



钻井数字孪生技术研究现状及发展趋势

宋先知 李根生 祝兆鹏 马宝东 张子悦

Research Status and Development Trend of Drilling Digital Twin Technology

SONG Xianzhi, LI Gensheng, ZHU Zhaopeng, MA Baodong, ZHANG Ziyue

在线阅读 View online: <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024096>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

钻井数字孪生系统设计与研发实践

Design and Research Practice of a Drilling Digital Twin System

石油钻探技术. 2023, 51(3): 58–65 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023011>

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>

数字孪生技术在钻井领域的应用探索

Exploration for the Application of Digital Twin Technology in Drilling Engineering

石油钻探技术. 2022, 50(3): 10–16 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2022068>

冲砂洗井技术研究现状及发展趋势

Research Status and Development Trends in Sand Washing and Well Cleaning Technologies

石油钻探技术. 2023, 51(3): 1–8 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023050>

中东地区碳酸盐岩油藏钻井工程技术现状及发展趋势

Status and the Future Perspective of Drilling Engineering Technologies in Middle East Carbonate Reservoirs

石油钻探技术. 2024, 52(1): 8–16 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2023103>

随钻测控技术现状及发展趋势

Current Status and Development Trend of Measurement & Control while Drilling Technology

石油钻探技术. 2024, 52(1): 122–129 <http://doi.org/10.11911/syztjs.2024017>



扫码关注公众号，获取更多信息！

doi:10.11911/syztjs.2024096

引用格式: 宋先知, 李根生, 祝兆鹏, 等. 钻井数字孪生技术研究现状及发展趋势 [J]. 石油钻探技术, 2024, 52(5): 1-10.

SONG Xianzhi, LI Gensheng, ZHU Zhaopeng, et al. Research status and development trend of drilling digital twin technology [J]. Petroleum Drilling Techniques, 2024, 52(5): 1-10.

钻井数字孪生技术研究现状及发展趋势

宋先知^{1,2}, 李根生^{1,2}, 祝兆鹏^{2,3}, 马宝东¹, 张子悦¹

(1. 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249; 2. 中国石油大学(北京)油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249; 3. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249)

摘要: 在第四次工业革命技术浪潮的推动下, 油气钻井行业正朝着信息化、数字化、智能化快速发展, 钻井数字孪生技术成为行业前沿与热点。钻井数字孪生技术旨在将真实钻井工程映射到虚拟空间, 建立集成多学科、多物理量、多尺度的钻井过程全生命周期虚拟仿真模型, 实现钻前演练、钻中优化、钻后分析等功能, 保障安全、高效、低成本钻进, 提高复杂油气储层钻井效率。介绍了数字孪生技术在钻井工程中的应用现状, 将钻井数字孪生分为钻机数字孪生和井筒数字孪生, 并提出钻井数字孪生五维系统架构。同时分析了钻井数字孪生未来发展趋势, 包括钻井数据实时高效传输、地质模型精细表征、多领域一体化建模与仿真、仿真模型动态自适应更新、机理与数据融合建模、安全高效的人机交互以及云边协同软件系统架构, 并提出我国钻井数字孪生技术发展的相关建议。研究结果可为钻井数字孪生技术体系的构建提供参考, 对于推动钻井行业智能化革新具有一定指导意义。

关键词: 钻井工程; 数字孪生; 系统架构; 技术现状; 发展趋势

中图分类号: TE242; TE928

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2024)05-0001-10

Research Status and Development Trend of Drilling Digital Twin Technology

SONG Xianzhi^{1,2}, LI Gensheng^{1,2}, ZHU Zhaopeng^{2,3}, MA Baodong¹, ZHANG Ziyue¹

(1. College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 2. National Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China; 3. College of Mechanical and Transportation Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing, 102249, China)

Abstract: Under the impetus of the Fourth Industrial Revolution, the oil and gas drilling industry is rapidly advancing towards informatization, digitization, and intelligentization, with drilling digital twin technology emerging as a frontier and hotspot in the field. The aim of drilling digital twin technology is to map real drilling operations into virtual space, establishing integrated, multidisciplinary, multiphysical, and multiscale virtual simulation models throughout the entire lifecycle of drilling. This facilitates functionalities such as pre-drilling rehearsal, in-drilling optimization, post-drilling analysis, ensuring safe, efficient, and cost-effective drilling, and enhancing the efficiency of complex oil and gas reservoir development. This paper introduces the application status of digital twin technology in drilling engineering, categorizing drilling digital twins into rig digital twins and wellbore digital twins, and proposes a five-dimensional system architecture for drilling digital twins. Additionally, it analyzes the future development trends of drilling digital twins, including real-time and efficient transmission of drilling data, refinement and quantification of geological models, multidomain integrated modeling and simulation, dynamic adaptive updating of simulation models, integration of mechanism and data for modeling, safe and efficient human-machine interaction, and cloud-edge collaborative software system architecture. Relevant suggestions for the development of drilling digital twin technology in China are also proposed. The research findings can serve as a reference for the establishment of a comprehensive drilling digital twin technology system and provide guidance for promoting intelligent innovation in the drilling industry.

收稿日期: 2024-08-28。

作者简介: 宋先知 (1982—), 男, 黑龙江依安人, 2004年毕业于石油大学(华东)石油工程专业, 2010年获中国石油大学(北京)油气井工程专业博士学位, 教授, 博士生导师, 主要从事井筒多相流、智能钻完井与地热钻完井等方面的研究与教学工作。E-mail: songxz@cup.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金杰出青年科学基金项目“油气井流体力学与工程”(编号: 52125401)、国家重点研发计划项目“复杂油气智能钻完井理论与方法”(编号: 2019YFA0708300)联合资助。

Key words: drilling engineering; digital twin; system architecture; technological status; development trends

21世纪以来,我国油气勘探开发理论技术不断创新,油气工业呈现出“油气并举”“常非并进”等油气勘探开发战略新格局^[1]，“深、低、海、非、老”等复杂油气资源加速成为勘探开发重点领域^[2-4]。钻井工程作为沟通地面与储层的关键环节,其成本占勘探开发总成本的30%以上,实现安全高效钻井对于油气勘探开发提质降本增效具有重要意义^[5-6]。然而,复杂油气储层存在非均质性强、资源品位低、埋藏深度大、地面条件差等突出难题,常规钻井技术面临巨大挑战。随着人工智能、大数据、云计算、物联网、人机交互等数字化技术与钻井行业的深度融合发展,智能钻井成为前沿变革性技术^[7-8],并在地层建模、效率优化、风险管控、质量评价、全局协同优化等场景体现出显著优势^[9],成为复杂油气藏高效开发的关键技术手段。钻井数字孪生技术作为实现物理世界虚拟映射的新兴手段^[10-11],已成为钻井行业智能化发展的前沿与热点,其旨在虚拟空间建立钻机设备及井筒的实时真实映射,从而实现设备预测性维护、故障模拟、远程巡检及钻前演练、钻中优化、钻后分析等功能,达到钻井过程全生命周期动态仿真和决策优化的目的,从而减少地面设备故障和井下复杂情况,提高钻井效率。国外钻井数字孪生技术的研究起步较早^[12-17],但整体仍处于发展初期。国内钻井数字孪生技术的研究处于起步阶段,与国外相比有一定差距。在系统分析钻井数字孪生技术构成及国内外研究现状的基础上,提出了钻井数字孪生技术系统框架,指出我国钻井数字孪生技术重点攻关方向,以推动钻井数字孪生技术发展及应用。

1 数字孪生理论概述

“数字孪生(digital twin)”最早由 Michael Grieves 教授于 2002 年提出,即通过数字化手段建立物理实体的抽象化表达,进而对其进行真实条件或者模拟条件下的测试^[18-20]。数字孪生化是指通过数字化手段将物理世界的实体进行虚拟映射,实现对物理实体特征、行为、形成过程和性能等进行描述、分析、优化的过程和方法,其中物理实体的实时虚拟映射模型和孪生数据称为数字孪生体,面向数字孪生全生命周期的技术被称为数字孪生技术。

数字孪生技术的核心是建模与仿真^[21-22]。建模

是建立数字孪生体的基础,包括物理实体的几何尺寸、运行机理和行为规则等,建立忠实的虚拟模型是数字孪生技术的最终目标。仿真是验证数字孪生模型的关键方法,能够在短时间内得到物理实体在一定条件下的参数状态。数字孪生技术与传统的建模仿真技术不同,传统建模仿真技术主要是将包含确定性规律和完整机理的模型转化成软件的形式来模拟物理世界,只要模型正确,并拥有了完整的输入信息和环境数据,就可以基本正确地反映物理世界的特性和参数。但数字孪生体的数据来自物理世界的实时收集,具有时间维度的更新,需要模型具有动态更新特性。

数字孪生技术早期主要用于军工国防、航空航天领域^[23-24],主要原因是工程实践经验少、试错风险成本高,由于研究成果保密,不容易被公众所了解。但随着数字孪生技术的产业化发展,其先进性被其他行业者所充分认知并吸收借鉴,全球主要工业国家都参与到数字孪生产业竞争中来,并提出国家和行业层面制造业转型发展战略^[25-26]。数字孪生技术逐渐被应用到产品设计、城市基建、医学分析、能源勘探和物流运输等行业,成为全球行业智能化发展的重要组成。

2 钻井数字孪生技术概述

钻井数字孪生技术是将钻井工程与数字孪生技术相结合,通过构建钻井数字孪生体,反映钻井过程全生命周期动态变化,是钻井智能化发展的关键技术之一。其构建流程为:1)通过钻井参数仪、综合录井仪、旋转导向等数据采集仪器对钻井、测井、录井等数据进行实时监测,并进行多源数据融合集成。2)基于实时数据和历史数据,从几何、物理、行为和规则4个维度在虚拟空间构建钻机设备以及井筒的高逼真虚拟模型,形成涉及机械、电气和液压等方面的钻机设备子系统和地质导向、钻进破岩、井眼轨迹、风险调控、协同优化等钻井过程子系统,模块化、组件化地进行多领域、多系统耦合,实现集成多学科、多物理量、多尺度和多概率的钻井过程全生命周期虚拟仿真。3)基于钻井实体与虚拟模型同步运行产生的孪生数据,来反映钻井作业实时状态,并实现破岩、导向、水力学等状态的超前预测,为钻井过程中全局协同优化提供数据和模型基础。

同时,借助先进计算机技术可在虚拟模型上进行安全、高效、低成本模拟操作,实现钻前演练、钻中优化和钻后分析等功能。4)基于 Unity 3D、3D MAX 等可视化引擎,钻井数字孪生将实现地面设备和井下井筒的可视化,彻底改善传统井下“黑箱”状态,直观呈现钻机与井筒状态。5)通过数据、业务共享,协同地质、工程等多方互联互通,构建远程决策支持中心,优化作业流程,提升钻井质量。6)利用人机交互、智能控制等技术,将虚拟模型产生的决策优化、调控反馈结果作用到钻井实体,最终实现钻井过程全生命周期闭环调控。

钻井数字孪生可分为钻机数字孪生和井筒数字

孪生两部分(见图 1)。钻机数字孪生主要包括对钻机起升系统、旋转系统、循环系统、动力系统、传动系统、控制系统、底座系统和辅助系统等八大系统建模仿真,对钻机设备进行健康监测、优化运行、故障诊断、预测性维护等操作,同时配合智能装备,实现钻机设备智能闭环控制。井筒数字孪生主要对钻井过程进行建模仿真,研究对象包括井周地质、钻进破岩、钻井管柱、井眼轨迹、井筒完整性、井筒流体、岩屑运移和钻井风险等,动态模拟井下钻井过程,通过人工智能等手段,对井下钻井过程进行预测、优化和决策,实现钻井过程“感知—认知—决策”^[9],为安全高效钻进提供技术保障。

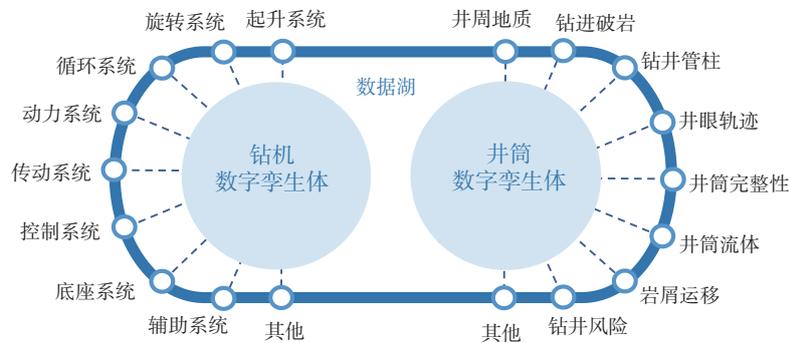


图 1 钻井数字孪生体的基本组成

Fig.1 The basic composition of drilling digital twin

3 钻井数字孪生系统架构

钻井数字孪生系统平台作为钻井数字孪生技术落地应用的核心载体,其框架的设计与搭建至关重要。借鉴不同行业数字孪生体系统架构设计^[27-30],提出了适用于钻井数字孪生的五维系统架构,主要包括物理层、模型层、数据层、服务层和应用层(如图 2 所示)。

3.1 物理层

物理层是客观存在于物理空间的实体及过程,主要指钻井过程中人、机、物、环境以及物理实体对应的集合。通过井场地面及井下设备安装的传感器进行实时数据收集,并基于统一的井场数据通讯协议与转换方法,实现物理层多源异构实时数据接入与集成,形成人-机-物-环境的互联与融合。以此建立的感知数据库是孪生数据的一部分,也是信息空间虚拟模型搭建的基础。

3.2 模型层

模型层是一系列钻机子系统以及钻井过程子系

统的集合,是物理层实体的忠实映射,其核心是建模与仿真。例如,钻机设备数字孪生模型主要包括描述要素和行为层面。描述要素是指对设备几何结构、材料属性的静态特征建模,建立多尺度的三维模型;行为层面是指设备运动规则的动态模型,如机械动力模型、疲劳损伤模型等。虚拟模型能够提供低成本的工况模拟、复杂事故处理,不受时空限制,实现多方信息共享。将钻机、井筒多维虚拟模型集成与融合,最终建立涵盖钻井过程全生命周期的虚拟模型,是钻井数字孪生体的重要承载形式。

3.3 数据层

数据层是指感知数据、计算数据、融合数据及服务系统数据。感知数据是指从物理实体上测量的数据,如测井数据、录井数据、工况数据、现场作业视频等。计算数据是指通过虚拟模型动态仿真得到的设备几何形变、管柱摩阻扭矩、井筒环空压力、钻井液参数、岩屑床高度等数据。融合数据主要是传感数据和计算数据通过清洗、关联、聚类、挖掘、迭代生成的数据,能够真实刻画和反映钻井过程状态、要素行为等特性,以实现全井、全过程、全方位

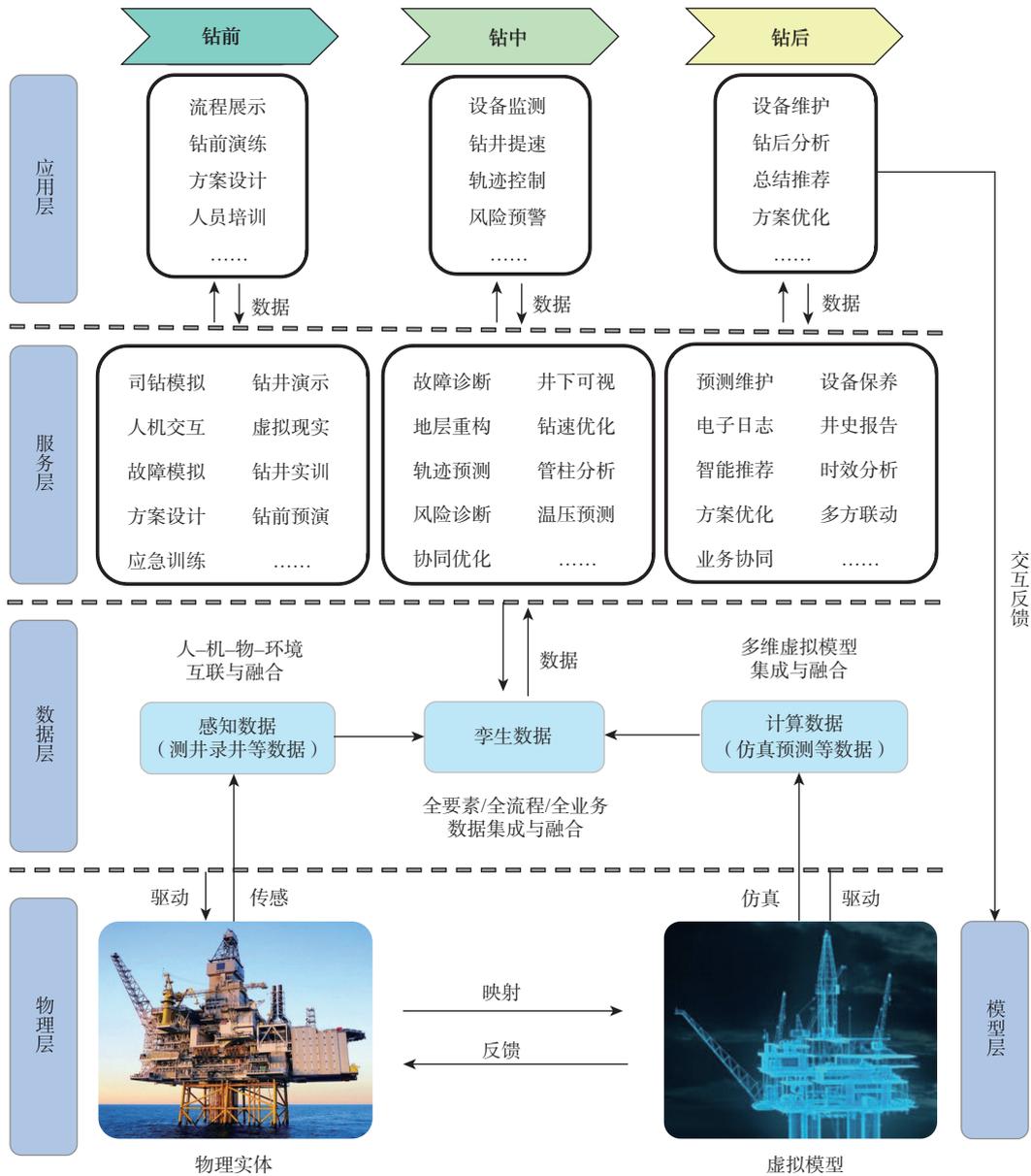


图2 钻井数字孪生系统架构

Fig.2 The system architecture of drilling digital twin

的数据覆盖。例如，可以通过人工智能算法实现对未来时刻状态参数的高效精确预测，来弥补仿真模型计算效率低的不足。服务系统数据包括在钻井设计、运行及分析处理过程中产生的控制指令数据，例如人机交互、排产管理、物资调度数据等，通过建立大量数字线程，达到维持数据交换秩序的目的。

3.4 服务层

服务层是指数据驱动的各类服务，根据钻井流程划分可分为三类：钻前、钻中和钻后。通过钻井数字孪生技术，可进行钻前司钻模拟、钻井演示、人机交互等操作，实现在虚拟环境下的低成本钻井操作模拟和训练，提升教学与培训水平，有助于提高

操作人员的技能水准，模拟不同方案下钻井作业效果，进一步完善钻井方案设计，提高钻井效率。钻中服务则主要针对运行的各个子系统进行实时建模仿真，实现设备故障诊断、井下可视、地层重构、钻速优化、轨迹预测、风险诊断、协同优化等功能，保障钻井过程中的设备健康运行以及安全高效钻井作业。钻后服务则主要针对已钻井进行经验总结，分析钻井时效，自动形成电子日志、井史报告等，以多模态领域数据和知识的形式融合钻井数据库，实现数据闭环，为后续作业方案优化提供基础。

3.5 应用层

应用层是服务层与用户直接交互的体现，也体

现了钻井数字孪生技术的真正价值。应用功能涵盖钻井过程全生命周期,包括钻前演练、人员培训、设备监测、钻井提速、钻后分析和方案优化等,从而提高钻井效率与效益。同时,命令执行后的结果数据也会反馈到虚拟模型中,便于监控与操作。

4 钻井数字孪生技术研究现状

钻井数字孪生分为钻井数字孪生系统平台和钻井数字孪生关键模块两个主要部分,前者主要包括系统框架、平台管理和智能闭环应用,后者重点关注于系统具体功能和应用模块。

4.1 钻井数字孪生系统平台

国外油服公司对钻井数字孪生技术的研究相对较早,通过自主研发或与互联网公司合作,加速了钻井数字孪生系统平台的建设,已取得较大进展。最早开展钻井数字孪生平台研究的是挪威 eDrilling 公司^[13,31-33],其在 2004 年就利用力学模型和三维可视化技术来监测钻井过程,并于 2008 年形成了 eDrilling 钻井数字孪生系统。该系统主要由钻井模型(流动、摩阻扭矩、机械钻速、井壁稳定性、孔隙压力等模型)、数据收集模块及诊断决策系统组成,能够实时协同钻井过程,实现诊断预测及钻井参数优化,贯穿钻井过程全生命周期。eDrilling 系统在一口高压高温井进行了现场应用,识别并预测了所有风险及事故,展示了数字孪生技术的优越性。

2017 年,哈里伯顿公司推出 DecisionSpace[®] 365 云平台,针对钻井设计、操作、历史数据分析等提供钻井全过程、全方位数据服务,建立集成钻机、地面设备、井下工具自动化和作业优化协同平台,实时监测钻井过程并提供钻井参数优化决策服务,降低井下风险,减少非生产时间,提高钻井效率^[34-35]。2020 年,该公司提出了 4.0 数字化战略,旨在创建钻井数字孪生模型,实现钻井过程可视化及人机交互,最终形成自动化钻井新模式。

2020 年,斯伦贝谢公司以数字孪生技术为核心,建立了钻井实时操作中心(real time operations center, RTOC)^[36]。RTOC 集成了机理模型和人工智能算法,开发了水力学、摩阻扭矩等模块,可以实时分析钻井数据,计算井下参数,构建井眼清洁路线以及钻井效率路线图,从而降低钻井成本,且在风险识别方面具有突出优势。同时,RTOC 还可利用识别算法实现“钻机状态”和“钻井状态”的自动分类,结合“未来钻机”等智能装备实现闭环调

控,提高了钻井作业自动化程度。

国内研究机构结合自身特色优势,逐步开展了钻井数字孪生系统平台的相关模块、软件研究。中国石油针对地下储气库建设,整合各类多源异构的动静态数据,构建了“储气空间-井筒限流-地面能力数字孪生耦合模型”,形成了地质、井筒和管网等数字孪生体,为储气库一体化研究、智能注采等场景应用提供支撑。中国石化通过多物理场建模、多尺度分析构建了精度更高的井筒数字孪生体,实现了水力学、管柱力学等机理模型实时联动计算^[11]。中国海油基于数字孪生技术开发了半潜式钻井平台系统,能够精细描述钻井实体,对钻井平台进行安全智能诊断,实现关键设备的预测性维护及可视化。

4.2 钻井数字孪生关键模块

钻机数字孪生和井筒数字孪生是钻井数字孪生的重要组成部分,钻机数字孪生专注于地面钻机装备,通过实时监测、故障诊断和预测性维护来提高钻机性能和安全性。井筒数字孪生主要关注井下的井周地层、井筒特性以及钻进动态等。

4.2.1 钻机数字孪生

钻机数字孪生研究对象主要是地面钻机装备,旨在实现钻机设备的状态监测、故障诊断、预测性维护等功能。其中,设备数字孪生技术在航天、医疗等领域的应用已比较成熟,为钻机数字孪生构建提供了很好的借鉴。国内外学者结合高保真物理模型、机器学习方法、计算机视觉等手段,针对钻机提升系统^[37]、控压设备^[15]等对象建立了设备动态数字孪生体,实现了故障诊断预测、远程检查维护以及运行参数优化,并模拟钻井作业流程,提供沉浸式场景漫游和人机交互功能,提升作业人员操作水平。同时,基于钻机数字孪生技术,还构建了虚拟传感器^[38],用于监测真实传感器不可测量位置的数据,解决了数据难以获取的问题,从而基于多源数据构建数字孪生体,进而提高设备和系统的性能、寿命和完整性。针对海洋钻井平台及设备的结构安全性、设备稳定性等,国内外学者^[39-42]构建了地面设备机电和控制系统仿真模型,结合传感器实时数据实现数字孪生模型与实体对象的更新校正,实现关键设备智能诊断、状态预测及平台可视化等功能。其中,中国海油建立了深水导管架数字孪生健康监测系统,提升了油气装备数字化智能化水平。

4.2.2 井筒数字孪生

井筒数字孪生研究对象主要是井周地层、地下井筒以及破岩、清屑、减阻等过程子系统,旨在实现

井下钻井过程全生命周期监测、预测与优化决策。由于钻井作业存在地下不可见性及地层属性不确定性等导致的“井下黑箱”问题,致使井筒数字孪生对于钻井作业降本增效具有十分重大的意义。国内外开展了针对井周地层^[43]、钻头磨损^[44]、钻具振动^[45]、钻井管柱^[46]、井眼轨迹^[12]、钻井液流变性^[47]、井眼清洁^[48]、井筒完整性^[49]和井下工况^[50]等的数字孪生研究,同时动态耦合钻井破岩、清屑、减阻等多过程,分析、预测、优化井下破岩、钻具状态和管柱振动等关键参数,实现钻前、钻中和钻后决策优化,在提高钻井效率、监测井筒完整性、诊断钻井复杂事故、降低非生产时间和保障安全高效钻进等方面发挥了较大作用。同时,基于可视化技术,实现了井下地质环境与井筒内钻头、管柱、钻井液等井下可视化功能。

5 钻井数字孪生技术发展趋势

目前,国内外钻井数字孪生还处在起步阶段,主要呈现出从局部到整体、从简化到精细的增量式建模趋势,存在建模流程不成熟、落地实施困难等问题,缺乏关键部件或流程数字化仿真能力,且在数字孪生技术的定义上还未形成统一标准。因此,需要将数字孪生通用技术与钻井工程数字化需求相结合,从数据传输、建模仿真、人机交互、系统架构等方面,开展钻井数字孪生关键技术攻关,为钻井过程全生命周期监测、维护、决策等提供技术支撑。

5.1 钻井数据实时高效传输

数据是钻井数字孪生体的血液,攻关研究实时高效的钻井数据传输技术,能够为模型高效、准确计算提供良好数据环境。钻井数据传输主要分为两部分,一个是井下工具与地面之间的数据传输,一个是井场与数据中心之间的数据传输。井下数据传输方式主要包括有线传输、无线传输、电磁波传输、钻井液脉冲传输等方式,其中钻井液脉冲传输应用较为广泛,成本低且相对稳定,但传输效率有待提升。智能井下装备的研制为井下信息高效传输提供了硬件支撑,如智能钻杆具有大容量、高速率随钻传输的优势,提高了井下数据的传输效率,改善了信息传输的延时性,对随钻测量、随钻测井、地质导向等技术发展具有重要的促进作用^[51]。同时,智能井场建设对井场数据传输的高效性和稳定性提出了更高要求,井场物联网技术的发展和应用为其提供了新的解决方案^[52]。通过各类传感器装置、无线通

信技术和射频识别技术等方式,可实时采集资产数据,建立连接物与物、人与物之间信息传递的网络体系,构建井场无线传感器自组织网络系统,提高信息采集的传输能力,最终实现对钻井现场的实时感知、动态监测与传输,达到各类数据高效化利用的目的,助力规范多源数据采集标准及接口规范,建立智慧井场数据高效传输机制,实现多源数据井下-井场-云端全平台流动。

5.2 地质模型精细化量化表征

地质建模是识别和认识地下储层的重要方式,也是认识井周地质环境的主要手段。然而,由于地下环境的不可见性和不确定性,模型精度严重依赖建模方法、地质认知、测井以及地震解释等^[53],这也是钻井数字孪生不同于航天、医疗等领域数字孪生的主要原因。因此,精细化、量化刻画储层特性成为构建钻井数字孪生体的关键。近年来,人工智能技术与地质建模深度融合,促进了储层解释、建模、模拟、开发逐渐向智能化方向发展,油藏数字孪生体^[43]应运而生,其旨在利用数字孪生技术构建油气藏数字孪生仿真模型,最大限度地量化逼近真实油气藏。将油藏数字孪生体和钻井数字孪生体有机结合,可在钻井过程中根据实时数据(测井、录井等)动态修正地质模型,明确地层岩石特性、地层压力、地质构造等属性,实现地质环境“透明化”,进而实时优化钻井方案,降低钻井风险,提高钻井效率。

5.3 多领域一体化建模与仿真

建模与仿真是数字孪生技术的核心。近年来随着计算机技术的快速发展,仿真技术凭借其高效率、低成本的优势,已成为研究系统运行状态和演化规律的主要手段^[54]。钻井数字孪生系统涉及多个学科的融合,包括控制、机械、电子、力学和传热等。以钻井过程数字孪生体为例,建模过程中需要同时考虑摩阻扭矩、钻井液流变性、岩屑运移、地层压力、钻头磨损、井眼轨迹等模型,仅仅依靠单一系统的建模仿真无法满足整个钻井数字孪生的分析和设计需求。因此,如何实现多个子模型的集成成为首要问题。在航空航天和机械加工领域中,已经有相对成熟的基于接口、基于高层体系结构和基于统一建模语言的多领域建模仿真方法。其中,基于统一建模语言的建模仿真方法利用数学方程描述不同学科物理规律,基于 Modelica 语言和 UML 语言等建模语言,可实现多领域子系统的耦合集成,具有可重复性和可扩展性的优势,成为应用最为广泛的建模方法。目前钻井数字孪生研究正逐步由单一系

统向耦合的多领域建模仿真研究发展,同时还需要关注多个系统之间的动态耦合机制和高效计算求解问题,兼顾模型复杂度和求解效率。

5.4 仿真模型动态自适应更新

数字孪生模型与传统仿真模型最大的区别在于数字孪生模型会随着物理实体的传感数据一起演变,一起成熟,甚至衰老^[21],一旦模型参数值偏离真实情况的程度超过阈值,那么模型的预测结果将不可信,因此需要根据真实场景动态变化,实现仿真模型自适应更新。钻井过程中,地层以及工况的不断变化导致钻井作业存在极大的不确定性和隐蔽性,初始化的模型参数难以对钻井过程整体进行有效模拟,已提取到的数据特征存在滞后性,且传统机理模型存在较多经验参数,对于不同区块或不同工况具有局限性,数据模型中的超参数亦是如此。为提高模型的稳定性和迁移性,前人基于滑动窗口^[55]、增量更新^[56]等方法实现了钻进破岩、井底压力等模型的在线更新,为钻井仿真模型自适应更新提供技术基础。未来,需要开展基于实时数据的钻井多系统耦合模型的动态自适应更新方法研究,实现钻井实体与虚拟模型之间的动态交互,实时修正钻井数字孪生体,进而提高模型预测与决策优化能力。

5.5 机理与数据融合建模

随着传感器技术、人工智能与大数据技术的快速发展,钻井过程中产生的大量数据得以充分利用,以此建立的数据驱动智能模型具有较好的时效性,能够弥补机理模型计算成本高、准确度不高的问题,能够对机理不明确的过程进行描述预测。然而该智能模型依旧存在典型的“黑箱”特征,极其依赖样本数据的质量和数量。因此,建立机理与数据融合的建模方法,既能够保持数据模型的准确性和时效性,又具有机理模型的通用性,可解释性强,是钻井数字孪生建模的关键问题之一。目前机理与数据融合的方法主要有 3 种:一是在数据集添加领域知识,以机理模型的输出作为数据模型的输入,或是将数据模型的输入经过机理模型处理;二是在机器学习模型中加入领域知识,如修改损失函数、隐藏层结构等;三是在输出结果添加领域知识,对结果进行符合物理规律的筛选^[57-58]。通过将机理模型与数据驱动模型有机结合,构建准确、高效的钻井数字孪生体模型,为钻井全局优化决策提供模型基础。

5.6 安全高效的人机交互

人机交互是钻井数字孪生研究与应用中必不可

少的一环,主要研究人对机器的操作方式和交互方式,如现场工人对设备的操作、监控系统对人员操作行为的识别判断、远程控制中心人员对平台界面的操作以及人员培训中员工在虚拟空间下的复杂故障处理模拟等,是一个“人-机-环境”互相融合、动态变化和虚实迭代的系统。虚拟现实技术能够达到较强的人机交互效果,通过三维计算机图形技术、广角立体显示技术、用户跟踪技术、立体声听觉效果与感知反馈技术等,营造具有沉浸感、交互性和构想性的虚拟三维视景仿真环境。国外 Drillmec^[59]、eDrilling^[13]、Siemens^[14]、Eni^[60]、Schlumberger^[61] 等公司已开展三维虚拟井场研究,通过 VR、AR、MR 等技术,达到人员培训、工况模拟和远程巡检等目的。国内王文明等人^[62]通过 Unity 3D 建立构建修井系统的虚拟实体,提供作业过程监控与设备实时信息可视化服务。目前,数字孪生系统研究中人机交互的人机远程操作安全、人机协作安全问题等尤为突出^[63-64],还应建立适用于钻井工程的“人-机-环境”分布式系统架构,实现云、边、端协同,建立人机远程安全操控技术、人机协作作业安全控制技术,以人为中心,降低系统不确定性,保障人机交互作业安全。

5.7 云边协同的软件系统架构

钻井数字孪生系统对数据处理、存储以及控制系统等方面的要求很高,基于云边协同的软件架构设计可以提供可靠的解决方案。将各类传感器收集的数据通过边缘端设备进行及时的整合、处理以及分析,实现钻井参数、状态等信息的实时展示;然后将处理后的数据发送到云端,进行高效的仿真模拟、优化决策等计算;最终将仿真结果和调控指令反馈给边缘设备,进而指导现场钻井作业。相较于传统的集中式架构,云边协同技术具有明显的优势。云计算能够提供更强大的算力支持,高效处理大型计算任务,能够满足钻井数字孪生系统日益增长的计算需求;边缘计算则提供安全、低延迟以及不依赖网络的计算服务,在需要实时响应或者断网情况下依旧可以进行。将二者紧密结合,通过合理分配云计算和边缘计算的数据和计算资源,提高数据传输效率、降低网络延迟,进而实现钻井过程全生命周期优化决策。

6 结论与建议

1) 钻井数字孪生可分为钻井数字孪生和井筒

数字孪生两部分,能够实现钻井全生命周期监测、维护、调控等功能,提高复杂油藏单井开采效率,实现安全、高效、低成本作业,推动钻井过程可视化、协同化、智能化发展,逐渐成为钻井领域发展前沿和热点。

2)目前国内钻井数字孪生研究还处于起步阶段,可采用“总-分-总”的发展模式,首先建立钻井数字孪生技术总体框架,在此基础上分模块建立数字孪生子系统模型,明确各模块之间关系,循序渐进,制定相应的标准体系,提高数据流通效率,最后形成统一、完善、自主的钻井数字孪生系统平台。

3)钻井数字孪生技术可吸收借鉴航空航天等领域的成熟应用经验,同时也应形成适合钻井工程的理论技术,促进物联网、大数据、人工智能、人机交互等数字化技术与石油钻井领域深度融合,朝着钻井数据实时高效传输、地质模型精细化定量化表征、多领域一体化建模与仿真、仿真模型动态自适应更新、机理与数据融合建模、安全高效的人机交互及云边协同的软件系统架构等方向发展,形成覆盖全井、全过程、全方位的钻井数字孪生技术体系。

4)建议完善钻井设备数字化交付技术,建立以“井场对象”为核心的网状关系数据库,构建井场静态数据资产;采用去中心化存储方式,建立钻井过程动态数据存储与传输机制;建议完善智能钻井行业多学科交叉人才培养机制,搭建产学研合作平台,促进钻井数字孪生技术快速发展。

参 考 文 献

References

- [1] 门相勇,王陆新,王越,等. 新时代我国油气勘探开发战略格局与2035年展望[J]. 中国石油勘探, 2021, 26(3): 1-8.
MEN Xiangyong, WANG Luxin, WANG Yue, et al. Strategic pattern of China's oil and gas exploration and development in the new era and prospects for 2035[J]. China Petroleum Exploration, 2021, 26(3): 1-8.
- [2] 邹才能,赵群,王红岩,等. 非常规油气勘探开发理论技术助力我国油气增储上产[J]. 石油科技论坛, 2021, 40(3): 72-79.
ZOU Caineng, ZHAO Qun, WANG Hongyan, et al. Theory and technology of unconventional oil and gas exploration and development helps China increase oil and gas reserves and production[J]. Petroleum Science and Technology Forum, 2021, 40(3): 72-79.
- [3] 袁光杰,付利,王元,等. 我国非常规油气经济有效开发钻井完井技术现状与发展建议[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(1): 1-12.
YUAN Guangjie, FU Li, WANG Yuan, et al. The up-to-date drilling and completion technologies for economic and effective development of unconventional oil & gas and suggestions for further improvements[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(1): 1-12.
- [4] 邹才能,杨智,张国生,等. 非常规油气地质学理论技术及实践[J]. 地球科学, 2023, 48(6): 2376-2397.
ZOU Caineng, YANG Zhi, ZHANG Guosheng, et al. Theory, technology and practice of unconventional petroleum geology[J]. Earth Science, 2023, 48(6): 2376-2397.
- [5] 苏义脑,路保平,刘岩生,等. 中国陆上深井超深井钻完井技术现状及攻关建议[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(5): 527-542.
SU Yinao, LU Baoping, LIU Yansheng, et al. Status and research suggestions on the drilling and completion technologies for onshore deep and ultra deep wells in China[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2020, 42(5): 527-542.
- [6] 汪海阔,黄洪春,毕文欣,等. 深井超深井油气钻井技术进展与展望[J]. 天然气工业, 2021, 41(8): 163-177.
WANG Haige, HUANG Hongchun, BI Wenxin, et al. Deep and ultra-deep oil/gas well drilling technologies: progress and prospect[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(8): 163-177.
- [7] 李根生,宋先知,田守增. 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.
- [8] LI Gensheng, SONG Xianzhi, TIAN Shouceng, et al. Intelligent drilling and completion: a review[J]. Engineering, 2022, 18(11): 33-48.
- [9] 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.
- [10] 杨传书. 数字孪生技术在钻井领域的应用探索[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(3): 10-16.
YANG Chuanshu. Exploration for the application of digital twin technology in drilling engineering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 10-16.
- [11] 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.
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.
- [12] SUGIURA J, SAMUEL R, OPPELT J, et al. Drilling modeling and simulation: current state and future goals[R]. SPE 173045, 2015.
- [13] MAYANI M G, ROMMETVEIT R, OEDEGAARD S I, et al. Drilling automated realtime monitoring using digital twin[R]. SPE 192807, 2018.
- [14] LAGRANGE E. Developing a digital twin: the roadmap for oil and gas optimization[R]. SPE 195790, 2019.
- [15] THORESEN K E, KYLLINGSTAD Å, HOVLAND S, et al. Using an advanced digital twin to improve downhole pressure control[R]. SPE 194088, 2019.
- [16] VARADARAJAN P A, ROGUIN G, ABOLINS N, et al. A digital twin for real-time drilling hydraulics simulation using a hybrid approach of physics and machine learning[R]. OTC 31278, 2021.
- [17] SHATIRY M S A, HARUN F, HUSNI Z H, et al. A review of the digital twin technology application in energy industry for performance improvement[J]. AIP Conference Proceedings, 2023, 2827(1):

- 040012.
- [18] 张霖. 关于数字孪生的冷思考及其背后的建模和仿真技术[J]. 系统仿真学报, 2020, 32(4): 1-10.
ZHANG Lin. Cold thinking on digital twins and the modeling and simulation techniques behind them[J]. Journal of System Simulation, 2020, 32(4): 1-10.
- [19] TAO Fei, LIU Ang, HU Tianliang, et al. Digital twin driven smart design[M]. London: Academic Press, 2020.
- [20] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 753-768.
ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 753-768.
- [21] 张霖, 陆涵. 从建模仿真看数字孪生[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(5): 995-1007.
ZHANG Lin, LU Han. Discussing digital twin from of modeling and simulation[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(5): 995-1007.
- [22] 王巍, 刘永生, 廖军, 等. 数字孪生关键技术及体系架构[J]. 邮电设计技术, 2021(8): 10-14.
WANG Wei, LIU Yongsheng, LIAO Jun, et al. Key technology and architecture of digital twin[J]. Designing Techniques of Posts and Telecommunications, 2021(8): 10-14.
- [23] 本刊编辑部. 美欧军工领域发力数字孪生技术应用[J]. 国防科技工业, 2019(2): 36-37.
Editorial Department of This Magazine. The US and Europe are making efforts to apply digital twin technology in the military industry[J]. Defence Science & Technology Industry, 2019(2): 36-37.
- [24] 方伟光, 聂兆伟, 刘震宁, 等. 数字孪生驱动的武器装备智能保障技术研究[J]. 系统工程与电子技术, 2023, 45(4): 1247-1260.
FANG Weiguang, NIE Zhaowei, LIU Chenning, et al. Research on digital twin driven intelligent weaponry support technology[J]. Systems Engineering and Electronics, 2023, 45(4): 1247-1260.
- [25] 胡权. 数字孪生体: 第四次工业革命的通用目的技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
HU Quan. Digital twin: general-purpose technologies (GPT) of the fourth industrial revolution[M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2021.
- [26] 王林, 乔建梅. 国外数字孪生技术发展及对我国的启示[J]. 上海信息化, 2021(11): 52-55.
WANG Lin, QIAO Jianmei. The development of digital twin technology abroad and its implications for China[J]. Shanghai Informatization, 2021(11): 52-55.
- [27] 陶飞, 程颖, 程江峰, 等. 数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(8): 1603-1611.
TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(8): 1603-1611.
- [28] 苏兴华, 詹胜, 胡刚. 石油钻井数字孪生架构设计[J]. 信息系统工程, 2021(11): 26-30.
SU Xinghua, ZHAN Sheng, HU Gang. Design of digital twin architecture for oil drilling[J]. China CIO News, 2021(11): 26-30.
- [29] 杨少龙, 孙延浩, 向先波, 等. 船舶数字孪生及其服务全生命周期研究综述[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(21): 1-8.
YANG Shaolong, SUN Yanhao, XIANG Xianbo, et al. Ship digital twin and a review of life-cycle service[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(21): 1-8.
- [30] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.
- [31] ROMMETVEIT R, BJØRKEVOLL K S, HALSEY G W, et al. eDrilling: a system for real-time drilling simulation, 3D visualization, and control[R]. SPE 106903, 2007.
- [32] MAYANI M G, SVENDSEN M, OEDEGAARD S I. Drilling digital twin success stories the last 10 years[R]. SPE 191336, 2018.
- [33] ROMMETVEIT R, GHOLAMI MAYANI M, NABAVI J, et al. Automatic realtime monitoring of drilling using digital twin technologies enhance safety and reduce costs[R]. SPE 197465, 2019.
- [34] KEMAJOU V, SAMUEL R. Real-time well monitoring and engineering analysis of drilling activities: Intelligent rig state detection and prediction with uncertainty[C]//ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. New York: ASME, 2020: V011T11A001.
- [35] ISLAM N, ROSENER A, SOUZA W, et al. Smarter well engineering concepts aid in reducing planning time and increasing ROP[C]//First EAGE Digitalization Conference and Exhibition. Odijk: European Association of Geoscientists & Engineers, 2020: 1-5.
- [36] BIMASTIANTO P, KHAMBETE S, ALSAADI H, et al. Digital twin implementation on current development drilling, benefits and way forward[R]. SPE 202795, 2020.
- [37] 井玉霏. 石油钻机提升系统的数字孪生模型构建[D]. 西安: 西安石油大学, 2023.
JING Yufei. Construction of digital twin model for lifting system of oil drilling rig[D]. Xi'an: Xi'an Shiyou University, 2023.
- [38] SRIKONDA R, RASTOGI A, OESTENSEN H. Increasing facility uptime using machine learning and physics-based hybrid analytics in a dynamic digital twin[R]. OTC 30723, 2020.
- [39] WU Bo, KOU Yufeng, LIU Jun, et al. Research on the application of digital twin technology in the structural safety assessment of deep-water semi-submersible platforms[R]. ISOPE-I 22-296, 2022.
- [40] MURRAY P, WATTIS Z, BAIN B, et al. Towards a digital twin supporting risk based decision making for offshore installations[R]. SPE 195717, 2019.
- [41] 蒋爱国, 王金江, 谷明, 等. 数字孪生驱动半潜式钻井平台智能技术应用[J]. 船海工程, 2019, 48(5): 49-52.
JIANG Aiguo, WANG Jinjiang, GU Ming, et al. Application of intelligent technology of semi-submersible drilling platform driven by digital twin[J]. Ship & Ocean Engineering, 2019, 48(5): 49-52.
- [42] STRAW M, MISTRY R, LEWIS S, et al. Predictive digital twin for performance and integrity[R]. OTC 31863, 2022.
- [43] 刘文岭, 韩大匡. 数字孪生油气藏: 智慧油气田建设的新方向[J]. 石油学报, 2022, 43(10): 1450-1461.
LIU Wenling, HAN Dakuang. Digital twin system of oil and gas reservoirs: a new direction for smart oil and gas field construction[J]. Acta Petrolei Sinica, 2022, 43(10): 1450-1461.
- [44] SHIRANGI M G, FURLONG E, SIMS K S. Digital twins for well planning and bit dull grade prediction[R]. SPE 200740, 2020.

- [45] SHI Jibin, DOURTHE L, LI D, et al. Real-time reamer vibration predicting, monitoring, and decision-making using hybrid modeling and a process digital twin[R]. SPE 208795, 2022.
- [46] BOUKREDERA F S, HADJADJ A, YOUCEFI M R. Drill string torsional vibrations modeling with dynamic drill pipe properties measurement and field validation[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2022, 144(2): 024502.
- [47] SHIRANGI M G, ETTEHADI R, ARAGALL R, et al. Digital twins for drilling fluids: advances and opportunities[R]. SPE 199681, 2020.
- [48] SAINI G S, ASHOK P, VAN OORT E. Predictive action planning for hole cleaning optimization and stuck pipe prevention using digital twinning and reinforcement learning[R]. SPE 199548, 2020.
- [49] ANJOS J L, ARANHA P E, MARTINS A L, et al. Digital twin for well integrity with real time surveillance[R]. OTC 30574, 2020.
- [50] KARPOV R B, ZUBKOV D Y, MURLAEV A V, et al. Drilling performance and data quality control with live digital twin[R]. SPE 206527, 2021.
- [51] 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.
- [52] 赵恩普, 刘晓晨. 浅析井场数据远程传输系统的设计与实现 [J]. *中国管理信息化*, 2018, 21(18): 66–67.
ZHAO Enpu, LIU Xiaochen. Design and implementation of remote transmission system for well site data[J]. *China Management Informationization*, 2018, 21(18): 66–67.
- [53] 何治亮, 赵向原, 张文彪, 等. 深层–超深层碳酸盐岩储层精细地质建模技术进展与攻关方向 [J]. *石油与天然气地质*, 2023, 44(1): 16–33.
HE Zhiliang, ZHAO Xiangyuan, ZHANG Wenbiao, et al. Progress and direction of geological modeling for deep and ultra-deep carbonate reservoirs[J]. *Oil & Gas Geology*, 2023, 44(1): 16–33.
- [54] 叶新, 潘清, 董正宏. 多领域建模仿真方法综述 [J]. *软件*, 2014, 35(3): 233–236.
YE Xin, PAN Qing, DONG Zhenghong. Comparison of multi-domain modeling and simulation technology[J]. *Computer Engineering & Software*, 2014, 35(3): 233–236.
- [55] ZHANG Chengkai, SONG Xianzhi, SU Yinao, et al. Real-time prediction of rate of penetration by combining attention-based gated recurrent unit network and fully connected neural networks[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2022, 213: 110396.
- [56] 祝兆鹏, 张瑞, 宋先知, 等. 数据拓展和增量更新的井底压力实时预测方法 [J]. *石油机械*, 2023, 51(6): 1–10.
ZHU Zhaopeng, ZHANG Rui, SONG Xianzhi, et al. Real-time prediction of bottom hole pressure based on data expansion and incremental update[J]. *China Petroleum Machinery*, 2023, 51(6): 1–10.
- [57] 肖立志. 机器学习数据驱动与机理模型融合及可解释性问题 [J]. *石油物探*, 2022, 61(2): 205–212.
XIAO Lizhi. The fusion of data-driven machine learning with mechanism models and interpretability issues[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(2): 205–212.
- [58] KARNIADAKIS G E, KEVREKIDIS I G, LU Lu, et al. Physics-informed machine learning[J]. *Nature Reviews Physics*, 2021, 3(6): 422–440.
- [59] CURINA F, TALAT QUSHCHI A, ALDANY A. A case study for the development and use of a well control simulator as a digital twin of a real scenario[R]. SPE 206530, 2021.
- [60] FERRARA P, RICCI MACCARINI G, POLONI R, et al. Virtual reality: new concepts for virtual drilling environment and well digital twin[R]. IPTC 20267, 2020.
- [61] CHATAR C, LOKESH R, KAMBOJ V, et al. Extended reality and gamification for drilling[R]. SPE 212532, 2023.
- [62] 王文明, 侯春来, 武振宇, 等. 海洋无隔水管修井的数字孪生框架与可视化交互 [J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 423–431.
WANG Wenming, HOU Chunlai, WU Zhenyu, et al. Frame and visualization for digital twin of marine riserless well intervention[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 423–431.
- [63] 李浩, 刘根, 文笑雨, 等. 面向人机交互的数字孪生系统工业安全控制体系与关键技术 [J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(2): 374–389.
LI Hao, LIU Gen, WEN Xiaoyu, et al. Industrial safety control system and key technologies of digital twin system oriented to human-machine interaction[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(2): 374–389.
- [64] 金镛, 秦雪伦, 江如意, 等. 油气行业数字孪生研究述评与展望 [J]. *世界石油工业*, 2022, 29(5): 17–25.
JIN L, QIN X L, JIANG R Y, et al. Review and prospect of digital twin research in oil and gas industry[J]. *World Petroleum Industry*, 2022, 29(5): 17–25.

[编辑 陈会年]