

人工智能在油气钻井工程中的应用

邹文彬, 王强, 吴梦霞, 杨雅淳, 廖原凯

重庆科技大学石油与天然气工程学院, 重庆

收稿日期: 2024年11月4日; 录用日期: 2024年12月7日; 发布日期: 2025年1月8日

摘要

近年来, 随着油气资源的勘探和开发进入更深层、更复杂的地质环境, 传统钻井方式在效率、安全和成本上面临严峻挑战。为应对这些挑战, 人工智能(AI)技术正逐步渗透到油气钻井工程中, 提升了钻井作业的智能化水平。本文结合国内外对油气钻井工程的研究现状, 讨论了人工智能在油气钻井工程中的关键技术应用, 智能钻完井技术结合大数据、人工智能算法和软件平台, 优化井眼轨道、导向钻井和钻速等关键技术, 以提高作业安全性和效率。其次, 智能钻井装备的研发与应用在国际上已相对成熟, 智能钻机、钻头和旋转导向系统等设备实现了高度自动化, 提高了作业效率并降低了人力成本。最后, 钻完井软件系统通过引入机器学习和云计算等技术, 整合和分析大量数据, 从而优化钻井设计和操作。虽然国内在智能钻井软件和装备方面起步较晚, 但已有了一定进展, 主要集中在监测优化和设计方面。未来, 随着核心技术的突破, 人工智能将为油气资源开发带来技术革命。我国需继续加强基础研究, 结合行业实际需求, 推动技术自主创新与应用推广, 以提升整体智能化水平, 缩小与国际先进技术的差距。

关键词

人工智能, 智能钻完井技术, 智能钻井装备, 智能钻井软件

Application of Artificial Intelligence in Oil and Gas Drilling Engineering

Wenbin Zou, Qiang Wang, Mengxia Wu, Yachun Yang, Yuankai Liao

School of Petroleum Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing

Received: Nov. 4th, 2024; accepted: Dec. 7th, 2024; published: Jan. 8th, 2025

Abstract

In recent years, as the exploration and development of oil and gas resources enter deeper and more complex geological environments, traditional drilling methods face severe challenges in efficiency, safety and cost. To meet these challenges, artificial intelligence (AI) technology is gradually penetrating

into oil and gas drilling engineering, improving the intelligence level of drilling operations. Based on the current research status of oil and gas drilling engineering at home and abroad, this paper discusses the key technical applications of artificial intelligence in oil and gas drilling engineering. Intelligent drilling and completion technology combines big data, artificial intelligence algorithms and software platforms to optimize key technologies such as wellbore trajectory, directional drilling and drilling speed to improve operation safety and efficiency. Secondly, the research and development and application of intelligent drilling equipment have been relatively mature internationally. Equipment such as intelligent drilling rigs, drill bits and rotary steering systems have achieved a high degree of automation, which has improved operation efficiency and reduced labor costs. Finally, the drilling and completion software system integrates and analyzes a large amount of data by introducing technologies such as machine learning and cloud computing, thereby optimizing drilling design and operation. Although China started late in the field of intelligent drilling software and equipment, it has made some progress, mainly in monitoring optimization and design. In the future, with the breakthrough of core technology, artificial intelligence will bring a technological revolution to the development of oil and gas resources. China needs to continue to strengthen basic research, combine the actual needs of the industry, and promote independent technological innovation and application promotion, so as to improve the overall level of intelligence and narrow the gap with international advanced technology.

Keywords

Artificial Intelligence, Intelligent Drilling and Completion Technology, Intelligent Drilling Equipment, Intelligent Drilling Software

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源需求的增长, 油气钻井工程不断向更深、更复杂的环境拓展, 进入深层、超深层以及非常规油气资源开发的阶段, 钻井作业的复杂性和风险也逐步加大, 传统钻井技术难以应对。随着信息化、自动化、智能化技术的发展, 钻井技术正朝着更高水平迈进, 人工智能(Artificial Intelligence, AI)将在油气钻井工程领域发挥重要作用[1]-[4]。中央针对未来发展制定的十四五规划及 2035 愿景目标, 强调要将最新一代人工智能技术、领先的智慧型能源科技, 以及油气领域的智能化升级转型确立为重要的技术发展方向[5][6]。在这一框架下, 国家能源局在推进石油与天然气行业不断采用数字化和智能技术, 并促进行业结构的深化融合与改革。而中国石油、中国石化和中国海洋石油等关键公司, 也正在积极实施数字化转型和智能化升级, 以此加速产业进步[7]。笔者基于人工智能油气钻井工程应用场景和国内外技术现状, 就智能钻完井关键技术、智能钻完井装备、智能钻完井软件进行阐述。

2. 人工智能概述

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、技术以及应用系统的一门新的技术科学, 是由人工制造出来的系统所表现出来的智能。人工智能领域包含了学习(获取和应用知识)、推理(使用规则来达到近似或确定的结论)、自适应(在新环境中调整行为)和理解自然语言(与人类沟通的能力)。根据发展阶段可以分为三部分, 弱人工智能是指专注于执行特定任务或解决特定问题的人工智能系统。这些系统被设计用来在特定领域内表现出色, 但它们并不具备人类般的广泛智能或意识。弱人工

智能也被称为窄域人工智能或应用型人工智能，如图像识别、语音助手、聊天机器人等；强人工智能是指具有与人类相似的理解、学习和推理能力的人工智能系统，不仅能够在特定任务上表现出色，还能够各种环境中进行适应、推理和解决问题，具备广泛的认知能力，如无人机，无人驾驶等；超人工智能指一种超越人类智能的人工智能，能够在几乎所有领域，包括创造力、情感理解、决策能力和社交能力等方面，表现得比人类更出色，目前还在理论阶段[8]。

油气人工智能是指服务于油气勘探、开发、生产、集输、设备、炼化、经济全产业链的人工智能技术。目前钻井工程领域的人工智能研究属于弱人工智能范畴。人工智能技术是油气勘探开发降本增效的有效手段，也是实现关键技术升级换代、提高竞争力的有效途径[9]。

3. 国内外油气钻井工程领域人工智能发展情况

中国在人工智能的研发和商业化应用方面位居全球第二，仅次于美国。国际油气公司和油田服务公司正在积极布局人工智能技术，主要应用于智能油田建设、油气储层识别、油气采收率提升和生产设备维护等领域。同时，国内大型石油公司在人工智能技术的研究上也取得了显著进展，重点集中在油气勘探与地质分析、钻井与完井技术优化以及智能油田建设等方面[10]。

3.1. 钻井关键技术智能化

智能钻井技术是一项综合技术，融合了大数据、机理知识、人工智能算法、工具装备和软件平台。其发展受到数据处理水平、智能化工具装备和计算能力等多方面因素的制约，因此是一个需要长期推进和逐步升级的系统性工程。智能钻完井的关键技术包括井眼轨道智能优化、智能导向钻井和钻速智能优化等。

井眼轨道智能优化技术是一门以地质工程的多源数据为基础的技术，常利用遗传算法与神经网络等先进的人工智能技术来调整井位的方位角等关键参数。例如，Selveindran 等人将临井历史钻探数据融合至新的钻探方案当中，并通过深度神经网络技术分析相邻井位的地质特征相似性；王延江等人运用支持向量机技术进行井位路径的预测分析；孟庆华等人则结合神经网络与 Krijing 代理模型来进一步提升预测路径的精确度。陈冬等人构建了一个融合地质与井筒信息的三维模型，并依据计算机视觉技术实施了井位路径的即时调整。井眼轨道智能优化技术是确保钻探作业安全、高效与成本低廉的核心，通过应用人工智能方法进行钻探路径的优化设计，能够即时求解井眼轨迹，评价其偏差程度，并优化关键控制参数，从而提高钻探规划的精度与稳定性。

智能导向钻井技术的核心是基于云平台、大数据及人工智能等技术，实时监测钻井过程中的井下参数(如钻压、井斜角、地层压力等)，通过随钻测量系统(MWD)、旋转导向系统(RSS)、数据传输系统、自动控制与决策系统等人工智能系统，随钻根据实时数据优化钻井轨迹和钻井参数，确保钻头沿着理想路径到达目标层位。1992年，斯伦贝谢公司首次提出了地质导向的概念，开发了可用于测量电阻率和自然伽马的随钻测井工具，并推出了 Geosteering 和 WellEye 软件，能够直观显示三维成像数据和实时获取地层倾角，为作业人员提供准确的地层信息。

钻速智能优化技术是通过人工智能和大数据技术，结合钻井过程中实时采集的数据，优化钻井速度，以提高钻井效率、降低成本和确保井眼稳定性的一种创新技术，经常应用的算法涵盖了诸如随机森林、神经网络、蚁群算法、粒子群优化等技术。2022年，Pacis 等人运用转移学习的技术构建了一个可进行钻井速度预判的先导模型，有效提升了该预测模型在不同场景下的适用能力。Payette 等人研究了钻头破岩工况检测方法，综合考虑钻头寿命、钻速和风险，结合多目标遗传算法实现了参数优化。宋先知等人在机理约束下进行了钻头工况智能诊断，建立了机理-数据融合的智能预测模型，并开发了钻速实时预测

和多目标参数优化的算法与相关软件模块。该系统通过实时监控钻井参数(如钻压、转速、钻井液流量等)和井下地层数据,自动调整钻速和其他操作参数,确保钻井效率最大化,同时避免井下复杂情况的发生。

3.2. 油气钻完井装备智能化

国际上,智能钻完井装备的研究和应用已相对成熟。在持续多年的研究与开发之后,诸如斯伦贝谢、贝克休斯和哈里伯顿在内的美国油田服务企业已经成功推出了高度自动化的钻探装备及其相关技术[11]。例如,斯伦贝谢开发的 DELFI 平台利用实时数据分析和地质建模,实现了井下数据与地面监控的无缝衔接,能够在钻井过程中精确控制井眼轨迹,并快速应对复杂地层。针对井下作业装备而言,智能钻机、智能钻头及智能化钻杆的应用,能实现自动钻井作业和钻探自动化的精确调节,极大提升了钻井作业的效率 and 安全性,同时有效减少了人工成本。智能钻头采用以传感器及智能处理芯片作为主要构件,能够独立监测如地层的温度和压力、钻头的深度与角度等多项数据,并且自适应地调节其形态和运行参数,以便高效率推进钻探作业。例如,在 2020 年,哈里伯顿公司发布了名为 CerebroForce™ 的钻头位内传感技术模块,可被置入聚晶金刚石(PCD)钻头的连杆部分,用以对钻头作业过程中的振动、扭力、负荷、压强及温度等多种性能指标进行即时跟踪监控。

旋转导向钻井系统的规模化商业应用实现了随钻、随测、随控的功能,不仅确保了钻头的高效破岩能力,还实现了智能化的导向。通过分析地质条件和油藏特征,利用神经网络等先进方法建立以最大化油气产量为目标的钻井工艺参数优化模型,并将计算得到的最佳工艺参数与实时获取的随钻测量数据进行对比,从而自动确定最佳钻井轨迹。目前,全球多个大型油气技术服务公司,如斯伦贝谢、哈里伯顿和威德福等,均拥有自己的一系列先进旋转导向系统。例如,斯伦贝谢公司推出了多种类型的旋转导向产品,包括推靠式、指向式、混合式和近钻头式等。

我国自主开发的自动化钻井设备已能够较为自主地完成管柱控制,然而,在传感器稳定运作和效率、设备实时预警及问题诊断的精确度上还亟待提升,且液压力系统在运作精准度上有限,整体的智慧化程度仍旧需进一步增强。井控钻机装备虽已趋近于自动化,但其工控系统在井内状态感知和地质层面的识别能力尚存提升的空间。至于井下作业器材方面,伴随钻进的测量设备等井下工具基本已实现本土化生产,但其检测能力依然有待增强。国内针对旋转导向技术虽有所突破,但尚未能实现自动化、高效化和多样化的综合运用,与国际成熟技术之间依旧存在显著差异。

3.3. 钻完井软件系统智能化

在国外,主要通过深入分析开采钻井产生的庞大数据库来作为基础,融合了如机器学习、大数据分析、云计算等前沿技术手段,建立了一套完整的预测钻井地下参数和描述地层力学性质的方法体系。依托这套体系,研发出了融合钻井信息的分析平台、基于云计算的钻井设计和智能调节一体化系统,从而提升压裂效果的软件,这些都大幅提升了钻探设计、复杂环境的预测、性能分析及钻井参数优选以及精准操作的能力,并促进了钻井作业自动化、高效化及智能化的发展[12]。哈里伯顿建井工程 4.0 版本整合了大量数据处理、智能化钻井系统平台等资源,创建了数字孪生钻井系统,包括钻探前的模拟预测、钻探过程中的实时决策分析,以及钻探后的回顾性评估。斯伦贝谢推出的勘探与认知一体化智能平台(DELFI)中的 Drill Plan 一体化钻井设计方案大幅简化了钻井规划周期,将时间从数周减少到数天。康菲公司的钻井数据分析平台(IDW)则简化了数据收集与处理流程,进行了有效的数据分析支持,目的是缩短钻探时间、优化完井计划以及加深对地层特征的了解。

我国在智能化钻探程序软件开发上仍处于萌芽期,其功能已覆盖了钻探规划设计与施工监测的优化等基础作业。现阶段,本土的软件研发主要聚焦钻井计划的编制上,而像远程操作决策和模拟控制这类

领域的自主开发软件则相对较少。这些软件的核心职能集中在遥远接入钻探数据和地质导航任务上。部分系统已在减少钻井作业风险上获得了初步进展。举例来说,在2012年的12月,中国海油启用了自家的钻探远程专家支持平台,整合了实时的地质模型构建技术、油井三维展示、实时测量深度、井道轨道管理以及地质导航等关键职能。该系统结合了地面与地下的即时信息、庞大的数据库资源以及最新更新的地质数据模型,并辅助定向钻井专家、地质导航工程师和随钻工程师进行精确操作和决策。即便有这些发展,无论是在总体水平还是具体技术方面,国内的技术同国际先进水平相比依旧有明显的不足。数据标准不统一,信息共享不畅,物理模型与机器学习算法交叉融合度低,国外有很多经验值得借鉴。

4. 结语

人工智能在钻井工程中的应用将作为未来油气开发的重要方向,具有广阔的应用前景。通过大数据、人工智能和自动化技术的深度融合,人工智能钻井可以提高钻井效率、减少事故发生并降低作业成本。尽管目前国内外人工智能钻井技术的整体发展尚未完全成熟,但随着核心技术的逐步突破,人工智能钻井必将为未来油气资源开发带来新的技术革命。中国在智能钻井技术的发展中需要继续加强基础研究,结合行业实际需求,逐步实现技术的自主创新和应用推广。

基金项目

重庆科技大学研究生科技创新项目,“连续管定向器执行机构电液伺服系统肋位置-力自适应控制研究”(YKJCX2320122);重庆市研究生科研创新项目,“连续管定向器执行机构电液伺服系统肋位置-力自适应控制研究”(CYS240785)。

参考文献

- [1] 刘伟,付加胜,郭庆丰,等.智能控压钻井关键技术研究进展与展望[J].石油钻探技术,2024,52(5):42-50.
- [2] 谢奎.智能钻完井技术研究现状及发展趋势[J].西部探矿工程,2024,36(10):67-69,73.
- [3] 李中.海洋钻完井智能感知关键技术研究与应用[J].石油钻探技术,2024,52(5):20-25.
- [4] 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.
- [5] 冯定,王健刚,张红,等.数字孪生技术在油气钻完井工程中的应用与思考[J].石油钻探技术,2024,52(5):26-34.
- [6] 杜松涛,杨晓峰,刘克强.人工智能技术在钻井工程的应用与发展[J].石油化工应用,2024,43(6):1-5,10.
- [7] 李华洋,邓金根,谭强,等.智能钻井技术应用体系构建及研究进展[J].现代化工,2023,43(10):41-45+51.
- [8] 李涛.智能钻完井技术研究现状及发展趋势[J].现代工业经济和信息化,2023,13(7):291-292,295.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 王敏生,光新军,耿黎东.人工智能在钻井工程中的应用现状与发展建议[J].石油钻采工艺,2021,43(4):420-427.
- [12] 匡立春,刘合,任义丽,等.人工智能在石油勘探开发领域的应用现状与发展趋势[J].石油勘探与开发,2021,48(1):1-11.