

油气钻采数字孪生模型构建方法及应用案例

林伯韬^{1*}, 朱海涛¹, 金衍^{1,2}, 张家豪¹, 韩雪银^{1,3}

1 中国石油大学(北京)信息科学与工程学院/人工智能学院, 北京 102249

2 中国石油大学(北京)石油工程学院, 北京 102249

3 中海油能源发展股份有限公司工程技术分公司, 天津 300452

* 通信作者, linb_cupb@163.com

收稿日期: 2024-02-20

国家自然科学基金面上项目“砾岩储层砾石—交界面—基质合压水力裂缝非平面扩展机制研究”(42277122)资助

摘要 油气钻采过程中地质的不确定性、井下实时工况的不可见性、工程仿真的复杂性阻碍了其科学高效的设计及施工。数字孪生技术能够提供实时智能且可视化的方案设计和工程决策, 但缺乏针对油气钻采的系统建模方法。对此, 本文首先剖析油气钻采数字孪生的国内外研究及应用现状, 进而应用成熟度指标定量评价该技术的发展程度; 其次, 逐次提出油气钻采数字孪生模型的建模方法, 包括建模流程、拆分策略、装配及融合架构、建模工具, 并以钻井井壁稳定和海上生产系统为例, 介绍数字孪生在钻井与开采方面的应用案例; 最后, 分析困难与挑战并提出发展建议。研究发现, 相对制造业, 钻采孪生多处于可视化阶段, 整体成熟度偏低。油气钻采系统的复杂需求被拆分为若干清晰且较容易实现的子需求; 基于需求分析将建模对象在粒度、维度、生命周期上拆分为不同的子模型, 通过模型层、功能层、需求层逐层装配子模型, 进而实现多维度、多领域模型间的融合。同时, 需要在模型管理、数据管理和工程仿真方面完善方法和提高效率。此外, 钻采孪生面临多源异构数据选择与融合困难、子模型定义模糊、模型验证不清的问题, 以及复杂动力学过程、多部门多任务协同、自主软件工具开发方面的挑战。综上, 本文提出的数字孪生模型构建方法和案例能为油气钻采工程提供方法指导和应用参考。

关键词 油气; 钻井; 开采; 数字孪生; 数据科学; 人工智能

中图分类号: TE21; TP183

Modeling approach and case studies of digital twin in drilling and production of oil and gas fields

LIN Botao¹, ZHU Haitao¹, JIN Yan^{1,2}, ZHANG Jiahao¹, HAN Xueyin^{1,3}

1 College of Information Science and Engineering/College of Artificial Intelligence, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

2 College of Petroleum Engineering, China University of Petroleum-Beijing, Beijing 102249, China

3 CNOOC EnerTech-Drilling & Production Co., Tianjin, 300452

Abstract The uncertainty of geological composition, the invisibility of the under-well real-time working conditions, and the complexity of the engineering simulation in the oil and gas field drilling and production process have hindered its scientific and efficient design and construction. The digital twin technology can bring up real-time, intelligent, and visualized project design and decision-making but has yet to lack a systematic method for modeling oil and gas field drilling and production. In this regard,

引用格式: 林伯韬, 朱海涛, 金衍, 张家豪, 韩雪银. 油气钻采数字孪生模型构建方法及应用案例. 石油科学通报, 2024, 02: 282-296

LIN Botao, ZHU Haitao, JIN Yan, ZHANG Jiahao, HAN Xueyin. Modeling approach and case studies of digital twin in drilling and production of oil and gas fields. Petroleum Science Bulletin, 2024, 02: 282-296. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.020

the article first explored the current levels of investigation and implementation both domestically and abroad, based on that the level of development by applying the maturity index was quantified. It then proposed the digital twin modeling approach for drilling and production in the oil and gas field, which encompassed the modeling workflow, model division strategies, architecture for model assembly and integration, and modeling tools for constructing the digital twin. Also, two case were studied for drilling and production, using wellbore stability while drilling and offshore gas well production system as two examples, respectively. Finally, the difficulties and challenges related to the digital twin deployment in the field were analyzed, based on which the suggestions for its future development are proposed. It is found that the digital twin for drilling and production has stayed at the visualization level and at a relatively low degree of maturity compared to the manufacturing field on digital twin. The complex demand for oil and gas drilling and production systems can be divided into several clear and easy realized sub-demands. Based on requirement analysis, the modeled object can be separated to be various sub-models based on the granularity, dimension, and lifecycle. The sub-models are then assembled layer by layer across the model, function, and demand layers so that the multi-dimension and multi-field models can be integrated. Meanwhile, an improvement of their methods and an increase in efficiency for the model administration, data management, and engineering simulation as desired. Moreover, the digital twin faces the problems such as difficulty in selection and fusion of multi-source heterogeneous data, vagueness in the sub-model definition, and ambiguity in the model validation, as well as the challenges such as the complicated kinetics processes, multi-division and multi-task collaboration, and development of domestic software tools. In summary, the digital twin modeling approach and the case studies in this article can provide a methodological guidance and practical reference for oil and gas drilling and production practices.

Keywords oil and gas; drilling; production; digital twin; data science; artificial intelligence

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2024.02.020

0 引言

数字孪生最早于2002年由密歇根大学的Michael Grieves教授提出,并由诸多学者给出了其概念或定义^[1-6];其广义上的概念可凝练为:通过物理与信息的融合,构建全面反映物理实体物理运行机制的数字化虚拟孪生体,实现物理实体与虚拟孪生体的动态、实时、闭环的信息交互与自动控制。数字孪生已被广泛应用于智慧城市领域,例如隧道开挖的预警与应急^[7],人工智能物联网(AIoT)驱动的桥梁运维^[8],极地建筑物的能耗管理及预测^[9];以及智能制造领域,如起重臂的实时结构健康监测及设计优化^[10-11],航空发动机的全生命周期数据管理^[12],飞机机翼的材料损伤检测和预测性维护^[13]。上述数字孪生案例主要通过以下2个实施路径来开展监测、操控、优化、设计和决策:(1)通过布设传感器和控制器,建立可视化网络界面,采用数据科学和人工智能(AI)算法处理传感器数据并输送回控制器,实现物理实体实时、自动的状态监控与参数调控;(2)通过耦合有限元、离散元等数值模拟方法与深度学习神经网络,优化组合多个单精度代理模型(ISM)或开发多精度代理模型(MFS),使用传感器数据验证、调整分析结果和更新模型参数,提供决策参数至控制器并与之实时双向反馈与交互。数字孪生在油气行业亦经历不同程度的发展并已应用于一些工业场景,如地面工程^[14]、设施设备^[15]、油气储运^[16]、生产管理^[17]和工厂炼化^[18]。此类工作多集中于管道、

设备、物料与工具的资产管理、智能运维和三维展示,侧重处理空间信息和属性信息,尚未实现反映物理实体实时状态的虚拟仿真。

同时,针对数字孪生模型的发展形态,陶飞等^[19]提出以虚仿实、以虚映实、以虚控实、以虚预实、以虚优实和虚实共生6个数字孪生成熟度等级,并从物理实体、数字孪生模型、数字孪生数据、连接交互和功能服务五个维度出发,将影响成熟度等级的19个因素作为评价因子,评估特定应用场景的成熟度。目前,智慧城市和智能制造领域的工业数字孪生多处于以虚预实或以虚优实的阶段,尚未实现完全的虚实共生。同时,在数字孪生模型构建方面,多数学者所提的方法仅适用于制造业领域,例如车间的零件加工过程^[5,20]。而在涉及多学科交叉的复杂油气钻采工程领域,尚缺乏系统的数字孪生模型构建方法及应用案例。

油气钻采工程的数字孪生建模方法是油气行业数字化与智能化转型过程中亟待探索的关键问题;同时,高效的建模方法及其成功应用,不仅能够把地下原本不可见的现象以实时可视化形式展示,还能将数据科学与人工智能技术动态地融入钻采决策过程,通过事先模拟不同施工手段造成的工程效果来快速优化设计方案。据此,本文首先挖掘现有油气钻采数字孪生的应用现状,针对文献中的应用案例开展整体成熟度评价。接着,提出需求驱动的油气钻采数字孪生模型构建方法,为高效构建油气钻采数字孪生模型提供指导。

同时,以钻井和开采各一个案例,展示及分析所提方法的应用流程。最后,阐明油气钻采数字孪生当前面临的问题与挑战,以期为业内数字孪生技术的发展提供建议。

1 油气钻采数字孪生应用概况

1.1 油气钻井数字孪生应用概况

地下世界的信息获取与传输极其困难,导致钻井工程的数字孪生难以精确反映井下地质与工程状况。因此,地面设备或作业工艺的孪生更契合一般工程的数字孪生建模过程。例如,通过建立地上部分^[21]或整个钻井设备环境^[22-23]的数字孪生体,开展作业演练与安全培训;构建海上平台的数字孪生,监控管理设备^[24]、规划钻井作业^[25],数字化工艺流程,以此提高作业效率^[26]和减少钻进时间^[27]。针对地下或井筒的数字孪生,利用现有实时传感器收集的数据进行建模、分析、预测和可视化,是比较常见的方式。如基于实钻数据,使用物理模型和机器学习方法来预警卡钻^[28-29],增强井下压力控制^[30],优化起下钻工艺^[31]。这些研究针对钻井工程的某一步骤环节开展孪生,助力降本增效;属于单元级的数字孪生技术。进一步地,结合数据增强手段^[32]、机械比能指标^[33]或学习反馈方法^[34]来模拟钻井过程、优化钻井参数、预测井壁稳定,则可实现系统级的数字孪生。

国外油气公司针对油气钻井数字孪生的建设开展了多年的探索与实践。早在2007年,挪威eDrilling Solutions公司的eDrilling平台搭建了具备三维可视化功能与远程控制中心的实时钻井模拟系统^[35],提供了包含规划设计、模拟钻井、自动监测、实时优化、钻后分析、动态可视化等功能的全流程数字孪生系统(图1)。eDrilling平台已在包含挪威北海、中国南海等多个区块的钻井实践中得到应用,显著减少了非作业时间或提供了高效的员工培训^[36-40]。斯伦贝谢研发了随钻扩孔器的数字孪生模型,用以监控井下震动,预防井下事故的发生^[41]。巴西石油公司应用数字孪生开展油井完整性监测,提前模拟未来作业以降低施工风险。阿布扎比国家石油公司与斯伦贝谢基于数字孪生技术增强了ROTC(远程操作中心)运营,通过数据质量监控、自动化算法和物理建模等手段实现钻速提升、工况预警和工艺优化等功能^[42]。哈里伯顿公司开发的数字孪生平台DecisionSpace[®]365^[43]能够实时监测钻井活动,通过对比设计方案实时优化调整参数,提高钻井的效率和安全性。同时,该公司的LOGIX[®]平

台提供了基于数字孪生和机器学习技术的自主钻井系统,无需人工干预即可完成钻井任务,降低了运营风险并减少了井场占地面积与交付时间^[43]。钻井服务商Nabors^[44]基于实时数据,结合物理模型与人工智能算法构建钻井数字孪生,并利用云计算平台快速部署和扩展业务。

国内研究人员杨传书等^[45]总结了井筒孪生、钻机孪生、井下动态仿真、物理—数字孪生体实时交互四项数字孪生关键技术。在此基础上,张好林等^[46]进一步提出了包含物理层、数据层、模型层、功能层和应用层的孪生架构。姜杰等^[47]利用Unity3D初步实现了数字孪生智能钻进系统,包括虚拟钻孔数字化设计、钻进过程孔内三维仿真和钻进参数实时虚拟监测与控制等功能。中石油西南油气田分公司创建了井场、井底钻具组合、井眼轨迹的数字孪生体,使得工程师能够在RTOC监控和分析现场作业情况,实时跟踪钻井设备的性能和井下状态^[48-49]。

1.2 油气开采数字孪生应用概况

数字孪生为油气行业带来的另一大收益是开采工艺及流程的可视化与优化。于永志等^[50]、迟化昌等^[51]、刘立强等^[52]、Wei等^[53]专家分别开发了油田注水系统、地面生产工艺系统、游梁式抽油机以及海底生产设备的可视化平台,实现了数字孪生单元级或简单系统级的可视化及沉浸式虚拟培训等功能。然而,可视化功能仅仅是数字孪生为油气开采领域带来的众多益处之一,且成熟度等级较低^[54]。相较于可视化,数字孪生的更多价值在于其对油气上游开采业

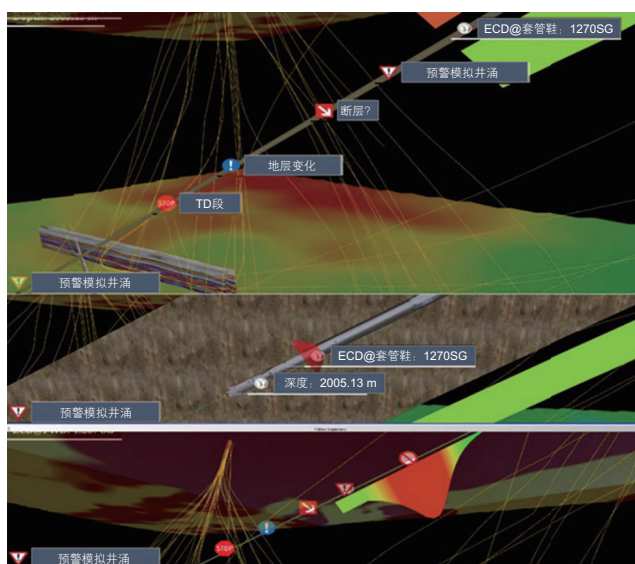


图1 钻时井下三维可视化案例(改自文献^[40])

Fig. 1 A case of 3D visualization of downhole while drilling^[40]

务的优化。数字孪生已被用来预测油气生产系统中的物理实体未来一段时间的运行过程和状态，特别是针对油气生产系统中的关键设备或难以测量对象的运行状态及工程风险的评估方面；例如，海底阀门状态预测^[55]、海底管道性能预测^[56]、连续油管作业状态预测^[57-58]、水下采油树故障诊断^[59]、井底温压预测^[60]、隔水管及立管疲劳预测^[61-63]、生产动态预测^[64-65]、海上设施风险评估^[66]、电潜泵故障预测等^[67]。通过集成控制系统，数字孪生可用于油气开采工艺及流程中的单元或系统的预测性维护和闭环优化，以提高油气生产效率，缩减计划外停产时间。在单元级别，数字孪生的预测性维护和优化能力已用于采油泵维护^[68]、抽油机效率优化^[69]、水下采油树维护^[59]等；在系统级别，已用于井口生产系统组件优化^[70](图2)，生产系统完整性管理^[71]、油气生产系统维护^[72]、无人生产平台维护与优化^[73]、举升系统参数优化^[74]、增产方案优选^[64]、生产参数优化^[75]。此外，油气开采过程中有关储层改造(例如水力压裂)的数字孪生研究目前尚为空缺。由于油气藏的复杂性以及相关监测手段的限制，油气藏数字孪生体的开发难度相对较高，目前多处于技术架构的探索阶段，鲜有成功的应用案例^[76-80]。未来油气藏开采数字孪生技术的发展有望打破以往油气藏行为的“黑匣子”，实现“透明油气藏”，可视化油气藏在其开采生命周期的实时、动态的物理规律。

相较于上述分散的研究，国内外油气企业推出了油气生产复杂系统级的数字孪生产品或解决方案。例如，康士伯数字技术公司开发的动态数字孪生平台Kognitwin，旨在为油气运营商提供高效的开采资产管理服务^[81]。Kognitwin的一个著名应用案例是在壳牌公司的Ormen Lange气田项目中提供的动态数字孪生解决方案。该方案用于维护海上平台基础设施，优化生产流程和提高采收率，预计每年能节约30%的维护费用^[82]。同时，挪威能源公司Equinor推出了Echo数



图2 利用数字孪生中优化井口组件^[70]

Fig. 2 Optimize wellhead components in a digital twin^[70]

字孪生软件，并应用于Johan Sverdrup油田的数字化运营，提高了生产效率和安全性^[83-85]。BP能源公司推出的数字孪生产品APEX系统帮助其在全球的油气产量增加了3万桶/天^[86]。美国海洋油气工程供应商McDermott在其Gemini XDTM软件平台的基础上，将数字孪生应用于海上油气田的规划、部署和运营^[87]。此外，FutureOn公司推出的数字孪生平台FieldTwin^[88]、ix3公司推出的Integral平台^[89]、西门子提出的RTPO系统和Topsides 4.0的数字孪生产品^[90-91]，都旨在为油气生产提供全生命周期的数字化解决方案。

在国内，中海油和加拿大Cenovus能源公司将数字孪生系统部署于中国南海的荔湾气田，提供生产作业、流动保障、海底管道完整性管理、储层动态监测等功能^[92]。同时，中海油能源发展装备技术有限公司也宣布研发了拥有自主知识产权的数字孪生三维引擎产品^[93]。

1.3 油气钻采数字孪生成熟度分析

结合油气领域工程实施现状，针对63篇文章^[21-49, 50-53, 55-69, 71-75, 77-85]的油气钻采数字孪生应用案例开展成熟度评价。具体评价步骤、准则及成熟度计算公式参考陶飞等学者提出的理论方法^[94]，其中每个维度的评价依据来源于文献中的相关描述；评价结果见图3。可见，尽管工业数字孪生技术处于蓬勃上升期^[12]，油气钻采领域数字孪生的应用仍处于探索阶段。其中，油气钻井数字孪生整体的成熟度为1.87，达到了“以虚映实”的程度，尚未实现“以虚控实”。在井壁、钻具等钻井单元中，相对孤立对象的模型开发达到了一定的水准，但受限于地下空间难以探测、认知并形成数据传回地表，“数字孪生数据”与“连接交互”两个维度的成熟度仍处于较低的水平。虽有Halliburton、eDrilling这样的油服企业可提供局部实现“以虚控实”功能的产品，但行业整体的水平尚有待提高。油气开采数字孪生整体的成熟度为2.20，处于以虚控实和以虚预实之间。从单个维度的评价结果来看，“连接交互”和“数字孪生模型”的成熟度较低，特别是其中“连接交互质量”和“数字孪生模型完整度”方面需要进一步提升。相较于制造业，油气行业的数字化转型较为缓慢是导致其总体成熟度偏低的重要原因。同时，学术界和工业界需要协同加强油气数字孪生相关基础理论的研究，引导数字孪生的应用向标准化和体系化的方向发展。

2 油气钻采数字孪生建模方法

数字孪生模型是数字孪生的重要组成部分，是实现其功能的基础^[94]。然而，油气钻采是一个涉及多学科交叉的复杂系统工程，其孪生模型的构建极其困难。据此，针对油气钻采领域，提出一种需求驱动的数字孪生模型构建方法。该方法基于复杂系统拆分—组

的建模思想，流程见图4，包括：需求分析及功能定义、模型构建、模型验证、模型管理和模型应用。

首先，将来源于真实油气钻采系统的复杂需求拆分为若干清晰且较容易实现的子需求。接着，根据这些被拆分的子需求定义数字孪生模型的功能。通常，对应孪生模型的功能即需求。接着，这些功能基于其内容被细分为若干更易实现的子功能，根据这些子功能确定具体的数字孪生模型。此外，通过真实油气钻

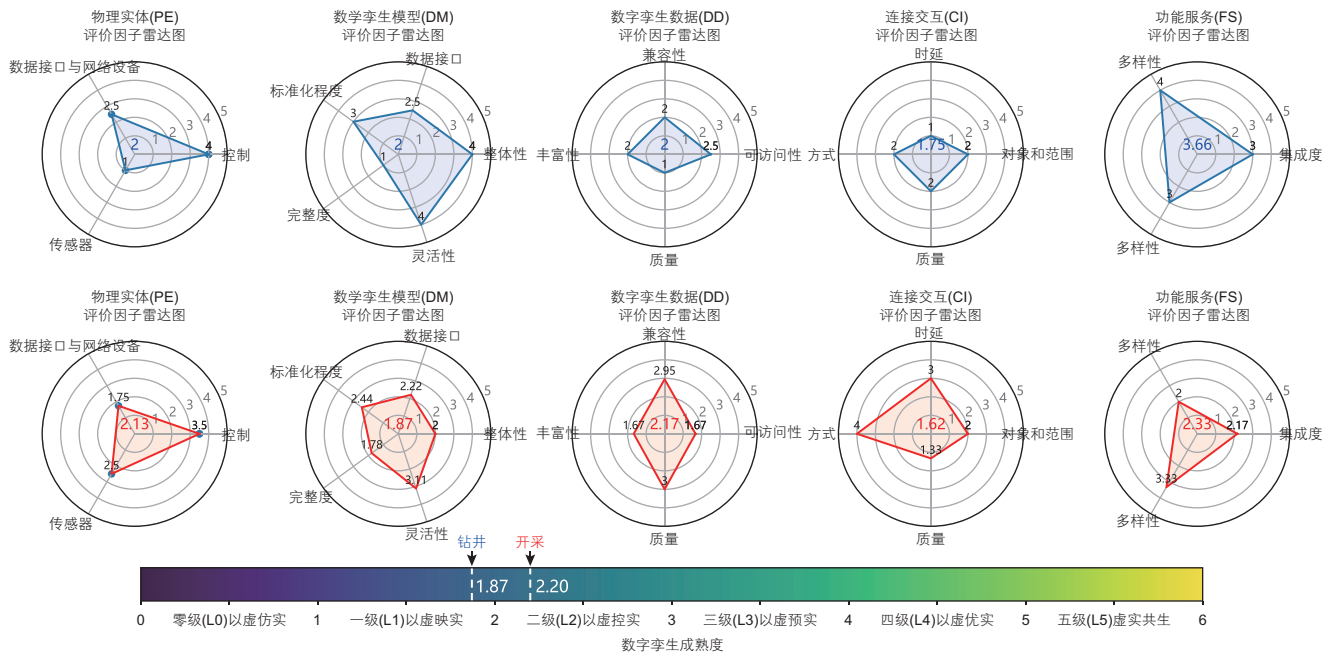


图3 油气钻井与开采数字孪生成熟度评价结果

Fig. 3 Evaluation results of digital twin maturity of oil and gas drilling and production

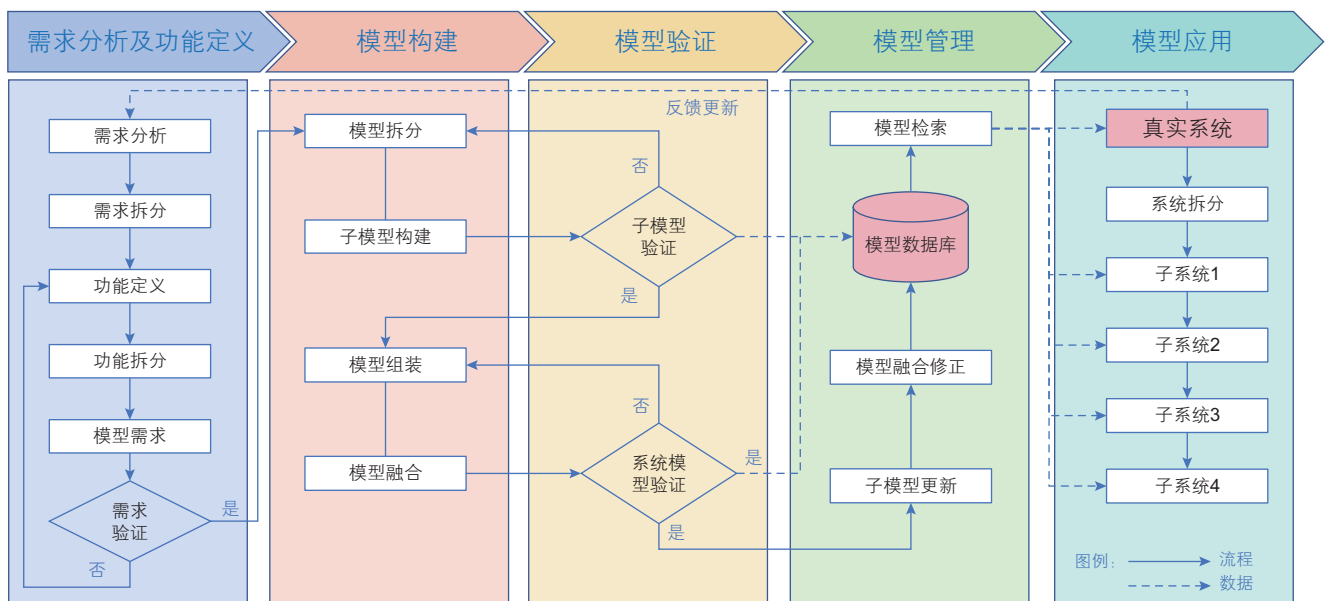


图4 油气钻采数字孪生模型建模流程

Fig. 4 Modeling process of digital twin model for oil and gas drilling

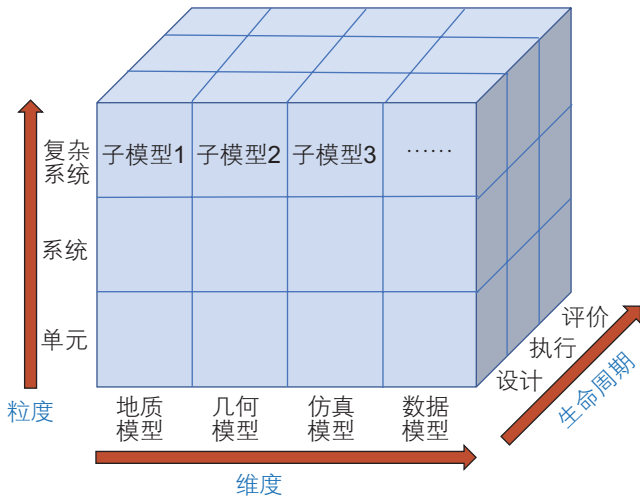


图5 油气钻采数字孪生模型拆分策略
Fig. 5 Digital twin splitting strategy for oil and gas drilling

采系统的知识和数据，验证其模型需求是否合理。若合理则进入模型拆分步骤，若不合理则返回功能定义步骤，根据拆分需求重新定义孪生模型的功能。

数字孪生模型的拆分策略至关重要，因为其直接影响建模效率。本文所提拆分策略见图5。从粒度上，划分建模对象为单元、系统以及复杂系统；例如，整个钻井设备可视为一个复杂系统，其井下设备为其中的一个子系统，而钻头则为一个单元。在维度上，将油气钻采数字孪生模型划分为地质、几何、仿真和数

据模型，其中地质模型是后续油气钻采设计及施工的基础，几何模型用于实现前端可视化及人机交互。同时，油气钻采工程的生命周期可分为设计、执行以及评价阶段。在此基础上，构建拆分后的较为简单的子模型，并根据真实系统采集得到的数据验证各子模型，从而保证其精度。

本文所提的油气钻采数字孪生模型装配和融合架构见图6。主要包括模型层、功能层和需求层，旨在从顶层角度指导不同异构子模型的装配和融合。模型装配为针对几何模型，在空间维度中实现不同子模型的装配^[20]。几何模型的装配是为了实现可视化功能，由此来满足透明工艺的需求。几何模型的空间关系体现为位置、连接和配合^[20]。依托所拆分并建立的单元级几何子模型，逐步组建系统级模型，进而组装成复杂系统模型。装配过程需要考虑各模型的空间约束关系，明确顺序后再装配。

模型融合是指开展地质模型、仿真模型和数据模型之间的耦合及数据交互。如图6所示，子模型的组装和融合方式完全由其要实现的功能和满足的需求决定。同时，在实现不同的功能时，子模型和子功能均可重复利用，以满足不同的需求。该种方式能够显著提升模型构建及其应用的效率。目前数字孪生模型融合的常用方法有2种：一种是以软件/数据接口的形式，实现不同领域模型之间的融合及数据交互。另外

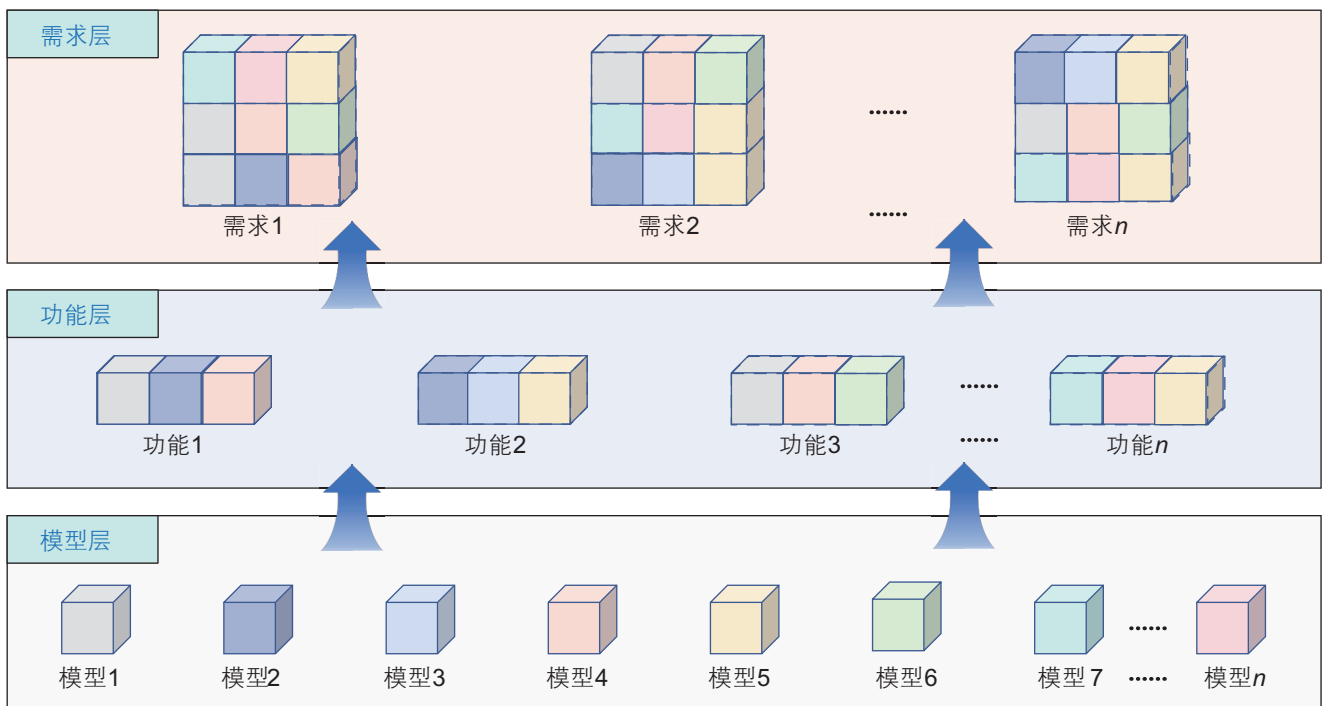


图6 油气钻采数字孪生模型装配及融合架构
Fig. 6 Oil and gas drilling and production digital twin assembly and fusion architecture

一种则是通过统一建模语言(UML)来实现融合与交互,如Modelica语言^[95]。在油气钻采领域,由于涉及的学科跨度大(涉及地质、化学、力学、材料、机械等),专业工具多,建议采用第一种方法来融合各类模型。

油气钻采是一个涉及多学科交叉的复杂系统工程,处于动态演化的过程。模型管理是保证模型准确率和效率的关键步骤。在上述模型装配和融合阶段,子模型以及子功能的重复利用基于模型管理实现。除模型存储外,模型管理还应具备基础的“增删改查”功能。因为随着油气钻采工程的生命周期演化,相关的模型需要被“增加”、“删除”、“更新”和“检索”以反映真实系统的演进。在模型应用阶段,为方便模型的应用,真实的复杂油气钻采系统被分为若干个子系统。其后,可直接将组装和融合后的数字孪生模型应用于整个油气钻采系统,也可通过模型检索及匹配,将子模型应用于相应的子系统。同时,数字孪生模型根据真实油气钻采系统的反馈,持续更新和修正,以保证其在真实系统演化过程中的准确性。

基于油气钻采数字孪生模型的需求和功能,可明确常见的建模工具,包括地质建模工具、几何建模工具、仿真建模工具和数据建模工具。其中地质模型是后续油气钻采设计及实施的基础模型,提供了油气藏重要的地质信息。常见的地质建模工具有国外的Petrel、RMS、GMI,以及国内的双狐、iStress、石文等。几何模型用于实现前端的可视化以及人机交互功

能,主要建模工具既包括三维建模软件如CAD、3ds Max、Maya,也包括前端渲染工具如UE、unity 3D和Three.js。仿真建模工具用于钻井设计、油藏数值模拟以及生产动态分析,常用的工具既包括通用的有限元软件Abaqus、Comsol,也包括CMG、Eclipse等专业油藏数值模拟软件。数据建模工具用于建立数据驱动模型,例如机器学习和深度学习模型,常见的工具包括Python、TensorFlow、PyTorch、本体及知识建模工具Protégé、计算机视觉工具OpenCV等。上述油气钻采数字孪生建模工具综合统计见图7。

3 油气钻采数字孪生应用案例分析

3.1 油气钻井数字孪生案例

本案例基于前述油气钻采数字孪生建模方法,以某海上平台钻井作业中的井壁稳定分析过程为例开展需求分析及功能定义;整合地质建模分析工具与编程手段^[96],构建了井壁稳定过程的数字孪生模型,具体的建模流程见图8。

油气钻井主要需求可以分为安全钻井、高效钻井、透明钻井与绿色钻井(图8步骤①)。以安全钻井与透明钻井为例,根据需求进行拆分,得到安全预警、数字井筒可视化等需具备的功能;进而根据功能选配所需模型,包含孔隙压力模型、地应力模型与三维可视化模型等。

在模型建立步骤中,按照地质模型、几何模型、

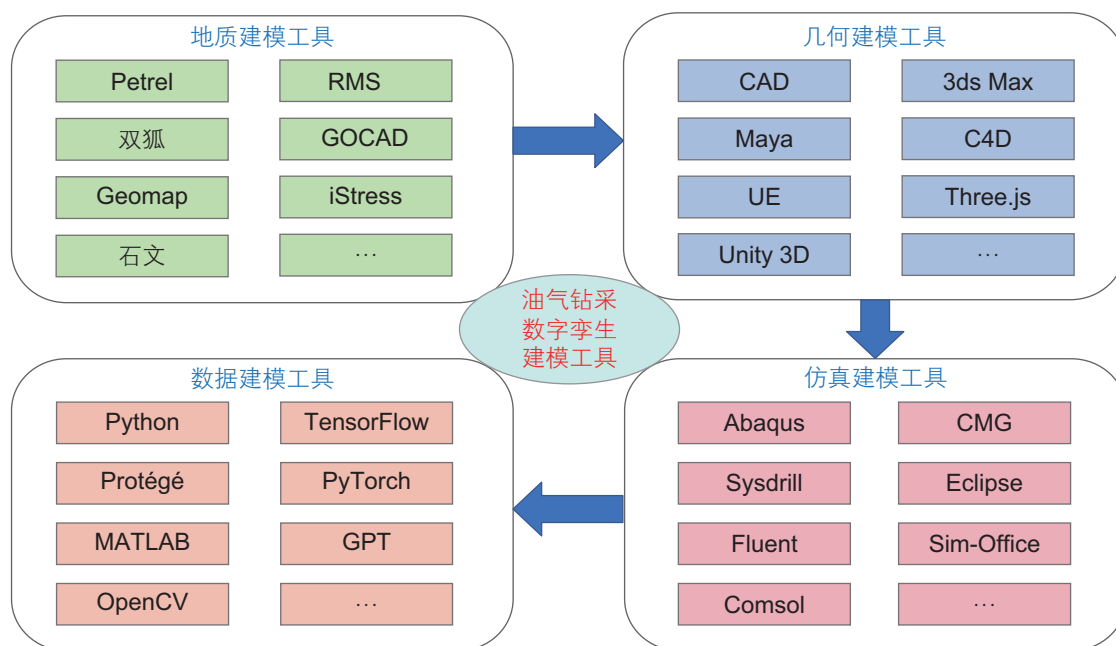


图7 油气钻采数字孪生建模工具

Fig. 7 Oil and gas drilling and production digital twin assembly and fusion architecture

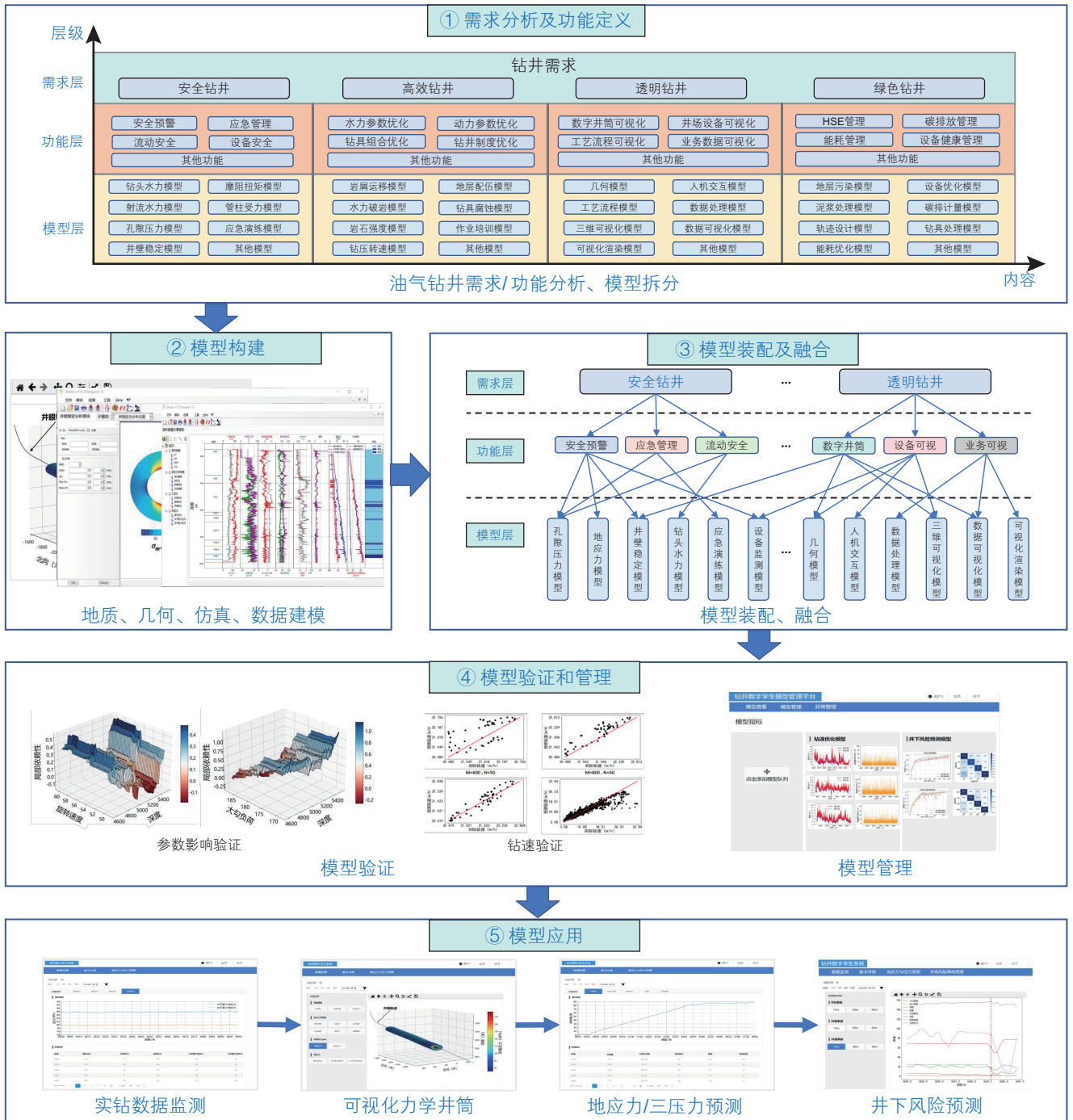


图 8 钻井井壁稳定数字孪生模型构建流程及应用案例

Fig. 8 Construction process and application cases of drilling borehole stability digital twin model

仿真模型和数据模型的顺序逐步构建所需的子模型。本案例中地质模型使用地质力学分析平台搭建^[96], 几何模型采用CAD, 仿真模型使用井壁稳定力学分析计算引擎^[96], 数据模型使用Python与TensorFlow, 根据需求分析步骤中定义的数字孪生功能, 将所需模型进行融合, 见图8步骤③。以数字井筒可视化功能为例, 需要融合孔隙压力模型、地应力模型和三维可视化模型来实现相应的功能。在模型验证方面, 通过录井实

测的钻速以及钻压、大钩载荷等参数对钻速的影响规律校准模型, 使所建立的数字孪生模型满足工程需求。在模型管理方面, 采用MySQL数据库存储每个子模型的关键信息, 例如模型的属性信息、装配及融合信息、关键参数、模型版本、模型文件路径等; 通过操作数据库实现数字孪生模型的“增删改查”。

在模型应用环节, 应用JavaScript编程工具, 根据现场工程需求开发了钻井井壁稳定数字孪生应用平台,

包括监控实钻数据的“实钻数据监测”模块、满足透明钻井需求的“可视化力学井筒”模块，保证安全钻井的“地应力及地层压力预测”以及“井下风险预测”模块。综上，本案例从油气钻井中井壁稳定的角度展示了所提数字孪生模型构建方法的实施流程。

3.2 油气开采数字孪生案例

基于所提的油气钻采数字孪生建模方法，以某海上气田生产系统为例，分析需求及定义功能，构建海上气田生产系统的数字孪生模型，建模步骤见图9。

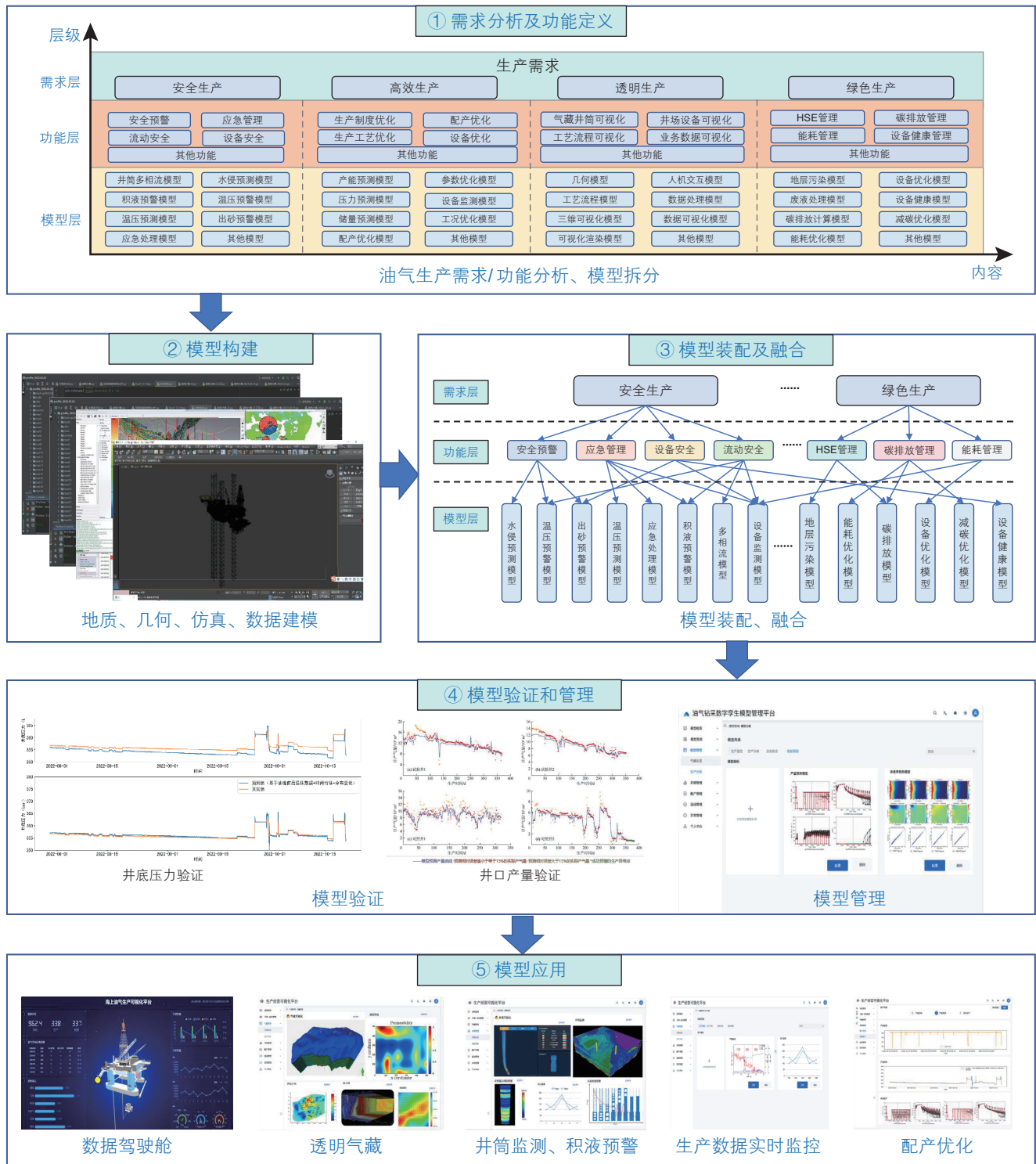


图9 海上气田生产系统数字孪生模型构建流程及应用案例

Fig. 9 Construction process and application cases of digital twin model of offshore gas field production system

首先,在需求分析方面,海上气田的生产需求主要包括安全生产、高效生产、透明生产以及绿色生产(图9步骤①)。将这些需求拆分并定义满足这些需求的数字孪生模型需具备的功能,如气藏可视化、安全预警、配产优化等。接着,根据这些功能定义数字孪生模型,如井筒多相流模型、产量预测模型、配产优化模型等。

在模型建立方面,使用多种建模工具,按照地质模型、几何模型、仿真模型和数据模型的顺序逐步建立相应的子模型。其中,地质模型使用Petrel,几何模型采用CAD、3ds Max和Three.js,仿真模型使用Eclipse、Comsol和MATLAB,数据模型应用Python、PyTorch。在模型装配和融合方面,根据上一步定义的数字孪生功能,将所需的所有子模型组装,见图9步骤③。例如,针对设备健康管理的功能,需要将设备监测模型、设备健康评价模型和设备参数优化模型等多个子模型融合来实现。在本案例中,子模型的组装和融合主要利用标准API实现不同模型之间的数据交互。在模型组装和融合过程中,子模型可以被重复利用。在模型验证和管理方面,利用传感器测量得到的压力、温度、产量等生产数据验证上述子模型。当平均相对误差小于10%时,认为子模型的准确度较高,达到了工程需求。使用MySQL数据库存储每个子模型的关键信息,例如模型的属性信息、关键参数、模型版本、模型文件的路径等;通过操作数据库实现数字孪生模型的“增删改查”。

最后,在模型应用方面,应用JavaScript编程工具,根据现场工程需求开发海上油气生产系统数字孪生平台界面,包括展示整体开发指标的“数据驾驶舱”模块、满足透明生产需求的“透明气藏”和“生产数据实时监控”模块,保证安全生产的“积液预警”模块以及实现高效生产的“配产优化”模块。综上,本案例从油气藏开采的角度展示了所提数字孪生模型构建方法的实施流程。

4 油气钻采数字孪生的问题与挑战

类似制造业的数字化进程,油气钻采各场景的数字孪生势必会带来业务系统的整体优化和工程决策效率与决策科学程度的提升。然而,尽管我国油气企业的信息化建设已经完成,目前距离全面数字化还存在明显差距;油气行业的智慧化技术尚处于探索阶段,具备显著效果的落地化场景仍然稀少^[97]。此种业态给油气钻采领域的数字孪生建模造成3个独特的问题,

并带来3个应用的挑战。

第一个问题在于油气钻采多源异构数据的选择与融合。钻采过程的多源设备和传感器产生大量不同格式和结构的数据,数据质量参差不齐,采样频率不一,采集效率有高有低。针对于此,需要开展冗长的数据清洗、筛选和预处理工作。其次,选择何类数据进入数字孪生模型亦是尚未完全解决的难题,需要开展特征工程的分析。最后,数据标准因企业甚至工程项目而异,多源异构数据的融合与治理亟待解决。第二个问题为子模型的定义问题。工业数字孪生需要集成数字支撑技术、数字线程技术、数字孪生体技术和人机交互技术,涵盖与之关联的软、硬件的耦合使用。因此,首先需要明确业务需求,确定具体功能点,再以此定义构成最终孪生系统的子模型(见图4)。针对钻采工程而言,目前并无具体且通用的定义方法与流程;此外,井口/井下数据的采集与传输,复杂目标系统(油气藏及钻采设备)下的数据驱动与物理模型的融合,钻采全生命周期的数据管理,都会造成子模型的定义不清,与其边界的划分困难。第三个问题在于钻采数字孪生模型的验证。与制造业或建筑业不同,油气钻采的显著特征为其工程活动大部分位于地下,井下恶劣工况导致无法搜集光学视频或图像,“看不见、摸不着”特征显著,所有的感知能力来自于各种井下电测仪器与传感器。尽管数字孪生的价值可通过效率或产量的提高来体现,但其模型的准确度和可靠性仅能通过有限类别的少量监测数据来界定,模型验证常以间接与定性的方式为主。以上为目前研发及部署钻采数字孪生模型亟需攻关的技术难题。

同时,油气钻采数字孪生的应用还面临3个长期存在的挑战。首先,虽然开采中的生产设施设备是较为稳定的系统,其物理化学机理和过程的刻画较为清晰;钻井和开采中的动态过程(如破岩、水力压裂)是瞬态的动力学过程,涉及多尺度、多物理场的耦合,而这些物理场迄今仍旧难以通过数学公式来清晰刻画,因此无法实现完全的数字孪生。其次,多部门、多任务协同是数字孪生高效应用于钻采现场的必要前提。目前油气企业负责数字化业务的研发、实施与管理的部门相对独立,与业务执行部门之间持续的多目标、多任务协同配合一直是管理上的痛点,需要企业在整体管理架构上完成数字化转型。最后,数字孪生的实现不仅需要一套集成的软件工具和三维可视化展现形式,还需数字化采集及控制硬件的支撑。如前所述(见图7),架构底层的钻采数字孪生建模的软件工具和三维可视化软件大多被国外IT公司垄断;同时,一些关

键的传感器(如高温高压条件下的压力计和流量计)和自动控制设备(如安装有AI芯片的执行器、可变油嘴、智能钻杆)亦多由国外油气服务公司提供。在国际环境日趋复杂的今天,如何寻找国产化替代,研发适合我国数字化、智能化井场建设的开发与实施的软硬件,成为推进钻采数字孪生应用的一大挑战。

5 结论与建议

本文针对油气行业上游的两大主要工程业务板块——钻井和开采,调研并分析了其数字孪生应用的现状;在此基础上,提出了钻采数字孪生建模方法,给出了流程,剖析了拆分、装配与融合策略。基于该方法,本文针对钻井和开采各提出一个应用案例,由此阐明该方法的应用场景。得到的主要结论如下。

(1)目前油气钻采数字孪生的应用仍属于探索阶段。国内相关的孪生案例多数停留在可视化的阶段,鲜有专业分析与决策的融合;国际知名油气公司也仅在可视化阶段上略微增加了初步的运营功能。整体而言,相较制造业,油气钻采领域的数字孪生仍处于较低成熟度的水平。

(2)油气钻采此种涉及多学科交叉且动态演化的复杂系统工程,建模的关键在于模型管理,沿着子模型、功能、需求3个层级开展拆分、装配与融合动作,最终组装成满足工程需求且能部署应用的数字孪生平台,期间还涉及多源数据的采集和多种工具软件的使用。通过此建模方法,分析了井壁稳定相关的数字井筒和

海上生产的数字孪生系统两个实施案例,充分说明了该数字孪生建模方法在钻井和开采领域的可行性与实用性。

(3)由于油气钻采的工程独特性,其存在数据融合、子模型定义和孪生模型验证3个突出的技术问题,亦带来多尺度多物理场难以刻画、多部门多任务协同困难、建模及实施的软硬件工具自主化程度低的3个挑战。

因此,建议数据管理部门加强钻采工程的数据治理,实现物理数据和虚拟数据的深度融合。同时,建议数字化部门(如科技信息部)牵头多个具体的研发与业务部门(如钻采研究院、钻井/生产作业中心),组织实施钻采数字孪生的信息化建设项目,通过项目探索并更新迭代数字孪生开发的应用场景、技术方案和管理模式,形成标准化的模型架构、建模流程与管理方案。最后,亟待国内大型软件公司加大基础数字孪生建模软件的研发投入,打造贯通数字孪生全业务链条的国产化软件,保障我国能源钻采的自主、安全和高效。

致谢

本文研究工作得到国家自然科学基金项目(42277122)的支持。研究工作还得到中海油能源发展股份有限公司的钻井工程师、中海石油(中国)有限公司海南分公司的开发生产工程师的指导,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 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 F,LIU W R,LIU J H,et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2018, 24(1): 1-18.]
- [2] TAO F, CHENG JF, QI QL, et al. Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data[J]. International Journal of Manufacturing Technology, 2018, 94: 3563-3576.
- [3] TAO F, ZHANG H, LIU A, et al. Digital twin in industry: State-of-the-art[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(4): 2405-2415.
- [4] FULLER A, FAN Z, DAY C, et al. Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research[J]. IEEE Access, 2020, 8: 108952-108971.
- [5] LIU MN, FANG SL, DONG HY, et al. Review of digital twin about concepts, technologies, and industrial applications[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2021, 58: 346-361.
- [6] VANDERHORN E, MAHADEVAN S. Digital twin: Generalization, characterization and implementation[J]. Decision Support Systems, 2021, 145: 113524.
- [7] YE ZJ, YE Y, ZHANG CP, et al. A digital twin approach for tunnel construction safety early warning and management[J]. Computers in Industry, 2023, 144: 103783.
- [8] GAO Y, LI H, XIONG G, et al. A IoT-informed digital twin communication for bridge maintenance[J]. Automation in Construction, 2023, 150: 104835.

- [9] PETRI I, REZGUI Y, GHOROGHI A, et al. Digital twins for performance management in the built environment[J]. *Journal of Industrial Information Integration*, 2023, 33: 100445.
- [10] LAI X, WANG S, GUO Z, et al. Designing a shape-performance integrated digital twin based on multiple models and dynamic data: A boom crane example[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2021, 143(7): 071703.
- [11] LAI X, HE X, WANG S, et al. Building a lightweight digital twin of a crane boom for structural safety monitoring based on a multifidelity surrogate model[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2022, 144(6): 064502.
- [12] 陈根. 数字孪生[M]. 北京: 电子工业出版社, 2020.3: 220. [CHEN G. Digital twin[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2020.3: 220.]
- [13] LAI X, YANG L, HE X, et al. Digital twin-based structural health monitoring by combining measurement and computational data: An aircraft wing example[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2023, 69: 76–90.
- [14] 张德发, 姚卫涛, 董智超, 等. “数字孪生”在油田地面油气站场中的应用和探索[J]. *油气田地面工程*, 2022, 41(03): 1–7. [ZHANG D F, YAO W T, DONG Z C, et al. Application and exploration of “Digital Twins” in oil and gas stations of oilfield surface system[J]. *Oil-Gas Field Surface Engineering*, 2022, 41(03): 1–7.]
- [15] 王金江, 王舒辉, 张来斌, 等. 基于数字孪生的压气站场设备风险智能决策系统[J]. *天然气工业*, 2021, 41(07): 115–123. [WANG J J, WANG S H, ZHANG L B, et al. Digital twin based intelligent risk decision-making system of compressor station equipment[J]. *Natural Gas Industry*, 2021, 41(07): 115–123.]
- [16] 王金江, 于昊天, 张凤丽, 等. 基于数字孪生的智慧油气站场设计与开发[J]. *油气储运*, 2022, 41(04): 391–396. [WANG J J, YU H T, ZHANG F L, et al. Design and development of intelligent oil and gas stations based on digital twin[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2022, 41(04): 391–396.]
- [17] SCHÄFER N C, BURGGRAF P, ADLON T. Application of a digital twin for proactive production planning[C]//SNAME Maritime Convention.
- [18] MIN Q, LU Y, LIU Z, et al. Machine learning based digital twin framework for production optimization in petrochemical industry[J]. *International Journal of Information Management*, 2019, 49: 502–519.
- [19] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2022, 28(5): 1267–1281. [TAO F, ZHANG C Y, QI Q L, et al. Digital twin maturity model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2022, 28(5): 1267–1281.]
- [20] ZHANG H, QI Q, TAO F. A multi-scale modeling method for digital twin shop-floor[J]. *Journal of Manufacturing Systems*, 2022, 62: 417–428.
- [21] KATSIKAS, SERAFEIM, MANDITSIOS, et al. Challenges to taking advantage of high frequency data analytics to address environmental challenges in maritime sector[C]//SNAME 8th International Symposium on Ship Operations, Management and Economics. Athens Greece, 2023.
- [22] FERRARA, PAOLO, RICCI M, et al. Virtual reality: New concepts for virtual drilling environment and well digital twin[C]//International Petroleum Technology Conference, Dhahran, 2020.
- [23] BURRAFATO, S., MALIAARDI, et al. Virtual reality in D & C: New approaches towards well digital twins[C]//the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, Ravenna, Italy, 2019.
- [24] 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(05): 49–52+55. [JIANG A G, WANG J J, GU M, et al. Application of the positive pressure fire shelter in offshore platform construction[J]. *Ship & Ocean Engineering*, 2019, 48(05): 49–52+55.]
- [25] PIVANO, LUCA, NGUYEN, et al. Digital Twin for drilling operations – Towards cloud-based operational planning[C]//Offshore Technology Conference, Houston, Texas, 2019.
- [26] 卢胜洋, 樊硕, 黄家伦, 等. 数字孪生在井队工程时效统计分析中的应用[J]. *电脑编程技巧与维护*, 2021, (03): 27–28. [LU S Y, FAN S, HUANG J L, et al. Application of digital twins to the statistical analysis of well team engineering timescales[J]. *Computer Programming Skills & Maintenance*, 2021, (03): 27–28.]
- [27] SAINI, GURTEJ, ASHOK, et al. Accelerating well construction using a digital twin demonstrated on unconventional well data in North America[C]//SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2018.
- [28] ZHANG, JIAWEI, HUANG, et al. Application of digital twin for real-time early identification and warning of pipe stuck using hybrid approach of physics model and machine learning[C]//ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [29] AITALI R, AREVALO, et al. Hybrid data driven intelligent algorithm for stuck pipe prevention[C]//ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [30] THORESEN, KARL E, KYLLINGSTAD, et al. Using an advanced digital twin to improve downhole pressure control[C]//SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, The Hague, The Netherlands, 2019.
- [31] AREVALO, PEDRO, BECKER, et al. Transient modeling of tripping operations enables closed-loop limit control of tripping processes to reduce ILT while maintaining wellbore safety[C]//SPE/IADC International Drilling Conference and Exhibition, Stavanger, Norway, 2023.

- [32] KARPOV, R., KOJADINOVIC, et al. Live digital twin improving drilling performance and providing foundation for the realtime data quality control[C]//ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [33] KARPOV, ROMAN B, ZUBKOV, et al. Drilling performance and data quality control with live digital twin[C]//SPE Russian Petroleum Technology Conference, Virtual, 2021.
- [34] DANNENHAUER, CRISTIANO E, BASTOS B, et al. Real-time physical models with learning feedback as a digital twin architecture[C]//Offshore Technology Conference, Houston, Texas, USA, 2020.
- [35] ROMMETVEIT, ROLV, BJØRKEVOLL, et al. Drilling: A system for real-time drilling simulation, 3D visualization, and control[C]//Digital Energy Conference and Exhibition, Houston, Texas, U. S. A., 2007.
- [36] NADHAN, DEREK, MAYANI, et al. Drilling with digital twins[C]//IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference and Exhibition, Bangkok, Thailand, 2018.
- [37] GHOLAMI M, MARYAM, ROMMETVEIT, et al. Drilling automated realtime monitoring using digital twin[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2018.
- [38] ROMMETVEIT, ROLV, GHOLAMI M, et al. Automatic realtime monitoring of drilling using digital twin technologies enhance safety and reduce costs[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2019.
- [39] MAYANI, MARYAM G, BAYBOLOV, et al. Optimizing drilling wells and increasing the operation efficiency using digital twin technology[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, 2020.
- [40] ROMMETVEIT, ROLV, NABAVI, et al. Dynamic RT modelling and 3D visualization of critical safety parameters on drillfloor during drilling, running liners & screens and cementing of challenging offshore wells[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, 2020.
- [41] SHI, JIBIN, DOURTHE, et al. Real-time reamer vibration predicting, monitoring, and decision-making using hybrid modeling and a process digital twin[C]//IADC/SPE International Drilling Conference and Exhibition, Galveston, Texas, USA, 2022.
- [42] BIMASTIANTO, PAULINUS, KHAMBETE, et al. Digital twin implementation on current development drilling, benefits and way forward[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2020.
- [43] HALLIBURTON. Decision space 365 well construction[EB/OL]. [2023-10-30]. <https://www.halliburton.com/en/software/decision-space-365-enterprise/decisionspace-365-well-construction>.
- [44] GANDIKOTA R A, CHENNOUFI, et al. Drilling digital twin predicts drilling dysfunctions and performance in real time[C]//ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [45] 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 C S. Exploration for the application of digital twin technology in drilling engineering[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2022, 50(3): 10-16.]
- [46] 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 H L, YANG C S, LI C S, et al. Design and research practice of a drilling digital twin system[J]. Petroleum Drilling Techniques, 2023, 51(3): 58-65.]
- [47] 姜杰, 霍宇翔, 张颀曦, 等. 基于数字孪生的智能钻探服务平台架构[J]. 煤田地质与勘探, 2023, 51(09): 129-137. [JIANG J, HUO Y X, ZHANG H X, et al. Architecture of intelligent service platform for drilling based on digital twin[J]. Coal Geology & Exploration, 2023, 51(9): 129-137.]
- [48] FAN, YU, GUO, et al. Digital drilling in holographic world[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, Abu Dhabi, UAE, 2021.
- [49] WANG, XUE Q, ZHU, et al. Enhancing oil field management: The digital wellsite advantages[C]//ADIPEC, Abu Dhabi, UAE, 2023.
- [50] 于永志. 数字孪生油田注水系统可视化平台的设计与研究[D]. 黑龙江: 东北石油大学, 2023. [YU Y Z. Design and research of a digital twin oilfield water injection system visualisation platform[D]. Heilongjiang: Northeast Petroleum University, 2023.]
- [51] 迟化昌, 吴佳欢, 王和平, 等. 基于数字孪生的油田地面生产运行虚拟培训[C]//西安石油大学, 陕西省石油学会, 北京振威展览有限公司. 2023 国际石油石化技术会议论文集, 2023: 297-305. [CHI H C, WU J H, WANG H P, et al. Digital Twin-based virtual training for oilfield surface production operations[C]//Xi'an University of Petroleum, Shaanxi Petroleum Society, Beijing Zhenwei Exhibition Co. 2023 Proceedings of the International Petroleum and Petrochemical Technology Conference, 2023: 297-305.]
- [52] 刘立强, 孙文磊, 王一, 等. 基于Unity3D的油田抽油机三维可视化监控系统设计[J/OL]. 系统仿真学报, 2023-10-07: 1-13. [LIU L Q, SUN W L, WANG Y, et al. Design of 3D visualization monitoring system for oil field pumping unit based on unity3D[J/OL]. Journal of System Simulation, 2023-10-07: 1-13.]
- [53] WEI L, PU D, HUANG M, et al. Applications of digital twins to offshore oil/gas exploitation: From visualization to evaluation[J]. IFAC-PapersOnLine, 2020, 53(5): 738-743.
- [54] 陶飞, 张辰源, 戚庆林, 等. 数字孪生成熟度模型[J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28(05): 1267-1281. [TAO F, ZHANG C Y, QI Q L, et al. Digital twin maturity model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2022, 28(05): 1267-1281.]
- [55] ANDA I, MISHRA R, IRAM S, et al. A machine learning model for the development of a digital twin for a control valve for oil and gas pipelines[C]//2022 International Conference on Maintenance and Intelligent Asset Management (ICMIAM). IEEE, 2022: 1-6.

- [56] BHOWMIK S. Digital twin of subsea pipelines: Conceptual design integrating IoT, machine learning and data analytics[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2019: D011S010R004.
- [57] WEI W, QU H, CHENG J, et al. Digital twin and contact analysis of ultra-long distance coiled tubing operation structures[J]. Digital Twin, 2023, 3: 1.
- [58] 王文轶, 李臻, 魏文澜, 等. 连续油管作业的数字孪生及其下入性[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(23): 9918–9926. [WANG W Y, LI Z, WEI W L, et al. Digital twin of coiled tubing operation and its running performance[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(23): 9918–9926.]
- [59] FENG Q, ZHANG Y, SUN B, et al. Multi-level predictive maintenance of smart manufacturing systems driven by digital twin: A matheuristics approach[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2023, 68: 443–454.
- [60] VRABIE I, SPESIVTSEV P, KAIPOV Y, et al. Digital twin for downhole pressure gauges: model and field case study[C]//SPE Russian Petroleum Technology Conference. SPE, 2020: D023S012R002.
- [61] CARPENTER C. Digital-twin approach predicts fatigue damage of marine risers[J]. Journal of Petroleum Technology, 2021, 73(10): 65–66.
- [62] KHARAZMI E, WANG Z, FAN D, et al. From data to assessment models, demonstrated through a digital twin of marine risers[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2021: D031S035R003.
- [63] 武振宇. 无隔水管修井管柱的数字孪生框架与作业安全研究[D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2023. [WU Z Y. Research on digital twin frame and operation safety of riserless workover strin[D]. Beijing: China University of Petroleum-Beijing, 2023.]
- [64] VOROBEV I, KOSHKIN T, PROKOPEV M, et al. Digital twin application for boosting oil production, predictive analytics of asset integrity and mid-term forecasting of field performance[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, 2022: D021S065R001.
- [65] SINDI W. Developing a digital twin for offshore wells using physics-rooted models[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2023: D011S005R006.
- [66] MURRAY P, WATTIS Z, BAIN B, et al. Towards a digital twin supporting risk based decision making for offshore installations[C]//SPE Offshore Europe Conference and Exhibition. SPE, 2019: D011S001R004.
- [67] LASTRA R. Electrical submersible pump digital twin, the missing link for successful condition monitoring and failure prediction[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference. OnePetro, 2019.
- [68] PASHALI A A, KOLONSKIKH A V, KHALFIN R S, et al. A digital twin of well as a tool of digitalization of bringing the well on to stable production in Bashneft PJSOC (Russian)[J]. Oil Industry Journal, 2021, 2021(03): 80–84.
- [69] REN S S, SHEN F, ZHANG X Y, et al. Digital twin of beam pumping unit control and analysis[C]//Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 2021, 1894(1): 012031.
- [70] LAI WENHUA, ZHANG HU, JIANG DAWEI, et al. Digital twin and big data technologies benefit oilfield management[C]//ADIPEC. OnePetro, 2022.
- [71] VIEIRA D S M, MENEZES D R R, ALVES D O L, et al. Development of digital twin for production and well integrity[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition. SPE, 2022: D011S002R002.
- [72] BØHN A G. Integrating planning of maintenance and continuous production in an oil and gas production system by the use of digital twins[D]. NTNU, 2021.
- [73] OKHUIJSEN B. Combining the process and maintenance digital twin to create an autonomous production platform[C]//Offshore Technology Conference. OnePetro, 2022.
- [74] ALHUMAID S, AL K M, DAANYAL M, et al. Utilizing well digital twins to optimize offshore nitrogen lift operations[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2023: D011S006R003.
- [75] SHEN F, REN S S, ZHANG X Y, et al. A digital twin-based approach for optimization and prediction of oil and gas production[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021: 1–8.
- [76] 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 W L, HAN D K. 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.]
- [77] CHEVERDA V, LISITSA V, PROTASOV M, et al. Digital twins of hydrocarbon reservoir[C]//International Conference on Computational Science and Its Applications. Cham: Springer International Publishing, 2021: 675–688.
- [78] ZHANG T, LI Y, CAI J, et al. A digital twin for unconventional reservoirs: A multiscale modeling and algorithm to investigate complex mechanisms[J]. Geofluids, 2020, 2020: 1–12.
- [79] ZHANG T, SUN S. An exploratory multi-scale framework to reservoir digital twin[J]. Advances in Geo-Energy Research, 2021: 352–363.
- [80] RESHETOVA G, CHEVERDA V, LISITSA V. Digital twins of geological objects: Development and use[C]//International Conference

- on Parallel Computational Technologies. Cham: Springer International Publishing, 2021: 300–311.
- [81] KONGSBERG, KOGNITWIN. 2021. Kognitwin, <https://www.kongsberg.com/digital/solutions/kognitwin-energy> (accessed 2 July 2021).
- [82] WHALEY J. A bridge between two worlds[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2020.
- [83] FEDER J. Will this be the decade of full digital twins for well construction?[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2021, 73(03): 34–37.
- [84] CARPENTER C. Johan sverdrup’s digital operations drive efficiency, safety[J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2020, 72(09): 67–68.
- [85] LARSEN P F, TØNNESEN T, SCHUCHERT F, et al. Johan sverdrup: The digital flagship[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2020: D041S046R005.
- [86] SINGH M, SRIVASTAVA R, FUENMAYOR E, et al. Applications of digital twin across industries: A review[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(11): 5727.
- [87] ZBOROWSKI M. Finding meaning, application for the much-discussed “Digital Twin” [J]. *Journal of Petroleum Technology*, 2018, 70(06): 26–32.
- [88] BREWER T, KNIGHT D, NOIRAY G, et al. Digital twin technology in the field reclaims offshore resources[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2019: D011S004R003.
- [89] MARTÍN R F, WALTHER D, EISINGER S, et al. Revisiting ontologies of units of measure for harmonising quantity values—A use case[C]//The Semantic Web—ISWC 2020: 19th International Semantic Web Conference, Athens, Greece, November 2–6, 2020, Proceedings, Part II 19. Springer International Publishing, 2020: 551–567.
- [90] OKHUIJSEN B, WADE K. Real-time production optimization-applying a digital twin model to optimize the entire upstream value chain[C]//Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference. SPE, 2019: D011S012R002.
- [91] GRANGE E L. A roadmap for adopting a digital lifecycle approach to offshore oil and gas production[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2018: D011S011R006.
- [92] ZHOU M, LI T, ESPELAND M, et al. Digital twin provides virtual multiphase flow metering and leak detection to deepwater operations for operational decision making on Liwan Field[C]//Offshore Technology Conference. OTC, 2023: D031S042R005.
- [93] 国际石油网. 中国海油数字化技术新成果, 助推国产工业软件实现新突破 [EB/OL]. (2023-08-05)[2023-10-13]. <https://oil.in-en.com/html/oil-2957216.shtml> [International Petroleum Network. New achievements in digitization technology of China National Offshore Oil (CNOOC) help domestic industrial software achieve new breakthroughs [EB/OL]. (2023-08-05)[2023-10-13]. <https://oil.in-en.com/html/oil-2957216.shtml>]
- [94] 陶飞, 张贺, 戚庆林, 等. 数字孪生模型构建理论及应用[J]. *计算机集成制造系统*, 2021, 27(01): 1–15. [TAO F, ZHANG H, QI Q L, et al. Theory of digital twin modeling and its application[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2021, 27(01): 1–15.]
- [95] LUO W, HU T, ZHANG C, et al. Digital twin for CNC machine tool: Modeling and using strategy[J]. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 2019, 10: 1129–1140.
- [96] Stress. Manual for determining the minimum horizontal stress following the G function method[C]. China, HNSH Corp, 2021, Chengdu.
- [97] 林伯韬, 郑海妍. 智慧金融技术在油气行业的应用[J]. *石油科学通报*, 2023, 8(2): 222–233. [LIN B T, ZHENG H Y. Application of intelligent finance technology in the oil and gas industry[J]. *Petroleum Science Bulletin*, 2023, 8(2): 222–233.]

(责任编辑 陈勉 编辑 马桂霞)