinjun, WANG Guo, ZHANG Hongbao, CHEN Zengwei, DUAN Jinan

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024081>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 智能钻完井技术研究进展与前景展望

Research Progress and the Prospect of Intelligent Drilling and Completion Technologies

石油钻探技术. 2023, 51(4): 35–47 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023040>

#### 智能钻井技术研究现状及发展趋势

Intelligent Drilling Technology Research Status and Development Trends

石油钻探技术. 2020, 48(1): 1–8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020001>

#### 中国石化录井技术新进展与发展方向思考

Thoughts for New Progress and Development Directions of Sinopec's Surface Logging Technology

石油钻探技术. 2023, 51(4): 124–133 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023027>

#### 随钻测控技术现状及发展趋势

Current Status and Development Trend of Measurement & Control while Drilling Technology

石油钻探技术. 2024, 52(1): 122–129 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024017>

#### 中国石化固井技术进展及发展方向

Progress, Outlook, and the Development Directions at Sinopec in Cementing Technology Progress

石油钻探技术. 2019, 47(3): 41–49 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019073>

#### 中国石化石油工程技术新进展与展望

New Progress and Prospects for Sinopec's Petroleum Engineering Technologies

石油钻探技术. 2023, 51(4): 149–158 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023021>



扫码关注公众号，获取更多信息！

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2024081

引用格式: 曾义金, 王敏生, 光新军, 等. 中国石化智能钻井技术进展与展望[J]. 石油钻探技术, 2024, 52(0): 1-9.

ZENG Yijin, WANG Minsheng, GUANG Xinjun, et al. Progress and Prospects of Sinopec's Intelligent Drilling Technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(0): 1-9.

## 中国石化智能钻井技术进展与展望

曾义金, 王敏生, 光新军, 王 果, 张洪宝, 陈曾伟, 段继男

(中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

**摘 要:** 智能钻井具有自感知、自学习、自决策、自执行、自适应等功能, 有望大幅度提高钻井效率、降低作业成本。为加速推动智能钻井技术发展, 中国石化针对实时感知、智能决策、集成控制等方面存在的关键技术难题, 开展了自动化钻机及关键装备、随钻工程地质参数感知、智能钻井分析决策、智能钻井系统集成等的攻关研究, 进行了现场集成与示范应用, 实现了钻井参数智能优化、井筒风险智能预警、井眼轨迹智能导航等应用场景的多目标协同优化, 达到了咨询模式下智能辅助-人工决策的闭环控制水平, 有力支撑了重点油气领域勘探开发的降本增效。为更好地发展智能钻井技术, 在分析所存在问题的基础上, 梳理、总结了中石化近些年在智能钻井关键技术研究取得的进展, 进行了技术展望, 提出应进一步加强全自动钻机装备、高性能测传控系统和数字孪生决策系统等关键技术研究, 加大技术迭代升级, 推动智能钻井由咨询模式向半自主、自主控制模式转变。

**关键词:** 智能钻井; 自动化钻机; 随钻测量; 智能决策; 闭环控制; 技术进展; 中国石化

**中图分类号:** TE142 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0890(2024)00-0001-09

### Progress and Prospects of Sinopec's Intelligent Drilling Technology

ZENG Yijin, WANG Minsheng, GUANG Xinjun, WANG Guo, ZHANG Hongbao,

CHEN Zengwei, DUAN Jinan

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co. Ltd., Beijing, 102206, China)

**Abstract:** Intelligent drilling is a new drilling method with functions such as self perception, self-learning, self decision-making, self execution, and self adaptation. It represents the highest form of drilling technology development and is expected to significantly improve drilling efficiency and reduce operating costs. In response to the key challenges in real-time perception, intelligent decision-making, and integrated control of intelligent drilling, Sinopec has conducted research on key technologies such as automated drilling rigs and key equipment, geological parameter perception while drilling engineering, intelligent drilling analysis and decision-making, and intelligent drilling system integration. Integration and demonstration applications have been carried out on site, achieving multi-objective collaborative optimization of application scenarios such as intelligent optimization of drilling parameters, intelligent warning of wellbore risks, and intelligent navigation of wellbore trajectories. The closed-loop control level of intelligent assistance manual decision-making in consulting mode has been achieved, which effectively supports cost reduction and efficiency improvement in key oil and gas exploration and development fields. Based on the analysis of the problems existing in intelligent drilling technology, the latest progress in the research of key technologies for intelligent drilling in Sinopec was summarized. It was proposed to further strengthen the research on key technologies such as fully automatic drilling equipment, high-performance measurement and control systems, and digital twin decision-making systems, increase technological iteration and upgrading, and promote the transformation of intelligent drilling from consulting mode to semi autonomous and autonomous control mode.

**Key words:** intelligent drilling; automated drilling rig; measurement while drilling; intelligent decision-making; closed loop control; technological progress; Sinopec

收稿日期: 2024-08-13; 改回日期: 2024-08-30。

作者简介: 曾义金 (1964—), 男, 江西吉水人, 1985 年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 2003 年获石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 正高级工程师, 主要从事深层超深层钻井基础理论研究及关键技术研发与应用工作。系本刊编委会副主任。

E-mail: zengyj.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“自动化钻井技术与装备”(编号: P20048)、“智能化钻井关键技术与装备”(编号: P21065)资助。

智能化是世界科技发展的大趋势,正在引领新一轮科技及产业变革、催生重大颠覆性创新。随着自动化钻井技术的不断完善,以及与大数据、人工智能等数字化技术的不断融合发展,钻井技术正在由自动化转向智能化。智能钻井技术配备具有学习、记忆和判断功能的人工智能平台,集成智能化地面和井下控制系统,以及高精度传感器和高速传输系统,能够实现部分钻井作业的自主决策和闭环控制,大幅提高作业效率和安全性能,是油气工程技术未来发展的重要方向之一。

目前,国外智能钻井部分关键技术已经在现场成功应用,正在开展地面井下一体化智能集成控制现场试验,不断提升钻井智能化程度;国内智能钻井个别单项技术处于推广应用或现场试验阶段,在钻机装备自动化、井下随钻测控仪器性能、数据挖掘水平等方面与国外先进水平还有较大差距<sup>[1-8]</sup>。其中,在中国石化,为加速推动钻井技术智能化发展,打造油气领域技术竞争新优势,推动形成油气上游新质生产力,近年来通过联合攻关,基本形成了智能钻井关键技术与装备,开展了现场集成示范应用,取得了较好效果。为更好地发展中国石化的智能钻井技术,笔者梳理智能钻井技术发展概况及存在的问题,总结了中石化智能钻井技术进展、现场集成与示范应用效果,展望了未来的技术发展方向。

## 1 智能钻井技术发展概况及问题

### 1.1 智能钻井技术发展概况

智能钻井是一项复杂的系统工程,是自动化设备、井下仪器、信息决策的高度融合,贯穿于钻井设计、模拟、作业、管理等各个环节。智能钻井技术主要由自动化钻机装备系统、井下测控系统和智能分析决策系统3大部分组成。其中,井下测控系统实时测量工程参数和地质参数并高速传输至地面,智能分析决策系统融合各种测量数据及历史数据,实时分析诊断并优化施工参数,并向地面自动化钻机装备系统及井下控制系统发出指令,两系统执行指令并实现自动闭环控制。

国内外均制定了详细的技术发展路线图,搭建了智能钻井架构体系,部分关键技术已经实现现场应用,提高了钻井效率和安全性。其中,高精度井下传感器、连续波高速传输等技术初步商业应用,起下钻自动控制、自动送钻和旋转导向等自动控制

系统已进入工程应用。总体上,地面井下一体化智能钻井技术还处于开发试验阶段,自动化智能化融合还处于探索阶段<sup>[9-12]</sup>。正在着力整合行业力量,建立统一的标准与认证体系。SPE钻井自动化技术分部将钻井智能化分为观察模式、咨询模式、半自主控制模式和自主控制模式4个阶段,以及每个阶段实现的功能,见表1<sup>[1]</sup>。国外基本实现了咨询模式,部分作业场景进入半自主控制阶段;国内总体还处于咨询模式发展完善阶段。

表1 智能钻井发展阶段划分

Table 1 Classification of development stages of intelligent drilling

智能钻井发展阶段	水平	实现功能
观察模式	L0	系统不提供任何建议,仅提供获取的信息,包括井场监测、井下信息获取、智能报警系统等
咨询模式	L1	系统提供咨询建议,司钻做出决定并执行,包括钻井动态过程诊断系统、定向钻井辅助系统等
半自主控制模式	L2	司钻批准建议后,系统自动执行,包括自动送钻系统、钻柱黏滑振动地面控制系统、自动压钻井系统等
自主控制模式	L3	机器自动决策并执行,一般用于某个具体流程,如随钻测量+旋转导向等

### 1.2 智能钻井技术存在的问题

1) 钻机装备自动化程度不高。传统钻机装备系统的自动化控制集成运行和数据融合程度低,还不能实现钻井全过程自动化控制。一键管柱自动化协同控制、钻井泵排量、钻井液性能调控、自动化压井控制系统等配套系统还没有实现“无人接管”或远程控制的全自动操控,无法满足智能钻井少人化、无人化作业要求。

2) 井下多维多参数智能感知参数少。随钻高分辨率地质成像系统、井下工程参数测量系统等核心井下感知仪器的可靠性和测量精度等,还不能满足智能钻井对工程地质参数的获取要求,还没有打通地层-井筒-地面大数据高速传输链路。

3) 钻井实时决策优化方法单一。缺乏钻井历史大数据、人工智能等智能分析决策手段,不能满足智能钻井作业由人工决策向机器决策转变的需要。钻井参数优化传统方法考虑因素较少,精度提升空间有限;钻井风险预警人工决策井下复杂处理滞后,易恶化失控,影响钻井时效;随钻地质导向人工判断易出现错误与误差,被动制导,储层钻遇率低。

4) 多系统集成应用及多目标优化协同不足。钻井各类数据的采集、流动、汇聚及一体化数据应用支持不充分,缺少基于后端微服务、前端跨平台技



术形成算法封装共享及模块集成技术规范。不具备钻机、井下仪器和智能决策的集成应用及多目标优化协同,不能实现软硬件协同的智能化闭环控制钻进。

## 2 中国石化智能钻井技术进展

### 2.1 自动化钻机及关键配套装备

#### 2.1.1 7 000 m 同升式自动化钻机

自动化钻机是实现智能钻井的基础,也是整个闭环控制的地面执行机构。7 000 m 同升式自动化钻机采用井架前腿与底座立柱构成的空间多平行四边形结构设计,解决了起升载荷与井架单段高位倾斜相互制约难题,实现了井架与底座一次穿绳、同步旋升,钻机起升效率提高 50%,起升载荷 2 500 kN,如图 1 所示。通过开发不同钻井工况下控制逻辑功能算法,研制了司钻集成控制系统,实现了地面/井下装备与主机数据互联互通、联动控制。管柱自动化处理系统采用移送臂多工位转换全程精准控速技术,实现了管柱“一键式”自动化输送、排放,管柱自动输送 40 根/h,自动排放 25 柱/h,起下钻速度 13~18 柱/h,降低了劳动强度,提升了本质安全。在胜利济阳国家级页岩油示范区牛页 1-3-504HF 井应用,创造了二开钻进  $\phi 311.1$  mm 井眼日进尺 1 620 m 的全国新纪录。



图 1 7 000 m 同升式自动化钻机

Fig.1 7 000 m simultaneous lifting automated drilling rig

#### 2.1.2 自动送钻与自动定向控制系统

自动送钻与自动定向控制系统是 7 000 m 自动化钻机关键组成部分之一。通过统筹比能、钻速、振动、进尺成本等参数的博弈、协同关系,提出钻井参数方案量化评价模型,基于粒子群算法形成了钻井参数多目标仿生寻优策略,并研发了自动送钻系统,实现了恒钻速、恒钻压、恒压差、恒扭矩多模式协同控制,钻速精度 $\pm 0.2$  m/h、钻压精度 $\pm 3$  kN、压差精度 $\pm 0.1$  MPa、扭矩精度 $\pm 320$  N·m。双向扭转自动

定向控制系统根据实际工具面与目标工具面偏差,自动冲撞功能调整工具面,控制精度 $\pm 5^\circ$ 。根据泵压、钩载等变化,自动调整双向扭转参数,包括扭转角度和速度等。该系统在一定程度上替代了旋转导向系统。

#### 2.1.3 自动控压钻井装置

自动化控压钻井装置主要由控压钻井硬件、监控软件 2 部分组成,实现了钻井井筒压力精细调控。在硬件方面,研发了模块化自动控压设备,用国产电动伺服节流阀替代进口电动节流阀,建立了节流压力精准调控方法,精度 $\pm 0.25$  MPa,响应时间 7 s,设备体积降低 50%;在软件方面,研发了一体化监控系统,实现了钻机、控压设备监测及控制数据自由流通,以及钻机与自动控压集成控制。该装置在焦页 12-检 1 井进行了应用,全井无溢漏坍塌复杂情况,助力中国石化首口页岩气压后密闭取心作业取得成功。

#### 2.1.4 钻井液性能监测与调控关键装置

钻井液性能检测与调控是智能钻井地面自动化控制的关键环节之一。研发了钻屑视觉自动识别、钻井液性能在线监测及钻井液自动加料 3 套装置。基于神经网络算法,提出了钻屑立体点云图及深度伪彩图描述方法,搭建了钻屑形状分类神经网络计算模型,实现了出口钻屑流量及体积的计算,钻屑轮廓分辨率达亚毫米级,钻屑流量及体积准确率 88.7%,掉块识别准确率 95.45%。采用模块化设计方法,实现了钻井液流变性( $\pm 1\%$ )、密度( $\pm 0.01$  kg/L)、离子浓度( $\pm 4.09\%$ )和破乳电压( $\pm 4\%$ )在线精准测量。基于 3D 光学相机、深度相机实现了视觉识别,通过深度学习算法准确判断位置,实现了不同种类处理剂的分区摆放与准确添加,现场应用最大加料速度 5 t/h,材料识别准确率 100%,如图 2 所示。

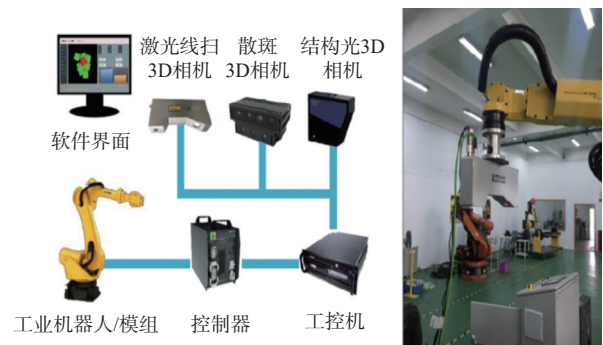


图 2 3D 视觉引导实现料袋识别与抓取

Fig.2 3D visual guidance for material recognition and grasping

## 2.2 随钻地质工程参数感知与控制技术

### 2.2.1 高分辨率电阻率成像仪

高分辨率电阻率成像仪是智能钻井的关键仪器,用于地质导向、裂缝识别、储层评价,识别钻井液漏失层等<sup>[13-17]</sup>。采用基于螺绕环感应的侧向电阻率成像方法,建立基于神经网络的电阻率图像层界面特征识别模型,研制了随钻高分辨率电阻率成像仪,如图3所示。

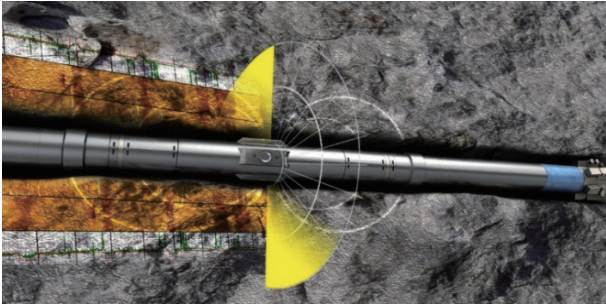


图3 随钻高分辨率电阻率成像仪

Fig.3 High resolution resistivity imaging instrument while drilling

该仪器能够在128个独立扇区中采集数据、对井筒360°全覆盖成像,图像分辨率10 mm,实现了地层界面和微观裂缝的识别,随钻成像层界面识别率达92.8%。在现场应用12井次,解决了识别井眼崩落、钻井液漏失层等钻井复杂情况,为智能钻井风险早期预警提供了依据。

### 2.2.2 高温井下动态工程参数测量仪

随钻井下动态工程参数测量仪是优化钻井参数的重要装置,可实时监测钻压、扭矩、振动等参数。基于井下应变片形变受温度、压力影响的规律,提出了钻压扭矩实时校准方法,解决了井底钻压扭矩测不准的难题,形成了井下数据处理方法和地面解释模块,实现了钻压、扭矩、压力、振动、冲击、转速、井斜角等11个参数的测量,数据可井下储存和实时传输,耐温175℃,仪器结构如图4所示。

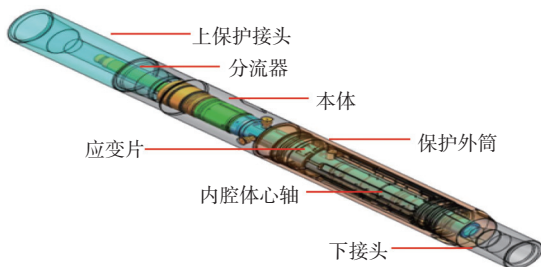


图4 耐温175℃随钻井下动态工程参数测量仪

Fig.4 175 °C downhole dynamic parameter measurement instrument while drilling

耐温175℃随钻井下动态工程参数测量仪在水平井、定向井、直井等应用15井次,通过测量和计算获取了准确的钻压、摩阻、机械比能、钻时等参数,为钻头选型、水力机械参数优化提供了支持。

### 2.2.3 旋转导向系统

旋转导向系统可实现井眼轨迹自动控制,使其按设计方向钻进。突破了高造斜率、高可靠性等关键技术,攻克了系统设计、规模制造、精细检查等技术瓶颈,研制出静态推靠式旋转导向系统。通过持续迭代优化,形成了导向头结构及电路设计、液压单元研制、工具测试、工具应用接口及平台规范等技术创新,系统耐温165℃,耐压140 MPa。该系统在现场应用57口井,累计进尺超40 000 m,累计工作时间超5 000 h,一趟钻最长进尺2 356 m,最长工作时间276 h,实钻最大造斜率11.5°/30m,优质储层钻遇率达97.5%。

## 2.3 智能钻井分析决策技术

智能分析决策系统(iDrilling)是智能钻井的大脑,设计了一体化云平台,开发了参数智能优化、风险智能预警、轨迹智能导航3个特色软件模块,实现了优快钻井、风险控制及精准钻井3个应用场景。

### 2.3.1 智能钻井分析决策云平台

智能钻井分析决策云平台由钻井地质工程数据库访问、服务逻辑和应用展示3层构架组成,提供自主图形框架和专业的公共组件与智能算法,如图5所示。该平台集数据汇聚流通、模型构建与优化共享、钻井智能可视化应用模块集成运行,采用插件式软件框架技术,具有开放性、高扩展性、数据自由流动、充分共享等特点。采用钻井专业大数据处理与数据分析技术,基于自动化机器学习的智能中台,实现了自动化AI算法建模。基于智能算法的钻井智能应用模块研发及其云端集成技术,实现了钻井实时优化、风险预警、地质导航3大核心应用模块的可视化集成,打通了数据、算法及分析决策信息的全流程闭环。

### 2.3.2 钻井参数智能优化技术

钻井参数智能优化是智能钻井核心决策任务之一<sup>[18-24]</sup>。深度融合大数据处理、人工智能、经典工程模型,采用经典计算模型与AI深度融合的钻井参数优化方法,考虑地面设备能力、井筒流动状态、钻具运动状态、岩石破碎机理等4类23种因素约束条件,以机械钻速最高或机械比能最低为目标,通过实时监测摩阻扭矩、井眼清洁、钻头磨损和破岩效率,进行钻井参数敏感性分析,动态推荐最优钻井



图 5 智能钻井分析决策云平台架构

Fig.5 Architecture of intelligent drilling analysis and decision platform

参数和控制图, 指导参数优化、钻头选型和工艺优化。图 6 所示为多约束条件下钻井参数智能优化方法实时预测参数调整对钻井全方位的影响, 实时推荐最优钻井参数区间。

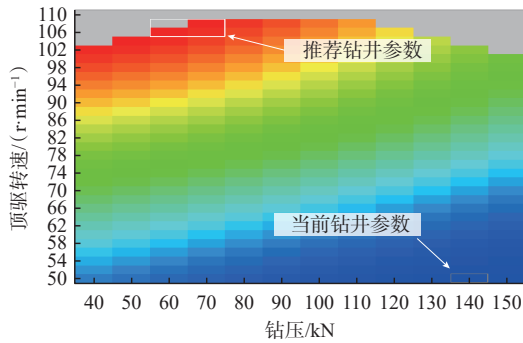


图 6 多约束条件下钻井参数智能优化调整对钻井的影响  
Fig.6 Real time optimization of drilling parameters

### 2.3.3 井筒风险智能预警技术

钻井过程中, 井漏、井塌、卡钻等井下复杂情况是制约安全快速钻井的主要因素, 亟需及时预警和准确诊断<sup>[25]</sup>。为此, 建立了地质与工程因素耦合的潜在风险量化识别预测模型, 开发了自适应多 AI 融合算法, 建立了时序数据趋势分析的井漏监测预警流程, 实现“漏、喷、塌、卡”等井下复杂情况早期预警。根据顺北 10 斜井井漏、溢流和卡钻预警情况 (见图 7), 其风险预警准确率达到 93%。另外, 基于人工智能漏失、溢流预测模型, 结合水力学计算漏失、溢流位置的方法, 形成了漏失、溢流诊断技术,

漏层位置诊断平均误差 0.22%, 漏失通道大小诊断平均误差仅 8.42%。

### 2.3.4 井眼轨迹智能导航技术

传统导向钻井需要人工分析, 易出现误差和轨迹调整滞后问题<sup>[26-27]</sup>。融合地震信息、完钻信息和随钻数据, 可实时分析和预测目标地层, 实现井下信息实时测量、地质自动建模、自动导航等功能, 自动生成和执行控制指令。钻前, 通过测井分层数据和地震层数据反演建立精细地层三维模型, 并沿设计轨道提取导航初始模型; 钻中, 通过方位伽马成像确定地层倾角、方位电磁波电阻率反演地层边界、录井全烃值判定最优油气层位, 系统自动提出钻进倾角和轨道方向。现场应用表明, 井周地层预测分辨率 $\leq 0.5$  m, 储层钻遇率达 95% 以上, 如图 8 所示。

### 2.4 智能钻井闭环控制技术

#### 2.4.1 钻井设计钻前模拟控制技术

通过井下环境的数字可视、“数据+模型”驱动, 开发了钻井仿真模拟系统, 实现了钻前预演、方案评估及随钻模拟预测, 将钻井工程不可见的地下“黑箱”转变为可见的“数据体”, 为钻井方案优化提供了直观、高效的技术手段。采用“稳态+瞬态”计算模型集成方法和模型相互作用关系, 在稳态瞬态模型间加入深度、时间标签, 对井筒流动、管柱运动分析模型设计集成关系, 构建了“数据+模型”融合驱动井下数字体, 采用井筒数字仿真技



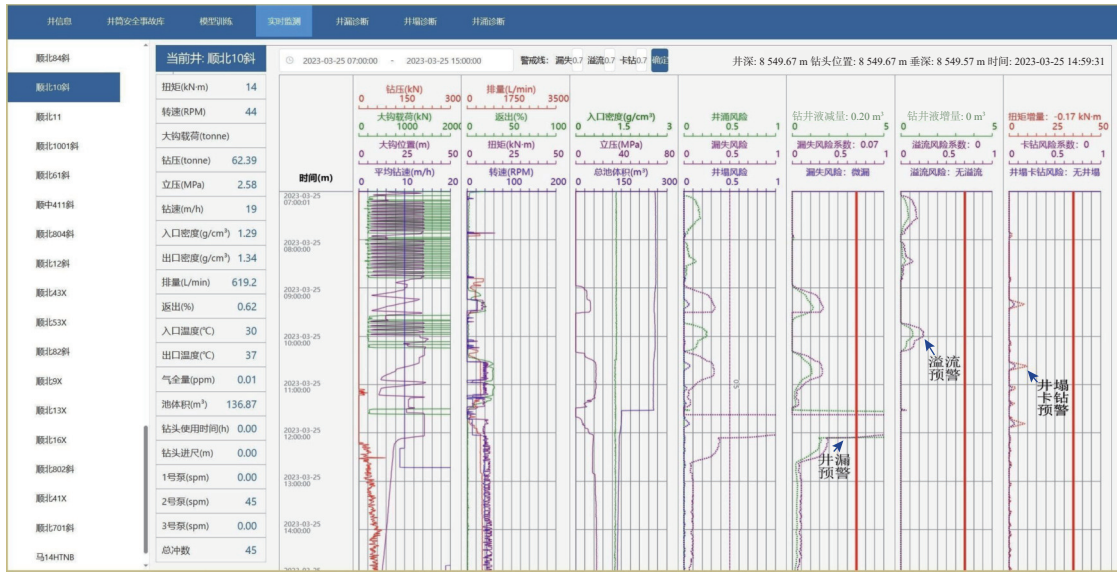


图7 井下复杂情况早期预警情况

Fig.7 Early warning of complex underground situations

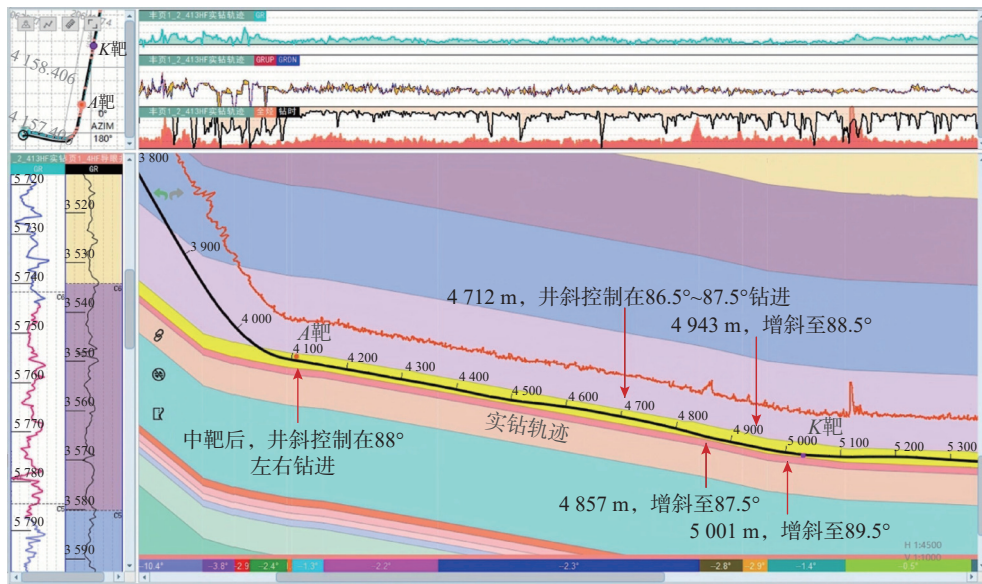


图8 地层实时预测与井眼轨迹智能导航

Fig.8 Real time geological prediction and intelligent navigation of wellbore trajectory

术, 全流程模拟分析钻井过程, 分析钻速、井下可能出现的复杂情况等, 调整技术方案, 实现了最优化钻井设计。

### 2.4.2 地面装备安全运行控制技术

利用物联网、移动通讯等技术, 研发了全面感知、实时监测、维保提醒、预警提示的钻机装备MRO物联网管理系统, 实现了设备状态监测与报警、维修过程跟踪和检查、设备全生命周期评估、设备故障高阶诊断、设备参数远程调优和设置等功能, 有效提升了设备管理水平, 大幅降低了钻井成本。通过对设备实时运行参数、故障特征进行相关

性分析, 可判断不同故障原因的主控因素, 实现了实时监测钻井泵、绞车、顶驱等关键设备的安全运行和有效控制, 监测关键设备运行参数 200 余项, 300 余项保养提醒率 100%, 将传统设备人工巡检转变为设备自动巡检。

### 2.4.3 钻井作业智能控制技术

钻井现场集成控制中心硬件主要由数据采集、数据硬件接口、仪器房系统、数据分发硬件接口、用于支持井场作业的成果展示、控制和指令支持硬件所构成。通过井场全方位数据采集, 建立可扩展的标准接口, 具有井场作业全过程的控制来实现对井

场智能化、自动化作业的技术和数据支持。担当井场智能作业的测控枢纽,搭建井场各专业之间、井场和远程、虚拟与现实之间的信息沟通和作业指令桥梁,为井场自主化智能作业提供解决方案。井场开放式数字化系统本身不存储数据,所需数据在作业前来自于油田云端数据,作业中来自于实时采集和测量数据,作业后数据全部送入数字化油田的云

端数据库和信息中心数据库。

钻井作业智能控制技术的核心是实现地面设备、井下仪器、远端决策 3 大系统的沟通融合。为此,设计了井场数智集成控制中心(I<sup>3</sup>DC),开发的钻井现场集控软件系统支持现场闭环数据汇聚与远程云平台交互,实现了钻机装备系统、井下测控系统、分析决策系统的一体化联动和闭环控制,如图 9 所示。

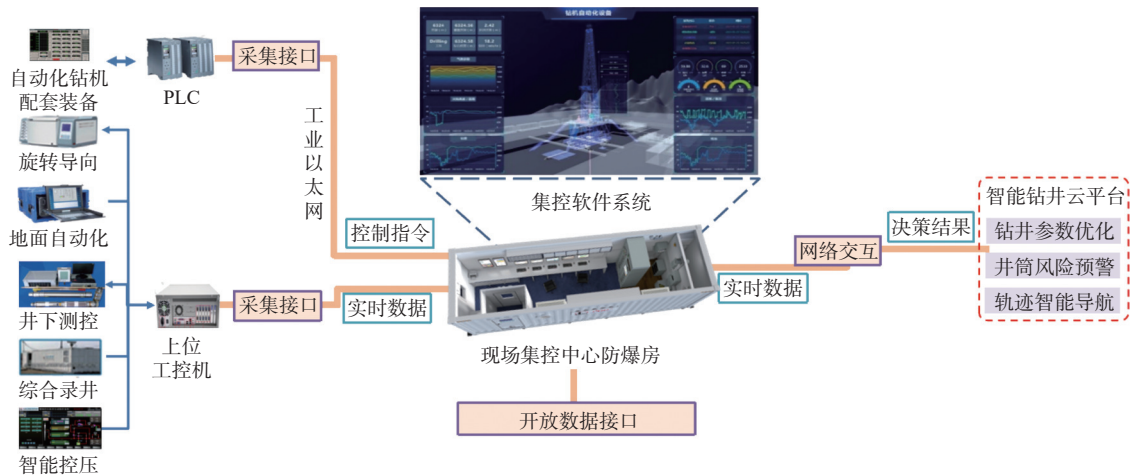


图 9 钻井作业智能控制技术示意

Fig.9 Intelligent control technology for drilling operations

I<sup>3</sup>DC 既是智能钻井数据集成中心、成果展示中心,也是现场技术人员多专业协同工作中心。该中心基于 WITS 数据扩展,建立了智能钻井系统数据汇聚共享方法,通过传感器联通地面装备、录井数据、随钻参数、旋转导向和司钻集控中心,通过实时分析向司钻集控中心自动传递决策指令和风险预警,司钻及时调整钻井参数或钻井工艺,实现地面—井下一远端平台闭环控制。

### 3 智能钻井技术集成示范应用

为了验证技术成果,在智能钻井系统联调测试的基础上,在胜利济阳页岩油国家级示范区丰页 2 号平台 3 口水平井(FY1-2-413HF 井、FY1-2-513HF 井和 FY1-2-113HF 井)开展了智能钻井技术集成示范应用,实现了智能优化决策、自动化控制。丰页 2 号平台部署在渤海湾盆地济阳拗陷,完钻层位为沙四纯上,压力系数 0.80~1.76,地温梯度 3.4 °C/100 m,设计井深约 6 000 m,采用三开井身结构,垂深约 3 750 m,水平段长约 1 500 m。实钻前,开展了钻前仿真模拟,实现了优化钻井、风险预警、智能导航 3 个应用场景,机械钻速提高 15% 以上,井下未出现

复杂情况,储层钻遇率 100%。

#### 3.1 钻井设计钻前模拟与优化

实钻前,根据仿真模拟系统预演钻井过程,预演结果指导和修正钻井设计,提高设计的科学性。如通过模拟,分析不同工具面角、钻井参数的井眼轨道,优化定向钻井施工参数;通过模拟,分析动态钻井水力参数,确定不同钻井液性能、排量下的井筒压力变化。以丰页 1-2-413HF 井井筒压力预演为例,三开钻进至 5 185.00 m,排量 35~36 L/s 时,预测井底当量循环密度(ECD)约 1.986 kg/L,立压为 42 MPa,继续钻至 5 350.00 m,井底 ECD 约为 1.994 kg/L,立管压力增至 43.04 MPa,将导致井下漏失,建议在井深 5 185.00 m 后保持立管压力 42 MPa 继续钻至 5 350.00 m,排量不大于 35 L/s。实钻结果表明,调整后井下没有出现漏失现象。

#### 3.2 智能钻井场景应用及效果

通过 iDrilling 分析决策系统,开展了钻井参数智能优化、井筒风险智能预警、井眼轨迹智能导航 3 大智能钻井场景应用。

1) 钻井参数智能优化。实时监测钻具运动状态、井下流动状态、钻头磨损情况,超前预测不同钻井参数下的钻具失稳风险、机械钻速和破岩效率,



同钻机耦合进行实时参数调整分析,避免长水平段强化参数导致的钻具涡动,在保证井下安全和地面设备负载正常的情况下,实时推荐最优钻井参数。丰页2号平台3口井应用表明,优化钻井参数后钻具振动降低50%以上,钻井机械钻速提高15%以上。

2)井筒风险智能预警。实时监测井筒压力分布、井底循环压力、起下钻抽汲压力,结合地层压力剖面,精准控制井底压力,丰页2号平台3口井三开最高钻井液密度1.91 kg/L,严格控制井底ECD在1.81~1.980 kg/L,全井未发生溢流、漏失等井下复杂情况。超前预测在沙四上段有溢流风险,钻井液密度从1.80 kg/L增加至1.90 kg/L,控制了溢流风险。随钻预警水平段岩屑床高度4 cm左右,岩屑阻卡风险较高,提出预警后,及时采取划眼、井眼清洁等措施避免了阻卡。

3)井眼轨迹智能导航。根据随钻测量曲线及模型仿真数据的对比差异结果,结合地震剖面判断地层变化趋势,及时预测钻出储层风险并调整井眼轨迹。丰页2号平台3口井实现了快速决策、精准导航,靶盒储层钻遇率100%。

## 4 中国石化智能钻井技术发展展望

中国石化制定了智能钻井技术发展“三步走”战略,在大力推广现有成果的基础上,持续开展智能决策软件、数字孪生、自动化智能化装备等关键技术研究,加大技术迭代升级,推动质询模式向半自主、自主控制模式转变,实现“全方位感知、大数据分析、智能化决策、自动化调控”的智能钻井技术目标。未来,结合中国石化智能钻井关键技术发展现状,应围绕以下4个方面开展攻关研究。

1)智能钻井技术基础前瞻研究。加强智能钻井基础前瞻研究,形成智能钻井技术新规律、新认识,为关键技术研发提供源头供给。建立井筒-地层大数据地质力学大模型,研究自适应钻头、智能流体等新一代智能钻井技术。搭建公开的行业数据标准和协议,建立统一的装备、工具、流体和软件标准。

2)全自动化钻机装备系统。研发全自动化钻机及配套系统,以实现“一键式”全自动操作和钻井智能调控。开展全自动控制连续起下钻钻机及配套设备研究,配备钻台机器人、钻井液连续循环系统等,以实现钻机设备的全自动化和钻台无人化。

3)高性能测传控系统。提升井下工程地质参数的获取精度和传输速率,扩展井下工具、仪器、流

体的智能感知和智能调控能力。开展多维多尺度地层参数智能解释技术研究,建立多维多尺度边、远/前探测方法,开展智能井下高速传输技术,探索智能钻杆、光纤传输技术。

4)智能钻井分析决策系统。借助智能机器来辅助司钻管理钻井过程或智能决策。开展地质-工程一体化钻井数字孪生技术研究,实现钻井全生命周期的智能化分析作业,提升智能钻井分析决策系统,进一步打通地质工程数据库,强化人工智能分析方法和学习样板,集成更多智能应用场景。

## 5 结束语

智能钻井是油气增储降本和绿色发展的重要手段,也是实现石油工程转型升级的重要途径。经过多年技术攻关,中国石化自动化钻机装备及配套系统、井下测传控系统和智能决策分析系统等智能钻井关键技术不断完善,已经实现了钻井参数智能优化、井筒风险智能预警与诊断、井眼轨迹智能导航3个作业场景的现场示范,达到了咨询模式下智能辅助-人工决策的闭环控制水平。为了进一步提高中国石化智能钻井技术水平,下一步应加大智能钻井现有技术的应用规模并不断迭代升级,强化基础研究和关键技术研发,提升钻井作业智能化水平,支撑油气高效勘探和效益开发。

## 参 考 文 献

### References

- [1] 王敏生,光新军.智能钻井技术现状与发展方向[J].石油学报,2020,41(4):505-512.  
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Status and development trends of intelligent drilling technology[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(4): 505-512.
- [2] 王敏生.沿钻柱测量技术及其发展方向[J].石油钻探技术,2022,50(4):52-58.  
WANG Minsheng. Along-string measuring technique and its development direction[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(4): 52-58.
- [3] 李根生,宋先知,祝兆鹏,等.智能钻完井技术研究进展与前景展望[J].石油钻探技术,2023,51(4):35-47.  
LI Gensheng, SONG Xianzhi, ZHU Zhaopeng, et al. Research progress and the prospect of intelligent drilling and completion technologies[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(4): 35-47.
- [4] 张好林,杨传书,李昌盛,等.钻井数字孪生系统设计与研发实践[J].石油钻探技术,2023,51(3):58-65.  
ZHANG Haolin, YANG Chuanshu, LI Changsheng, et al. Design and research practice of a drilling digital twin system[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(3): 58-65.

- [ 5 ] 杨传书, 李昌盛, 孙旭东, 等. 人工智能钻井技术研究方法及其实践 [J]. *石油钻探技术*, 2021, 49(5): 7–13.  
YANG Chuanshu, LI Changsheng, SUN Xudong, et al. Research method and practice of artificial intelligence drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 7–13.
- [ 6 ] OLIVIER G. Using an E&P digital twin in well construction[EB/OL]. (2022-01-07)[2024-08-12]. <https://www.haliburton.com/en/software/decisionspace-365-enterprise/decision-space-365-well-construction>.
- [ 7 ] BA S, IGNOVA M, MANTLE K, et al. Autonomous directional drilling planning and execution using an industry 4.0 platform[R]. SPE 204607, 2021.
- [ 8 ] LAI S W, NG J, EDDY A, et al. Large-scale deployment of a closed-loop drilling optimization system: Implementation and field results[R]. SPE 199601, 2020.
- [ 9 ] 李根生, 宋先知, 田守嶙. 智能钻井技术研究现状及发展趋势 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(1): 1–8.  
LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shouceng. Intelligent drilling technology research status and development trends[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(1): 1–8.
- [ 10 ] ZHANG Hongbao, ZENG Yijin, LIAO Lulu, et al. How to land modern data science in petroleum engineering[R]. SPE 205689, 2021.
- [ 11 ] MAYANI M G, BAYBOLOV T, ROMMETVEIT R, et al. Optimizing drilling wells and increasing the operation efficiency using digital twin technology[R]. SPE 199566, 2020.
- [ 12 ] KARPOV R, KOJADINOVIC K, KOKOTOVIC U, et al. Live digital twin improving drilling performance and providing foundation for the realtime data quality control[R]. SPE 216981, 2023.
- [ 13 ] 蔡亚琳, 柯式镇, 康正明, 等. 随钻电阻率成像测井在裂缝地层中的响应模拟 [J]. *石油科学通报*, 2020, 5(3): 327–336.  
CAI Yalin, KE Shizhen, KANG Zhengming, et al. Logging response simulation of a LWD resistivity imaging tool in fractured formations[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2020, 5(3): 327–336.
- [ 14 ] 康正明, 柯式镇, 李新, 等. 随钻电阻率成像测井仪定量评价地层界面探究 [J]. *石油钻探技术*, 2020, 48(4): 124–130.  
KANG Zhengming, KE Shizhen, LI Xin, et al. Probe into quantitative stratigraphic interface evaluation using a resistivity imaging LWD tool[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2020, 48(4): 124–130.
- [ 15 ] 李新, 倪卫宁, 米金泰, 等. 一种基于非接触耦合原理的新型随钻微电阻率成像仪器 [J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(6): 46–52.  
LI Xin, NI Weining, MI Jintai, et al. A novel high-resolution resistivity imaging while drilling tool based on contactless coupling[J]. *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*, 2020, 44(6): 46–52.
- [ 16 ] KANG Zhengming, LI Xin, NI Weining, et al. Using logging while drilling resistivity imaging data to quantitatively evaluate fracture aperture based on numerical simulation[J]. *Journal of Geophysics and Engineering*, 2021, 18(3): 317–327.
- [ 17 ] XU Wei, HUANG Hang, LI Xin, et al. Self-adaptive inversion method of electromagnetic-propagation resistivity logging while drilling data[J]. *Applied Geophysics*, 2022, 19(3): 343–352.
- [ 18 ] ZHANG Hongbao, LU Baoping, YANG Shunhui, et al. A global drilling KPIs analysis system based on modern data science techniques[R]. SPE 203378, 2020.
- [ 19 ] ZHANG Hongbao, LU Baoping, LIAO Lulu, et al. Combining machine learning and classic drilling theories to improve rate of penetration prediction[R]. SPE 202202, 2021.
- [ 20 ] ZHANG Hongbao, ZENG Yijin, BAO Hongzhi, et al. Drilling and completion anomaly detection in daily reports by deep learning and natural language processing techniques[R]. URTEC 2020-2885, 2020.
- [ 21 ] ZHOU Fei, FAN Honghai, LU Baoping, et al. Application of DNN-TCN composite neural network in rate of penetration prediction[R]. SPE 209886, 2022.
- [ 22 ] BAI Kankan, FAN Honghai, ZHANG Hongbao, et al. Real time torque and drag analysis by combining of physical model and machine learning method[R]. URTEC 3723045, 2022.
- [ 23 ] ZHOU Fei, FAN Honghai, LIU Yuhan, et al. Application of XG-Boost algorithm in rate of penetration prediction with accuracy[R]. IPTC 22100, 2022.
- [ 24 ] LU Baoping, XU Ting, HUANG Yuebin, et al. Applications of computer vision and deep learning in visual features extraction of drill bits[R]. IPTC 22624, 2022.
- [ 25 ] 曾义金, 李大奇, 陈曾伟, 等. 基于自然语言处理与大数据分析的漏失分析与诊断 [J]. *石油钻探技术*, 2023, 51(6): 1–11.  
ZENG Yijin, LI Daqi, CHEN Zengwei, et al. Loss analysis and diagnosis based on natural language processing and big data analysis[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(6): 1–11.
- [ 26 ] LU Baoping, YUAN Duo, WU Chao, et al. A drilling technology guided by well-seismic information integration[J]. *Petroleum Exploration and Development*, 2020, 47(6): 1325–1332.
- [ 27 ] JIANG Jun, LUO Fang, ZHANG Hongbao, et al. Adaptive multiexpert learning for lithology recognition[J]. *SPE Journal*, 2022, 27(6): 3802–3813.

[ 编辑 令文学 ]