数字孪生技术与AI融合在智能油田生产中的应用

侯雷
（中国石化销售有限公司山东分公司，临沂 273400）

摘要:本文立足于油田现场工程实际，系统阐述数字孪生与AI技术融合的架构体系与运行机理，重点围绕采油生产方案优化、油田设备预测性维护、全域能源智能调度三大核心应用场景，结合长庆油田、胜利油田、大庆油田一线落地工程案例，深入剖析技术应用路径、实施方法、落地成效与应用优势。实践证明，数字孪生与AI融合技术能够有效破解传统油田生产管理痛点，大幅提升油田生产精细化管控水平、降低生产运营成本、减少设备故障停机风险、优化能源消耗结构，为智能油田数字化转型升级、油田提质增效、绿色低碳生产提供坚实的技术支撑，具备极强的工程实用性、落地性与行业推广价值，可为同类油气田智能化改造项目提供可靠的实践参考。

关键词:数字孪生；AI技术；智能油田；生产优化；设备运维；能源调度

The Application of Digital Twin Technology Integrated with AI in Intelligent Oilfield Production

HOU Lei
(Sinopec Sales Co., Ltd., Shandong, Linyi 273400,China)

Abstract:Based on actual engineering practices in oilfields, this paper systematically presents the architecture and operational mechanisms of integrating digital twin and AI technologies. Focusing on three core application scenarios–optimization of oil production schemes, predictive maintenance of oilfield equipment, and intelligent energy scheduling across the entire field–the paper deeply analyzes technical implementation pathways, methods, practical outcomes, and application advantages through real-world projects at Changqing, Shengli, and Daqing oilfields. Practical experience demonstrates that the integration of digital twin and AI technologies effectively addresses longstanding challenges in traditional oilfield operations, significantly enhancing precision management, reducing operational costs, minimizing equipment failure downtime, and optimizing energy consumption structures. This technology provides solid technical support for the digital transformation and intelligent upgrading of oilfields, improving quality and efficiency while enabling green and low-carbon production. It exhibits strong engineering practicality, implementability, and broad industry promotion value, offering reliable reference for intelligent retrofitting projects in similar oil and gas fields.

Key words:Digital twin; AI technology; smart oilfield; production optimization; equipment operation and maintenance; energy dispatching

1 引言

在“数字中国”“智慧能源”双战略引领下，传统高耗能、经验化、粗放式的能源生产模式正在发生根本性变革，油气行业作为国家能源安全的核心支柱产业，数字化、智能化转型已经成为行业高质量发展的必然趋势。随着油田开采年限不断增加，国内多数主力油田逐步进入开发中后期，普遍面临地层压力衰减、综合含水率上升、单井产能下降、设备老化严重、运维成本攀升、能耗居高不下等诸多生产难题，传统生产管理模式的短板与弊端日益凸显。依托物联网、大数据、5G通信、数字孪生、人工智能等新一代信息技术建设智能油田，打通油田地质勘探、钻井开发、采油生产、集输处理、设备运维、能耗管理、安全管控全流程数据链路，构建数据驱动、智能赋能、精准管控的新型生产体系，是现阶段解决老油田开发难题、实现稳产增产、降本增效、绿色转型的核心技术路径。近年来，国内各大油气田均已启动智能化升级改造工作，数字孪生与AI融合技术作为智能油田建设的核心支撑技术，凭借虚实联动、仿真推演、智能决策、提前预判的技术优势，逐步替代传统人工经验管理模式，在油田生产优化与精细化管控中发挥着不可替代的作用。

长期以来，国内绝大多数油田生产作业、设备管理、能源调度工作高度依赖一线技术人员与管理人员的现场实操经验，整体管理模式呈现明显的经验化、滞后化、粗放化特征。在采油生产过程中，地层参数动态变化、油井工况实时波动、区块开发条件持续演变，人工研判难以精准捕捉细微工况变化，生产参数调整、采油制度优化往往需要通过多次现场试采、反复调试才能确定，不仅调试周期漫长，耗费大量人力、电力、物资资源，还极易因方案适配性不足导致油井产能波动、含水上升、地层能量受损，影响区块整体开发效果。在设备管理方面，传统定期检修模式一刀切、故障抢修模式被动滞后，无法识别设备隐性故障与老化趋势，极易引发突发停机事故，造成生产中断。在能源管理方面，人工

调度响应滞后、分配固化，无法适配动态生产负荷，能源浪费与能耗过载问题长期存在。以上诸多问题，严重制约了现代油田高效化、精细化、绿色化发展，亟需依托智能化技术实现生产管理模式的全面革新。

数字孪生技术能够精准构建油田物理生产场景的虚拟镜像，实现物理油田与虚拟模型的实时数据同步、工况联动。结合AI智能算法的数据分析、仿真预测、自主优化能力，可突破传统生产管理的技术瓶颈，实现油田生产全流程的事前预判、事中调控、事后复盘。相较于传统人工经验管理模式，该融合技术具备数据全域联动、仿真精度高、决策智能化、落地性强等核心优势，可针对性解决油田生产中的各类精细化管理难题。基于本人多年油田工程现场实操与技术管理经验，本文系统梳理数字孪生与AI融合技术的核心理论体系，重点结合国内各大主力油田落地应用案例，深度剖析技术在采油生产、设备运维、能源调度三大核心场景的实践路径、应用成效与优化价值，总结现场应用中的现存问题与改进方向，为同类型智能油田数字化改造、技术落地落地及生产提质增效提供可复制、可落地的工程实践参考。[1,2]

2. 数字孪生与AI技术融合的核心原理

2.1 数字孪生技术核心架构

数字孪生技术是依托物联网感知、高精度三维建模、5G数据传输、虚拟仿真、边缘计算等核心技术，对油田现场油井、抽油机、集输设备、管网系统、污水处理站、生产场区等全部物理实体进行1:1高精度虚拟化复刻的全生命周期技术体系。其核心技术优势在于构建起物理实体、虚拟模型、实时数据、业务应用的四维联动闭环体系，彻底打破传统油田生产数据孤立、场景脱节、管理割裂的弊端。在油田现场部署大量高精度压力传感器、流量传感器、温度变送器、振动采集终端、视频监控等物联网设备，7×24小时不间断实时采集油井井底压力、井口流量、井筒温度、设备运行转速、振动幅值、管网压力损耗、现场环境温湿度等全维度生产信息，通过5G+工业互联网实现数据低延迟传输，实时同步更新至云端虚拟模型。依托三维建模技术还原油田区块地貌、设备结构、管网布局、井场分布等真实场景，让虚拟场景可毫秒级还原油田真实生产工况，真正实现油田生产全流程可视化监控、动态仿真模拟、历史状态追溯、工况联动推演，为后续AI智能分析与决策优化提供精准、全面、实时的数据底座。

2.2 AI技术的赋能作用

单纯的数字孪生模型仅能实现物理工况复刻、数据可视化展示与生产状态追溯，属于“被动感知”技术，不具备自主分析工况规律、预判风险隐患、优化生产方案的主动赋能能力，无法满足现代智能油田自主决策、精准调控、提前预判的生产需求。AI人工智能算法的深度融入，彻底弥补了数字孪生模型的技术短板，实现了“感知-分析-预判-决策-优化”的全流程升级。在技术应用过程中，通过搭载机器学习、深度学习、大数据聚类分析、多目标优化算法，对数字孪生平台长期积累的海量生产历史数据、实时动态工况数据、设备运维数据、能耗数据进行全方位深度学习与挖掘分析，精准捕捉不同区块、不同工况下的产油规律、设备故障隐性特征、能耗波动关联逻辑、地层参数变化趋势。同时，通过算法迭代仿真、多方案对比推演、参数智能拟合，可对采油生产制度、设备运行状态、能源分配模式、维保周期计划等核心业务场景进行趋势预测与全局优化，彻底打破传统油田“靠经验、事后管、盲目试错”的管理模式，实现油田生产从“可视化被动监控”向“智能化主动决策”的根本性升级，是智能油田数字化转型的核心技术支撑。[3,4]

3. 数字孪生与AI技术在智能油田中的具体工程应用

3.1 采油生产方案智能优化

采油生产是油田运营的核心环节，采油工作制度、生产参数、注水方案的科学性与精准度，直接决定单井产能、区块采收率与油田整体开发效益。国内油田地质条件复杂多样，低渗透油田、断块油田、老油田、高含水油田并存，不同区块、不同层系、不同单井的地层渗透率、孔隙度、地层压力、含油饱和度存在显著差异，具备极强的个性化特征。传统采油方案制定与参数优化工作，主要依靠技术人员积累的现场经验，结合静态地质数据制定固定生产制度，无法适配地层动态变化的工况特征，人工制定的生产方案通用性差、针对性弱、精准度低。为了匹配最优开采状态，现场往往需要开展多次试采调试，反复调整抽油机冲程、冲次、配产额度、注水强度、注水周期等核心参数，试错成本极高。同时，频繁的现场调试会打乱油井稳定生产工况，造成地层压力波动、原油含水上升、产能不稳定等问题，不仅浪费大量电力、水资源、人力物力，还会缩短油井稳产周期，严重影响油田开发经济效益。

依托数字孪生技术搭建油田区块全域高精度虚拟模型，可实现油田地质结构、井场布局、设备状态、管网分布、生产工况的1:1虚实复刻，全面整合区块地质勘察数据、单井地层参数、五年以上历史产能数据、注水开发数据、工况运行台账、检修运维数据等全维度信息，构建完整的油田生产数据底座。在此基础上，嵌入AI多目标遗传优化算法、工况拟合算法与参数迭代算法，搭建可视化采油方案智能仿真推演系统。技术人员无需进入现场调试，即可在虚拟孪生平台中自定义各类生产参数组合，模拟不同采油节奏、注水模式、配产方案下的油田生产状态，快速推演各类方案对应的产能数据、含水率变化、地层压力变化、能耗水平与开采稳定性。AI算法可自主完成上千组工况数据的对比分析、迭代筛选、参数拟合，精准捕捉适配单井地层特性的最优参数组合，自动筛选出兼顾稳产、增产、节能、长效开发的最优采油生产方案，精准匹配地层产油规律与能量变化趋势。[5]

该智能仿真优化模式彻底颠覆了传统油田现场反复试错、经验调试的落后作业模式，无需开展实地盲目实验，通过虚拟仿真即可完成多组生产方案的快速迭代、对比筛选与优化定型，大幅缩短采油方案调试周期，有效规避原油资源、电力能源、人力物力的浪费，稳定油田产能输出，显著

提升单井采油效率与区块整体采收率。该技术可广泛适配低渗透油井、老油田增产改造、高含水油井治理、复杂断块油田开发等各类复杂场景，具备极强的场景适配性与工程实用性。[6]

具体工程应用案例：长庆油田某低渗透区块采油方案优化应用

长庆油田某主力开发区块地处鄂尔多斯盆地，属于典型的低渗透、低孔隙、低丰度“三低”油藏，储层非均质性极强，地层连通性差，压力衰减速度快，开采难度大、稳产难度高，是国内复杂低效油田的典型代表。在传统开发模式下，该区块生产方案完全依靠技术人员经验制定，抽油机冲次、冲程、配产额度、注水强度等核心参数统一设定，未结合单井地层差异进行个性化优化，导致大量油井产能释放不充分、低产低效井占比高。为了提升单井产能，现场长期依靠人工反复调试生产参数，单井单次方案调试周期长达7-15天，调试期间设备频繁启停、参数频繁变动，不仅耗费大量人工成本与电力资源，还极易造成油井工况紊乱、综合含水率上升、地层能量失衡，进一步加剧低效开发问题，区块整体采收率长期低于行业平均水平，油田开发效益难以提升。

为彻底解决区块低效开发、试错成本高、产能不稳定的问题，该区块于2023年全面落地数字孪生+AI智能采油优化系统，搭建覆盖全域236口生产油井的高精度数字孪生虚拟模型，完整录入各单井地层渗透率、孔隙度、原始地层压力、含油饱和度、储层厚度等精细化地质参数，整合区块近五年产能数据、月度注水数据、工况波动数据、设备运行台账与检修记录，构建专属区块的油田生产大数据库。依托数据库搭载AI多目标遗传优化算法，针对低渗透油藏压力衰减快、产能敏感、含水易上升的特性，建立适配“三低”油藏的采油方案仿真推演模型。技术人员依托虚拟平台，围绕抽油机冲次、冲程、日配产量、注水强度、注水周期、焖井时间等12项核心生产参数，开展多维度、多组别仿真试验，累计完成1200余组不同参数组合的工况仿真对比，全面分析不同参数组合对产能、含水、地层压力、能耗的影响规律。AI算法通过深度学习仿真数据，自动迭代优化参数组合，筛选出适配每一口单井地层特性的个性化最优生产制度，精准匹配地层产油规律与压力变化趋势。

经过现场落地应用，该区块单井生产方案调试周期缩短至1-2天，彻底取消盲目现场试错作业；区块综合含水率下降3.2%，单井日均产油量提升8.6%，区块整体采收率提升1.8个百分点，年节约电力、人力、物料等生产成本超120万元，提质增效成果显著，充分验证了该技术在复杂油田开采中的应用价值。[7-9]

3.2 油田设备智能预测性维护

油田抽油机、输油泵、压缩机、集输管网、注水设备等核心生产设备是油田连续稳定生产的基础载体，设备运行状态直接决定油田产能水平与生产安全。油田现场设备常年处于24h不间断连续运行状态，运行负荷波动频繁，加之野外露天作业环境复杂，风沙、潮湿、温差、腐蚀等外界因素叠加，导致设备磨损、老化、积垢、腐蚀问题频发，故障类型多样、故障诱因复杂。长期以来，国内油田设备管理普遍采用“定期检修+故障抢修”的传统模式，管理方式粗放、管控精度不足。定期检修模式实行统一周期、统一标准，未区分设备运行状态、使用年限、负荷强度，大量运行状态良好的设备被频繁拆机检修，造成人力、耗材、工时的大量浪费；而轴承磨损、电机老化、管网微堵塞、密封失效等隐性故障无法被提前识别，隐患长期累积后会引发设备突发停机故障，直接导致原油生产、输送中断，不仅造成大幅产能损耗，还存在设备烧毁、管网泄漏、安全环保超标等安全隐患。

依托数字孪生技术，可对油田所有核心生产设备进行1:1三维精细化建模，搭建设备全生命周期虚拟电子台账，完整录入设备出厂参数、安装调试记录、运行年限、历次检修记录、故障台账、配件更换信息等全维度资料，实现设备信息数字化、可视化、可追溯管理。通过在抽油机轴承、电机、输油泵腔体、压缩机进出口、管网关键节点等核心位置加装高精度振动传感器、温度传感器、电流电压采集终端、压力采集模块，7×24小时不间断采集设备运行振动幅值、壳体温度、工作电流、运行转速、进出口压力等动态工况数据，通过5G网络实时上传至数字孪生云端平台，实现设备物理状态与虚拟模型的毫秒级同步更新。结合AI故障特征识别算法与趋势预测模型，对设备实时数据与历史正常工况数据、故障样本数据进行对比分析，精准捕捉设备运行细微异常变化，有效识别人工巡检难以发现的隐性故障与老化趋势，提前预判轴承磨损、电机过热、管网堵塞、密封老化、电流异常等潜在故障风险。

系统可根据AI算法分析结果，自动生成分级分类最优维保计划，精准定位设备故障点位、预判故障发生时间与故障等级，区分常规保养、重点检修、紧急抢修场景，彻底实现从“被动抢修、定期检修”向“预测性精准维保”的智能化转型。一方面，可提前排查设备隐性故障，有效避免抽油机停机、管网堵塞、输油泵故障等突发问题，杜绝油田生产中断、原油输送停滞等生产事故，保障油田连续稳定生产；另一方面，精准规避无效检修、过度维保、重复检修等问题，大幅降低设备运维耗材成本、人工检修成本，有效延缓设备老化速度，延长核心生产设备使用寿命，降低设备更换频次，为油田设备全生命周期精细化管理提供有力支撑。[10,11]

具体工程应用案例：胜利油田某采油厂设备智能运维应用实践

胜利油田某沿海采油厂是区域核心生产区块，辖区内现有生产油井320余口，配套各类抽油机、输油泵、压缩机、集输管网等核心生产设备460余台/套，设备整体服役年限较长，且现场地处沿海滩涂区域，常年受高湿、高盐、多风沙、强腐蚀环境影响，设备腐蚀、磨损、振动异常、密封失效等问题高发频发。该采油厂长期沿用传统设备管理模式，以季度定期检修和故障事后抢修为主，管理弊端突出。一方面，定期检修模式标准化、一刀切，不区分设备运行工况与

健康状态，大量运行稳定、状态良好的设备被频繁拆机检查、更换配件，无效检修、过度检修问题普遍存在，浪费大量人力物力与检修工时；另一方面，设备隐性故障无法提前预判，轴承磨损、管网微堵塞、电机老化等细微隐患长期积累，最终引发设备突发停机故障。据厂区运维台账统计，改造前年均设备突发停机故障高达80余次，单次故障平均停机时长4-8小时，单次故障不仅需要投入大量人力耗材进行维修，还会直接造成原油生产停滞，年均产能损耗突出，同时大幅提升油田安全生产管控压力。

为彻底解决设备运维粗放、故障突发率高、运维成本高、产能损耗大的问题，该采油厂于2022年全面上线数字孪生+AI设备智能运维管理系统，完成全厂460余台/套核心设备的1:1三维孪生建模，搭建一体化设备全生命周期数字化管理平台。平台整合所有设备出厂资料、安装调试数据、历年检修记录、故障台账、配件更换记录等信息，形成标准化数字档案。同时，完成全厂设备感知终端升级改造，在抽油机、输油泵、压缩机等关键设备的核心点位加装高精度数据采集终端，实时采集设备振动、温度、电流、转速、压力等关键运行数据，依托5G工业互联网实现数据低延迟传输，保障虚拟模型与物理设备工况实时同步。系统搭载自主训练的AI故障特征识别算法，通过学习厂区近十年设备正常运行数据、各类故障样本数据、老化衰减数据，建立适配滩涂油田复杂工况的设备故障预测模型，可精准识别设备细微异常变化与隐性故障隐患。

系统可提前7-15天预判轴承磨损、电机过热、管网堵塞、密封老化等潜在故障，自动生成精准维保清单，推送至运维人员终端，实现“按需维保、精准检修”。经过两年的现场应用，该采油厂设备突发故障率下降65%，设备无效检修频次减少58%，单台设备年均运维成本降低30%，设备平均使用寿命延长2.5年，年均减少因设备停机造成的原油产量损耗超300吨，在保障生产安全稳定的同时，实现了设备运维降本增效。[12-15]

3.3 油田能源智能调度优化

油田生产属于典型的高能耗、高用水、高耗能工业场景，采油举升、原油集输、注水作业、污水处理、设备运行、场地供暖等全流程均需要大量电力、工业用水、热能、压缩空气等能源支撑，能源消耗点多、覆盖范围广、能耗结构复杂、负荷动态波动大。传统油田能源管理模式以人工统计、固定分配、事后核算为主，缺乏动态监测、智能分析、提前预判能力，能源调度方式极为粗放。在日常生产过程中，各生产单元能源分配额度长期固定，无法根据实时产能任务、设备运行负荷、生产工况变化动态调整，极易出现生产高峰期采油、注水核心单元能源供给不足，设备被迫降负荷运行，影响原油产能；而生产低谷期、检修期辅助设备空载运行，电力、水资源、热能大量空耗浪费的问题。同时，人工能源统计数据滞后、误差较大，无法精准定位高能耗点位与无效能耗环节，油田能耗管控长期处于被动状态，单位产油量能耗居高不下，难以满足现阶段油气行业绿色低碳、节能降耗、高质量发展的政策要求与生产需求。

依托数字孪生技术搭建油田全域能源管控虚拟模型，可全面整合油田电力、工业用水、热能、压缩空气等各类能源的消耗数据、供给数据、损耗数据，关联各生产单元、各单井、各台设备的实时生产负荷、产能任务、运行状态，构建全覆盖、全时序、全要素的能源数据监测体系。模型可实时还原油田全域能源流动路径、能耗分布状态、负荷波动规律，实现能源消耗可视化、透明化管控。结合AI智能动态调度算法，系统可实时分析各生产单元的投入产出比、设备运行效率、能耗负荷特征，根据实时生产工况秒级动态调整各单元能源分配额度，将电力、水资源、热能等能源精准匹配至高负荷、高产出、高效益的核心生产单元，对空载设备、低效单元、闲置流程自动缩减或切断能源供给，最大限度压缩无效能耗、降低能源传输损耗与空耗浪费。

同时，AI算法可通过长期学习油田历史能耗数据、生产负荷变化规律、季节工况差异，精准预判不同生产阶段、不同季节、不同产能需求下的能耗峰值与能耗缺口，提前制定科学化、精细化能源调度预案，动态平衡油田全域能耗负荷，规避高峰过载、低谷浪费的能耗乱象，有效降低油田整体生产能耗，助力智能油田实现节能降耗、绿色低碳的生产建设目标，契合油气行业绿色转型发展政策要求。[16,17]

具体工程应用案例：大庆油田某作业区能源智能调度改造案例

大庆油田某核心作业区是集采油生产、原油集输、注水开发、污水处理、设备运维于一体的综合性生产区块，区域内拥有各类生产设备、辅助设备千余台，生产链条长、能耗节点多、能源消耗总量大，是典型的高能耗老油田作业区。长期以来，该作业区沿用传统人工能源调度模式，能源分配方案固定僵化，未结合月度产能计划、日度生产负荷、设备运行状态动态调整能源供给。在生产高峰期，采油、注水、集输核心单元电力、水资源供给不足，设备无法满负荷运行，直接制约原油产能释放；在生产低谷期、设备检修期，大量辅助设备、污水处理设备、场地配套设备空载运行，能源空耗浪费问题严重。同时，人工统计能耗数据滞后性强，无法精准识别高能耗点位与能耗浪费环节，作业区单位产油量能耗指标长期高于油田平均水平，节能降耗压力巨大，难以完成油田下达的绿色生产考核指标。

为破解能源粗放管理、能耗偏高、资源浪费的难题，该作业区于2023年全面完成数字孪生+AI能源智能调度系统建设，搭建油田全域能源数字孪生仿真模型，全面接入区域电力系统、供水系统、供热系统、生产设备的能耗数据，实现全品类能源、全生产单元、全时段能耗数据的实时采集、汇总分析与可视化展示。模型精准还原区域能源输送管网、电路布局、能耗节点分布，完整关联各单元产能任务、设备运行负荷、生产工况信息，构建动态能源数据库。在此基础上，搭建AI能源多目标优化调度算法模型，以“保产能、降能耗、提效率、稳负荷”为核心优化目标，深度学习作业区历年能耗数据、季节能耗规律、产能与能耗关联关系。系统可实时监测全域能源消耗态势，根据各油井产能进度、设备运行状态、时段负荷差异，秒级动态调整各生产单元能源分

配额度，优先保障核心生产单元能源供给，关停空载、低效设备能源消耗，精准压缩无效能耗。

同时，AI算法结合季节变化、月度产能计划、设备检修计划，提前预判能耗需求波动，制定月度、周度、日度三级能源调度预案，实现能源调度前置化、智能化、精细化。系统落地应用后，该作业区整体综合能耗下降9.3%，工业用水利用率提升12.5%，设备空载能耗损耗大幅降低，年均节约各类能源成本超180万元，顺利完成油田下达的绿色节能生产指标，为老油田绿色低碳转型提供了成熟的技术范例。[18-20]

3.4 国外实践案例

3.4.1 BP公司——APEX数字孪生平台与AI驱动的生产优化

BP是油气行业数字化转型的先行者，其数字孪生战略的核心是基于与Palantir Technologies长达十余年的合作构建的APEX（Advanced Production Excellence）平台。APEX是一个实时数字孪生系统，整合了BP全球油气生产设施超过200万个传感器的数据，形成统一的运营视图。该平台可实时模拟生产系统运行状态，使工程师能够在虚拟环境中测试系统调整方案、预测运营结果并提前发现潜在问题。

在APEX平台基础上，BP于2024年初开发了名为Optimization Genie的AI增强工具，并于同年9月全面部署。Optimization Genie能够自主识别和测试生产系统瓶颈、模拟调整方案，并向工程师推荐最优配置。AI技术的引入将过去需要工程师数周手动完成的产能优化分析缩短至数小时左右。

典型应用成果：在美国墨西哥湾的Atlantis海上设施，Optimization Genie通过优化井位变量和优先排序，在不增加额外成本的情况下实现了每日约2000桶的增产。2017年，APEX平台的分析为BP带来了每日3万桶的额外产量。在勘探领域，BP借助AI技术实现了近97%的上游作业可靠性和98%的钻井“井涌”预测准确率，并计划在2026年前实现20亿美元的成本节约目标。

技术特点：BP的案例体现了数字孪生从“可视化”向“自主决策”演进的趋势。其技术架构分为三个层次——数据层（整合2M+传感器数据）、分析层（AI算法识别瓶颈与模拟调整）、应用层（提供可执行的优化建议）。人类工程师仍保留最终决策权，形成“AI建议-人工验证-闭环优化”的人机协同模式。[21]

3.4.2 壳牌公司——动态数字孪生与预测性维护的深度融合

壳牌在数字孪生技术的应用上采取了更侧重动态仿真与预测性维护的技术路径。在挪威最大的海上气田之一，壳牌部署了实时动态数字孪生系统，整合数据、可视化与动态建模能力，帮助工程师在虚拟环境中复现油田工况。该气田自2007年投产以来，依靠两条120公里的多相输气管道和海底气体压缩系统运行，数字孪生的引入使工程师能够运行“假设情景”分析、将模型与实时运行数据进行基准比对，并在问题影响生产前预判风险。

在设备维护领域，壳牌与Akselos公司合作，利用数字孪生技术对英国北海南部一座已有50年历史的平台进行结构分析，成功识别出关键升级需求，使该平台的运营寿命延长了20年，避免了新建平台的巨额投资。

关键技术突破：壳牌还主导开发了开源实时数据接入平台RTDIP（Real Time Data Ingestion Platform），通过Linux Foundation Energy向全行业开放。该平台旨在解决OT（运营技术）环境与IT环境之间的“气隙”问题，实现时间序列数据和事件数据的安全接入，为AI分析提供高质量的数据基础。

量化成效：壳牌与凯捷（Capgemini）合作开发的AI驱动数字孪生解决方案，将低效井和待优化井的分析时间从7小时缩短至1.5小时，陆上和海上作业分别实现了1-1.5%和1-2% 的产量提升。壳牌高管表示，实时动态数字孪生结合预测性建模，使工程师能够检测异常、优化设备参数，未来还将进一步集成AI驱动功能，自动标记关键风险并推荐纠正措施。[22]

4. 技术应用优势与工程价值

相较于传统油田人工经验主导的粗放式生产管理模式，数字孪生与AI融合技术在智能油田多场景落地应用，展现出极强的技术先进性与工程实用性，综合应用优势与工程价值突出，具体可分为四大核心维度。一是全维度降本增效，提升开发效益，通过虚拟仿真推演完全替代传统现场盲目试错作业，大幅减少原油、电力、人力、物料等各类资源浪费，同时通过设备精准维保降低运维成本，通过智能能源调度压缩无效能耗，全方位降低油田生产运营成本，稳定并提升油田产能与采收率，显著提升油田整体开发经济效益。二是生产精准可控，打破经验局限，构建油田物理场景与虚拟模型的实时联动体系，实现油田地质工况、生产运行、设备状态、能耗变化全场景可视化、数据化、智能化管控，依托AI算法大数据分析能力，替代传统人工主观经验研判，大幅提升生产决策、参数优化、故障处置、能源调度的精准度与科学性。三是筑牢安全底线，保障生产稳定，通过设备故障提前预判、工况异常实时预警、高危作业虚拟仿真推演，提前规避设备故障、工况失衡、能耗过载等各类生产安全隐患，有效减少设备停机、生产中断、安全事故等问题，保障油田生产连续、安全、稳定运行，提升油田安全生产管理水平。[23-25]

5. 现存问题与优化

结合国内各大油田智能化改造现场应用现状来看，数字孪生与AI融合技术在智能油田的落地应用虽然取得了显著成效，但整体仍处于试点应用、迭代完善的过渡阶段，受油田建设年限、硬件基础、数据体系、算法能力、人才结构等多重因素制约，技术规模化普及与高精度应用仍存在诸多短板与瓶颈问题，一定程度限制了技术赋能效果的充分发挥。首先是老旧油田现场数据基础薄弱，感知体系不完善。国内大量主力油田建设年限久远，早期智能化改造程度低，现场部署的传感器、数据采集终端设备老旧、精度偏低、稳定性差，部分偏远井场、边缘生产区域未实现感知设备全覆盖，存在数据采集盲区。同时，老旧设备数据传输延迟、数据

丢失、数据失真问题频发，导致数字孪生模型数据更新不及时，虚拟模型工况与物理现场工况存在细微偏差，直接影响AI算法数据分析与智能决策的精准性。其次是多系统数据割裂，数据孤岛问题突出。油田生产运营过程中，生产系统、设备管理系统、能耗统计系统、安全监控系统、地质数据库多为不同时期、不同厂商独立建设，各系统数据标准不统一、接口不兼容、数据无法互通共享，数据碎片化存储严重，无法形成全域融合的完整数据体系，难以支撑高精度、多维度的仿真推演与智能优化。再次是AI算法复杂工况适配性不足。现阶段油田应用的智能算法多基于常规稳定生产工况训练优化，对极端天气、地层参数突变、设备突发故障、油田大规模检修、工况异常波动等特殊复杂场景的样本训练不足，导致复杂工况下的预判精度、优化效果、适配能力有所下降，算法鲁棒性有待进一步提升。最后是行业复合型技术人才严重短缺。数字孪生+AI智能油田技术横跨石油工程、地质开发、物联网技术、三维建模、大数据分析、人工智能算法等多个专业领域，对技术人员综合能力要求极高。目前油田一线技术人员多深耕传统石油开采、设备运维专业，对数字化、智能化、算法建模等新技术掌握不足，专业数字化人才稀缺，复合型人才队伍建设滞后，极大制约了智能系统的高效运维、深度应用与迭代升级。[26,27]

针对以上现存问题，结合油田智能化发展趋势与工程应用需求，未来可从设备升级、数据整合、算法优化、人才建设四个维度持续优化技术体系，推动技术深度落地普及。一是迭代升级现场感知设备，全面替换老旧低效采集终端，补齐偏远井场感知设备短板，搭载5G+边缘计算技术，提升数据采集精度、传输速度与稳定性，保障孪生模型实时、精准映射现场工况。二是搭建油田统一数据中台，统一各系统数据标准与接口规范，打通生产、运维、能耗、地质、设备等全维度数据壁垒，实现数据集中存储、融合共享、统一调度，为AI算法优化与仿真推演提供完善的数据底座。三是优化迭代智能算法体系，针对复杂地层工况、极端生产场景、突发故障场景，扩充样本数据训练，优化算法模型结构，提升特殊场景下的工况预判、故障识别与方案优化能力，拓宽技术场景适配范围。四是加强复合型人才队伍建设，定期开展石油工程与数字化、智能化技术交叉培训，引进智能化专业技术人才，组建专业运维团队，保障数字孪生与AI系统高效、稳定、长效运行。长远来看，随着技术的持续迭代与完善，数字孪生+AI技术将深度融合5G、大数据、边缘计算、物联网等新兴技术，逐步实现智能油田生产超实时仿真、无人化值守、自主化决策、精细化管控，全面推动油气行业向智能化、绿色化、高效化、安全化方向转型升级。[28,29]

6. 结语

数字孪生与AI人工智能技术的深度融合，是新时代智能油田数字化转型、提质增效、绿色发展的核心技术路径，彻底打破了传统油田经验化、粗放式、滞后化的生产管理模式，针对性破解了采油方案试错成本高、生产优化精准度不足、设备运维被动滞后、故障突发率高、能源调度粗放失衡、生产决策科学性不足等行业痛点。本文通过系统梳理数字孪生与AI技术的核心架构、赋能机理与融合优势，结合长庆油田低渗透区块采油优化、胜利油田设备智能运维、大庆油田能源智能调度三大一线工程落地案例，全方位、多角度验证了该融合技术在智能油田核心生产场景的应用价值与落地成效。通过构建油田全要素、全流程、全时序的高精度虚拟镜像，依托人工智能大数据分析、仿真推演、趋势预判、迭代优化能力，有效实现了油田采油生产方案的智能化迭代、设备运维的精准化管控、能源调度的科学化分配，全方位提升了油田生产效率、采收率水平、安全生产能力与综合经济效益，为老油田稳产增产、降本增效、绿色低碳转型提供了坚实的技术支撑。该技术体系适配国内不同类型油田的生产改造需求，落地性强、适配性广、增效显著，具备极高的工程实用性与行业推广价值。[30]在能源行业数字化、智能化、绿色化转型的大背景下，随着感知设备、数据中台、智能算法的持续迭代完善，数字孪生+AI融合技术将在智能油田建设中实现全覆盖、深应用，逐步实现油田生产无人化值守、自主化决策、精细化管控，全面推动油气行业高质量发展，同时也为广大一线石油工程技术人员开展智能化油田建设与生产管理提供了可复制、可落地的实践参考与技术借鉴。□

参考文献

[1] 刘合, 姚尚林, 李欣, 等. 智慧油田建设的思考与设计原则[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2025, 17(2): 243-258.

[2] 聂晓炜. 智能油田关键技术研究现状与发展趋势[J]. 油气地质与采收率, 2022, 29(3): 68-79.

[3] 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.

[4] Ren S S, Shen F, Zhang X Y, et al. Application and development of digital twinning in oil and gas exploitation and production: a focus on China and global perspectives[J]. Geoenergy Science and Engineering, 2025, 245: 213568.

[5] 杨剑锋, 杜金虎, 杨勇, 等. 油气行业数字化转型研究与实践[J]. 石油学报, 2021, 42(2): 248-258.

[6] Bigdeli A. The rise of digital twin: a new era for reservoir simulation and modeling[J]. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology, 2026, 16(1): 45-62.

[7] 张凯, 赵兴刚, 张黎明, 等. 智能油田开发中的大数据及智能优化理论和方法研究现状及展望[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2020, 44(4): 28-38.

[8] 刘合, 李欣, 姚尚林, 等. 智能油藏注采生产调控系统关键技术研究[J]. 钻采工艺, 2025, 48(1): 180-189.

[9] 林伯韬, 朱海涛, 金衍, 等. 油气钻采数字孪生模型构建方法及应用案例[J]. 石油科学通报, 2024, 9(2): 282-296.

[10] 杜金虎, 时付更, 张仲宏, 等. 中国石油勘探开发梦想云研究与实践[J]. 中国石油勘探, 2020, 25(1): 58-66.

[11] Capgemini. Revolutionizing oilfield operations with AI-powered digital twin[R]. Paris: Capgemini Research Institute, 2025.

[12] Younger R. Agentic AI for oilfield optimization: bridging expert workflows and generative intelligence in multi-field facilities[R]. Abu Dhabi: ADNOC, 2026.

[13] 曾楠诺, 李力, 李劲松, 等. “深海一号” 智能气田生产数字孪生建

设探索与实践[J]. 石油科学通报, 2025, 10(5): 945-958.
[14] 梁文福. 油田开发智能应用系统建设成果及展望[J]. 大庆石油地质与开发, 2019, 38(5): 283-289.
[15] 林杨. 非数字原生企业数字化转型实践与认识——以中海石油智能油田建设示范项目为例[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(4): 552-558.
[16] Shell plc. Shell partners with NVIDIA to accelerate AI applications in energy sector[EB/OL]. (2024-03-18)[2026-06-20]. https://www.shell.com.
[17] Exxon Mobil Corporation. ExxonMobil and Microsoft accelerate digital transformation in oil and gas[EB/OL]. (2023-11-10)[2026-06-20]. https://corporate.exxonmobil.com.
[18] TotalEnergies SE. TotalEnergies leverages digital twin for integrated production optimization[R]. Paris: TotalEnergies, 2024.
[19] BP plc. BP advances digital transformation with AI-powered production optimization[R]. London: BP, 2024.
[20] Halliburton Company. Digital twin solutions for reservoir management[R]. Houston: Halliburton, 2023.
[21] Schlumberger Limited. DrillOps closed-loop drilling optimization platform[R]. Houston: Schlumberger, 2024.
[22] Equinor ASA. AI and digital twin applications in unmanned offshore platforms[R]. Stavanger: Equinor, 2023.
[23] 聂晓炜. 智能油田关键技术攻关方向与展望[R]. 北京: 中国石化石油勘探开发研究院, 2023.
[24] 张凯, 刘威, 赵兴刚. 生产现场动态自动监测与智能控制技术研究进展[J]. 石油钻探技术, 2021, 49(6): 1-9.
[25] 杜金虎, 杨剑锋, 张仲宏. 新一代油田工业大数据智能化技术及应用[J]. 石油勘探与开发, 2022, 49(1): 178-188.
[26] 刘合, 李欣, 姚尚林. 油藏开发智能优化技术研究现状与展望[J]. 石油钻采工艺, 2024, 46(2): 185-196.
[27] 张凯, 赵兴刚, 周英操. 云边协同的智能注采调控系统架构设计[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2025, 49(1): 112-121.
[28] Ren S S, Shen F, Zhang X Y. Challenges and countermeasures of digital twin data governance in China's oil and gas industry[J]. Energy, 2025, 312: 134256.
[29] 刘文岭, 韩大匡. 数字孪生油气藏建模与仿真技术综述[J]. 石油地球物理勘探, 2023, 58(4): 987-1000.
[30] Gartner Inc. Top strategic technology trends for 2025: digital twins[R]. Stamford: Gartner, 2025.

作者简介:侯雷，男，工程师，主要研究石油生产与运输。

版权为作者所有。本文为开放获取文章，遵循知识共享署名（CC BY）许可协议（https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/）的条款和条件进行发布。
Copyright by the authors.This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).