

doi:10.11911/syztjs.2024099

引用格式: 王志战. 智能录井技术研究进展及发展展望 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 51–61.

WANG Zhizhan. Research progress and development prospect of intelligent surface logging technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 51–61.

智能录井技术研究进展及发展展望

王志战^{1,2}

(1. 中国石化测录井重点实验室, 北京 102206; 2. 中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 录井具有样品条件及制样工序复杂、采集项目多而离散、人工经验依赖性强且人均产值低等特点, 亟需加强智能化转型, 但相比于其他石油工程技术, 智能录井技术进展缓慢, 且局限于应用层面。为此, 从智能钻井的进展与成效入手, 分析了国内外智能钻井在硬件系统、控制系统、应用系统方面的进展与差距; 然后, 从地质录井、工程录井、智慧平台 3 个方面分析了智能录井的主要技术进展, 包括“数据+”驱动和视觉驱动的岩性识别、流体识别、井下与地面风险识别及预警等。通过对比智能钻井与智能录井的现状, 提出智能录井应强化井下智能录井、智能录井机器人等硬件系统及多场数字孪生、多元采集智能控制、多模态录井大模型、智能解释评价等软件系统的研发。同时强调, 既要高度重视, 又要理性看待智能录井的发展, 要在回顾评价、横向对比的基础上, 做好战略定位与研发流程优化, 实现进度追赶与作用发挥。这些分析与观点, 对推动智能录井实现良性、快速发展具有指导意义。

关键词: 智能录井; 智能钻井; 机器人; 数字孪生; 大模型; 智能控制

中图分类号: P631.81

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)05-0051-11

Research Progress and Development Prospect of Intelligent Surface Logging Technology

WANG Zhizhan^{1,2}

(1. Sinopec Key Laboratory of Well Logging, Beijing, 102206, China; 2. Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: Surface logging has the characteristics of complex sample conditions and sample preparation process, numerous and discrete collection items, strong dependence on hands-on experience, and low per capita output. It is urgent to strengthen intelligentization transformation. However, compared with other petroleum engineering technologies, intelligent surface logging is making slow advancement and facing application limits. Therefore, the progress and gap of hardware systems, control systems, and application systems of intelligent drilling in China and abroad were analyzed from the progress and achievement of intelligent drilling. Then, the main technical progress of intelligent surface logging was analyzed in terms of geological surface logging, engineering surface logging, and intelligent platform, covering “data +” driven and visually driven lithology identification, fluid identification, and downhole and surface risk identification and early alarming. Based on the comparison between intelligent drilling and intelligent surface logging, it was suggested that the research and development of hardware systems such as downhole intelligent surface logging, and intelligent surface logging robots, as well as software systems such as multi-field digital twins, multi-acquisition intelligent control, multimode large model of surface logging, and intelligent interpretation and evaluation should be strengthened. At the same time, it was emphasized that we should attach great importance to and rationally look at the development of intelligent surface logging and determine strategic positioning and process optimization on the basis of retrospective evaluation and horizontal comparison, so as to catch up with the progress and engagement. These analyses and viewpoints have guiding significance in promoting the benign and rapid development of intelligent surface logging.

收稿日期: 2024-05-08。

作者简介: 王志战 (1969—), 男, 山东栖霞人, 1991 年毕业于西北大学岩石矿物学及地球化学专业, 2002 年获石油大学计算机应用技术专业硕士学位, 2006 年获西北大学矿产普查与勘探专业博士学位, 正高级工程师, 长期从事录井基础理论与新技术新方法研究。系本刊编委。E-mail: wangzz.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“岩屑自动化录井及多元信息在线检测技术研究”(编号: P23158) 资助。

Key words: Intelligent surface logging; intelligent drilling; robots; digital twin; large model; intelligent control

人工智能已成为第四代工业革命的核心及油气行业的引领性、变革性技术^[1-3]。智能化是指事物在网络、大数据、物联网和人工智能等技术的支持下,所具有的能动地满足人们各种需求的属性,它不仅能够替代人的固定操作,还能够自主判断和决策。可见,“能动”、“自主”是智能化的本质,是自动化技术的高级阶段。在人工智能成为热点的大势下,其概念不能被泛化,机械手等自动化装备、设定域值的自动化判别不能称为智能化。人工智能早在1955年由John McCarthy等人^[4]提出,迄今已发展了近70年。人工智能在录井领域的应用主要集中在数据、图像驱动下的岩性岩相识别^[5]、地层流体识别^[6]、钻井工况识别^[7]、地层压力预测^[8]等方面。在人工智能“井喷式”发展的今天,需要回顾与评价人工智能在钻井、测井、录井发展史上的作用与效果,才能理性规划智能录井的发展方向。

李根生等人^[1]从智能钻完井的视角给出了与测录井相关的应用场景,包含机械钻速智能预测与参数优化、钻井风险智能预警与动态调控、固井质量智能评价与优化控制、压裂方案智能设计和优化调控。匡立春等人^[9]从石油勘探开发的视角给出了测井处理解释领域的应用场景,包括自动深度校正、自动报告生成、智能分层、曲线重构、岩性识别、成像测井解释、储集层参数预测、含油气性评价、横波速度预测、裂缝及缝洞充填物识别等。王志战^[10]针对录井领域提出了井场智能采样机器人、基于机器学习的录井采集处理解释一体化系统、井下智能录井技术等发展方向。这些场景在一定程度上为智能录井的发展指明了方向,但跟物探、钻井、测井、压

裂等专业相比,智能录井发展缓慢,科学性及系统性不强,需要进一步强化战略布局与优化研发流程。为此,笔者在分析智能钻井进展与启迪、智能录井进展与需求的基础上,从井下智能录井、井场与室内智能机器人、多元采集智能控制系统、井筒及井周多场数字孪生系统、多模态录井大模型、录井智能解释评价系统等方面展望了智能录井的重点发展前景,以期推动智能录井技术良性、快速发展。

1 智能钻井技术的主要进展与启迪

录井全过程跟踪钻井,是勘探开发的眼睛、石油工程的参谋、信息传输的中枢^[11]。智能钻井的发展对智能录井的发展具有借鉴与促进作用。智能钻井将大数据、人工智能、物联网、云计算、虚拟与现实、信息工程、控制工程等理论与技术应用于钻井,使其具有感知、学习、传输、操作和反馈等功能^[12]。

1.1 智能钻井技术的主要进展

智能钻井技术由系统整体架构、数据测量系统、信息传输系统、自动控制系统、智能决策分析系统、人机交互、标准与认证体系等7大部分组成^[2]。智能钻井系统包括智能导向钻井系统、数据测量通信控制网络系统、现场地面智能控制平台和远程实时控制平台等4大部分(见图1)^[12-13]。可见,智能钻井是个系统工程,包含了硬件与软件,且有狭义与广义2个层次,广义的智能钻井包含了录井、固井与完井。

智能钻井的核心技术包括随钻测量技术(MWD、LWD、PWD、AWD、SWD、NMR-LWD和FEWD

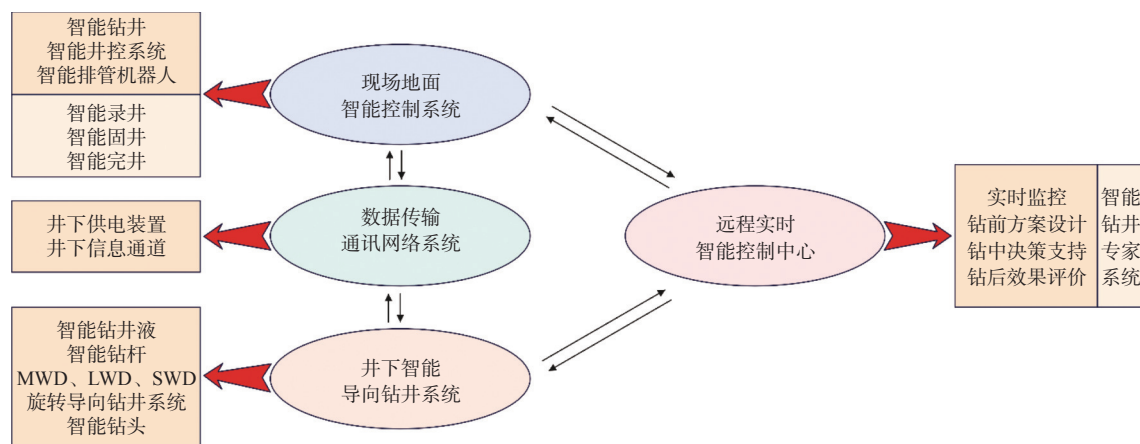


图1 智能钻井系统组成

Fig.1 Composition of intelligent drilling system

等)、智能导向钻井技术、智能钻机、智能钻头、智能钻杆、智能控压钻井技术、远程智能钻井决策控制系统等^[12]。其发展远景是:通过安装在钻头上的智能微型机器人对井下所有的参数进行观测和检测,并将其传回地面,同时完成钻井过程中的测井作业;通过控制钻进速度和钻头轨迹,实现远程智能钻进;所有钻井作业,如起下钻作业,由地面机器人根据指令自动完成,实现无人钻井^[14]。

智能钻井技术的主要进展分为 3 个方面:

1) 硬件系统。包括综合机器人、自动化、计算和数据分析能力的无人钻机^[15];基于安装在钻头上的传感器与微芯片,能实现信息自主感知与状态自动调整的智能钻头^[1-2,12-13];能传输高带宽井下数据和地面控制信号的智能(有线)钻杆^[16-17];集成电动马达的智能连续油管^[18];具有无线射频识别(RFID)和压力循环激活功能、可同时实现钻进与扩眼功能的智能扩眼器^[19];具有自动转向控制和全生命周期维护的智能旋转导向系统^[20-21]和用于实时监测钻井循环系统的智能监视器^[22]等。

2) 控制系统。包括配备了紧凑型歧管、具有测量和自动控制功能的智能控压钻井系统^[23],推靠式旋转导向系统的智能开关控制系统^[24]和基于最低成本的钻井参数智能控制系统^[25]等。

3) 应用系统。包括基于方法-数据双驱动、智能钻井咨询系统(IDAS)或智能钻井决策系统的机械钻速预测^[26]、钻井参数优化^[27-29];基于长短期记忆(LSTM)或图像识别技术的钻井工况智能预警^[30-32]和基于机器视觉的井眼轨迹智能控制^[33]等。

1.2 智能钻井应用成效

智能钻井可通过自动化作业减少操作人员、降低劳动强度,通过专家会诊缩短钻井周期,通过实时数据反馈提高钻井质量,通过工况诊断确保安全钻进,通过作业优化降低综合成本等^[34]。

Nabors 公司研发了世界首台全自动陆地钻机(PaceR801),机器人可有条不紊地拾取管柱,并将其精确地移动到井口中心,在 1 min 之内完成管柱连接;SmartSLIDE、SmartNAV 等智能化程序可实现地面和井下的一系列自动化操作^[15,35]。斯伦贝谢公司在巴西 Peregrino C 平台采用全自动钻机进行钻井作业,将地面自动化、自主海底钻井和定向钻井等数字技术相结合,长 2 600 m 井段的 99% 的钻井工作是在自主控制模式下进行的,钻探了 5 口井,机械钻速提高了 60%,大幅度降低了钻井成本和碳排放

量,加快了油井交付进度。

1.3 智能钻井技术的启迪

油气行业发展人工智能是当今时代的必然要求与发展趋势^[36]。智能钻井系统中有别于常规钻井的任何一环,均可被冠名为“智能”,如带有电缆的钻杆、带有发电系统的连续油管等。国外在智能钻头、智能钻杆、智能连续油管、智能钻机、智能机器人等硬件系统的研发方面,以及在智能控制、智能优化、智能决策等软件系统的研发方面均领先于国内,国内的进展主要体现在应用层面,包括参数优化、工况识别、压力预测^[37]等,应加强智能硬件、智能控制、智能算法的研发。

2 智能录井技术的主要进展

智能录井技术的主要进展体现在应用层面,包括地质(岩性识别、流体识别)、工程(工况识别、压力监测、地质导向)和平台建设 3 大方面。应用层面的智能录井应聚焦于未建立固定模型或过度依赖人工经验的领域。

2.1 智能化地质录井技术的进展

录井是直接通过成像观测(岩样肉眼观察、岩石薄片鉴定、岩屑图像录井)或直接测量岩样成分(元素录井、矿物录井)识别岩性、岩相,通过直接测量流体(气测录井、荧光录井、岩石热解录井、罐顶气轻烃色谱录井、热蒸发烃色谱录井、同位素录井、核磁共振录井、荧光薄片录井、离子色谱录井、出入口电导率等)识别油、气、水及其性质。

2.1.1 岩性智能识别

沉积岩、变质岩、火成岩的岩石分类及命名方案均有国家标准,根据命名要素及规则,设定域值便可实现自动命名,但这不能称之为智能。岩性识别智能化的主要进展体现在 2 方面:一是基于元素数据的处理解释,二是基于机器视觉或工程参数的岩性识别。

1) 元素数据智能化处理解释。通过元素计算矿物含量,是元素录井、元素测井的重要研究内容,其难点在于:没有任何一种元素是岩石中某一矿物或基质、有机质所独有,矿物的分子式因溶解、蚀变等原因也并非固定不变,对标的 XRD 矿物测量精度低。Harold D. Rowe^[38]以特拉华盆地研究对象,采用层次聚类分析(HCA)法,建立了由元素到矿物的转化模型(E-M),E-M 模型的精度取决于样品质量、元素仪器校准与精度、元素仪器分析人员的水

平、XRD矿物的准确性及数据集的大小。元素录井可以测量10~50种元素,包含了丰富的地层信息,降维是元素录井常用的解释方法。M. Hussain^[39]以沙特阿拉伯3个古生代地层为研究对象,采用均匀流形近似和投影(UMAP)对元素录井数据进行降维分析,可以100%区分4类不同岩相;而采用主成分分析(PCA)法及主成分层次分析(PCA-HCPC)法仅能区分3类主要岩相的63%。N. A. Michael^[40]基于判别函数分析(DFA)法建立了一种新型的元素化学地层学处理解释方法,应用了2口井,从原始数据到最终结果仅需要10 min,而采用标准井间对比法可能需要数周时间,在结果相当的前提下,所需时间缩短了95%。中石化石油工程技术研究院有限公司基于理论分析、回归分析,通过元素录井建立了测井、地质、工程3类17个参数的计算模型。唐诚等人^[41]针对川南页岩气地层的元素录井数据,比对了支持向量机(SVM)、多元自适应回归样条(MARS)、神经网络(NN)3种机器学习算法计算岩石密度、有机碳、岩石成分的精度,结果表明,SVM的效果最佳,决定系数(R^2)为0.88~0.95。可见,数据质量、工作流程、智能算法是元素数据智能化处理解释的3个关键要素,通过智能化,可以大幅度提高处理解释速度与精度。

2) 基于机器视觉或工程参数的岩性智能识别。岩屑图像包含了岩性、物性、含油气性、异常地层压力、井壁稳定性等丰富的地质工程信息,肉眼判别带有一定的主观性。刘雨龙^[42]基于对岩屑图像灰度、局部均值化等处理,优选Resnet卷积神经网络,并加入自注意力机制,建立了岩性智能识别方法,准确率达96%,计算效率提升了72%。夏文鹤等人^[43]利用注意力机制及特征融合模块改进了MobileNet V2网络,提取单颗粒岩屑图像纹理、颜色和形状特征进行岩性分类,实现了基于单颗粒岩屑图像的岩性识别,进而能获取砂样整体岩性成分比,灰岩、泥岩、砂岩、页岩等4种常见岩性岩屑的识别精度均达到了92%以上,单次分析时间小于10 s。钻井工程参数可以间接反映岩性的变化,为了弥补岩样分析滞后的不足,提前预测井下复杂情况,并辅助水平井地质导向,张德君等人^[44]基于钻时、扭矩、转盘转速、dc指数、机械比能(MSE)等实时参数,采用具有良好分类效果的支持向量机分类算法,建立了地层岩性智能识别模型,准确率达到了79.76%。可见,基于机器视觉、工程参数的岩性智能识别方法很有意义。

2.1.2 流体智能识别

流体智能识别的典型例子是挪威国家石油公司(Equinor)开发的储层流体实时识别系统^[45],该系统获得了2022年世界石油大奖——最佳数据管理及应用解决方案奖。Equinor基于4000多个储层样本的PVT数据库与气测(AMG) $C_1 \sim C_5$ 的组分数据,采用内部开发的机器学习模型,建立了气油比(GOR)预测模型,对于非生物降解的PVT流体样品,GOR预测精度约为33%。影响预测精度的主要因素是数据质量,包括供应商、钻井事件以及气测解释等3个方面,为此建立了一种QC指标,利用其可以标记出低质量的AMG数据。对于QC指标大于0.3的AMG数据,GOR预测的误差大部分落在40%内。现场试验期间收集的AMG数据,只有70%可用于GOR预测^[6, 46-50]。基于AMG技术可以连续、准确地获取流体类型等信息,成为在难以进行测试与测井条件下的替代解决方案^[51]。利用气测资料计算气油比^[52-55]早有报道,而Equinor这套系统的创新性在于基于QC指标的数据质量控制和自研的机器学习模型。

T_1 - T_2 二维核磁共振是识别页岩油储层多相态流体的利器,但其分辨率受磁场强度的制约,工作频率低于10 MHz的仪器通常只能测得2个信号。Jiang Han等人^[55]比较了6种不同算法(k -means、高斯混合模型、光谱聚类 and 3种分层方法)的计算结果,结果表明,在大多数情况下,高斯混合模型的效果最佳,可以识别出5种流体组分。

2.2 智能化工程录井技术进展

录井采集了大量的钻井参数、钻井液性能参数及图像、视频等信息,在断钻具、卡钻、钻头磨损、井漏、井涌、井壁坍塌、地层压力预监测等井下钻井工况监测及钻井风险预警、井场风险识别及预警等方面发挥着重要作用,但这些作用主要是基于域值、模型驱动的人工模式,而智能化模式可进一步提高识别精度和预警的及时性。

2.2.1 视觉驱动的钻井风险识别

岩屑掉块是井壁失稳的重要标志。夏文鹤等人^[56]以深度学习网络的高效特征提取技术为基础,基于XConv卷积、注意力机制和多通道特征融合方法改进了ShuffleNet V2网络,提高了网络模型提取掉块纹理、颜色和形状特征的能力,建立了一种基于岩屑掉块图像特征的井壁失稳类型分析模型,识别精度达到90.56%,识别时间小于1 s。井场安全识别是QHSE的重要环节。Zhang Shaohui等人^[57]针对

钻井现场人员离岗、井口设备安装、头盔佩戴、工作服穿着和灭火器配备等 6 个典型场景的风险识别与预警管理,介绍了风险智能识别与预警模型的建立过程。以佩戴头盔为例,采用机器学习算法自动合成目标和场景对象并生成数据集,大大减少了图像采集和标记工作量。通过引入特征聚合、损失函数和注意力机制,建立了一种基于 YOLOv5 网络的改进目标检测算法,对监测视频中的人体和小目标更为有效,精度平均达到了 90%,响应时间小于 2 s。可见,利用人工智能可快速识别或提取图像、视频中肉眼难以分辨的特征,大幅度提高安全预警机制。

2.2.2 “数据+”驱动的工况预警及压力预测

保障钻井安全是录井的重要内容和职责。殷启帅和胡志强等人^[31, 58]分别建立了融合域值和神经网络的算法模型、基于 LSTM 的深水钻井工况实时智能判别模型,旋转钻进、滑动钻进、接单根、静止、循环、向下洗井、划眼、向上洗井、倒划眼、起钻和下钻等钻井工况的识别准确率达到 90% 以上。陈凯枫和张矿生等人^[7, 59]分别利用随机森林、LSTM 集成网络建立了漏失风险预警模型,预警准确率达到 95% 以上。刘枫和张敏^[8, 60]分别基于 LSTM 算法、粒子群优化算法的双向长短期记忆神经网络模型(PSO-BiLSTM),建立了顺北地区四压力(孔隙压力、坍塌压力、破裂压力、漏失压力)智能预测模型、渤海深层三压力(孔隙压力、坍塌压力、破裂压

力)智能预测方法。通过上述研究可以看出,基于数据驱动的智能化工方法有 3 个要点:一是数据治理;二是驱动机制,包括数据驱动,数据与模型双驱动以及数据、模型、经验三驱动;三是智能算法,分为优选、优化、自研 3 个层次。

2.3 智慧录井平台建设进展

作为井场信息中枢,加强智慧平台建设不仅是智能录井发展的需要,也是支撑智能钻井、智能压裂的需要。阎荣辉等人^[61]探索了智慧录井系统的构建,采用采集层、网络层、应用层和用户层等 4 层网络架构,实现现场录井信息自动采集与分析、数据远程传输与视频监控、数据管理与智能分析、远程支持与决策管理。方铁园等人^[62]基于岩屑自动捞取系统、岩屑数字化与智能化识别系统、机械臂自动分析系统和随钻智能解释评价系统,搭建了智慧录井平台,并在长庆油田进行了应用,重塑了录井产业流程和决策机制,降低了人为因素影响,提高了录井效率并降低了人员成本。从架构上看,与钻井咨询/决策系统都是四级结构(见表 1),但将算法层/数据操作层与应用放在一个层次,单独拿出一个网络层。中国石化正在测井软件平台上集成录井和增加智能,打造测录井一体化智慧平台^[63]。

3 智能录井技术发展展望

录井的技术需求可以概括为实时性、准确性、

表 1 录井与钻井智慧平台架构的对比
Table 1 Comparison of intelligent platform architecture between drilling and logging

层次	智能录井 ^[64]	智能钻井 ^[1]	钻井 ^[28]
用户层	移动端、Pad端、PC端的实时监控、技术支持、协同研究、远程决策		钻井工程师、完井工程师、地质工程师、管理人员、管理员
网络层	局域网、广域网		
应用层	数据管理平台(分类存储与查询等)、数据挖掘平台(统计分析方法)、成果输出平台(岩性自动识别、物性评价、油气层解释、工程智能预警等)	机械钻速智能预测与参数优化、井眼轨迹智能优化与闭环调控、钻井风险智能预警与动态调控、固井质量智能评价与优化控制、压裂方案智能设计和优化调控、完井方案智能设计与生产优化及钻完井多过程动态耦合与多目标协同优化	钻头选型、井壁稳定、钻速预测、卡钻预警、钻井参数优化等
装备层		智能钻头、井下测量短节、智能导向工具、智能钻杆、智能滑套、智能钻机	
算法层/数据操作层		机理数据融化、数据增强、小样本学习、迁移学习、强化学习、卷积神经网络、小波分析、在线学习、图算法、遗传算法	数据清洗、资源调度、计算工程
数据层	各类录井仪器、传感器采集的数据、图像、音频/视频等信息	物探数据、综合录井数据、测井数据、岩心数据、地质资料数据、随钻数据、文档资料、其他数据	井信息、录井、测井、地质、地震实时级历时数据

全面性和经济性等4个方面,而智能化可以大幅度提高录井的实时性、经济性;通过加强数据质量控制与信息挖掘,能在一定程度上提高准确性与全面性。自动化是智能化的基础,录井在自动化方面的研究进展与成果转化比较缓慢,自动捞砂机发展了40年^[65],仍未实现工业化应用;在智能化方面的研究还局限于应用层面,需要准确定位、高度重视和

大力投入,加快推进智能录井的基础理论研究、应用基础研究、软硬件产品研发及推广应用。智能录井的研发重点包括井下智能录井系统、智能录井机器人等硬件系统,以及多场数字孪生系统、多元采集智能控制系统、多模态录井大模型、智能处理解释等软件系统。软件系统均可集成到智能录井平台上,整体架构如图2所示。

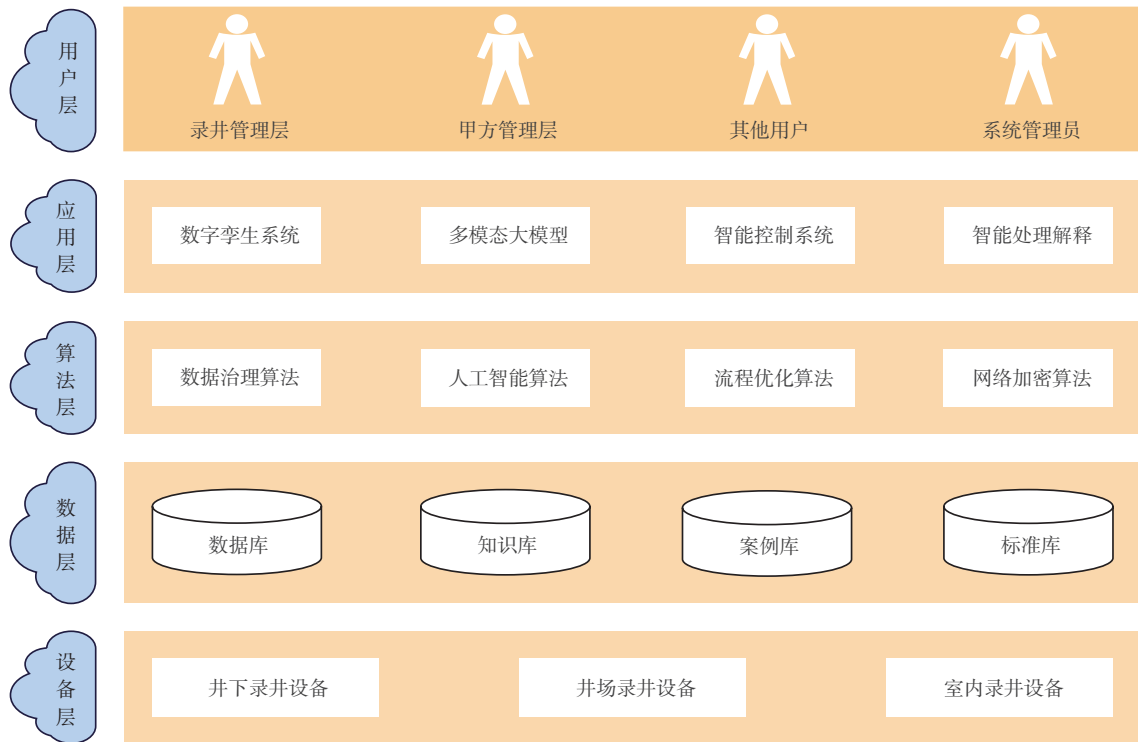


图2 智能录井平台架构

Fig.2 Architecture of intelligent logging

3.1 井下智能录井系统

井下录井的意义在于将移动实验室迁移至近钻头位置,通过对岩样(岩屑、微心、岩心)、钻井液及工程参数的原位、动态监测,实时发现异常高压层及钻头磨损等情况,大幅度降低钻井风险;及时发现含油、气、水层,因避免了由井筒上返、温压降低、人工取样等因素造成的流体扩散与逸散,评价更为精准;准确评价岩性、物性、烃源岩特性及岩石力学特性,因降低了岩屑在上返过程中的磨蚀、沉降、混杂及应力释放,代表性更强^[10]。基于传感器的小型化程度及耐温、耐压、抗震动等情况,将所有录井技术全面井下化是不现实的,但通过与智能钻井、随钻测井、随钻测试等技术的互融互促,实现井下智能录井是可行的。结合智能钻头的感知、智能连续管的供电、智能钻杆的传输,可以实现井下录

井系统的智能采集、控制与处理解释。

3.2 智能录井机器人

录井采集的地质信息主要来源于岩屑和钻井液,样品条件复杂是录井的主要特征。岩屑、罐顶气、钻井液离子色谱等样品采集/清洗、烘干/饱和、粉碎/胶结、压片/磨片、萃取/稀释等样品处理严重依赖人工,工序复杂,效率、质量难以保障,迫切需要研发机器人取代人工作业^[10],增强采样密度,保证制样质量。井场录井机器人可以模块化配置,包括样品采集、清洗、挑样、烘干、装袋、打码、搬运、钻具丈量等作业系统,槽面观察、岩屑成像、井场巡视等视觉系统,元素、荧光等测量系统。室内录井机器人则可以完成粉碎、胶结、压片、磨片、萃取等样品制备工作,通过自动化程序控制强化样品处理质量,通过智能化工序管理提高作业效率。

3.3 录井多元采集智能控制系统

录井是移动实验室,具有多元采集的特征(见图3);录井相比于其他石油工程技术,具有人均产值低的特点;这就需要进行技术集成,实现减员增效。“一趟录”已成为国内外录井行业发展的共识^[10,66]。中国石化正在研发集岩屑采集、清洗、成像、烘干、图像采集、元素采集、装袋、打码等功能于一体的岩屑“一趟录”;钻井液核磁共振^[67]、钻井液性能^[64,68-69]在线录井技术业均已研发,岩屑“一趟录”、钻井液“一趟录”终将合龙。如此多的传感器或采集系统,需要根据采集速度或分析周期、钻速快慢、钻井工况、油气显示及目的层钻遇情况进行智能调节、优化与控制。室内仪器分析也需要根据样品属性智能调控测量参数。因此,录井多元采集智能控制系统的研发势在必行。第四次工业革命通过将各种设备连接到互联网并允许它们相互通信,拓宽了技术的应用范围^[65]。

3.4 井筒及井周多场数字孪生系统

录井是在地面采集,具有井筒影响因素不可

控、资料处理不确定性强等特点,未掌握井筒压力场、流体场、温度场、应力场的动态演化机理与过程,制约了录井信息处理、解释、评价由表征向机理延伸、由静态向动态延伸、由一维向多维延伸。数字孪生是充分利用物理模型、传感器更新、运行历史数据,集成多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真过程,在虚拟空间完成映射,从而反映相对应的实体装备或生产流程的全生命周期过程。在石油工程领域,数字孪生技术已应用于设备孪生、数字油田等领域^[70]。从油藏到分离器的整个油田的数字孪生体,有望将产量提高2%~3%,将总运营成本降低10%~20%^[71]。地下储气库的数字孪生体实现了全过程的离线方案规划、在线监测与优化、未来工况预测和异常工况预警功能^[72-74]。因此,基于中试平台的模拟试验、钻井过程的实时参数、光纤监测的动态数据构建的井筒及井周多场数字孪生系统,将为溢流预警、井壁稳定性实时评价、异常压力随钻预测、油气水识别与评价提供机理、动态、立体、实时、准确的技术支撑。

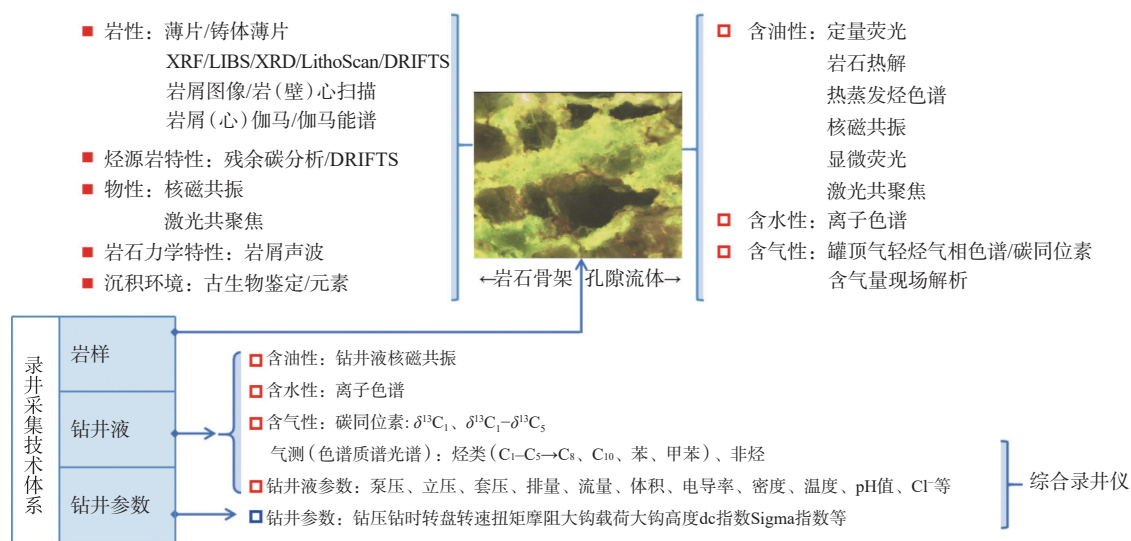


图3 录井采集技术体系

Fig.3 Logging acquisition technology system

3.5 多模态录井大模型

智能录井的目的是在保证甚至提高精度的前提下,解放人手,提高效率与效益。语言大模型、视觉大模型、多模态大模型在油气行业有助于加强数据全生命周期管理,提升数据治理能力^[75]。语言大模型(LLM)在钻井领域的探索表明,LLM在筛选大数据方面表现出色,能够快速提取关键信息,如历史事件报告、最佳钻井参数,甚至实时更新建井进度,使工程师和运营商在流程优化、数据采集、钻井决

策方面更为科学、有效^[76-77]。同样,在多传感器信息感知与检测的基础上,综合视频、图像、图谱、图版、数据、标准等信息,多模态大模型可在录井的岩屑、岩心、井壁取心描述,以及分析化验、完井地质、解释评价报告编写等领域发挥巨大作用。

3.6 录井智能解释评价系统

录井资料处理与解释评价的内容十分丰富(见表2),但当前的智能解释评价集中在“数据+”驱动和视觉驱动2方面,在领域的选择上体现出较强

表 2 录井信息处理与解释评价技术体系

Table 2 Technical system of logging information processing, interpretation, and evaluation

录井信息处理	解释	评价及应用
深度校正与数据源深度匹配	岩性、岩相识别	物性及孔隙结构评价
影响因素校正或消除	古生物鉴定及沉积环境识别	烃源岩特性评价
散失量恢复或原位重构	成分及结构、构造识别	脆性、岩石力学、可压性评价
解谱解耦与信息挖掘	地质层位及地质小层识别	润湿性、水淹层评价
曲线、图谱、影像特征提取	流体类型及赋存状态识别	含油气丰度及油气性质评价
多元、多维、多尺度数据融合	物源、油(气)源识别	含水性或含水率评价
平滑、抽稀、插值等处理	油(气)成因识别	甜点评价或产能预测
标准化、归一化处理	含水性及水型识别	单井评价或选区评价
	有效储层识别	地层压力随钻评价
	油气水层解释	可钻性、井壁稳定性评价
	VOCs类型识别	井筒封闭性或盖层评价
	钻井工况与安全风险识别	热储及锂、钾、铀丰度评价
	高压层及其成因识别	钻井地质设计
	溢流预警	水平井综合地质导向
	井漏及其原因识别	压裂选层

的必要性,那就是充分挖掘数据、谱图、曲线、影像等录井资料中所隐含的信息,如利用气测资料^[78]、工程参数^[79]预测地层孔隙度。随着人工智能技术的飞速发展,在录井领域的应用会越来越广,速度与精度也会越来越高,并成为智能钻井、智能压裂中的重要一环。但在人工智能的应用与发展方面,既要高度重视,又要保持理性,如数据治理,基于地层特性的非均质性以及不同录井技术采样密度、精度的差异,简单粗暴地去除异常点、增补缺失值可能会产生较大误差,甚至导致得出错误的结论。因此,需要强化录井领域与智能领域的专业融合。另外,在解释评价方面,人工智能只能作为辅助手段,最终的结论需要解释评价人员给出。

4 结束语

录井具有样品条件及制样工序复杂、采集项目多而离散、人工经验依赖性强且人均产值低等特点,急需加快智能化转型,进一步满足经济性、实时性、准确性、全面性的技术需求;但相比于其他油气专业,智能录井进展缓慢,需要加强重视,加大投入。当前的智能录井局限于应用层面,应向井下录井、机器人、一体化多元采集等智能硬件、智能控制方向发展,与硬件相结合的智能化更具生命力与生产力。在应用层面,数据治理是基础,智能算法是核心。数据治理简单化、智能算法比选化不利于智能化录井的发展,应加强录井与人工智能的专业融合,构建井筒及井周多场数字孪生系统、多模态录

井大模型、录井智能解释评价系统,推动录井基础理论创新与作业方式变革。智能录井的发展既要高度重视,又要理性看待,不能泛化概念、盲目跟随热点。要回顾评价神经网络、遗传算法等传统技术在录井及相关领域未能实现工业化应用的症结所在,并评估当代人工智能在相关领域的作用与效果,做好战略定位与研发流程优化,切实发挥智能录井新质生产力的作用。

参 考 文 献

References

- [1] 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.
- [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.
WANG Minsheng, GUANG Xinjun. Status and development trends of intelligent drilling technology[J]. Acta Petrolei Sinica, 2020, 41(4): 505-512.
- [3] 李宗田,肖勇,李宁,等.低油价下的页岩油气开发工程技术新进展[J].断块油气田,2021,28(5):577-585.
LI Zongtian, XIAO Yong, LI Ning, et al. New progress in shale oil and gas development engineering technology under low oil prices[J]. Fault-Block Oil & Gas Field, 2021, 28(5): 577-585.
- [4] MCCARTHY J, MINSKY M L, ROCHESTER N, et al. A proposal for the Dartmouth summer research project on artificial intelligence: August 31, 1955[J]. AI Magazine, 2006, 27(4): 12-14.
- [5] GAINITDINOV B, MESHALKIN Y, ORLOV D, et al. Predicting mineralogical composition in unconventional formations using machine learning and well logging data[R]. IPTC 23487, 2024.

- [6] YANG Tao, ARIEF I H, NIEMANN M, et al. A machine learning approach to predict gas oil ratio based on advanced mud gas data[R]. SPE 195459, 2019.
- [7] 陈凯枫, 杨学文, 宋先知, 等. 基于工程录井数据的井漏智能诊断方法[J]. 石油机械, 2022, 50(11): 16–22.
CHEN Kaifeng, YANG Xuwen, SONG Xianzhi, et al. An intelligent diagnosis method for lost circulation based on engineering logging data[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(11): 16–22.
- [8] 刘枫. 顺北地区地层四压力智能预测软件研发与应用[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
LIU Feng. Research and application of intelligent prediction software for formation four pressure in Shunbei Area[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [9] 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.
KUANG Lichun, LIU He, REN Yili, et al. Application and development trend of artificial intelligence in petroleum exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2021, 48(1): 1–11.
- [10] 王志战. 一体化、智能化时代的录井技术发展方向探讨[J]. 录井工程, 2020, 31(1): 1–6.
WANG Zhizhan. Discussion on the development direction of mud logging technology in the era of integration and intellectualization[J]. Mud Logging Engineering, 2020, 31(1): 1–6.
- [11] 王志战. 中国石化录井技术新进展与发展方向思考[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(4): 124–133.
WANG Zhizhan. Thoughts for new progress and development directions of Sinopec's surface logging technology[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 124–133.
- [12] 闫铁, 许瑞, 刘维凯, 等. 中国智能化钻井技术研究发展[J]. 东北石油大学学报, 2020, 44(4): 15–21.
YAN Tie, XU Rui, LIU Weikai, et al. Research and development of intelligent drilling technology in China[J]. Journal of Northeast Petroleum University, 2020, 44(4): 15–21.
- [13] 张鑫鑫, 梁博文, 张晓龙, 等. 智能钻井装备与技术研究进展[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(9): 20–30.
ZHANG Xinxin, LIANG Bowen, ZHANG Xiaolong, et al. Research progress of intelligent drilling equipment and technology[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(9): 20–30.
- [14] HU Qin, LIU Qingyou. Intelligent drilling: a prospective technology of tomorrow[R]. SPE 103781, 2006.
- [15] RASSENFOSS S. Drilling automation: a robot takes over the drilling floor[J]. Journal of Petroleum Technology, 2021, 73(12): 18–22.
- [16] LAWRENCE L, REDMOND B, RUSSELL R B, et al. Intelligent wired drill-pipe system provides significant improvements in drilling performance on offshore Australia development[R]. OTC 20067, 2009.
- [17] JELLISON M J, PRIDECO G, HALL D R. Intelligent drill pipe creates the drilling network[R]. SPE 80454, 2003.
- [18] TURNER D R, HEAD P F, YURATICH M A, et al. The all electric BHA: recent developments toward an intelligent coiled-tubing drilling system[R]. SPE 54469, 1999.
- [19] VALVERDE E. Intelligent near-bit reamer affords same-trip drilling, hole enlargement and rathole reduction for optimal deepwater well construction[R]. OTC 28402, 2018.
- [20] TILLEY J, NAIR V N, HAMOUDI L. Case study: intelligent RSS improving drilling performance on three mile laterals in the Appalachian Basin[R]. SPE 201723, 2020.
- [21] AL ARFI S, ALSOWAIDI F, RUIZ F, et al. New intelligent push-the-bit rotary steerable system helped reducing well time and maximized directional drilling performance, Abu Dhabi, UAE[R]. SPE 207537, 2021.
- [22] CORSER G P, HARMSE J E, CORSER B A, et al. Field test results for a real-time intelligent drilling monitor[R]. SPE 59227, 2000.
- [23] ZHU J, ZENG L. Intelligent pressure control system on drilling process[R]. OTC 30828, 2020.
- [24] SHEN Xinyu, LIU Sen, SU Qiang, et al. Intelligent switch control algorithm of the push-the-bit rotary steerable drilling system[R]. ARMA 20233-0558, 2023.
- [25] ROWSELL P J, WALLER M D. Intelligent control of drilling systems[R]. SPE 21927, 1991.
- [26] WAN Youwei, LIU Xiangjun, XIONG Jian, et al. Intelligent prediction of drilling rate of penetration based on method-data dual validity analysis[J]. SPE Journal, 2024, 29(5): 2257–2274.
- [27] ABUGHABAN M, ALSHAARAWI A, MENG Cui, et al. Optimization of drilling performance based on an intelligent drilling advisory system[R]. IPTC 19269, 2019.
- [28] XIE Tao, HOU Xinxin, HUO Hongbo, et al. Improving drilling efficiency using intelligent decision system for drilling in Bohai Oil-field based on big data[R]. SPE 215427, 2023.
- [29] RASHIDI B, HARELAND G, TAHMEEN M, et al. Real-time bit wear optimization using the intelligent drilling advisory system[R]. SPE 136006, 2010.
- [30] WANG Jianhua, GUAN Zhen, LIU Muchen, et al. Drilling stuck probability intelligent prediction based on LSTM considering local interpretability[R]. ARMA 2023-0326, 2023.
- [31] 殷启帅, 杨进, 曹博涵, 等. 基于长短期记忆神经网络的深水钻井工况实时智能判别模型[J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(1): 97–104.
YIN Qishuai, YANG Jin, CAO Bohan, et al. Real-time intelligent rig activities classification model of deep-water drilling using long short-term memory (LSTM) network[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(1): 97–104.
- [32] 李雪松, 张骁, 管震, 等. 基于图像识别技术的钻井井漏溢流智能报警系统开发[J]. 世界石油工业, 2021, 28(1): 48–54.
LI Xuesong, ZHANG Xiao, GUAN Zhen, et al. Development of the drilling mud loss and overflow intelligent alarm system based on the image recognition technology[J]. World Petroleum Industry, 2021, 28(1): 48–54.
- [33] WANG Han, CHEN Dong, YE Zhihui, et al. Intelligent planning of drilling trajectory based on computer vision[R]. SPE 197362, 2019.
- [34] 张晓东, 朱正喜. 智能钻井技术研究[J]. 石油钻采工艺, 2010, 32(1): 1–4.
ZHANG Xiaodong, ZHU Zhengxi. Study of intelligent drilling technology[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2010, 32(1): 1–4.
- [35] de WARDT J. Guest editorial: trends in remote operations and drilling systems automation point to an expanding footprint what comes next and when?[J]. Journal of Petroleum Technology, 2022, 74(11): 10–13.
- [36] 刘合. 油气勘探开发数字化转型人工智能应用大势所趋[J]. 石油

- 科技论坛, 2023, 42(3): 1-9.
- LIU He. Digital transformation of oil and gas exploration and development; unstoppable AI application[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2023, 42(3): 1-9.
- [37] 宋先知, 姚学喆, 李根生, 等. 基于 LSTM-BP 神经网络的地层孔隙压力计算方法 [J]. 石油科学通报, 2022, 7(1): 12-23.
- SONG Xianzhi, YAO Xuezhe, LI Gensheng, et al. A novel method to calculate formation pressure based on the LSTM-BP neural network[J]. Petroleum Science Bulletin, 2022, 7(1): 12-23.
- [38] ROWE H, MAINALI P, NIETO M, et al. Geochemical perspectives on cuttings-based chemostratigraphy and mineral modeling in the Delaware Basin, Texas and New Mexico[R]. URTEC 2019-1068, 2019.
- [39] HUSSAIN M, AMAO A, AL-RAMADAN K, et al. A novel method to develop chemostratigraphy using X-ray fluorescence spectral raw data[R]. URTEC 2021-5478, 2021.
- [40] MICHAEL N A, SCHEIBE C, CRAIGIE N W. Automations in chemostratigraphy: toward robust chemical data analysis and interpretation[R]. SPE 204892, 2021.
- [41] 唐诚, 王崇敬, 梁波, 等. 基于机器学习算法的页岩气评价参数计算模型研究 [J]. 录井工程, 2021, 32(4): 18-22.
- TANG Cheng, WANG Chongjing, LIANG Bo, et al. Study on shale gas evaluation parameter calculation model based on machine learning algorithm[J]. Mud Logging Engineering, 2021, 32(4): 18-22.
- [42] 刘雨龙. 基于深度学习的岩屑智能分析方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- LIU Yulong. Research on intelligent analysis method of cuttings based on deep learning[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [43] 夏文鹤, 谢万洋, 唐印东, 等. 砂样岩屑图像特征的岩性智能高效识别 [J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(3): 495-506.
- XIA Wenhe, XIE Wanyang, TANG Yindong, et al. Intelligent and efficient lithology identification based on image features of returned cuttings[J]. Oil Geophysical Prospecting, 2023, 58(3): 495-506.
- [44] 张德君, 魏伟, 刘明艳, 等. 基于综合录井数据的地层岩性智能识别方法 [J]. 西部探矿工程, 2023, 35(4): 54-59.
- ZHANG Dejun, WEI Wei, LIU Mingyan, et al. Intelligent identification method of formation lithology based on comprehensive logging data[J]. West-China Exploration Engineering, 2023, 35(4): 54-59.
- [45] JACOBS T. Mud-gas breakthrough Equinor develops real-time reservoir-fluid identification[J]. Journal of Petroleum Technology, 2021, 73(2): 37-39.
- [46] HAFIDZ ARIEF I, YANG Tao. Real time reservoir fluid log from advanced mud gas data[R]. SPE 201323, 2020.
- [47] YANG Tao, YERKINKYZY G, ULEBERG K, et al. Predicting reservoir fluid properties from advanced mud gas data[J]. SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 2021, 24(2): 358-366.
- [48] UNGAR F, MCGILL A, NYGAARD M T, et al. Fluid identification from mud gas in the overburden: a case study for the Snorre Field[R]. SPE 214440, 2023.
- [49] YANG Tao, ULEBERG K, CELY A, et al. Unlock large potentials of standard mud gas for real-time fluid typing[R]. SPWLA 2022-0007, 2022.
- [50] KOPAL M, YERKINKYZY G, NYGÅRD M T, et al. Real-time fluid identification from integrating advanced mud gas and petrophysical logs[R]. SPWLA 2022-0009, 2022.
- [51] BUCKLE P S G, ABDULLAH A F H, ZAINI N, et al. Utilization of digitalized numerical model derived from advanced mud gas data for low cost fluid phase identification, derisking drilling and effective completion plan in depleted reservoir[R]. SPWLA 2022-0092, 2022.
- [52] WRIGHT A C. Estimation of gas/oil ratios and detection of unusual formation fluids from mud logging gas data[R]. SPWLA 1996-CC, 1996.
- [53] MALIK M, HANSON S A, CLINCH S. Maximizing value from mudlogs: integrated approach to determine net pay[R]. SPWLA 5028, 2020.
- [54] 严伟丽, 高楚桥, 赵彬, 等. 基于气测录井资料的气油比定量计算方法 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9287-9292.
- YAN Weili, GAO Chuqiao, ZHAO Bin, et al. Quantitative calculation method of gas-oil ratio in gas logging data[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(23): 9287-9292.
- [55] JIANG Han, DAIGLE H, TIAN Xiao, et al. A comparison of clustering algorithms applied to fluid characterization using NMR T_1 - T_2 maps of shale[J]. Computers & Geosciences, 2019, 126: 52-61.
- [56] 夏文鹤, 唐印东, 李皋, 等. 基于岩屑录井图像的井壁稳定性智能预测方法 [J]. 天然气工业, 2023, 43(12): 71-83.
- XIA Wenhe, TANG Yindong, LI Gao, et al. An intelligent prediction method for wellbore stability based on drilling cuttings logging images[J]. Natural Gas Industry, 2023, 43(12): 71-83.
- [57] ZHANG Shaohui, HUANG Weihe, BI Guoqiang, et al. Intelligent risk identification and warning model for typical drilling operation scenes and its application[R]. SPE 214599, 2023.
- [58] 胡志强, 杨进, 王磊, 等. 钻井工况智能识别与时效分析技术 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(2): 241-246.
- HU Zhiqiang, YANG Jin, WANG Lei, et al. Intelligent identification and time-efficiency analysis of drilling operation conditions[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2022, 44(2): 241-246.
- [59] 张矿生, 宫臣兴, 陆红军, 等. 基于集成学习的井漏智能预警模型及智能推理方法 [J]. 石油钻采工艺, 2023, 45(1): 47-54.
- ZHANG Kuangsheng, GONG Chenxing, LU Hongjun, et al. Intelligent early warning model and intelligent reasoning method based on integrated learning for loss circulation[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2023, 45(1): 47-54.
- [60] 张敏. 渤海中深层钻井地层三压力智能预测方法研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023.
- ZHANG Min. Research on the intelligent prediction method of triple pressure in the middle and deep drilling strata in Bohai Sea[D]. Beijing: China University of Petroleum(Beijing), 2023.
- [61] 阎荣辉, 黄子舰, 杨永强, 等. “互联网+”时代的智慧录井系统应用探索 [J]. 录井工程, 2020, 31(2): 1-5.
- YAN Ronghui, HUANG Zijian, YANG Yongqiang, et al. Application and exploration of smart logging system in the Internet Plus era[J]. Mud Logging Engineering, 2020, 31(2): 1-5.
- [62] 方铁园, 马宏伟, 郭龙飞, 等. 智慧录井平台建设及其在长庆油田的创新应用 [J]. 录井工程, 2023, 34(3): 97-101.
- FANG Tieyuan, MA Hongwei, GUO Longfei, et al. Construction of smart mud logging platform and its innovative application in Changqing Oilfield[J]. Mud Logging Engineering, 2023, 34(3): 97-101.

- 97–101.
- [63] 张锦宏, 周爱照, 成海, 等. 中国石化石油工程技术新进展与展望[J]. 石油勘探技术, 2023, 51(4): 149–158.
ZHANG Jinhong, ZHOU Aizhao, CHENG Hai, et al. New progress and prospects for Sinopec's petroleum engineering technologies[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(4): 149–158.
- [64] 梁海波, 宋洋, 于志刚, 等. 钻井液流变性实时测量方法及系统研究[J]. 石油机械, 2022, 50(1): 10–18.
LIANG Haibo, SONG Yang, YU Zhigang, et al. Real-time measurement method and systematic study on drilling fluid rheology[J]. China Petroleum Machinery, 2022, 50(1): 10–18.
- [65] 孟济良, 吴龙斌, 张学亭. 岩屑录井的新技术: DL-1 型地质录井自动捞砂机介绍[J]. 石油勘探与开发, 1984, 11(5): 75–79.
MENG Jiliang, WU Longbin, ZHANG Xueting. A new technology of cuttings logging: DL-1 type automatic cuttings acquisition machine[J]. Petroleum Exploration and Development, 1984, 11(5): 75–79.
- [66] ALSHEHRI A, KATTERBAUER K, YOUSEF A. Real-time autoregressive deep learning framework for in-line automatic surface logging[R]. SPE 214079, 2023.
- [67] LI Sanguo, XIAO Lizhi, LI Xin, et al. A novel NMR instrument for real time drilling fluid analysis[J]. *Microporous and Mesoporous Materials*, 2018, 269: 138–141.
- [68] 张志财, 刘保双, 王忠杰, 等. 钻井液性能在线监测系统的研制与现场应用[J]. 钻井液与完井液, 2020, 37(5): 597–601.
ZHANG Zhicai, LIU Baoshuang, WANG Zhongjie, et al. Development and field application of an online drilling fluid property monitoring system[J]. Drilling Fluid & Completion Fluid, 2020, 37(5): 597–601.
- [69] 王鹏, 刘伟, 张果. 钻井液性能自动监测装置的现状及改进建议[J]. 钻采工艺, 2022, 45(3): 42–47.
WANG Peng, LIU Wei, ZHANG Guo. Status quo and improvement suggestions of automatic monitoring equipment for drilling fluid performance[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(3): 42–47.
- [70] 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]. 石油勘探技术, 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.
- [71] BALACHANDRAN P A, PADMANABHAN K V K. Integrated operations system: implementation of a truly integrated digital oil field and development of digital twin[R]. OTC 32841, 2023.
- [72] WANG Peixian, WANG Xiaolin, MA Jun, et al. Digital and intelligent technology in underground gas storage operation based on digital twin technologies[R]. ISOPE I-23-008, 2023.
- [73] BUSOLLO C, ABDO E, KATTAR M, et al. Evolution of a digital twin for underground gas storage wells: thermal effects of tubing gas flow on annulus pressure in transient conditions[R]. SPE 220006, 2024.
- [74] WANG Peixian, MA Jun, LI Zunzhao, et al. Integrated simulation technology of underground gas storage based on digital twin technologies[R]. ISOPE I-24-043, 2024.
- [75] 刘合, 任义丽, 李欣, 等. 油气行业人工智能大模型应用研究现状及展望[J]. 石油勘探与开发, 2024, 51(4): 910–923.
LIU He, REN Yili, LI Xin, et al. Research status and application of artificial intelligence large models in the oil and gas industry[J]. Petroleum Exploration and Development, 2024, 51(4): 910–923.
- [76] YI M, CEGLINSKI K, ASHOK P, et al. Applications of large language models in well construction planning and real-time operation[R]. SPE 217700, 2024.
- [77] PACIS F J, ALYAEV S, PELFRENE G, et al. Enhancing information retrieval in the drilling domain: zero-shot learning with large language models for question-answering[R]. SPE 217671, 2024.
- [78] AMEUR-ZAIMECHE O, KECHICHED R, HEDDAM S, et al. Real-time porosity prediction using gas-while-drilling data and machine learning with reservoir associated gas: case study for Hassi Messaoud Field, Algeria[J]. *Marine and Petroleum Geology*, 2022, 140: 105631.
- [79] OULADMANSOUR A, AMEUR-ZAIMECHE O, KECHICHED R, et al. Integrating drilling parameters and machine learning tools to improve real-time porosity prediction of multi-zone reservoirs. Case study: Rhourd Chegga Oilfield, Algeria[J]. *Geoenergy Science and Engineering*, 2023, 223: 211511.

[编辑 刘文臣]