

◀钻井完井▶

doi:10.11911/syztjs.2022068

引用格式: 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.

数字孪生技术在钻井领域的应用探索

杨传书

(中国石化石油工程技术研究院, 北京 102206)

摘 要: 在简述数字孪生技术的由来及分析石油行业钻井领域数字孪生技术研究现状的基础上, 提出了钻井井筒数字孪生、地质环境数字孪生、钻机数字孪生、井下动态过程仿真、物理-数字孪生体实时交互等关键技术, 设计了钻井数字孪生技术在钻前模拟预测与优化、疑难井施工团队协作预演、随钻预警与决策、钻井远程控制、钻井设备预测性维护、钻井实训等 6 大应用场景, 提出了钻井数字孪生系统的研发重点, 并分析了钻井数字孪生技术研发的难点与对策。研究结果为加快数字孪生技术在钻井工程领域的应用, 促进钻井工程数字化、智能化转型提供了技术借鉴。

关键词: 钻井; 数字孪生; 关键技术; 应用; 模型; 数据驱动

中图分类号: TE2

文献标志码: A

文章编号: 1001-0890(2022)03-0010-07

Exploration for the Application of Digital Twin Technology in Drilling Engineering

YANG Chuanshu

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

Abstract: Based on a brief introduction to the origin of digital twin technology and the research status of its applications in drilling engineering in the petroleum industry, some key technologies were advanced, including the development of digital twin of the wellbore, digital twin of the geological environment, digital twins of drilling rigs, the simulation of downhole dynamic processes, and the real-time interaction technology of physical-digital twins, etc. Then, six application scenarios were designed for the digital twin technology: namely pre-drilling prediction and optimization by simulation, rehearsal of teamwork for complex well drilling, early warning and decision-making while drilling, remote drilling control, predictive maintenance of drilling equipment, and drilling training. Further, the major research and development focuses were proposed regarding the digital twin system for drilling. Finally, the research and development difficulties of digital twin technology applied in drilling were analyzed together with corresponding countermeasures. The research results provide a technical reference for speeding up the practical applications of digital twin technology in drilling engineering and promoting the digital and intelligent transformation of drilling engineering.

Key words: drilling; digital twin; key technologies; application; model; data-driven

以新兴的大数据、人工智能、物联网和云计算等 IT 技术为基础, 在复杂系统分析、优化、预测、诊断和维护等需求的推动下, 将生产流程及物理实体数字化已经成为大势所趋, 而数字孪生技术则是其中重要的代表技术。数字孪生技术于 2017—2019 年连续 3 年被列为未来十大战略技术之一, 认为数字

孪生技术是产品生命周期管理的关键元素, 有可能节省数十亿欧元^[1]。

2002 年, M. Grieves 等人^[2]首先提出了数字孪生技术的核心思想, 即构建一个包含有关物理系统所有信息的新虚拟系统, 其包括真实空间、虚拟空间、数据从真实空间流向虚拟空间的链接、信息从

收稿日期: 2021-03-22; 改回日期: 2022-04-25。

作者简介: 杨传书 (1972—), 男, 湖北黄冈人, 1996 年毕业于石油大学 (华东) 机械制造工艺及设备、计算机技术及应用专业, 2009 年获中国石油大学 (华东) 石油与天然气工程专业硕士学位, 高级工程师, 主要从事石油工程信息技术、石油工程软件方面的研究工作。E-mail: yangcs.sripe@sinopec.com。

基金项目: 中国石化科技攻关项目“2020 年石油工程智能钻井前沿技术探索研究” (编号: P20047-3) 和中国石化新领域项目“基于大数据的司钻智脑系统研制 (一期)” (编号: XLY19001) 部分研究内容。

虚拟空间流向真实空间的链接及虚拟子空间, 数字孪生按照产品的生命周期分为创建(create)、生产制造(build)、使用维护(use/sustain)和退役(dispose)等 4 个阶段^[3]。2010 年, NASA 正式提出了数字孪生(digital twin), 并将数字孪生定义为基于模拟的系统工程, 主要用于飞行器发射之前的试飞模拟和飞行器正式飞行过程中的实时镜像、潜在风险诊断、参数改变的模拟与决策等 4 个方面^[4]。德国 A. Deuter 等人^[5]认为数字孪生在不同的场景下有不同的阐释, 很难进行普适性定义, 在德国工业 4.0 (RAMI 4.0) 中, 数字孪生在进行产品全生命周期、多层级资产等多维度建模时具有重要作用。多年来, 不同学者和研究机构对于数字孪生的定义虽有差异, 但本质相同, 综合来看, 数字孪生是充分利用传感器更新、运行历史等数据, 融合物理模型与数据驱动模型, 通过多学科、多物理量、多尺度、多概率的仿真模拟, 对物理空间进行描述、诊断、预测与决策, 从而实现物理空间与虚拟空间的实时交互映射。简而言之, 数字孪生包括物理资产的高精度虚拟化(包括结构、属性和状态等)和任何阶段的物理资产与数字孪生系统之间的双向实时一致性及其互操作能力, 高级的数字孪生系统还应具备智能化分析与决策控制功能。

随着传感技术、物联网技术的发展和智能化数字钻井技术的进步^[6], 石油钻井监测数据量剧增, 且呈现工业大数据特点^[7-9], 传统的基于机理模型的钻井模拟/仿真技术已难以满足动态多变环境下自动化、智能化钻井的实时评估分析及预测精度需求。数字孪生技术的出现及发展应用, 为解决上述问题和实现数字化智能化钻井提供了新的技术思路。

1 数字孪生技术在油气行业的发展

Siemens 公司的 B. Okhuijsen 等人^[10]认为, 数字孪生技术是下一代油气实时生产监控和系统优化的核心, 智能油气田的数字孪生将从项目的早期设计阶段开始, 并与实物资产的建造同步进行。

Aker Solution 公司成立了软件与数字服务公司 ix3, 研发的 Integral™ 数字孪生平台融合了云计算、工业物联网、机器学习及人工智能技术, 在能源资产整个生命周期内优化资产的完整性、安全性与性能; FutureOn 公司的 FieldTwin 解决方案是海上油田规划、部署与/或运营的数字孪生; 西门子公司研发的 Topsides 4.0 可用于海上油气开采的智能数字双

胞胎建设, 在设施启动前测试流程与控制的基础结构、安全逻辑以及作业流程; GE 和钻井承包商联合推出了首条数字化钻井船, 对相关设备的性能和可靠性进行预测性分析维护。

eDrilling 公司认为其早在 2008 年就建立了世界第一套钻井数字孪生系统, 由高级的模块化仿真引擎和 3D 虚拟井筒构成, 功能涵盖建井全生命周期, 包括钻井优化设计、钻前模拟预演、实钻监测与参数优化、钻后回放及仿真培训^[11]; 目前正在研发人工智能模型, 以提升系统的智能化水平。这是目前最接近数字孪生概念、且实现了工程应用的软件产品。

Sekal 公司研发了与 eDrilling 类似的系统, 主要用于随钻实时监控及趋势分析, 可实时监控与井壁失稳相关的钻井行为(如钻柱起下速度、转速、开泵速度、排量等), 自动做出优化调整决策, 并与现场钻机关键设备(如顶驱、绞车和钻井泵)相连, 实现自动控制钻井^[12]。

Halliburton 公司也提出了油气数字孪生概念(见图 1), 并将其用在了 Decision Space 365 云平台中, 该平台的建井工程 4.0 实现了井位设计、钻井工程设计及建井施工管理全过程的一体化、数字化, 从而实现了油气建井过程的持续高效优化^[13]。该建井数字孪生是一个利用设计和模拟手段来复制虚拟井、钻机、井下部件及模型操作场景, 是数学模型、软件算法和数据模型的组合, 包括井下和地面钻机 2 部分, 井下主要包括井眼轨迹、钻柱、钻井液与压力控制、油藏与井筒完整性, 地面钻机包括起升系统、钻井泵、顶驱、转盘、方钻杆和绞车^[14]。

国内, 中国石油部分油田开发了三维数字化井场, 进行了钻井设备的虚拟拆装与虚拟操作; 中海油在引进 eDrilling 系统的基础上, 根据海上钻井实际需求扩展开发了随钻监测、模拟优化等功能^[15]; 中国石化开展了钻井井筒数字仿真技术研究, 构建了基于数字井筒的钻前模拟仿真系统雏形, 初步实现了融合地质与工程的钻井过程三维动态仿真、参数同步表征和部分工程计算分析。

总的来说, 数字孪生技术虽然来源于制造业, 但也适用于石油工业。数字孪生技术在石油行业的应用仍处于起步阶段, 目前主要应用在资产设施的规划与预测性维护方面, 包括钻井船、钻井平台和生产设备等。尽管部分企业称其系统是数字孪生(如 eDrilling 系统), 但只是实现了部分物理资产的三维可视化、部分实时信息的计算、分析与展现, 在数据智能驱动、决策指令反向控制物理实体等方面尚有

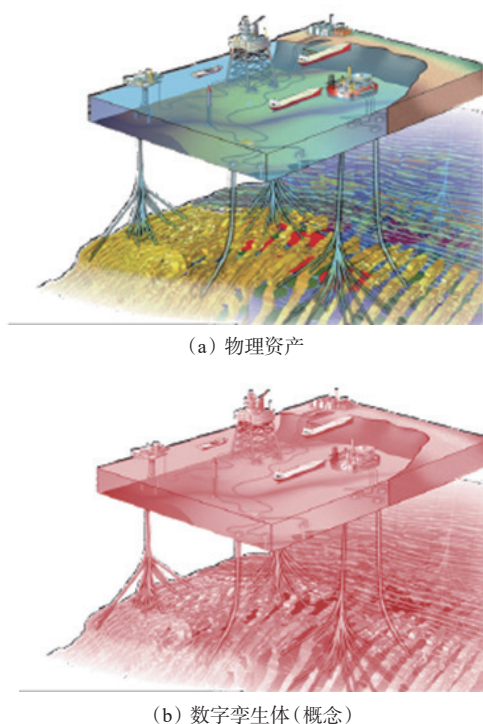


图1 Halliburton 公司的油气数字孪生概念

Fig.1 Halliburton's concept of oil and gas digital twin

欠缺,因此其系统只是与数字孪生的概念相对更为接近,远未达到真正的数字孪生技术目标。

2 钻井数字孪生关键技术

钻井作为油气勘探开发的重要专业分支,其数字孪生系统也属于油田数字孪生的一部分。借鉴数字孪生的核心概念,钻井数字孪生系统应包括井下部分和地面部分:井下部分包括数字孪生井筒及钻井过程动态仿真,地面部分包括数字孪生钻机及钻井作业过程仿真。其中,井下数字孪生系统的主要作用是支持井筒构建过程的专业分析,地面数字孪生系统的主要作用是支持钻机设备的虚拟操控和生命周期管理,二者以井口为纽带,实现信息的串联和同步。钻井数字孪生系统作为智能化钻井的理想软件载体,系统构成复杂,且技术难度大,研发时建议按照由分到总、由静到动的过程逐步完成关键技术的攻关。

2.1 井筒数字孪生技术

2.1.1 井筒数字孪生体的信息模型

井筒是钻井数字孪生的核心基础组成部分,钻井阶段的井筒“实体”包括井身结构、钻柱和井内流体;要做到全面描述,还必须包括井眼轨迹等信

息(见图2)。既然是“实体”,井筒信息模型非常适合使用面向对象的方法进行描述,每个信息对象可根据业务逻辑关系挂接到其“父对象”上,具体方法可参考 WITSML(井场信息传递标准标记语言)^[16]。图2中的信息以“父子”关系形式进行数据对象的挂接和存取,确保井筒实体描述信息的完整性、唯一性和高效率。

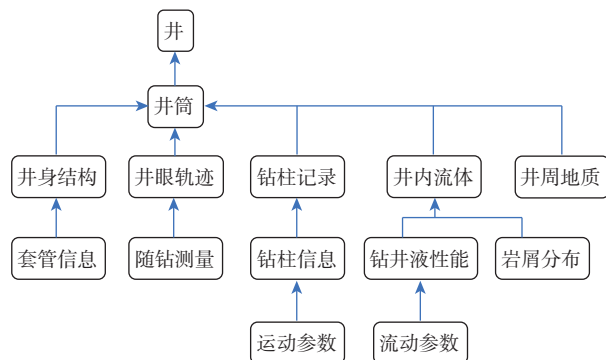


图2 井筒数字孪生体信息模型

Fig.2 Information model of wellbore digital twin

2.1.2 井筒数字孪生体的高保真几何模型

基于井筒数字孪生体信息模型中的数据信息,可以进一步建立井筒数字孪生体的高保真几何模型,这是实现钻井数字孪生的基础,主要包括实体的物理形状、结构、属性及其三维可视化。要根据实物数据,对信息模型中的井身结构(或称为井筒结构,包括裸眼段和固井段)、钻柱和井内流体进行高精度3D建模。

对于井身结构、钻柱等通过“制造”得到的物理部件,一般采用专业的三维建模工具,根据井眼、管柱部件(如钻头、测量短节、钻铤、加重钻杆、钻杆、稳定器和接头等)等的实际结构和尺寸进行精确3D建模;流体一般指钻井液、地层流体或岩屑,其没有固定形状和尺寸,只能根据给定的分布、含量等进行流体建模,通常使用 Unity3D 等开发引擎实现。

针对钻井实例,上述高保真模型部件必须根据钻井实况进行“组装”,形成系统级3D模型,便于用户在逼真场景下利用虚拟现实等方式进行井下“观测和操作”,其关键技术包括2方面:1)以剖切方式真实展现井眼、套管、钻柱、流体之间的空间关系,符合钻井过程中井下各部件之间的运动逻辑;2)所有部件必须与井眼轨道(迹)高度吻合。

2.1.3 井筒数字孪生体的生命周期

井筒孪生体可分为静态部分和动态部分。静态

部分指, 井筒的结构形态及井筒周缘地层构造, 其生命周期从钻井设计开始, 经过钻井施工、完井, 直至生产、报废的全过程, 信息模型与几何模型固定不变; 动态部分指, 钻柱、流体, 仅在钻井设计模拟、钻井施工阶段有效, 其信息模型与几何模型根据实时测量数据进行更新。

井筒周缘地层构造是钻井工程操作的主体对象, 地质环境数字孪生是钻井数字孪生技术的基本前提。地质环境数字孪生要尽量包括已有的数据资料, 以尽可能提高对实际地质情况的映射程度, 这些数据资料通常包括: 1) 地震资料和解释结果, 包括层位、断层、岩石类型和岩石属性; 2) 测井/岩心资料和解释结果, 包括连井剖面、岩性、岩相、岩石物性、渗透率和空间连续性等。地质环境数字孪生主要是建立构造模型(又称地层框架模型, 由地层界面模型和断层模型组成) 和属性模型(如储层参数、岩石参数和地应力等)。

2.2 钻机数字孪生技术

钻机数字孪生主要指钻机及相关设备的数字虚拟化, 也称数字仿真钻机, 包括钻机 8 大系统所有设备及零部件的等比例 3D 建模, 并赋予每个部件的状态参数、运行参数, 在大屏幕或其他虚拟现实环境中能提供沉浸式操作体验, 且与现场实际工况保持完全一致。国内外已开展大量研究, 技术细节不再赘述。需要指出的是, 钻井地面数字孪生系统不同于目前成熟的仿真培训系统, 要求建立高保真、可互操作的 3D 模型, 不能用简易、示意模型替代, 而且必须具备与现场实际设备的互联、互操作接口。

2.3 钻井井下动态过程仿真

2.3.1 实时数据驱动的可视化模型集成

钻井井下动态过程仿真是在井筒数字孪生体基础上赋以钻井过程的动态描述信息, 按照时间轴实现井下状态的真三维、高保真动态呈现, 即基于数据驱动的模式集成(见表 1)。

表 1 实时数据驱动的仿真模型集成
Table 1 Integration of real-time data-driven simulation model

动态仿真分类	被驱动的实体模型	驱动数据	驱动机理
井筒结构 3D 动态仿真	井身结构、地层	预测或解释的地层属性, 井眼轨道(迹), 井径, 井底位置, 下套(尾)管状态, 套管属性, 注水泥状态	依据实时获取的驱动数据, 改变井筒结构及相关属性至最新状态
钻柱 3D 动态仿真	钻柱	钻柱组成及属性, 钻头钻进、起下速度, 转速, 涡动参数, 伸长量	依据实时获取的驱动参数, 改变钻柱组成部件至最新, 并实时更新其运动状态(起下、扭转、旋转、涡动等)
井筒流体 3D 动态仿真	钻井液、岩屑、地层侵入流体	流体性能、排量、流速, 岩屑含量及分布	依据实时获取的驱动参数, 实时表征钻柱内及环空中的流体及岩屑分布及运动状态
井下故障复杂 3D 动态仿真	井身结构、钻柱、井筒流体等等	井漏位置及漏速, 地层破裂位置及形态, 井塌位置及形态, 气侵位置及侵入量, 钻具失效位置, 卡钻位置	在上述三类仿真的基础上, 融合井漏、井涌、卡钻、钻具失效等井下故障的实时状态
系统集成 3D 仿真	上述全部	上述全部	按物理位置关系和相互作用关系实现上述所有模型及状态的一体化表征

2.3.2 钻井工程机理仿真模型集成

可视化模型建立后其所需驱动数据包括 2 部分: 一部分是输入量(设计数据或实钻实时数据); 另一部分则需要利用专业模型或人工智能模型进行实时分析计算得到。这些模型也可称为钻井数字孪生的机理仿真模型, 包括岩性解释模型、岩石物性解释模型、岩石力学计算模型、地层压力计算模型、钻柱摩阻扭矩计算模型、钻柱强度校核模型、流体力学模型、井下故障复杂识别诊断模型、机械钻速预测模型、待钻轨道预测模型和潜在风险预测模型等。需要说明的是, 这些模型区别于钻井设计时采用的静态计算模型, 必须是瞬态计算模型, 单次计

算响应时间应达到秒级。此外, 所有计算都是并行的, 可采用云计算手段提高并行、协同计算效率。

2.4 物理-数字孪生体实时交互技术

2.4.1 井场物联网及智能测控技术

基于井下、井上的各类传感器及物联网, 实现井场物理设备设施的动态属性、运行状态参数及施工参数的自动采集、远程传输, 并实时更新数字模型, 确保数字端(又称虚拟空间) 与物理端(又称物理空间) 实时保持高度一致。同时, 通过数字端的实时计算、智能分析, 由人工或系统自动做出优化决策, 通过高速可靠网络将设备操作指令传输给物理端, 现场设备、井下工具的自动控制机构执行操

作指令进行相应改变,确保物理端实时响应数字端的改变,实现二者同步。

2.4.2 人机交互技术

进入数字孪生时代,数字孪生系统可提供全三维高仿真的沉浸式操作环境,钻井软件的操作不能再局限于鼠标键盘下的HMI界面或者游戏杆等初级的交互手段,而是要综合利用最新的人机交互技术,提高用户体验效果、操控的精准性和操控效率。这些技术包括:

1)虚拟现实技术(VR)及增强现实技术(AR)。该技术可将真实的钻井场景信息和虚拟仿真信息“无缝”集成,在三维屏幕上进行钻井过程的真实呈现,并进行人机互动。

2)智能语音交互技术。通过专门建模训练,实现钻井专业语言的智能识别与自动响应,帮助操作者实现信息的快速获取和操作指令的快速传递。

3)智能可穿戴设备。可将上述技术集成在安全头盔、手套、工衣和工鞋上,实现语音、视觉、触觉及体态的感知、呈现与交互,与云端RTOC系统实现实时连接,大大提高钻井现场人员的操作能力和协同效率。

4)智能视觉交互技术。综合运用视网膜显示器、仿生隐形眼镜及眼动追踪技术,实现更加奇妙的人机交互,简化钻井现场人员的穿戴设备,提高交互效率。

3 钻井数字孪生系统应用场景设计

针对钻井工程井下作业不可见、不可预测及试错成本高的问题,钻井数字孪生系统可低成本地重复映射/监控/诊断/预测现实环境中的钻井过程和行为,实现钻前、钻中及钻后作业的闭环演进,并帮助解决相关的业务应用问题。

3.1 钻前模拟预测与优化

基于钻前预测的井下地质环境数据及钻井工程设计方案,建立高精度井下虚拟模型,针对全井或某个特定井段设定不同的参数组合,进行各种钻井工况的仿真模拟,利用计算模型或智能模型对钻井速度及钻进、起下钻等各种工况下可能出现的井下风险进行预测,从而制定施工应对方案,或者优化/优选设计方案;还可以基于最新的井场数据,在钻井过程中对待钻井段进行模拟预测及优化。

3.2 疑难井施工团队协作预演

基于3.1节描述的场景功能,叠加地面钻机的

数字孪生系统及人机交互技术手段,在疑难井开钻之前组织施工人员基于数字虚拟空间进行钻井操作演练,加强施工人员对井下各种可能状况的直观感知,提高对意外状况的应对处置效率,同时提高各岗位、各团队人员之间的协同配合效率。

3.3 随钻预警与决策

基于设计阶段构建的高精度井下数字孪生模型,利用物联网、传感器采集的数据对孪生模型进行实时更新,采用集成的智能诊断模型对异常工况进行自动识别预警。此外,基于内置的多场景模拟功能,可进一步对钻井参数进行智能优化,做出最优决策,以提高机械钻速和避免发生井下故障。

3.4 钻井远程控制

随着钻井传感器和物联网技术的成熟与普及,现场物理系统与后方虚拟系统之间会趋于高度一致,在钻井数字孪生系统中叠加反馈控制功能,可将虚拟空间的操作指令低延时地发送到现场,控制钻井设备或工具的自动执行,如同在现场一样真实高效。

3.5 钻井设备预测性维护

钻井设备设计制造的开始阶段即建立高精度孪生模型,赋予设备关键部件的性能参数和运行参数,通过传感器测量相关参数,形成设备全生命周期的数据库,基于大数据及人工智能技术预测设备的寿命和诊断设备运行参数的异常,自动制定出维修保养计划,从而减少“例行”检修次数,并主动避免被动停机,达到降本增效的目的。

3.6 钻井实训

钻井数字孪生的建立,将大大增强现有仿真培训系统的精确度和实操性,可将钻井培训与实钻案例完全融合起来,让学员在“实钻”操作中学习知识,提高操作能力。

4 钻井数字孪生系统的研发重点

与传统的钻井工程模拟仿真不同,钻井数字孪生系统需要基于实时数据和海量历史数据,在传统机理模型的基础上引入数据驱动模型,以便实现对物理实体的同步精准演化。要实现这一目标,需要在完成关键技术攻关和应用场景设计的基础上,进一步解决以下问题。

4.1 地质环境模型实时更新

钻井数字孪生面临着一个制造业数字孪生中很少见到的具体挑战:环境的不确定性。因为地质目

标的构造和特性主要是根据地震、测井等主要或次要来源来解释的,并带有相关的误差成分,地质环境的不确定性体现在地层压力、岩石力学特性、应力非均质性、地层构造、岩性和地层分层深度等方面,其会严重影响钻井设计施工的科学性、钻井技术措施的针对性和有效性,从而增大井身结构优化、井眼稳定、井眼轨迹控制、机械钻速提高和井下复杂情况及事故的预防与处理等方面的难度。

数字孪生的一个基本原则是数字孪生模型对物理世界的实时准确映射,而地质环境模型的不确定性破坏了这一原则,影响了后续各模型计算的准确性,导致最终的分析决策结果与物理钻井之间出现偏差,钻井数字孪生的技术难度因此急剧增大。

因此,钻井数字孪生首先要尽可能降低或者消除地质环境模型的不确定性,随钻地震技术、随钻测井前探技术的发展为解决此问题提供了可行性。钻井过程中,将随钻测得的地震数据、测井前探数据实时传输至后方,对地质数字孪生体进行同步更新,实现地质环境的真实映射,建立钻井数字孪生最基础的环境要素。在此过程中,要解决的关键技术包括随钻地震、测井数据的高效准确处理解释及地质孪生体数据的动态更新应用。

4.2 数据驱动模型研究应用

钻井工程的机理模型众多,通常是基于一定的假设条件进行简化,但这会导致模型的不确定性问题,很多模型虽然通过调整参数拟合可以与测试数据吻合较好,但是在进行预测或者对新数据解释时往往会出现偏差。例如,钻井风险预测模型与风险案例的吻合较好,但是受地域性经验参数的影响,其普适性较差。

过去的几十年中,钻井工程已经积累了海量的地质、工程数据,以此为基础,利用新兴的大数据与人工智能算法,建立数据驱动模型(统计模型,或者机器学习),可以弥补传统机理模型的不足。数据驱动模型在预测性维护、风险预测等方面已证明其可替代并超越传统机理模型,并在特定参数计算、参数优化等方面可以与传统机理模型融合应用,进一步提高计算分析结果的可信度^[17-21]。数据驱动模型的研发应用是钻井数字孪生与传统钻井模拟的显著差别。

4.3 模型修正与融合

钻井数字孪生具有多尺度、多学科的特点,模型融合问题包括多物理尺度融合、多学科融合及机理/数据模型相互融合。多物理尺寸融合是指地质、

井筒、工具等宏观尺度模型与地层裂缝扩展、孔隙流体流动、热化学反应等微观尺度模型的同步应用与结合;多学科融合是研究岩石力学、水力学、热化学和管柱力学之间的相互作用;机理/数据模型的融合则是指基于机理的传统数学模型与基于数据的智能模型相互间的补充、印证。

钻井数字孪生研发过程中的另一个重点是模型的修正与融合。其中,模型修正主要解决有限元模型修正、在线学习和增量学习等问题,从而改进完善模型,提高模型计算、分析和预测的准确性;模型融合则主要解决多物理尺度建模、多学科联合仿真和机理模型与数据模型融合应用等问题,从而建立与实际钻井工程相符合的数字演化进程。

钻井数字孪生的核心是模型,主要包括传统机理模型和数据模型,机理主要解决的是定性的问题,而数据是要解决定量的问题。然而,钻井工程涉及的传统机理模型(岩石力学、水力学、管柱力学等)存在较多的经验系数,针对不同地区需要在应用过程中对地质差异性进行修正,包括但不限于物理模型修正、模型参数修正等内容。另外,基于近年来兴起的应用大数据、人工智能算法等建立的数据模型,在应用过程中需要利用不断采集的海量实时数据进行学习修正,以进一步提高其普适性和准确性。

5 结论与建议

1) 钻井数字孪生技术是建立在钻井数字化基础上的,因此建立高精度的数字仿真模型是最重要的基础。在钻前模拟阶段,利用设计数据可构建井筒工程的几何、工程数字仿真模型,但构建井筒周缘岩体数字仿真模型的难度大,需要紧密结合地质综合研究成果、岩石力学试验结果进行深入研究。

2) 钻井数字孪生技术的应用场景涵盖钻井设计、钻井施工和钻后分析全过程,还需加强施工过程中物联网、人工智能、VR/AR 技术的研究与应用,建立人机一体的实时高仿真虚拟空间,向远程控制的自动化智能化钻井发展。

3) 建议加强钻井设备、工具的数字化交付,直接共享设备生产厂家的三维设计图,将大大提高数字孪生体几何模型的构建速度和精度。

4) 建议加快钻井井场数字化进程,实现地面设备及井下工具、环境的实时数据采集和远程监控,最终实现钻井物理实体和数字孪生体之间的虚实交互、同步演化。

参考文献

References

- [1] CEARLEY D W, BURKE B, SEARLE S, et al. Gartner top 10 strategic technology trends for 2018[EB/OL]. (2017-10-03) [2020-02-05]. <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-10-strategic-technology-trends-for-2018>.
- [2] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems (excerpt)[EB/OL]. [2020-01-29]. <https://www.researchgate.net/publication/307509727>.
- [3] GRIEVES M W. Virtually intelligent product systems: digital and physical twins[M]//FLUMERFELT S, SCHWARTZ K G, MAVRIS D, et al. Complex systems engineering: theory and practice. Reston: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2019: 175-200.
- [4] MIKE SHAFTO C, CONROY M, DOYLE R, et al. Modeling, simulation, information technology and processing roadmap: technology area 11[R]. New York: NASA, 2010.
- [5] DEUTER A, PETHIG F. The digital twin theory-a new view on a buzzword[EB/OL]. (2019-03-18)[2020-02-05]. <https://www.researchgate.net/publication/330883447>.
- [6] 李根生, 宋先知, 田守崙. 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] OKHUIJSEN B, WADE K. Real-time production optimization-applying a digital twin model to optimize the entire upstream value chain[R]. SPE 197693, 2019.
- [11] NADHAN D, MAYANI M G, ROMMETVEIT R. Drilling with digital twins[R]. SPE 191388, 2018.
- [12] CAYEUX E, DAIREAUX B, DVERGSNES E W, et al. An early warning system for identifying drilling problems: an example from a problematic drill-out cement operation in the north-sea[R]. SPE 150942, 2012.
- [13] Halliburton. Applying the O&G digital twin[R]. 2018: 1-3.
- [14] Halliburton. Using an E&P digital twin in well construction[R]. 2017: 1-10.
- [15] 李中. 中国海油油气井工程数字化和智能化新进展与展望[J]. 石油钻探技术, 2022, 50(2): 1-8.
LI Zhong. Progress and prospects of digitization and intelligentization of CNOOC's oil and gas well engineering[J]. *Petroleum Drilling Techniques*, 2022, 50(2): 1-8.
- [16] Energistics. WITSML developers & users[EB/OL]. [2020-02-05]. <https://www.energistics.org/witsml-developers-users/>.
- [17] 檀朝东, 黄新春, 王松, 等. 机理仿真与数据驱动融合的电泵举升故障诊断预警理论研究进展[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 483-488.
TAN Chaodong, HUANG Xinchun, WANG Song, et al. Research progress on fault diagnosis and early warning theory of electric submersible pump lifting based on mechanism simulation and data driven fusion[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 483-488.
- [18] 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.
- [19] 王茜, 张菲菲, 李紫璇, 等. 基于钻井模型与人工智能相耦合的实时智能钻井监测技术[J]. 石油钻采工艺, 2020, 42(1): 6-15.
WANG Xi, ZHANG Feifei, LI Zixuan, et al. Real-time intelligent drilling monitoring technique based on the coupling of drilling model and artificial intelligence[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2020, 42(1): 6-15.
- [20] 朱硕, 宋先知, 李根生, 等. 钻柱摩擦扭矩智能实时分析与卡钻趋势预测[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 428-435.
ZHU Shuo, SONG Xianzhi, LI Gensheng, et al. Intelligent real-time drag and torque analysis and sticking trend prediction of drill string[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 428-435.
- [21] 谭天一, 张辉, 马丹妮, 等. 虑数据不平衡影响的钻井复杂智能诊断方法[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 449-454.
TAN Tianyi, ZHANG Hui, MA Danni, et al. An intelligent drilling accident diagnosis method considering the influence of data imbalance[J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 2021, 43(4): 449-454.

[编辑 滕春鸣]