

地质钻探专家决策系统开发与信息化发展路径分析

尹浩¹, 梁健¹, 张华¹, 马琳¹, 孟义泉¹, 宗泽斌², 王跃伟¹

(1. 中国地质科学院勘探技术研究所, 河北廊坊 065000; 2. 西部钻探工程有限公司, 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 针对地质钻探工程中数据采集标准化缺失、决策分析维度单一、数据价值挖掘不足等问题, 本文提出了一套基于物联网与人工智能技术的钻探专家决策系统。系统通过构建多源数据采集层、混合存储架构、实时计算引擎与可视化前端技术, 实现了钻井参数实时监测、工况自动识别与专家在线反馈功能, 以期提升钻探安全性与时效性、降低井内事故率提供支撑。下一步, 将融合知识图谱与生成式大模型技术, 构建“透明井下-智能井场-云端大脑”三级智能决策体系, 推动地质钻探从“经验驱动”向“数据智能”范式跃迁。

关键词: 地质钻探; 信息化; 数据采集; 专家决策; 系统开发; 发展趋势

中图分类号: P634 **文献标识码:** A **文章编号:** 2096-9686(2025)S1-0001-08

Development of an expert decision-making system for geological drilling and analysis of informatization pathways

YIN Hao¹, LIANG Jian¹, ZHANG Hua¹, MA Lin¹, MENG Yiquan¹, ZONG Zebin², WANG Yuewei¹

(1. Institute of Exploration Techniques, CAGS, Langfang Hebei 065000, China; 2. West Drilling Engineering Company Limited, CNPC, Karamay Xinjiang 834000, China)

Abstract: To address challenges in geological drilling engineering, such as non-standardized data acquisition, single-dimensional decision analysis, and insufficient data value utilization, this study proposes an expert decision-making system based on IoT and artificial intelligence (AI) technologies. The system integrates a multi-source data acquisition layer, a hybrid storage architecture, a real-time computing engine, and a visualization frontend, enabling real-time monitoring of drilling parameters, automated operating condition recognition, and expert feedback, with which to enhance drilling safety and operational efficiency while providing robust support for reducing downhole accident rates. Future work will focus on integrating knowledge graph and generative large language model technologies to establish a three-tier intelligent decision-making framework (“transparent downhole-smart wellsite-cloud brain”), driving the paradigm shift from “experience-driven” to “data-intelligent” geological drilling.

Key words: geological drilling; informatization; data acquisition; expert decision-making; system development; development trends

0 引言

地质钻探是资源勘探的核心技术手段, 地质钻探工程的系统实施对精准探获地下实物资料、高效分析地层信息, 具有决定性的意义。地质钻探按研

究领域和工程目的不同, 可分为岩心钻探、科学钻探、油气钻探等, 通过操作专门的钻探装备, 选配适用的钻探工艺, 驱动适配的井下器具碎岩入地, 获取地下实物资料。因地层复杂程度和选取的钻进

收稿日期: 2025-05-27; 修回日期: 2025-07-28 DOI: 10.12143/j.ztgc.2025.S1.001

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目“云平台地质调查节点运行维护与网络安全保障(勘探技术所)”(编号: DD20251200126)、“固体矿产高效精准勘探技术及自动化钻探装备升级与应用”(编号: DD20242850); 中国地质科学院勘探技术研究所培育基金课题“钻探知识汇聚共享平台与项目全生命周期管理系统开发”(编号: PY202410)

第一作者: 尹浩, 男, 回族, 1987年生, 高级工程师, 地质工程专业, 硕士, 从事钻探工艺、钻具及信息化研发工作, 河北省廊坊市广阳区金光道77号, yhao@mail.cgs.gov.cn。

引用格式: 尹浩, 梁健, 张华, 等. 地质钻探专家决策系统开发与信息化发展路径分析[J]. 钻探工程, 2025, 52(S1): 1-8.

YIN Hao, LIANG Jian, ZHANG Hua, et al. Development of an expert decision-making system for geological drilling and analysis of informatization pathways[J]. Drilling Engineering, 2025, 52(S1): 1-8.

工艺不同而导致钻探投入成本和实施效率不同,能否及时预判识别井下钻进情况而调整钻探工艺,将决定地质钻探的安全性和时效性。

随着信息革命带来的算力、存储、传输及物联网技术的日新月异,通过信息化手段实现井场数据采集、传输汇聚、分析预判井下情况进而提高地质钻探工程的实施效率,成为当前亟需关注和开展的工作任务^[1]。

近年来,国内外在钻井信息化领域的研究与应用发展迅速。国际油服依托其强大的技术积累,构建了覆盖钻井设计、实时优化、风险预警的全流程智能化平台,如斯伦贝谢的DrillPlan、DrillOps套件,哈里伯顿的DecisionSpace,深度融合了物理模型、数据驱动模型和专家系统,显著提升了复杂井的作业效率和安全性。国内中石油、中石化为代表的企业在油气钻井领域积极推进智能化转型,开发了如钻完井实时数据集成分析系统(RDAS)、智能钻井系统(IDSS)等,实现了钻井参数的实时监控、远程专家支持及部分工况的智能识别。在科研领域,基于机器学习(如LSTM、CNN、强化学习)的钻井参数优化、井下工况诊断(如黏滑、井漏、溢流早期识别)和钻头磨损预测等成为研究热点^[2-3]。

现有钻井数据获取、传输入库均有对应的解决方案,但技术集成度、产品化、经济性和易用性不足阻碍了在行业内大范围推广应用^[4],使用上仍存在显著差距。在数据获取方面,地质钻探工程地面井场数据的获取能力和利用水平,因工程目的、应用场景和选用装备不同而参差不齐。在岩心钻探方面,基本停留在人工经验判别钻进工况和手动记录钻探工程参数的现状,其中立轴式钻机通过立轴驱动钻杆旋转,机械结构简单,操作方便,应用广泛,但数据采集和利用程度低;全液压钻机动作灵活,自动化程度高,但钻探设备参数在线化水平有待进一步提升;在科学钻探方面,引入钻参仪采集存储并展示钻井工程数据曲线,辅助操作人员识别钻井工况;在参数井油气钻探方面,通过专业综合录井技术采集并实时展示地质数据和工程数据,实现随钻地质评价和钻井过程监测^[5]。对于深部钻探、海洋钻探等井下工况复杂、作业成本高的钻探工程,对钻井装备数据的采集和利用有更高依赖,井场信息化水平要求更高。井下数据获取也因井身结构要求不同和工程成本约束,不同工程对井下

数据依赖程度和要求不同;一般钻井工程对井下钻井轨迹的测量有需求,在钻遇矿层时对地层物性参数获取也有工程要求。在数据传输方面,井下与地面之间通过泥浆脉冲、电磁波通信或有缆方式传输到地表;井场与服务器之间通过4G/5G移动信号或网络专线实现数据传输。

随着新一轮找矿突破战略行动的工作推进,对深钻、快钻、打成、打好、取好的工程需求越来越多,经验决策的模糊性与深钻工程安全精细化要求、现有规程难以量化复杂工况参数阈值等矛盾凸显,装备数字化水平参差不齐和传统设备传感器缺失导致数据断层、工程数据难以全覆盖,现有地质钻探数据采集与利用水平亟需提升。因此,升级钻探装备数据采集能力、开发钻探数据分析决策系统并厘清地质钻探信息化发展方向,对地质钻探行业发展具有重要促进作用。

1 钻探井场数据汇聚与处理能力存在的挑战

1.1 数据采集标准化接口缺失

目前的钻井现场存在设备协议不兼容和数据格式不完整的问题。专用通信协议用于不同制造商的钻井系统和录井仪器等设备,导致无法实时兼容汇聚多井工程参数和地质数据。在现场手动纸质或Excel电子表格转录的常用手段导致数据延迟和主观错误率高。为此,亟需建立行业数据收集标准,推进支持WITSML/OSDU等开放协议的智能网关设备,使用OPC UA等工业互联标准实现多个来源异构设备的数据规范化处理,构建包括数据标签、采样频率和准确度等级的标准化元数据采集系统接口,实现各设备之间数据的实时无缝传输^[6]。

1.2 决策分析依赖数据来源单一

现有决策系统中80%以上的数据来自井场传感器,缺乏地质建模、邻井历史和行业规范等多维数据融合。由于缺乏多源数据的整合和矫正,钻井工况识别和井下复杂预判准确性不足,不利于推广应用。为此,亟需开发多数据源组成的综合知识库,整合结构化和非结构化数据,如钻井时的工程参数、地层数据和钻井液性能参数等,利用知识图谱技术建立地质工程关联模型,开发多模态数据融合算法,将决策支持维度从实时监测扩展到风险预测,通过多维数据协同,提升决策准确性和降低钻井复杂性^[7]。

1.3 数据分析利用程度不足

现有系统多数仅实现了基础数据可视化,未能充分挖掘数据价值,大量存储数据处于待整理和挖掘状态,钻井参数优化仍然依赖于经验公式,机器学习模型应用率不足^[8-9]。为此,有必要建立智能分析平台,部署数字孪生模型,应用神经网络机器学习算法实现工况预警,建立全口径关键指标组成的智能评估体系,通过强化学习动态优化钻压、转速等工艺参数组合。

综上,当前的核心矛盾已从“数据有无”转变为“数据如何用好”。异构数据接口、单一决策维度和浅层价值挖掘正制约着钻探信息化、智能化的深化发展,突破数据融合与智能分析瓶颈,是实现数据驱动决策的当务之急。

2 数据驱动的钻探专家决策系统开发

对于上述钻探信息化存在的问题,结合钻探验证工程项目,开展了一定的研究工作,基于物联网技术、前后端、数据库、消息队列、实时计算及容器化等开发环境和工具,研发了钻探专家决策系统,突破数据实时采集和解析、分布式计算和存储、规则引擎设计与优化、实时可视化展示、专家建议知识库构建等关键技术,采用现代化的技术栈,实现了从数据采集、存储、分析到展示的全流程管理,可以有效支持钻探作业的决策过程。本系统对钻井进度实时监控和工况自动分析,专家在线点评反馈,能够及时发现潜在问题,提高作业效率和安全性、经济性。同时,实现了钻探工程参数变化特征与工况的对应关系识别,并建立工况识别标签化数据库,为实现钻探智能化奠定了基础,为钻探领域的智能算法训练提供高质量数据支持。通过汇集大量钻探工程验证项目的录井数据,涵盖不同地质条件下的钻探参数和工况特征,形成全面的工况库,保证数据多样性;对数据进行清洗、标准化和标签化处理,确保样本的准确性和一致性,提高数据质量;基于工况标签化数据库,后续开发机器学习模型,优化工况识别算法,为智能工况识别提供可靠依据。

2.1 多源数据采集

2.1.1 DTU数据采集传输

适配工作性能满足录井仪或现场物联网传感器采集频率要求的DTU(Data Transfer unit)无线终端设备,使用Spring Integration框架处理DTU数据

流,实现数据清洗和标准化处理,采用异步处理模式,提高吞吐量^[10]。

2.1.2 WITS报文协议解析

使用Java NIO搭建高性能Socket服务器,配置监听端口接收WITS报文,按协议规范解析23个钻探参数,使用Apache Commons Pool管理接口连接池通过合理架构设计和优化策略,实现内存优化、线程优化及TCP优化,适用于钻探专家决策系统的实时数据采集和传输需求,可以有效处理大量并发连接、数据处理、监控统计等功能需求和大数据量钻探数据采集传输、实时参数监测、警告推送、命令下发等应用场景,报文传输入库流程见图1。

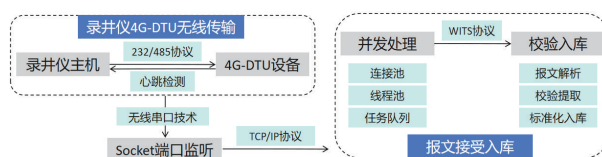


图1 基于WITS报文传输入库流程

2.1.3 井场视频流监控集成

基于海康互联内置流量视频采集球机,结合后台视频流API接口调用,实现井场钻台工况视频信息实时在线展示。

2.2 混合存储与数据库设计

2.2.1 实时-历史数据分层存储

采用开源关系数据库管理系统和混合存储架构,分别实时存储录井数据和手动导入历史数据,支持高效时序查询。

2.2.2 数据库设计

构建钻探实时数据表、工况识别结果表、专家诊断意见表,记录各钻井工程参数,标识各时段的工况类型、工况描述、开始结束时间、置信度等核心业务表结构,关联各工况ID、专家建议内容、优先级、处理状态等,为构建钻井井史概览、快速了解井场情况提供数据支撑。

2.2.3 数据字典设计

建立完整的数据字典,包括:钻井工况类型字典、异常事件类型字典、处理措施字典、预警等级字典。

2.3 实时计算与工况识别引擎

2.3.1 流式数据特征提取

基于Spark Streaming处理实时数据流,利用滑动窗口技术实现实时数据分析,调取特征提取模块

完成多维特征计算,构建典型工况(如正常钻进、起钻、下钻、接单根、循环、井漏、溢流、钻具刺漏、卡钻、岩心堵塞等)与关键钻探参数(钻压、转速、扭矩、泵压、流量、大钩负荷、大钩高度、入口/出口密度等)之间的映射关系,为每种工况定义关键参数阈值条件、状态组合以及时序变化特征,利用历史录井数据,应用特征重要性分析和关联规则挖掘,量化规则中阈值的合理范围,并将上述提炼规则按

照判断逻辑的优先级和复杂度,开发决策树模型,非叶节点代表参数特征的条件判断,叶节点则对应具体的工况类型标签,实现按优先级、风险度的工况自动识别^[11]。

2.3.2 时序-频域参数关联分析和工况识别引擎开发

基于钻探技术规程,梳理典型工况对应钻探参数映射关系,实现程序编写,见图2。

数据大屏 x

工况规则配置

工况名称

请输入工况名称

等级

请选择等级

状态

请选择状态

新增

重置

+ 新增

修改

删除

全导出

☐	ID	工况名称	规则描述	类型	等级	处理对策	状态	创建时间	操作
☐	1	工况 - 钻进	深度变化: $\text{\$depth_rate} \geq 0.160$, $\text{abs}(\text{钻头位置}-\text{井深}) \geq 0.2\text{m}$	工况	提醒	3	有效	2024-11-13	修改 删除
☐	2	工况 - 起钻	钻头脱离孔底, $\text{\$bit_rate} \leq 0.01\text{m/s}$, $\text{abs}(\text{钻头位置}-\text{井深}) \geq 30$	工况	提醒		有效	2024-11-16	修改 删除
☐	3	工况 - 下钻	钻头下入孔底, $\text{RATE_PER_SECOND} \leq 0.01\text{m/s}$, $\text{abs}(\text{钻头位置}-\text{井深}) \geq 30$	工况	提醒		有效	2024-11-16	修改 删除
☐	4	工况 - 划眼	a) 转速、扭矩、钻压、泵压、大钩负荷不为零; b) 井深持续加深,如深度增加(0.160)米每小时; c) “井深-钻头位置” $\geq 0.2\text{m}$	工况	提醒		有效	2024-11-16	修改 删除
☐	5	孔内复杂情况-1钻具漏失	a) 孔口冲液面上返量减少; b) 泥浆池液面下降; c) 泵压降低; d) 钻进扭矩增大; e) 钻具放空。	异常情况	提醒		有效	2024-11-16	修改 删除

图2 工况规则配置表

基于 Douglas-Peucker 算法,清洗数据,剔除采集数据异常点,提高可视化效果和处理速度;依据时序分析方法,制定参数曲线变化趋势特征计算公式(见图3),基于快速傅里叶变换,实现频域特征提取,通过相关性分析,建立参数关联特征体系,实现钻压、钻速等参数的统计特征提取,支持实时趋势分析^[12]。

2.4 可视化与专家交互应用

2.4.1 钻探参数动态可视化

基于 RuoYi 框架开发,使用 Vue.js 构建前端界面,采用 ECharts 实现数据可视化和多维展示,包括:钻井基本信息、钻探工程进度、钻探工程参数、钻探情况预警、井场视频监控、井史情况概览、专家意见反馈。

钻井基本信息:展示依托项目、开钻日期、设计井深、施工天数,见图4。

钻探工程进度:以工程日报表和瀑布图的形式显示从开钻到当天或选取时间段内的工程进度情况,包括当日进尺、累计进尺、取心回次、取心长度、取心率、钻达层位、工作进度等,见图5。

钻探工程参数:展示钻井工程录井参数变化曲

修改工况规则配置

* 工况名称

工况 - 钻进

* 计算公式

{

"type": "RANGE",

"target": "\${depth_rate}",

"min": 0.1,

"max": 60

}

工况描述

深度变化: $\text{depth_rate} \geq 0.160$, $\text{abs}(\text{钻头位置}-\text{井深}) \geq 0.2\text{m}$

时间间隔(秒)

两条数据的时间间隔(秒)

深度间隔(米)

请输入最少深度间隔(米)

* 数据条数

3

* 类型

工况

* 等级

提醒

原因

1

预防措施

2

处理对策

3

备注

4

* 状态

有效

确定

取消

图3 工况识别规则计算公式写入模块

线和地质录井参数变化曲线随钻井深度或时间的变化情况,展示时间段或井段可根据需要选择,X轴

添加地质钻探井

名称

请输入名称

* 井号

请输入井号

* 钻机

请输入钻机

* 设计垂深

请输入设计垂深(米)

^

v

(米)

目的层

请输入目的层

钻井队名称

请输入钻井队名称

* 开钻日期

2024-11-27

完井日期

请选择完井日期

* 井状态

进行中

v

负责人

请选择负责人

v

经度

^

v

纬度

^

v

* 最新端口

^

v

* 原文格式

时间+数据

v

参数配置

描述

请输入内容

确定

取消

图 4 钻探井建井模块

回放标尺可调节曲线显示大小和拖动巡视,见图 6。

钻探情况预警:根据钻井参数变化趋势关联分析,判断当前钻台情况,判别井下复杂情况,预警井下事故,见图 7。

工程录井数据实时展示:大屏中下方实时展示井深、钻头位置、钻头编号、钻压、扭矩、转速、钻时、钻头累计进尺、立压、钩载、大钩高度、入口密度、出口密度、入口流量、出口流量、入口温度、出口电导、总池体积,便于快速了解钻进情况,见图 8。

井史概览:表格展示从开钻到当前或选定时间范围内的工况列表,如各开次钻进、下套管、固井、回次取心等,便于用户快速了解当前钻进情况,为做出指导性建议提供事实依据。

专家意见反馈:根据每个时间范围确定的工况,进行评价分析,可修正自动判别工况、给出当前钻进建议、指出存在问题(见图 9~11),为钻井安全高效可持续施工提供实时的技术支撑。其中,通过在系统数据库中设计专门的专家建议知识表,实现专家建议结构化/半结构化形式存储,其核心字段包括:关联工况类型 ID(链接至工况类型字典)、适用地层条件(链接至地层字典)、问题描述关键词、具体建议措施、建议优先级(高/中/低)、提出专家、审核状态、生效日期等;基于存储在专家建议知识表中的结构化数据,与从技术文献、规程规范中抽取的实体关系和存储,形成钻探领域知识图谱,形成“为什么”和“怎么做”的逻辑链条,为更复杂、更精准的推理决策提供基础。

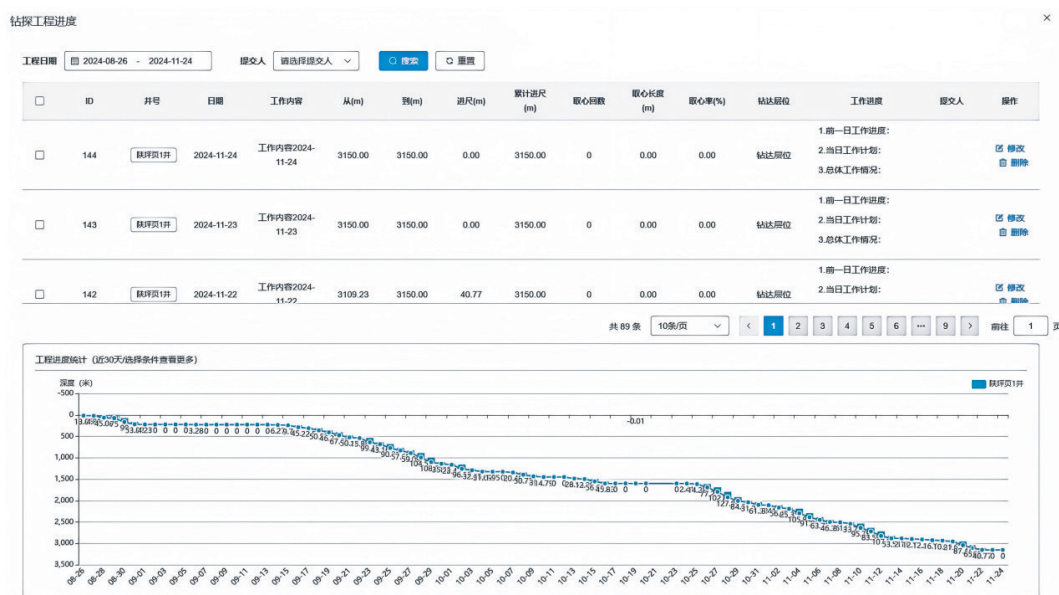


图 5 钻井工程进度子页面



图6 钻探工程参数与地质录井参数可视化子页面



图7 钻探工况识别标签可视化子页面

1.井深	3150.00m	7.钻时	0.00min/m	13.出口密度	0.04g/cm3
2.钻头位置	2231.94m	8.钻头累计进尺	643.17m	14.入口流量	0.00L/s
3.钻头编号	18.00#	9.立压	0.00MPa	15.出口流量	2.25L/s
4.钻压	0.00kN	10.钩载	17.70kN	16.入口温度	41.70℃
5.扭矩	0.00kN·m	11.大钩高度	29.02m	17.出口电导	0.34
6.转速	0.00rpm	12.入口密度	1.15g/cm3	18.总池体积	56.98m3

图8 录井参数实时展示模块

2.4.2 多角色权限协同管理

基于RBAC模型实现管理员、现场工程师、专家用户等用户角色,功能权限:数据查看、分析、批注等;数据权限:按井场、项目划分,用户权限管理

模块及登录页。

2.4.3 历史钻井数据导入模块

通过建井模块,按要求编制数据库表格并模拟数据流向指定端口定时发送钻井工程参数数据,实现历史钻井参数的导入。

综上,本工作基于后端(Spring Boot+MyBatis Plus)、前端(Vue.js+Element UI)、数据库(MySQL+ClickHouse)、消息队列(Kafka)、实时计算(Spark Streaming)及容器化(Docker+Kubernetes)等开发环境和工具,突破数据实时采集和解析、分布式计

专家意见反馈

批注类型

☐	ID	工况日志ID	井ID	批注类型	批注内容	创建时间	创建者	操作
☐	4	5	4	日志评价	取心钻进、注意控制钻压	2024-11-16	1	修改 删除
☐	5	4	4	设备故障	泵压不稳, 检查泥浆泵	2024-11-16	1	修改 删除
☐	6	5	4	日志评价	注意控制起钻速度, 预防前心掉落	2024-11-16	1	修改 删除
☐	7	5	4	日志评价	注意控制钻速, 气测异常, 注意分析砂样	2024-11-16	1	修改 删除
☐	8	5	4	4	222	2024-11-17	1	修改 删除
☐	9	137	4	日志评价	钻过目的层, 达到设计井深, 完钻	2024-11-25	1	修改 删除

共 6 条 1 页

图9 专家意见反馈表页面

添加工况日志

图10 工况日志手动添加模块

修改工况日志

图11 工况日志修订页面

算和存储、规则引擎设计与优化、实时可视化展示、专家建议知识库构建等关键技术,在技术、经济、管理等方面取得了显著的成效。

3 地质钻探信息化发展路径

信息技术的快速发展为传统钻探模式面临的钻遇地层隐蔽性强导致井内事故风险高、经验驱动的参数调控难以适配复杂工况、装备数字化水平滞后制约数据价值释放等问题提供了解决方案,亟需突破“人工经验主导、数据碎片沉睡、决策响应滞后”的传统范式,构建“数据感知-智能决策-动态优化”的新质生产力体系。

(1)感知层:井下-地面全域数据采集。研发适配立轴/全液压钻机的智能传感模块,攻克数据可靠传输技术,构建井场全域感知体系。

(2)决策层:知识-数据双驱模型构建。构建融合行业规范的钻探知识图谱,研制规则推理与机器学习混合决策模型,开发知识-数据双驱引擎。

(3)平台层:智能钻探中枢系统集成。建立钻探数据采集、传输、分析相关规范标准,研制自主可控的云端智能钻探软件套件,形成自主可控地质钻探大数据中心,汇聚实时数据流、工艺知识库与优化算法集,突破钻井“设计-施工-监控”的动态闭环调控,建设智能钻探中枢数据平台,打造“钻探心智大脑”^[13]。

综上,通过攻克“数据断链-认知局限-决策滞后”技术瓶颈,“数据驱动”破解“地下黑箱”,构建“透明井下-智能井场-云端大脑”三级智能决策体系,为新一轮战略找矿突破和国家能源资源安全保障提供智能化钻探技术底座。

4 结论

(1)异构数据接口、单一决策维度和浅层挖掘正制约着钻探信息化、智能化的深化发展,突破数据融合与智能分析瓶颈,是实现数据驱动决策的当务之急。

(2)开发的钻探专家决策系统初见成效。研发的钻探专家决策系统集成物联网、分布式计算与规则引擎技术,攻克了异构数据实时解析、多源特征融合与工况动态识别难题,实现了钻探参数分钟级监测、常见工况自动识别。

(3)明确了以“三层架构”为核心的地质钻探信息化发展路径:在感知层,研制井下-地面数据采集传感传输模块,构建井场全域数据汇集体系;在决策层,融合钻探专业知识图谱与工程数据机器学习,形成“知识-数据”双驱的智能决策模型;在平台层,构建云端智能中枢与行业级数据中心,奠定一体化应用生态。

(4)通过“数据驱动”破解地下复杂工况黑箱问题,构建智能钻探决策体系,将为深部资源勘探、海洋钻探等高难度工程实施提供技术底座,助力国家

能源资源安全保障与新一轮找矿突破战略实施。

参考文献:

- [1] 魏盈盈.人工智能在钻井工程中的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2022,42(23):127-129.
- [2] 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.
- [3] 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(5):1-9,171.
- [4] 袁铭,袁立志,高翔.钻井数据分类分级管控技术研究[J].电脑知识与技术,2024,20(13):135-137.
- [5] 邵磊,倪朋勃,张文颖,等.基于随钻数据的岩性智能识别方法[J].录井工程,2024,35(4):26-31.
- [6] 陈瑞,黄朝兵.基于Neo4j和Unity3D的钻井知识图谱可视化系统[J].现代计算机,2022,28(12):90-96.
- [7] 陈嘉豪,李谦,曾小龙,等.结合地质导向作业的实时智能地层识别预测模型[J].钻探工程,2023,50(S1):135-142.
- [8] 徐楷,苏堪华,李猛,等.机器学习在油气钻井工程中的应用[J].非常规油气,2023,10(5):8-17.
- [9] 陈秋实.基于数据增强技术的钻井数据集目标检测方法研究[D].青岛:中国石油大学(华东),2022.
- [10] 叶惠仙.基于Spark Streaming、Kafka构建数据中心加工引擎的实践[J].网络安全技术与应用,2023(3):51-53.
- [11] 梅舜豪.钻井一体化智能系统研究及应用[J].石油化工自动化,2023,59(2):53-55,82.
- [12] 甘超,曹卫华,王鲁朝,等.深部地质钻探钻进过程流式大数据分析 with 动态预处理——以辽宁丹东3000 m科学钻探工程为例[J].钻探工程,2022,49(4):1-7.
- [13] 雍锐.智能钻井多目标协同优化系统研究与应用[J].钻采工艺,2024,47(3):9-14.

(编辑 王文)