

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2023011

引用格式: 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.

钻井数字孪生系统设计与研发实践

张好林, 杨传书, 李昌盛, 王 果, 段继男

(中石化石油工程技术研究院有限公司, 北京 102206)

摘 要: 数字孪生技术作为智能钻井的理想范式, 已呈现出巨大潜力, 但由于钻井工程具有复杂工业系统的特性, 数字孪生技术研发难度大, 目前尚处于起步阶段。为此, 在分析石油行业数字孪生技术发展现状的基础上, 厘清了钻井数字孪生涉及的 6 项支撑技术, 结合钻井工程业务需求, 设计了钻井数字孪生系统的整体架构并详述了其功能及模型设计。通过井场数据标准采集、机理计算模型耦合及三维动态融合显示 3 项研发试验, 从技术角度验证了钻井数字孪生技术落地应用的可行性。研究认为, 构建钻井数字孪生系统, 应以钻井工程数据为数据基础, 基于业务需求进一步构建“机理+数据”的双计算核心, 研发孪生体模型和业务应用模块, 并将其作为载体, 最终实现钻井数字孪生系统的应用。研究结果对推进数字孪生技术在钻井工程中的应用具有重要意义。

关键词: 钻井工程; 数字孪生; 系统整体架构; 功能设计; 技术试验

中图分类号: TE245

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2023)03-0058-08

Design and Research Practice of a Drilling Digital Twin System

ZHANG Haolin, YANG Chuanshu, LI Changsheng, WANG Guo, DUAN Jinan

(Sinopec Research Institute of Petroleum Engineering Co., Ltd., Beijing, 102206, China)

Abstract: As an ideal paradigm of intelligent drilling, digital twin technology shows great potential. However, due to the complex industrial system characteristics of drilling engineering, the research and development (R & D) of digital twin technology has been difficult and is still in its infancy. Therefore, on the basis of analyzing the development status of digital twin technology in the petroleum industry, six supporting technologies involved in drilling digital twin were clarified. Adhering to the business needs of drilling engineering, the overall architecture of a drilling digital twin system was designed, and the function and model designs were described in detail. Through three R & D tests of wellsite data standard collection, mechanism calculation model coupling and three-dimensional (3D) dynamic fusion display, the feasibility of implementing the drilling digital twin technology was verified from a technical point of view. The research takes the position that the construction of the drilling digital twin system should take drilling engineering data as the foundational bases of data. The “mechanism + data” dual computing core should be built based on the business needs, and the twin model and business application module should be developed as carriers, so as to realize the application of the drilling digital twin system. The research results are of great significance for promoting the application of digital twin technology in drilling engineering.

Key words: drilling engineering; digital twin; overall system architecture; function design; technical test

数字孪生的概念最早于 2002 年作为“镜像空间模型”被首次引入^[1], 但受限于当时的认知及技术水平, 并未得到重视。直至 2010 年, 美国国家航

空航天局与空军实验室分别提出将数字孪生用于飞行器的预测维护后, 数字孪生才逐渐进入公众视野并受到重视^[2-3]。自此之后, Siemens、Dassault 等公

收稿日期: 2022-11-24; 改回日期: 2023-02-06。

作者简介: 张好林 (1986—), 男, 山东青岛人, 2009 年毕业于中国石油大学 (北京) 石油工程专业, 2014 年获中国石油大学 (北京) 油气井工程专业博士学位, 副研究员, 主要从事钻井工程数字化、钻井施工优化与决策软件方面的研究。E-mail: zhanghl.sripe@sinopec.com。

基金项目: 国家重点研发计划“复杂油气智能钻井理论与方法”专题“钻井智能分析决策平台架构设计” (编号: 2019YFA0708304-01) 和中石化基础前瞻项目“钻井数字孪生技术基础研究” (编号: P20047-3) 联合资助。

司的研究机构开始了相关技术研究与应用,特别是近几年随着大数据、人工智能等数据处理技术以及云计算、云边协同等算力支持技术的发展,数字孪生技术应用的障碍和难度显著降低,使数字孪生的应用范围迅速从航空航天扩展到当前的智能制造、智能医疗、智慧城市等领域场景当中^[4-11]。

在石油工程领域,国外的 Siemens, Aker Solution, FutureOn, GE 和 Nobel Corporation 等公司利用其各自的数字孪生平台进行了海上油气钻探开发相关设备的孪生建设^[12-16], BP, Baker Hughes, Halliburton, Sekal 及 eDrilling 等公司则在数字油田建设、勘探开发、钻井工程等方面进行了数字孪生的应用尝试^[17-23];国内的中国海油、中国石油、中国石化等公司虽在数字化井场、钻完井模拟仿真等方面进行了研究,但尚未引入数字孪生技术。目前,数字孪生技术的应用主要集中在海上油气开发设施的规划、建设与预测性维护方面,其在钻井工程领域的应用,由于涉及地面钻机、井下工具、地质环境等多目标的联合交互,且井下数据难获取、传统机理模型难耦合,数字孪生难度更高,尚处于起步状态。随着勘探开发环境变得日益复杂,钻井工程由于地下作业环境的不可见性导致钻井作业生命周期中极易出现不确定和不可预测的风险,给人员安全、环保、时间与成本控制带来巨大挑战^[24-26],发展并应用数字孪生在钻井行业极具价值。

为此,笔者梳理了传感监测技术、复杂系统融合建模技术、人工智能技术、模型动态进化技术、人机交互技术和云计算与边缘计算技术等钻井数字孪生涉及的 6 项支撑技术,结合业务需求,设计了钻井数字孪生系统的整体架构并开展了井场数据标准采集、机理计算模型耦合及三维动态融合显示等系列研发实践,总结实践认识,提出了钻井数字孪生技术发展和应用建议。

1 钻井数字孪生支撑技术

1.1 传感监测技术

钻井数字孪生系统是钻井现场的实时动态超现实映射,数据的实时采集传输与更新对于钻井数字孪生实现具有至关重要的作用。如图 1 所示,传感监测技术可划分为感知层、网络层和过渡层 3 层。感知层中地面及井下分布的各类型高精度传感器可以为钻井数字孪生提供基础感官作用,为其提供更加准确、充分的数据源支撑;网络层通过应用不同的互联网/物联网通讯协议实现井场数据汇聚,为数据流动和指令反馈构建快速、安全、稳定的交互通道;过渡层则利用数据交互总线解决钻井数据源多、标准不同的问题,为数字孪生系统提供标准数据和指令交互接口,实现钻井数字孪生系统与不同钻井现场的快速衔接。

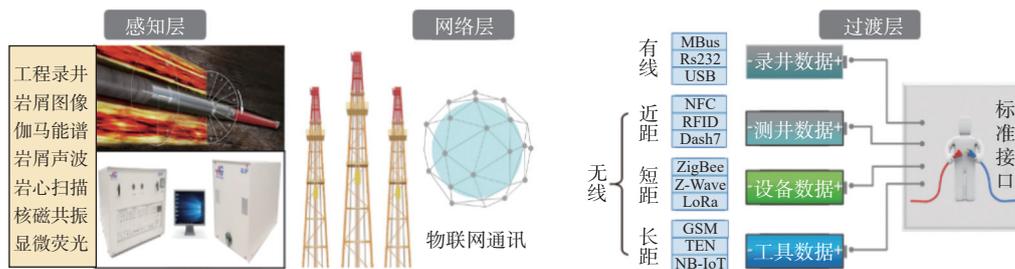


图 1 钻井数字孪生传感监测技术示意

Fig.1 Sensing monitoring technology of a drilling digital twin

1.2 复杂系统融合建模技术

钻井数字孪生建模主要涉及用于映射显示的钻井数字孪生体和用于实时动态仿真的钻井孪生计算模型。

数字孪生体由传统模型发展而来,因此建立高精度的孪生体模型是首要前提,对于钻井工程而言,孪生体模型构成复杂,包括地质、井筒、工具、流体等多种元素,可采用行业性的建模工具以及

3D 扫描等软件进行构建,最终通过流程建模和系统建模形成完整的钻井数字孪生体(见图 2)。钻井数字孪生体的构建可以由小到大、由静到动,以组件、设备、系统和流程为层次顺序逐步完成。其中,组件孪生是系统组成部分的数字孪生,例如钻头、接头等,是钻井数字孪生体的基础模块;设备孪生是组件孪生的集合,例如钻井泵、钻具组合,在设备级别提供钻井数字孪生系统的可见性;系统孪生则是

一组执行特定功能设备的集合,例如整套的地面钻机以及完整的井下钻柱,是对整个钻井实体的静态映射;流程孪生通常是一组工作流程(如钻进流程、起下钻流程)的最高级别的数字孪生,其更关注于流程本身及其对孪生体的影响。

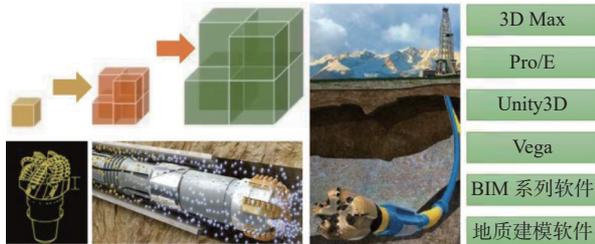


图2 钻井数字孪生复杂系统融合建模技术示意

Fig.2 Fusion modeling technology for drilling digital twin complex system

钻井孪生计算模型涉及到多领域(流体力学、岩石力学、管柱力学、化学)多尺度(宏观、微观、时间)融合建模,需要借助于多物理场耦合建模、多尺度分析方法提升钻井孪生仿真分析精度。对于钻井孪生系统而言,需要在保持模型一定自由度的同时,通过模型强耦合联动计算模型计算的是孪生体的同一时间状态,实现钻井孪生体模型对应不同来源、不同频率实时数据的实时更新。此外,由于数字孪生技术中引入了数据驱动的智能算法,需要进一步确定传统机理计算模型与新兴人工智能模型在各领域及各尺度上的应用与融合。

1.3 人工智能技术

对于钻井工程而言,可以基于有限的物理传感器指标数据,借助海量历史数据,通过神经网络、决策树、支持向量机等机器学习算法推测出无法直接测量指标数据的分类、聚类及回归问题,弥补单井实时数据不足和机理模型的计算缺陷,进一步扩展提升了钻井工程的优化、预测、决策能力。人工智能技术的应用使钻井数字孪生系统能够将海量数据最终转化为合理的勘探决策、高质量的油井、较低的成本和可接受的环境影响等^[27-31]。

1.4 模型动态进化技术

钻井工程传统建模方式是在历史数据的基础上,预设钻井作业可能会出现载荷、环境、边界条件建立合理的模型,并以此指导后续钻井作业。但由于实际钻井作业中环境、边界条件的复杂性、动态性和不确定性,使传统解析物理模型很难真实地反映后续钻井状态和行为,难以准确预测钻井的动态演化。

实时交互和动态演化是钻井数字孪生的两个重要特征。基于实时数据对模型的动态更新,同时基于钻井的历史运行数据,充分融合系统机理特性和运行数据特性,利用智能模型对物理模型进行更新、修正、连接和补充,可使钻井孪生模型实现全生命周期内不断成长与演化,能够更好地分析钻井的实时运行状态。可进一步借助钻井数字孪生系统与钻井物理实体间的实时双向交互,根据预测与决策的实际执行效果,对钻井孪生系统中的计算模型进行同步调整优化,使其不断进化,从而实现钻井孪生系统与钻井物理实体间的精准映射与共同演化。

1.5 人机交互技术

基于工程与地质的静态-动态数据,借助AR/VR等显示交互技术,复制地面作业动态与地下地质构造,能够帮助专家更好地分析钻井作业井下状态,制定作业计划,在孪生系统内完成方案推演后更直观自然地实现远程指导、远程操控等,增强跨专业、跨地域的协同作业能力。3R技术(增强/虚拟/混合现实)、智能语音交互、智能可穿戴设备等与工程技术的深度融合,将使人机交互更加自然,钻井数字孪生的使用体验也将得到进一步提升。

1.6 云计算和边缘计算技术

边缘计算负责井场对即时性要求高的计算决策,例如工程参数计算、作业状态分析、井眼轨迹控制、井下风险诊断及应对处置等;云计算则负责井场非即时性的计算决策,例如钻速预测及工程参数优化、工艺优化调整、风险预测与规避方案的制定和预演、决策实施效果评估等。同时,云计算可基于海量的钻井历史数据,结合不断累积的实时数据,持续优化钻井数字孪生系统模型,并对边缘计算中的相应服务进行升级更新。

2 钻井数字孪生系统设计

如图3所示,钻井数字孪生系统的设计思路是综合利用感知、计算、显示等信息技术,通过软件定义,对钻井物理对象(地面设备+井筒)进行数字化仿真、分析诊断、学习预测、决策自治,进而实现物理空间与数字虚拟空间的交互映射和闭环决策。

2.1 钻井数字孪生系统整体架构

依据数字孪生技术的定义与特点,将钻井数字孪生划分为物理空间(钻井工程的物理实体)和赛博空间(钻井工程的数字孪生体)两大孪生空间。如图4所示,钻井数字孪生系统整体架构自下而上

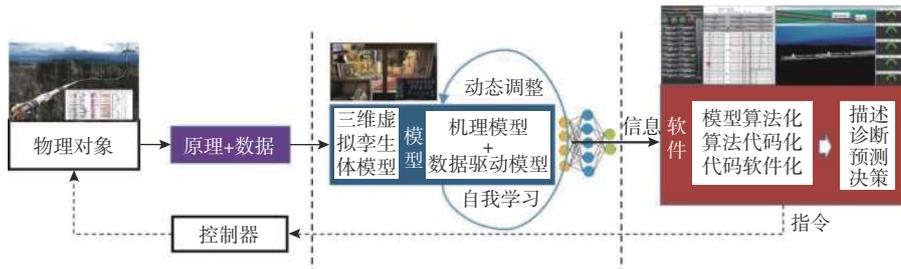


图 3 钻井数字孪生系统设计思路

Fig.3 Design idea of a drilling digital twin system

划分为物理层、数据层、模型层、功能层和应用层。其中，数据层是基础，负责数据的汇聚、处理、存储与流动；模型层是核心，以机理模型加人工智能模型的方式实现系统的动态调整与自我学习；功能层与应用层则是最终软件载体呈现，按照模型算法化、算法代码化、代码软件化来逐层构建出钻井数字孪生的描述、诊断、预测、决策的功能等级，通过虚实体之间的数据交互与信息反馈功能，构建出完整的钻井数字孪生体系，实现数据驱动、模型支撑、软件定义、精准映射、智能决策的最终目标。

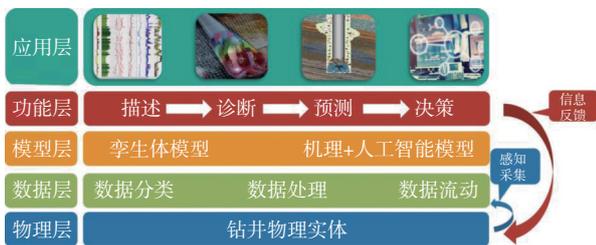


图 4 钻井数字孪生系统整体架构示意

Fig.4 Overall architecture of a drilling digital twin system

2.2 钻井数字孪生系统功能设计

钻井数字孪生系统功能设计具体划分为监测描述、分析预测、优化决策和闭环控制。通过功能组合调度以及数据流动控制，构建钻井业务闭环中的装备全生命周期跟踪、钻前模拟设计验证、随钻模拟正演预测、钻后回放分析评价等不同应用场景。

2.2.1 监测描述功能

对于地面装备部分，通过建立整个地面井场的数字孪生体，以三维动画和三维模拟成像，将井场地面钻机的各个物理实体的属性信息以及通过先进传感监测技术和通信技术采集的运行状态数据在虚拟模型上表达，同时结合图形、颜色、表格等形式，实现整个井场地面设备信息的可视化显示，提升钻机及地面装备状态监测的可阅读性。

对于地下井筒部分，井下仪器测量的参数传输

至井场地面后，利用物联网技术进行汇聚与同步，在钻井数字孪生系统中实时展现井下作业动态和测量参数的变化，实现井眼、工具、流体、地质环境等的可视化监测，将钻井作业的地下黑箱透明可视化。

2.2.2 分析预测功能

对于地面装备，将设备传感器数据及使用环境数据实时输入数字孪生模型，使钻井设备数字孪生体与实际设备工作状态和环境的变化保持一致，通过数字孪生设备进行钻井设备运行状态分析、关键设备故障预测及自动化诊断、设备预测性维护及寿命预测等，避免出现异常导致停机停工，影响钻井作业时效。钻井数字孪生系统的地面装备分析预测功能可进一步划分为状态分析、异常预警、寿命预测、健康评估、维修规划、故障定位、远程调度和备件管理等 8 项内容。

对于地下井筒部分，分析预测功能则划分为井下参数计算、井下状态诊断以及井下状态预测 3 个梯度。井下参数计算是利用井场实时测量的地面与井下数据，结合静态数据，基于钻井数字孪生系统中耦合后的水力、井眼清洁、摩阻扭矩、管柱力学、岩石力学、地层压力等机理计算模型，在井下单点测量数据的基础上，实时计算全井水力、温度、岩屑、管柱受力、井壁稳定以及钻头与地层相互作用、岩石破碎参数等数据，并在数字孪生体中同步显示。井下状态诊断则是结合井下参数计算结果与实时数据，在钻柱振动、钻头磨损等机理分析模型的基础上，融合人工智能技术建立井下状态与风险智能诊断模型，实时诊断钻井工程和地质异常风险。井下状态预测基于井周地质孪生模型的精细刻画，提取地质参数，结合当前执行或将要执行的作业参数，超前模拟待钻井段作业，预测钻井速度变化、井眼轨迹延伸、工具状态变化以及待钻井段潜在的作业风险(漏、涌、卡、坍等)。

2.2.3 优化决策功能

钻井工程中地面钻机等装备主要为井下钻井作业服务,很少涉及地面钻机的运营优化,因此,在钻井数字孪生系统中重点设计井下作业的优化决策功能,其可划分为工艺优化决策、钻井参数优化决策和风险规避处置3个部分。工艺优化决策是基于历史井应用效果,结合工具/工艺在孪生系统内运行模拟完成优化,从而实现工艺成本、工具适用性及寿命与钻井时效成本之间的平衡调整。钻井参数优化决策耦合井下风险预测结果,利用钻井数字孪生系统中基于历史实钻数据构建的人工智能算法,模拟

形成安全提速的最佳方案。风险规避处置基于数字孪生模型模拟不同处置方案对风险的处置效果,形成最佳的钻井风险消减方案,保证钻井安全。

2.2.4 闭环控制功能

如图5所示,钻井数字孪生体形成的优化决策结果以钻井作业指令的形式,通过感知接入层,反向传递到钻井实体中的钻机集控系统中,由其解析指令,按照工序进程,调度设备完成钻井作业,可将钻井数字孪生系统与钻井实体之间的虚实交互频次降至最低,降低各项进程在虚实体之间反复确认的工作量,保证安全与效率。

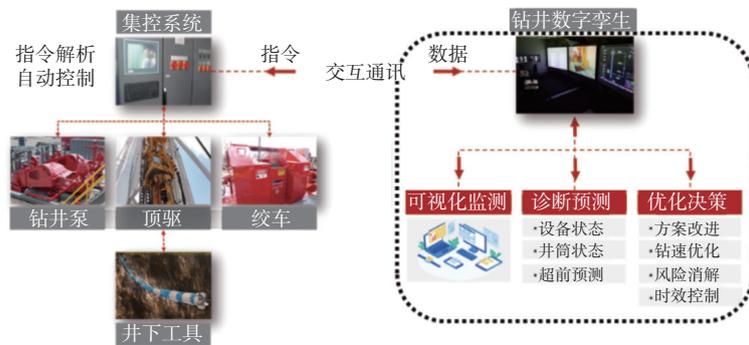


图5 孪生系统与井场间作业指令交互及控制执行流程示意

Fig.5 Operation command interaction and control execution flow between the twin system and the well site

2.3 钻井数字孪生系统模型设计

模型层是钻井数字孪生系统的核心,由计算分析模型、孪生体模型以及模型驱动引擎3部分构成。

钻井数字孪生系统中的计算分析模型在传统机理模型计算的基础上,基于海量数据引入数据驱动的智能模型,以改善并解决传统机理模型在岩性解释识别、钻速预测、钻井参优化以及风险识别等方面计算效率低或准确性不足的问题,通过二者的融合实现钻井数字孪生体对钻井物理实体无法测量部分的准确映射。

传统仿真模拟中的模型主要在几何和物理方面进行建模,而在钻井数字孪生系统中则是按照“几何模型+物理模型+行为模型+规则模型”流程,构建形成多维多时空多尺度的钻井孪生体模型,即虚拟实体模型,实现钻井物理实体的虚拟映射显示。

驱动引擎则是钻井数字孪生系统的驱动核心,负责汇聚系统各类数据,调动孪生系统计算模型实现数据及计算结果的交互流动,调动孪生体模型实现结果的输出与显示,保障钻井数字孪生系统的运行。钻井数字孪生系统中驱动引擎可划分为数据库引擎、计算引擎、应用引擎、可视化引擎以及人机协

同引擎5部分进行构建,如图6所示。其中,数据库引擎负责数据存储、管理、调度及服务;计算引擎负责协同各类机理计算模型与数据驱动智能模型之间的耦合运行;应用引擎负责钻井数字孪生系统中不同功能、模块及业务应用场景的调度运行;可视化引擎负责各类二维图表、三维动画的显示运行;人机协同引擎则负责人机交互接口、界面的运行管理及指令/结果的相互传递。

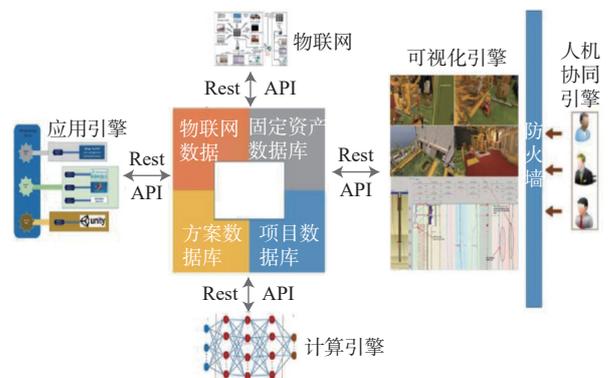


图6 钻井数字孪生系统中驱动引擎的分块构建

Fig.6 Block-by-block construction of driving engine in a drilling digital twin system

3 钻井数字孪生系统研发实践

基于钻井数字孪生系统设计,对钻井数字孪生关键技术中“传感监测技术”及“复杂系统融合建模技术”相关的技术点进行研发实践,从技术上进一步验证钻井数字孪生系统落地应用的可行性。

3.1 井场数据标准采集技术实践

钻井数字孪生系统实施的首要问题是获取准确、充分的各类钻井静态数据及井场实时数据。针对当前钻井现场同类仪器因型号不同而产生实时数据格式不同的情况,通过研发井场数据通用采集接口,验证多源异构数据统一输出标准的可行性,从而降低钻井数字孪生系统与钻井实体之间数据交互接口的复杂度。目前井场数据通用采集接口已实现录井数据、定向数据、控压数据、钻井液数据以及试油试气数据的统一采集输出,其中,可以采集神开 CMS、胜利 ZH、中原 ACE 等多种型号仪器的录井数据,可以采集 Fardux、Expro、HY 等型号仪器的试油试气数据。

目前钻井数字孪生系统数据采集的难点在于钻井工程中所使用井下传感器的数量、种类、可靠性等受到当前技术发展水平、井下工作环境以及成本的限制,特别是受限于井下数据到地面的采集传输方式。同时,钻井现场数据仍分散于不同系统内(例如录井、测井、定向等),井场网络传输方式单

一,未实现井场数据的有效汇聚,而在实际应用中应对网络安全性保障予以考虑与重视;借助自动化、智能化钻井的发展,需要逐步解决当前钻井现场同类仪器因型号不同而产生的数据格式不同的问题,降低钻井数字孪生系统与钻井实体之间交互接口的复杂度,提升系统的鲁棒性与普适性。

3.2 机理计算模型耦合技术实践

钻井作业受限于井下复杂环境与当前井下传感器性能及其信息传输技术的限制,考虑钻井成本,在井内工具上部署有限的传感器测取少量井下参数,而分析全井筒作业参数的变化情况,则需要依靠模拟计算。钻井工程传统模拟计算使用的各个机理模型通常独立运算(例如水力分析与摩扭分析相互独立),未考虑在实际作业中各因素之间的相互影响,在一定程度上影响了模拟计算结果的准确性。

为实现钻井数字孪生体对钻井实体的真实映射,首先构建了计算分析模型,通过多物理场耦合建模、多尺度分析来提升钻井孪生仿真分析精度。基于多源数据,厘清了井筒水力计算与摩阻扭矩计算之间模型参数的关联影响关系,同时考虑了井筒温度及岩屑运移与水力参数、摩阻扭矩的相互影响,实现井下不同作业场景下机理模型的联动计算分析,更符合井筒内流体流动、岩屑运移、温压变化及钻柱摩阻扭矩之间的实际影响情况,提升了井筒孪生仿真分析的精度,如图 7 所示。

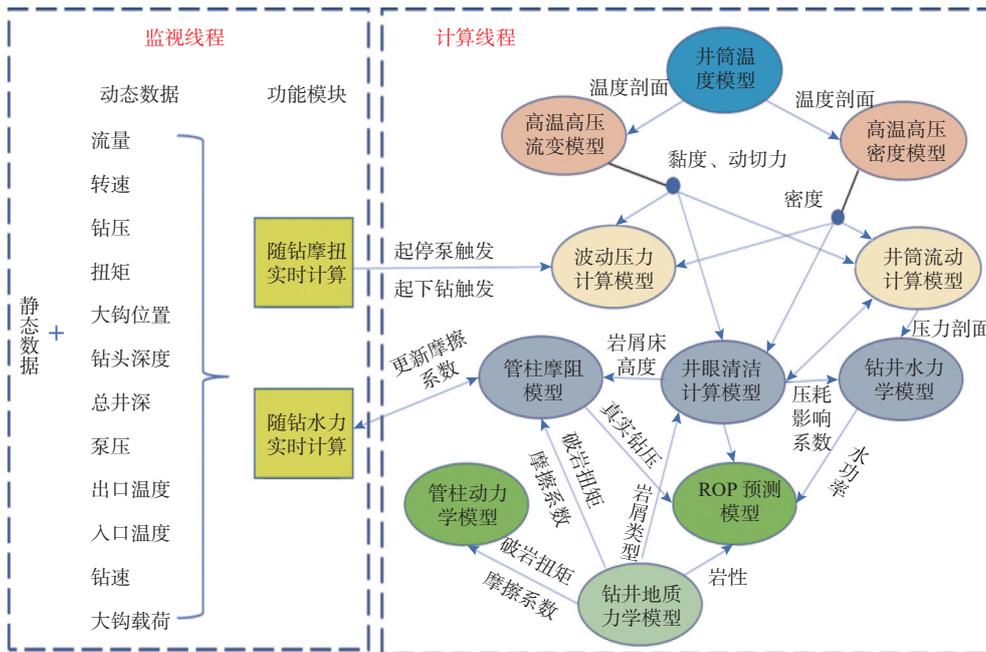


图 7 多模型实时联动计算

Fig.7 Multi-model real-time linkage calculation

除需耦合传统机理计算模型、提高模型仿真计算精度之外,钻井数字孪生系统计算分析模型还需引入海量实钻历史数据构建智能模型,解决机理模型计算在钻速预测、参数优化以及风险识别等专业问题中存在的计算预测效果不佳等问题,并进一步探索机理计算模型与数据驱动模型的协同融合。

3.3 三维动态融合显示技术实践

高保真孪生体是构建钻井数字孪生系统赛博空间的关键要素。不同于传统钻井仿真模拟对工具、设备、岩石、地质进行几何尺寸和物理属性的静态建模与局部仿真,钻井孪生通过传感器实时获取物理实体数据对孪生体进一步附加相应的行为与规则,达到虚拟孪生体对钻井实体全局的“克隆”映射,实现与钻井实体的共生演化,在整个生命周期中与钻井实体保持一致。

通过梳理与钻井数字孪生系统相关的数据并与现有数据库对比,构建连接不同数据源的数据驱动引擎,实现对钻井实时动态数据、耦合计算参数以及相关静态属性数据的提取汇聚与更新推送;通过分析井下作业场景明确钻井数字孪生系统中相应的作业流程转换,构建涵盖部分钻井元素显示逻辑及其空间拓扑关系的可视化驱动引擎,实现对井下地质-流体-管柱等不同领域对象之间的联动更新显示。在此基础上,利用Unity3D技术对前期钻井三维模拟仿真成果进行升级改造,融合三维地震模型和区域井筒信息构建宏观、井周、井筒、近钻头等孪生场景,依靠实时数据进行动态驱动,实现钻井孪生体的动态融合。

4 结 论

1)开展传感测量技术(智能传感器)、物联网及通讯协议等的应用研究,可为钻井数字孪生建设和运行提供数据支持,奠定数字孪生体与钻井实体之间的数据通讯映射及指令控制交互的基础。

2)开展工具、设备、地质环境等钻井孪生体建模的基础研究,可为钻井行业通用孪生体构建奠定基础,以进一步深入开展设备工具全生命周期的跟踪评价。

3)开展3R显示技术、智能语音、智能穿戴、云边协同计算等数字孪生支持技术的理论研究和攻关实践,可在人机交互、算力支持方面使钻井数字孪生的使用体验得到进一步提升。

4)钻井数字孪生技术是实现自动化、智能化钻

井的重要软件载体,可重复低成本地映射/监控/诊断/预测现实环境中钻井全生命周期的过程和行为,助力钻井作业实现降本增效和风险防控的目的。为实现钻井孪生系统对钻井实体的真实演化,构建钻井数字孪生系统的计算核心,重点是传统机理模型的交互耦合、数据驱动智能模型的研发应用以及二者的融合驱动与在线进化。

参 考 文 献

References

- [1] GRIEVES M W. Product lifecycle management: The new paradigm for enterprises[J]. *International Journal of Product Development*, 2005, 2(1/2): 71-84.
- [2] TUEGEL E J, INGRAFFEA A R, EASON T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2011, 2011: 154798.
- [3] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and U. S. air force vehicles[C]// the 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012: AIAA 2012-1818.
- [4] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(1): 1-18.
TAO Fei, LIU Weiran, ZHANG Meng, et al. Five-dimension digital twin model and its ten applications[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(1): 1-18.
- [5] WANG X V, WANG Lihui. Digital twin-based WEEE recycling, recovery and remanufacturing in the background of industry 4.0[J]. *International Journal of Production Research*, 2019, 57(12): 3892-3902.
- [6] 杨林瑶, 陈思远, 王晓, 等. 数字孪生与并行系统: 发展现状、对比及展望[J]. *自动化学报*, 2019, 45(11): 2001-2031.
YANG Linyao, CHEN Siyuan, WANG Xiao, et al. Digital twins and parallel systems: State of the art, comparisons and prospect[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2019, 45(11): 2001-2031.
- [7] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. *CIRP Annals*, 2017, 66(1): 141-144.
- [8] MILLER A M, ALVAREZ R, HARTMAN N. Towards an extended model-based definition for the digital twin[J]. *Computer-Aided Design and Applications*, 2018, 15(6): 880-891.
- [9] 刘志峰, 陈伟, 杨聪彬, 等. 基于数字孪生的零件智能制造车间调度云平台[J]. *计算机集成制造系统*, 2019, 25(6): 1444-1453.
LIU Zhifeng, CHEN Wei, YANG Congbin, et al. Intelligent manufacturing workshop dispatching cloud platform based on digital twins[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2019, 25(6): 1444-1453.
- [10] 李欣, 刘秀, 万欣欣. 数字孪生应用及安全发展综述[J]. *系统仿真学报*, 2019, 31(3): 385-392.
LI Xin, LIU Xiu, WAN Xinxin. Overview of digital twins application and safe development[J]. *Journal of System Simulation*, 2019, 31(3): 385-392.
- [11] 刘大同, 郭凯, 王本宽, 等. 数字孪生技术综述与展望[J]. *仪器仪表*

- 表学报, 2018, 39(11): 1–10.
- LIU Datong, GUO Kai, WANG Benkuan, et al. Summary and perspective survey on digital twin technology[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(11): 1–10.
- [12] CHOWDHURY K, LAMACCHIA D, FRENK FELDMAN V, et al. A cloud-based smart engineering and predictive computation system for pipeline design and operation cost reduction[R]. SPE 203171, 2020.
- [13] HOLBERG G I, GRENNBERG V, MARTENS J. Using digital twins for condition monitoring of subsea mechanical equipment[R]. SPE 202405, 2020.
- [14] KNEZEVIC D J, KANG H, SHARMA P, et al. Structural integrity management of offshore structures via RB-FEA and fast full load mapping based digital twins[R]. ISOPE-I-18–185, 2018.
- [15] CARPENTER C. Digital-twin approach predicts fatigue damage of marine risers[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2021, 73(10): 65–66.
- [16] BHAT S, NADATHUR V, KNEZEVIC D, et al. Structural digital twin of FPSO for monitoring the hull and topsides based on inspection data and load measurement[R]. OTC 31328, 2021.
- [17] 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.
- [18] 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]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(3): 376–382.
- [19] BIMASTIANTO P, KHAMBETE S, ALSAADI H, et al. Digital twin implementation on current development drilling, benefits and way forward[R]. SPE 202795, 2020.
- [20] IMOMOH V B, TOYOBO O, OKAFOR R. Creating a digital twin of part of the earth subsurface through reservoir navigation service[R]. SPE 203621, 2020.
- [21] PRICE J, JONES C, DAI Bin, et al. Characterizing downhole fluid analysis sensors as digital twins: Lessons of the machine learning approach, the physics approach and the integrated hybrid approach[R]. SPE 206291, 2021.
- [22] AVANZINI G B, ERIKSSON K E. Quality assurance framework of digital twins for the oil and gas industry[R]. OMC 2021–157, 2021.
- [23] GHARIB SHIRANGI M, FURLONG E, SIMS K S. Digital twins for well planning and bit dull grade prediction[R]. SPE 200740, 2020.
- [24] CHMELA B, ABRAHMESEN E, HAUGEN J. Prevention of drilling problems using real-time symptom detection and physical models[R]. OTC 25460, 2014.
- [25] MAYANI M G, SVENDSEN M, OEDEGAARD S I. Drilling digital twin success stories the last 10 years[R]. SPE 191336, 2018.
- [26] NADHAN D, MAYANI M G, ROMMETVEIT R. Drilling with digital twins[R]. SPE 191388, 2018.
- [27] 耿黎东. 大数据技术在石油工程中的应用现状与发展建议 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(2): 72–78.
- GENG Lidong. Application status and development suggestions of big data technology in petroleum engineering[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(2): 72–78.
- [28] 杨传书, 李昌盛, 孙旭东, 等. 人工智能钻井技术研究方法及其实践 [J]. 石油钻探技术, 2021, 49(5): 7–13.
- YANG Chuanshu, LI Changsheng, SUN Xudong, et al. Research method and practice of artificial intelligence drilling technology[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2021, 49(5): 7–13.
- [29] 柳海啸, 刘芳, 代文星, 等. 基于大数据分析技术的钻井提效实践 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 436–441.
- LIU Haixiao, LIU Fang, DAI Wenxing, et al. Drilling efficiency improvement practice based on big data analysis technology[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 436–441.
- [30] 黄小龙, 刘东涛, 宋吉明, 等. 基于大数据及人工智能的钻速实时优化技术 [J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 442–448.
- HUANG Xiaolong, LIU Dongtao, SONG Jiming, et al. Real-time ROP optimization technology based on big data and artificial intelligence[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 442–448.
- [31] 石祥超, 王宇鸣, 刘越豪, 等. 关于人工智能方法用于钻井机械钻速预测的探讨 [J]. 石油钻采工艺, 2022, 44(1): 105–111.
- SHI Xiangchao, WANG Yuming, LIU Yuehao, et al. Discussion on the application of artificial intelligence method to the prediction of drilling machinery ROP[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2022, 44(1): 105–111.

[编辑 曹耐]