

基于人工智能的地质工程一体化钻井优化系统构建与应用

周俊鹏^{1,2} 王文财³ 孙艺桐³

1. 辽宁省地质勘探矿业集团有限责任公司 辽宁沈阳 110031

2. 辽宁省地矿集团地质有限责任公司 辽宁沈阳 110031

3. 辽宁省地质矿产研究院有限责任公司 辽宁沈阳 110031

摘要: 钻井作业作为石油天然气勘探开发的核心环节,其效率与成本直接决定油气田开发的经济价值。传统钻井优化依赖人工经验与静态模型,难以应对复杂地质条件下的动态工况变化,常导致钻井周期延长、非生产时间增加及井下事故风险上升。本文提出一种基于人工智能(AI)的地质工程一体化钻井优化系统,通过融合地质数据、工程参数与实时监测信息,构建多源数据融合框架,设计包含数据预处理、特征工程、智能模型训练与决策输出的系统架构。系统核心采用改进的深度神经网络(DNN)与强化学习(RL)算法,实现钻井参数动态优化、井下风险实时预警及地质条件自适应匹配。通过在某页岩气田的现场应用验证,该系统可将平均机械钻速提升18.7%,钻井周期缩短12.3%,井下复杂事故发生率降低27.5%,显著提升了钻井作业的智能化水平与经济效益,为油气田高效开发提供技术支持。

关键词: 人工智能;地质工程一体化;钻井优化;深度神经网络

引言

钻井作业是油气田勘探开发中投资最大、风险最高、技术最密集的关键环节。传统的钻井作业模式通常将地质研究和工程设计视为两个相对独立的序列过程:地质学家提供地质设计和目标,工程师据此进行钻井设计并执行。然而,地下地质条件具有极强的非均质性和不确定性,实钻地层往往与设计模型存在偏差。这种地质与工程的脱节,极易导致钻井过程中遭遇未预料到的复杂地层(如高压层、裂缝性漏失层)、工具故障、井眼轨迹偏离靶区等问题,造成机械钻速低、卡钻、井漏、井喷等恶性事故,带来巨大的经济损失和时间浪费。

一、地质工程一体化钻井优化系统构建

1. 系统设计理念

系统以“数据驱动、地质-工程耦合、实时自适应”为核心设计理念,遵循“数据输入-融合处理-智能决策-现场执行-反馈迭代”的闭环逻辑:摒弃传统经验依赖,以多源数据(地质、工程、监测)为基础,通过AI算法挖掘数据背后的关联规律,支撑优化决策;打破地质与工程数据的割裂状态,建立地层岩性、孔隙压力等地质参数与钻压、转速等工程参数的动态映射关系;通过实时数据采集与模型在线更新,实现对钻井工况变化的快速响应,动态调整优化策略,避免“一刀切”式参

数设置。

2. 系统架构设计

系统采用“四层三交互”架构,从下至上分为数据层、融合层、模型层与应用层,各层之间通过数据交互、模型交互与决策交互实现协同工作。

数据层是系统的基础,负责采集钻井作业全流程的多源数据,涵盖三类核心数据,包括前期勘探阶段的地质解释数据(构造形态、地层厚度)、测井数据(孔隙度、渗透率、岩性识别结果)、岩心实验数据(岩石抗压强度、研磨性),以及随钻测井(LWD)实时地质参数;包括钻井设计参数(井身结构、目标井深)、实时作业参数(钻压WOB、转速RPM、扭矩TOR、排量Q、泵压P)、钻井液性能参数(密度、黏度、失水);包括井下随钻监测数据(井斜角、方位角、井下温度压力)、地面设备状态数据(钻机功率、绞车转速)、安全监测数据(井口压力、溢流量)。数据存储采用“时序数据库+关系数据库”混合架构:时序数据库(如InfluxDB)存储高频实时数据(如秒级更新的钻压、扭矩),关系数据库(如MySQL)存储静态设计数据与地质解释结果,确保数据存储的高效性与安全性。

二、人工智能概念及其在地质工程中的适用性

人工智能是研究、开发用于模拟、延伸和扩展人的智能的理论、方法、技术及应用系统的一门新的技术科

学。其核心在于让机器能够像人一样感知、学习、推理和决策。在本研究语境下，相关的AI核心技术主要包括。机器学习，是AI的核心分支，允许计算机系统利用历史数据（如已钻井的测井、录井、钻井参数数据）自动学习和改进模型，而无需显式编程。在钻井优化中，可用于预测ROP、识别岩性、检测井下异常等。深度学习是机器学习的一个子领域，它使用包含复杂结构或由多重非线性变换构成的多个处理层（神经网络）对数据进行高层抽象。特别适用于处理高维、非结构化数据，如利用随钻测井（LWD）和随钻测量（MWD）的曲线数据自动提取特征，进行地层对比和油气水层识别。自然语言处理用于分析和理解非结构化的文本数据，如钻井日报、地质报告、事故报告等，从中提取有价值的信息，并将其结构化，融入知识库。计算机视觉可用于分析岩屑图片、钻屑形态，辅助地质师进行岩性识别和沉积环境判断。强化学习，智能体通过与环境交互并获得奖励来学习最优策略。在钻井参数优化中，可将钻井系统视为环境，通过不断调整钻压、转速、排量等参数（动作），以最大化ROP或最小化成本为目标（奖励），训练出最优控制策略。

地质工程钻井是一个典型的数据密集型过程，涵盖了地震、测井、录井、钻井参数、流体性能等海量数据。这些数据中蕴藏着地层特性、岩石力学行为、钻头-岩石相互作用、水力动力学等复杂规律。传统数学模型难以精确描述这些高度非线性的物理过程，而AI方法，特别是机器学习和深度学习，恰恰擅长从数据中学习这些复杂映射关系，从而具备了解决地质工程一体化难题的天然适用性。

三、钻井领域人工智能关键技术

1. 机器学习算法

机器学习是人工智能在钻井领域的基础应用技术，通过数据训练建立输入（地质参数、装备参数）与输出（钻速、风险等级）的映射关系。在江汉油田复兴区块应用中，基于随机森林算法构建的机械比能（MSE）分析模型，实现了钻井参数的实时优化，使水平段机速提升114.77%。

2. 深度学习与大模型技术

深度学习通过多层神经网络实现特征自动提取，在处理随钻成像、地震数据等复杂信息时优势显著。中国石化智能钻井系统采用“DeepSeek大模型+地质工程一体化数据”架构，构建的“经小纬”混合智能体可替代人工完成摩阻系数计算等核心工作，大幅提升作业效率。

钻井领域大模型具备三大功能：一是知识整合，融合2000余个历史案例形成专家知识库；二是自然语言交互，支持语音汇报与数据查询，实现钻井数据“开口说话”；三是快速决策，在井漏等复杂情况处置中，30分钟内即可生成推荐方案，效率较传统模式提升8倍。

3. 强化学习与闭环控制

强化学习通过“试错-奖励”机制实现动态决策优化，适配钻井过程的实时调控需求。在胜利油田智能化示范工程中，基于强化学习的钻井参数调控模型，通过持续学习钻压、转速与机械钻速的关系，实现了多目标协同优化，优质储层钻遇率达到100%。该技术与自动化钻机结合，可构建“感知-决策-执行”的闭环控制体系，推动钻井模式从咨询式向半自主控制式升级。

四、地质工程一体化钻井优化系统构建

1. 系统设计理念与架构

（1）设计理念

系统以“地质引导工程、工程验证地质”为核心理念，打破传统地质与钻井专业的壁垒，实现三大融合：一是数据融合，整合地震、测井、钻井等多源数据；二是技术融合，集成AI算法、物联网、数字孪生等前沿技术；三是流程融合，构建覆盖钻前、钻中、钻后的全生命周期优化体系。通过这一理念，推动钻井决策从“经验驱动”向“数据+模型驱动”转变。

（2）总体架构

系统采用四层分布式架构，自下而上分为感知层、数据层、智能层与应用层，各层协同实现一体化优化功能。架构如图2所示（此处省略图表）：

感知层作为系统的“千里眼”与“顺风耳”，由高精度传感器、物联网设备与数据传输网络组成。井下部署随钻电阻率成像、摩扭监测等仪器，地面集成钻机状态监测、钻井液分析等设备，通过5G与连续波传输技术，实现毫秒级数据采集与传输，延迟控制在10秒以内。

数据层承担数据存储与管理功能，由分布式数据库与数据中台构成。采用云边协同架构，边缘端存储实时钻井数据，云端存储历史数据与知识库，通过联邦学习技术实现数据安全共享。已建成的数据库可容纳单区块万口井级数据，支持多维度数据关联查询。

智能层系统的“智慧中枢”，集成三大核心引擎。一是数据处理引擎，实现数据清洗与特征提取；二是AI算法引擎，包含20余种机器学习与深度学习模型；三是大模型引擎，基于DeepSeek等底座模型开发钻井专业能力。该层通过模型调用接口，为应用层提供智能分析服务。

应用层：面向用户的功能展示层，通过Web端与移动端提供可视化服务，涵盖钻前设计、钻中优化、风险防控等九大功能模块，满足不同场景需求。

2. 核心功能模块设计

(1) 钻前优化设计模块

该模块基于区块地质特征与邻井数据，实现钻井方案的智能化预设计。首先通过AI算法分析已钻井数据，建立地层岩性与钻井参数的匹配模型；其次结合目标井地质设计，预测不同井段的最优钻具组合、钻井液性能与参数范围；最后通过数字孪生技术进行钻井过程仿真，提前规避潜在冲突。在普陆301-1H井应用中，该模块设计的水平段钻井方案，助力刷新千佛岩组2126米最长纪录。

(2) 实时参数优化模块

作为钻中优化的核心功能，模块通过实时分析井下数据动态调整钻井参数。依托MSE热力图与ECD精细计算技术，实时监测钻头工况与井壁稳定性，由“经小纬”混合智能体动态推荐钻压、转速等关键参数。系统采用多目标优化算法，在保障安全的前提下平衡机械钻速与成本控制，如在江汉油田兴页L185-6-1HF井应用中，使二开平均机速提升101.48%，创下日进尺700米纪录。

(3) 风险智能预警模块

模块如同24小时值守的“安全卫士”，对7大工况38种状态进行全参数监测。通过构建井漏、井塌、卡钻等典型风险的AI识别模型，结合实时数据与历史案例进行比对分析，实现风险的提前预警。在西南工区马2-10井应用中，系统通过“地震裂缝预测+三压力解释”联合技术，成功化解窄压力窗口带来的漏失风险。预警响应流程包括三级机制：一级预警提示参数调整，二级预警启动专家会诊，三级预警触发紧急停钻。

(4) 轨迹智能导航模块

针对水平井、定向井的轨迹控制需求，模块融合地质导向与工程控制技术。基于随钻成像数据实时识别储层边界，由AI算法动态计算最优轨迹调整量，指导旋转导向工具作业。在胜利油田济阳页岩油示范区，该模块实现了轨迹的精准调控，优质储层钻遇率达到100%。模块支持轨迹偏差自动校正，校正响应时间小于1分钟，显著提升储层钻遇精度。

(5) 效能分析与知识管理模块

模块承担钻井效果评估与经验沉淀功能，包含KPI

分析与知识库两大子功能。KPI分析系统可自动计算机械钻速、钻井周期等关键指标，生成可视化分析报告；知识库则将每口井的优化方案、风险处置经验转化为数字资产，通过向量建模实现案例快速匹配。该模块使钻井经验得以复用，为后续井作业提供参考。

3. 系统运行机制

系统采用“驻井优化+中心把关+专家决策+现场执行”的联合作战模式，构建起“预警-优化-执行”的高效闭环。运行流程分为四步：感知阶段感知层设备实时采集井下与地面数据，通过5G网络传输至数据层；分析阶段智能层算法自动处理数据，生成参数优化建议与风险评估结果；决策阶段优化中心进行初步审核，复杂情况启动远程专家会诊，形成最终方案；执行阶段现场团队依据方案调整作业参数，执行效果反馈至系统用于模型优化。这一机制实现了数据、技术与人员的协同，打破了传统钻井的信息孤岛，使决策响应时间从天级缩短至小时级。

结语

随着人工智能技术的持续发展与钻井工程需求的不断升级，地质工程一体化钻井优化系统将向更智能、更集成、更可靠的方向发展。未来需重点突破前视探测、数字孪生、自主控制等核心技术，建立行业统一标准与协同机制，推动智能化水平从咨询模式向自主控制模式跨越。该系统的深度应用将彻底改变传统钻井作业模式，为深层、非常规等复杂油气资源的高效开发提供关键技术支撑，对于保障国家能源安全、推动油气行业高质量发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 刘庆山, 刘坤, 于晓逸, 等. 基于人工智能的地质工程一体化钻井优化系统构建与应用[J]. 录井工程, 2025(2).
- [2] 胡勇, 惠栋, 彭先, 等. 高含硫气藏开发关键技术新进展, 挑战及攻关方向[J]. 天然气工业, 2022, 42(12): 23-31.
- [3] 冯夏庭, 朱维中, 冯夏庭. 智能岩石力学在地下工程中的应用[C]// 第一届海峡两岸隧道与地下工程学术与技术研讨会. 1999. DOI: ConferenceArticle/5aa6fd97c095d72220f6c339.