

海洋钻完井智能感知关键技术研究与应用

李中

Key technologies and field applications of intelligent sensing in offshore drilling and completion

LI Zhong

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024083>

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>

人工智能在压裂技术中的应用现状及前景展望

Status and Prospect of Artificial Intelligence Application in Fracturing Technology

石油钻探技术. 2023, 51(1): 69–77 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022115>

中国海油“深海一号”大气田钻完井关键技术进展及展望

Progress and Prospect of Key Technologies for Drilling and Completion of “Deep Sea No.1” Gas Field of CNOOC

石油钻探技术. 2023, 51(4): 88–94 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023031>

多层合采智能井井筒温度场预测模型及应用

Temperature Field Prediction Model for Multi-Layer Commingled Production Wellbore in Intelligent Wells and It's Application

石油钻探技术. 2019, 47(4): 83–91 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2019049>

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>

人工智能钻井技术研究方法及其实践

Research Method and Practice of Artificial Intelligence Drilling Technology

石油钻探技术. 2021, 49(5): 7–13 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2020136>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024083

引用格式: 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): 1-6.

LI Zhong. Key technologies and field applications of intelligent sensing in offshore drilling and completion[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 1-6.

海洋钻完井智能感知关键技术研究与应用

李 中

(中海油研究总院有限责任公司, 北京 100028)

摘 要: 海洋油气开发远离陆地, 通信和布网面临巨大挑战, 智能感知技术是发展海洋智能钻完井必须解决的难题之一。海洋智能钻完井技术是海洋钻完井工程与人工智能、大数据、云计算等先进技术的有机融合, 可实现海洋油气钻完井过程的精细表征、决策优化和闭环调控, 大幅提升钻完井效率和油气采收率。为此, 分析了目前海上智能钻完井在基础设施建设、智能钻井、智能井筒等方面的技术难点, 从地层、工具、流体和装备等 4 个方面研究了海洋钻完井智能感知领域的关键技术, 建设形成了海洋钻井智能监控系统, 实现了海洋钻完井全生命周期的全面感知。现场应用海洋智能钻井监控系统后, 使用平台自开钻起至首批开发井完成, 全程未发生任何安全事故。海洋钻完井智能感知关键技术作为建设海上智能钻完井的基础, 为推动海洋油气田的数字化转型和智能化发展提供了技术支撑。

关键词: 海洋钻完井; 智能感知; 智能井筒; 现场应用

中图分类号: TE245 文献标志码: A 文章编号: 1001-0890(2024)05-0001-06

Key technologies and field applications of intelligent sensing in offshore drilling and completion

LI Zhong

(CNOOC Research Institute Ltd., Beijing, 100028, China)

Abstract: Offshore oil and gas development is far away from the land, and communication and network deployment face great challenges. Intelligent sensing technology is one of the difficult problems that must be solved in the development of offshore intelligent drilling. Offshore intelligent drilling and completion technology is the organic integration of Marine drilling and completion engineering and advanced technologies such as artificial intelligence, big data and cloud computing, which can realize fine characterization, decision optimization and closed-loop control of offshore oil and gas drilling and completion process, greatly improving drilling and completion efficiency and oil and gas recovery efficiency. To this end, the current technical difficulties of offshore intelligent drilling and completion in infrastructure construction, intelligent drilling and intelligent wellbore are analyzed. The key technologies in the field of intelligent sensing in offshore drilling and completion are studied from four aspects, such as formation, tools, fluids and equipment, and an intelligent monitoring system for offshore drilling and completion is constructed to realize a comprehensive perception of the whole life cycle of offshore drilling and completion. After the application of the offshore intelligent drilling monitoring system, the platform was used without any safety accidents. The key technology of intelligent perception in offshore drilling and completion, as the basis for the construction of offshore intelligent drilling and completion, provides technical support for promoting the digital transformation and intelligent development of offshore oil and gas fields.

Key words: offshore drilling and completion; intelligent perception; intelligent wellbore; field application

当前国内外油公司、油服公司纷纷引入云计算、大数据、人工智能等新兴技术^[1], 迈开了建设智能油田的步伐。近年来, 我国逐步开始勘探开发深水高温高压油气, 钻遇区域普遍存在压力系统复杂

收稿日期: 2024-08-27。

作者简介: 李中(1972—), 男, 河南驻马店人, 1994年毕业于江汉石油学院钻井工程专业, 2011年获中国石油大学(北京)安全技术及工程专业博士学位, 正高级工程师, 博士研究生导师, 主要从事海洋油气钻完井方面的研究与技术管理工作。系本刊编委会副主任。E-mail: lizhong@cnooc.com.cn。

多样的情况,钻井过程中井下复杂情况频发,严重影响钻井作业安全,亟需智能化钻完井手段提供多维度智能决策支撑^[2]。智能钻完井以井筒为核心业务对象,借助数字化方法和信息技术全面辅助钻完井业务活动,以实现作业智能化、设计协同化、管理主动化和决策科学化,是智能油田的重要组成部分。相比于传统钻井,智能钻井模式需要更丰富的井下数据、自动化程度更高的钻机系统及更智能的钻井决策^[3-8]。

海洋智能钻井的实现需要完善的通讯基础、统一的数据规范及智能的算法应用,必须建设工业互联网,以此为载体获得基础支撑。同时,不同于传统工业自动化过程控制,钻井作业还具有流程复杂、工具特殊、系统孤立和协议繁多的特点,需要实现钻井系统及地层的全面感知与融合。目前,海洋智能钻完井还处于起步阶段,分析了目前海上智能钻完井在基础建设、智能钻井、智能井筒的技术现状及技术难点,研究了海洋钻完井智能感知领域的关键技术,为推动海洋油气田的数字化转型和智能化发展提供了技术支撑。

1 海上智能钻完井技术难点

随着海上油田大规模开发,优质储量越来越难以发现,同时新发现油气田储量品质劣质化,经济开发难度大,复杂结构井、超大位移井等高难度井越来越多,钻完井提速提效与安全钻井之间的矛盾

日益突出。不同于陆上油田,海上智能钻完井建设面临着基础建设和智能感知技术应用的特殊性。

1.1 基础建设技术难点

智能钻完井的核心是数据的获取、传输及使用,海上钻井平台通过建立数据中心+应用中心,实现对于现场钻完井各类设备设施的联通工作,通过统一应用环境实现数据的统一采集、服务及现场应用部署。依托数据治理基本解决了基础数据及常规业务的需求,但智能化应用时还缺少基础设施和资源体系。

海洋油气开发远离陆地,海上平台管制钢结构密集复杂,对无线信号有所影响,并且作业红区范围大,多数情况下只能使用有线建立网络通讯^[9]。钻井相关工控系统类型众多,存在系统孤立、数据不通、难以协同的问题(见表1),目前还没有能满足海上钻井业务需求的现成解决方案。此外,跨专业数据的需求,以及现场新工具的数据采集传输仍未得到保障。

1.2 智能感知技术难点

海洋钻完井智能感知通过地层感知、工具感知、流体感知和装备感知,实现了建井过程计井筒全生命周期的感知。按照阶段划分,可分为智能钻井阶段和智能井筒阶段。

智能钻井可实时获取更多类型的随钻数据,基于大数据利用AI算法及模型智能分析辅助决策,指导智能钻机控制操作,提升作业效率、降低作业风险,但目前数据获取、装备及算法尚处于起步阶段,

表1 海洋钻井常见设备与系统

Table 1 Common equipment and system of offshore drilling

组网对象	系统名称	目标集成软件	目标集成硬件
录井与MWD	录井系统	数据传输服务	服务器
	MWD数据接收系统	上位机软件	PC
作业控制类系统	集成司钻控制系统	集成司钻操作系统	服务器
	SCM(水下采油树控制系统)	上位机软件	服务器
	控压钻井/固井系统	组态软件	PLC(具备网络模块)
	固井撬系统	数据网关输出	PLC(配合数据网关)
其他工控系统(火气/气象)	防喷器控制系统	PLC具体IO点位	PLC(开放适配接口)
	其他工控系统(火气/气象)	PLC具体IO点位	PLC(开放适配接口)
	海上钻井智能监控系统	网站系统	服务器
作业辅助类系统	钻完井作业日志填报系统	日志填报系统	PC
	智能钻井决策系统	软件	服务器
智能钻井新工具	智能钻杆(井下数据传输)	数据接收上位机	服务器

尚未形成闭环。在数据监测传输方面,钻井工程参数(钻压、扭矩等)未能准确获取井底实际情况,井底数据传输数据量容量低无法满足未来钻井智能化大量的井下数据需求^[10]。在智能地面装备方面,对地面设备和工艺状态的全面感知能力覆盖面不够、可靠性不足,仅局限于钻井作业期间钻台面钻杆、套管处理自动化,对于复杂管柱/工具无法实现自动处理,对于新型智能化设备的运维能力不足,导致自动化设备故障率较高。在现场闭环调整优化方面,尚未实现钻机装备自动调控的闭环,目前主要依赖现场的经验手动调节,缺少安全风险预警与处置的闭环机制。

智能井筒通过智能井下监测工具可获取更丰富、更精细的油藏信息,支撑实现油藏精细化描述和智能优化,根据优化结果,通过智能井下控制工具实现精细化生产调配,提高油气藏的整体采收率。目前井下工具的可靠性以及如何进一步实现与地质、开发生产专业的融合是面临的主要问题。在储层数据监测方面,未形成标准化的井筒监测可靠性评估方法,监测数据主要集中在近井地带,对井间储层动态描述的监测手段有限;仍需进一步深化多源监测数据综合解释技术在油藏开发中的应用^[11]。在井筒工具控制方面,井下滑套、传感器等工具长时间工作可靠性有待进一步加强,监测的精度和维度需要提升和拓展,分层生产智能控制与智能监测功能集成性有待提高。在压裂实时决策方面,现有的压裂相关的数据分散分,缺乏统一的管理,整体上智能压裂仍处于“起步”阶段^[12],应用场景设计仍需统筹规划。

2 海洋钻完井智能感知关键技术

针对目前海上智能钻完井面临的难点和技术需求,开展了钻完井关键核心装备及工具、人工智能算法模型研究,通过自动化和智能化提升,实现海上钻井、井筒、地层的全面感知,远程操控,实时优化、预测预警,打造海上智能钻井、智能井筒闭环系统,支撑“作业智能化”,实现从传统油田开发模式向现代化、数字化、智能化的跨越。

2.1 地层感知

地层感知通过测量解释技术,感知地层属性,制定科学技术方案。钻前地质风险科学评估、地质力学精准分析是科学钻井的基础,对地层的认知、感知直接关系到钻完井工程的时效与安全,是指导

施工、减少风险、科学制定施工措施的重要基础。

2.1.1 上覆地层岩性及特殊构造精准识别技术

融合钻测录井与地震资料多源信息,建立各类岩性的钻前地球物理识别方法^[13],实现岩性界面所致阻卡风险的精准识别;在传统相干属性基础上,发展曲率增强与梯度结构张量属性,实现了小尺度褶曲和火山通道等特殊构造的精准识别。通过地质异构体识别与钻井轨道优化设计结合、地球物理与井筒参数结合实现裂缝性漏失量化评估、岩性界面可视化与钻井结合实现钻井参数优化、三维地质力学分析,为钻井工程优化提供精确分析基础。南海某油田岩性界面可视化与钻井结合实现钻井参数优化结果如图 1 所示。

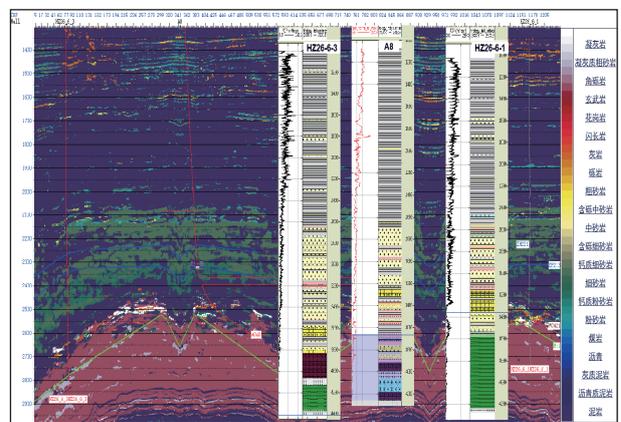


图 1 岩性界面可视化与钻井结合实现钻井参数优化

Fig.1 Lithologic visualization combined with drilling to optimize drilling parameters

2.1.2 超压储层顶界井震融合分析技术

基于快速偏移成像技术,根据钻井过程中不断更新的地层数据,对地震数据进行快速偏移成像重处理,并结合随钻测录井岩性等信息,随钻过程中实现高精度卡取关键反射层。针对超压储层压力突增风险,寻求高/低频声学、电学属性与超压响应关系,澄清现有测录井、地震属性对气层超压无敏感响应的新认识^[14-16];明确了纵波阻抗作为泥岩阈值,结合已钻井测录井资料,刻画超压储层泥岩顶界的空间分布规律。

2.2 工具感知

工具感知通过随钻实时监测,感知井下工具及井筒状态,实现科学高效调整。井下工具是实现井眼钻进、井筒建设的重要手段^[17],工具感知是井下真实状况最直接的洞察,是钻井提速、减少井下复杂情况、降低作业风险的关键。

2.2.1 钻井井下智能监测技术

结合井下进钻头工程参数实时测量工具(见

图2)、随钻超前探测技术、智能钻杆,实现近钻头工程参数(钻压、扭矩、振动等)实时传输的能力,集成形成集井下监测及传输的技术一体化方案体系。建立井下数据高带宽,高速率的传输链路,实现对于井下工具、地层的全面感知,实现井下关键数据和未钻地层性质的获取。

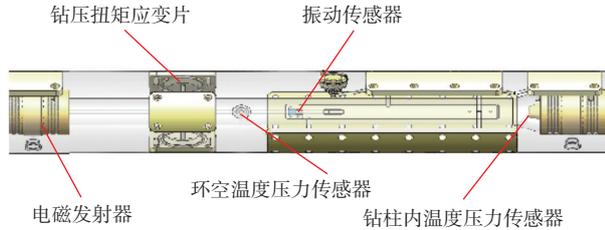


图2 井下近钻头工程参数实时测量工具

Fig.2 Schematic diagram of downhole near-bit engineering parameter real-time measurement tool

2.2.2 井筒生产智能监测技术

未来的多参数传感系统中,不同类型的光纤传感器可以感知流量、压力、声波、化学、振动和重力等不同参数^[18-19]。来自不同类型传感器的数据将通过特殊的数据挖掘算法进行合并和处理,以便更快地做出决策。光纤技术在其他领域已开展成熟的应用,但需要进行调整和改进,以适应石油和天然气行业苛刻的应用环境。

采用飞秒激光微加工技术和大规模卷对卷制备技术,实现大规模长寿命飞秒透涂覆阵列光栅制备,解决了井下恶劣环境下普通光纤对微弱信号分辨不足、大规模光纤微结构加工一致性和成品率低的问题。针对光纤中的散射信号较弱导致系统的信噪比较低、传感距离和灵敏度受到限制的缺点,以及多点定位困难、定位精度差的缺陷,将波时分混合复用技术与弱光栅阵列结合,突破多参数多功能传感融合技术,进一步提升传感器网络容量,实现一条光缆高精度监测温度、声波、压力等参数,解决海上长水平段水平井、大位移井监测精度低导致的无法精细感知问题。

2.3 流体感知

流体感知包含钻井液自动检测、优化,固井智能控制、多维度生产流体监测^[13]。基于油藏类型、井身结构等基础信息,实现标准化、流程化的钻井、完井、固井设计;通过作业数据采集工具和作业监测系统的融合应用,实现智能化的流体设计与作业,降低作业风险,提高作业效率。

基于实时监测的核心设计理念,开发了钻井液性能在线监测系统,将机器视觉技术引入旋转黏度

测量系统,消除了因机械阻尼带来的数据误差,更加真实准确表征了旋转黏度的读数。基于API标准,研发钻井液中压滤失自动化测量模块,通过机械自动化控制实现了钻井液API滤失量的全自动化测量。钻井液性能自动化测量技术实现了密度、温度、pH值、漏斗黏度、六转旋转黏度、API滤失量等参数自动测量。

基于自动化测量设计理念,研发了固井水泥浆性能在线监测系统,实现了水泥浆密度、流变性能、注入流量及注入压力的实时测量。采用双旋转黏度计设计,交替测量密度、温度、pH值、六转旋转黏度等参数,提高数据采集频率和测量可靠性。

以上2种在线监测系统均具备自动取样、自动测量、自动清洗及故障诊断、紧急停机、测试结果自动保存在数据库、远程通讯等功能。

2.4 装备感知

装备感知通过现场装备数据、司钻系统全面感知,实现智能化控制。通过打造现场边缘计算中心,实现现场装备数据、集成司钻系统、井下作业工况的全面感知,实现智能钻机的基础建设及钻井智能化应用。

2.4.1 钻机装备与钻井工艺一体化智能控制技术

研发以钻井工艺需求为导向的闭环钻井智能控制技术,建立远程智能化钻井固控系统,钻机装备系统智能化辅助管控、安全管理、智能故障诊断维护能力。提升钻机装备智能化操控和管理水平,具备钻机装备自主联动控制、协同数据处理、动态安全管理、钻井液智能调控、设备智能故障诊断与维护能力;以钻井工艺需求为导向,实现地面和井下联动闭环钻井过程,促进钻井作业提效降本。

2.4.2 基于工业互联网的海洋钻井智能监控

基于工业互联网的海洋钻井智能监控围绕人、井、设备和管理等4个方面开展建设工作,实现了窄带宽条件下在陆上观看现场实时画面,为远程定井提供了技术保障^[20-22],为协同决策精细化奠定了技术基础;构建了基于机器视觉的安防监测体系,实现了人、物、工况综合分析的安全管控;构建了海陆协同的井控早期发现、智能决策体系,全面支撑应急管理和陆地指挥需求。

3 现场应用

中海油针对装备感知,建设了基于工业互联网的海洋钻井智能监控系统-天眼系统,实现了面向钻

完井各系统的统一数据接入平台。解决了常规海洋钻井平台设备分散独立、数据流转困难的问题,已在多个模块钻机现场应用。

目前,海洋钻井智能监控系统已成为现场安全管理的重要辅助工具。2023年,该系统在南海东部某平台深度试点应用,累计识别重点违章问题136次,现场安全监督发放STOP卡12张,以智能化手段提升现场作业队伍安全意识。在海洋钻井智能监控系统的助力下,该平台自开钻起至首批开发井完成,全程未发生任何安全事故。

资源层建设方面,通过合理的网络拓扑规划,精简了防喷器控制台、录井系统等接入的施工程序,基于超融合架构,强化了设备远程运维能力。2023年南海东部某油田避台风4次、设备出现异常状态3次,期间陆地项目人员完全使用远程运维功能对系统进行复员和诊断,累计节省人员出海维护45人天。创造直接经济效益的同时,资源层方案成功突破了海上设备点对点连接的固有模式,为数据通信层数据流转奠定了基础。

完善的数据通信层建设,是在应用层方面发挥多源数据融合、多源系统协同优势的重要保证。天眼系统已实现了钻井人员、作业、设备、管理等多个方面的监控应用。图3为实时计算入口流量差曲线、水力学曲线、岩屑沉降曲线的计算机显示界面,图4为作业规范关键点自动检查功能的显示界面。



图3 井控曲线实时计算界面

Fig.3 Real-time calculation interface of well control curve

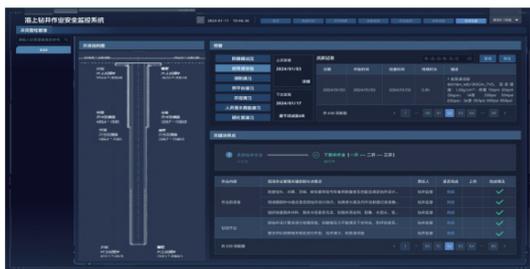


图4 作业规范关键点自动检查界面

Fig.4 Automatic check interface of key points of operation specification

该系统通过 wits 传输格式和网络接口,分别接录井数据和日志数据联动,实现了曲线自动绘制,完全无需人工输入,充分体现了数据打通的价值。

报警视频联动回看功能如图5所示,相比于其他领域的机器视觉风险监控软件,该系统可同时提供报警时刻前后录像回放,弥补了目标检测识别人员行为能力不足的问题,提供了双重校核选项。

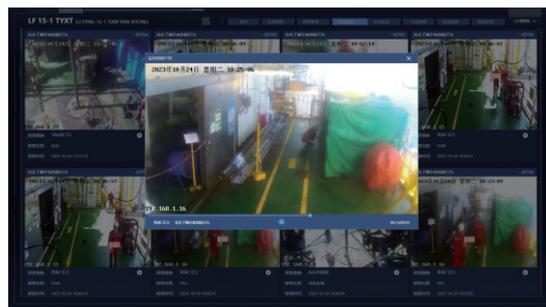


图5 报警视频联动回看界面

Fig.5 Alarm video linkage look back interface

4 结 论

1)海洋钻井作业具有流程复杂、工具特殊、系统孤立和协议繁多的特点,需要加快数据基础设施建设,实现钻井系统及地层的全面感知与融合。

2)通过开展钻完井关键核心装备及工具、人工智能算法模型研究,围绕海上油气开发钻完井核心业务开展关键技术攻关,实现了海上地层、工具、流体、装备的全面感知,打造海上智能钻井、智能井筒闭环系统,实现了从传统油田开发模式向现代化、数字化、智能化的跨越。

3)基于工业互联网的海洋钻井智能监控系统已在多个模块钻机现场应用,并取得初步成效,有效提升了现场安全管理水平。

4)海上智能钻完井智能感知技术可作为建设海上智能钻完井基础,为推动海洋油气田的数字化转型和智能化发展提供技术支撑。

参 考 文 献

References

- [1] 李金蔓,周守为,孙金声,等.数字技术赋能海上油田开发:渤海智能油田建设探索[J].石油钻采工艺,2022,44(3):376-382.
LI Jinman, ZHOU Shouwei, SUN Jinsheng, et al. Digital technology energizes offshore oilfield development: an attempt to build the Bohai smart oilfield[J]. Drilling & Production Technology, 2022, 44(3): 376-382.
- [2] 李中,张祯祥,杨进,等.地层压力随钻监测方法在深水高温高压

- 井中的研究与应用[J]. 地球科学, 2019, 44(8): 2597-2602.
- LI Zhong, ZHANG Zhenxiang, YANG Jin, et al. Research and application of formation pressure monitoring while drilling in deepwater with high temperature and high pressure[J]. Earth Science, 2019, 44(8): 2597-2602.
- [3] DENNEY D. Optimizing marginal subsea-well developments with intelligent completions[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2003, 55(8): 43-44.
- [4] 马英文, 杨进, 李文龙, 等. 渤中 26-6 油田发现井钻井设计与施工[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(3): 9-15.
- MA Yingwen, YANG Jin, LI Wenlong, et al. Drilling design and construction of a discovery well in Bozhong 26-6 Oilfield[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(3): 9-15.
- [5] ABUGHABAN M, ALSHAARAWI A, MENG Cui, et al. Optimization of drilling performance based on an intelligent drilling advisory system[R]. IPTC 19269, 2019.
- [6] 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.
- [7] 张世昆, 陈作. 人工智能在压裂技术中的应用现状及前景展望[J]. 石油钻探技术, 2023, 51(1): 69-77.
- ZHANG Shikun, CHEN Zuo. Status and prospect of artificial intelligence application in fracturing technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2023, 51(1): 69-77.
- [8] 李根生, 宋先知, 田守崧. 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.
- [9] 林杨. 基于工业互联网云边协同技术在渤海某智能油田的实践[J]. 信息系统工程, 2021(11): 47-50.
- LIN Yang. Based on the practice of industrial internet cloud-edge collaboration technology in an intelligent oilfield in Bohai[J]. *China CIO News*, 2021(11): 47-50.
- [10] 高仁. 钻井工程参数监测系统体系结构与数据采集传输模块的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- GAO Ren. Development of drilling parameters monitoring system architecture and data acquisition & transmission module[D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [11] 张伟. 基于油田多源数据分析的油藏管理研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- ZHANG Wei. Reservoir management research based on multi-source data analysis of oilfield[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013.
- [12] 盛茂, 李根生, 田守崧, 等. 人工智能在油气压裂增产中的研究现状与展望[J]. 钻采工艺, 2022, 45(4): 1-8.
- SHENG Mao, LI Gensheng, TIAN Shouceng, et al. Research status and prospect of artificial intelligence in reservoir fracturing stimulation[J]. *Drilling & Production Technology*, 2022, 45(4): 1-8.
- [13] 田飞, 底青云, 郑文浩, 等. 面向地质导向的地层智能评价解决方案[J]. 地球物理学报, 2023, 66(9): 3975-3989.
- TIAN Fei, DI Qingyun, ZHENG Wenhao, et al. A formation intelligent evaluation solution for geosteering[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2023, 66(9): 3975-3989.
- [14] 马海. 基于多源信息整合的钻井地质特征参数估计与预测方法研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2010.
- MA Hai. Estimation and prediction of drilling geologic characteristic parameters based on multi-source information fusion[D]. Qingdao: China University of Petroleum(East China), 2010.
- [15] 范廷恩, 胡光义, 王晖, 等. 井震结合储层研究[C]//中国地球物理学会第二十二届年会. 北京: 中国地球物理学会, 2006: 116.
- FAN Ting'en, HU Guangyi, WANG Hui, et al. Well-seismic combined reservoir research[C]//The 22nd Annual Meeting of the Chinese Geophysical Society. Beijing: Chinese Geophysical Society, 2006: 116.
- [16] 李中, 谢仁军, 袁俊亮. 深水高温高压气田窄压力窗口地层钻井安全概率区间[J]. 天然气工业, 2020, 40(12): 88-94.
- LI Zhong, XIE Renjun, YUAN Junliang. Study on the drilling safety probability interval in narrow pressure window formation in deepwater HPHT gas fields[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(12): 88-94.
- [17] 郭永峰. 能使井底参数上互联网的“遥测钻杆”技术[J]. 中国海上油气, 2004, 16(1): 17.
- GUO Yongfeng. The “telemetry drill pipe” technology that can make the bottom hole parameters on the Internet[J]. *China Offshore Oil and Gas*, 2004, 16(1): 17.
- [18] ADIL M, SANTHIRASEKARAN L, THAM N A, et al. Injection profiling for intelligently completed wells equipped with fiber optics[R]. SPE 211402, 2022.
- [19] SEABROOK B, ROMERO E, MATTESON C. Fiber optic surveillance of subsea developments including intelligent well completions (IWCs)[C]//EAGE Workshop on Fiber Optic Sensing for Energy Applications in Asia Pacific. Houten: European Association of Geoscientists & Engineers, 2020: 1-5.
- [20] 赵正彬, 石光伟, 张舜钦, 等. 基于超融合架构的船舶云设计平台[J]. 船舶设计通讯, 2022(2): 92-96.
- ZHAO Zhengbin, SHI Guangwei, ZHANG Shunqin, et al. Ship cloud design platform based on hyper converged infrastructure[J]. *Journal of Ship Design*, 2022(2): 92-96.
- [21] 李洪星. 网络时间同步与授时技术研究[D]. 北京: 北京邮电大学, 2021.
- LI Hongxing. Research on network time synchronization and time service technologies[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2021.
- [22] CARPENTER C. Intelligent drilling advisory system optimizes performance[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2020, 72(2): 65-67.

[编辑 滕春鸣]