

石油石化行业场景驱动的智能工厂系统研究与展望

刘换来

(中海油能源发展股份有限公司, 北京 102209)

摘要: 随着新质生产力的蓬勃发展, 石油石化企业积极响应国家号召, 聚焦加速新型工业化, 致力构建制造强国、质量强国、网络强国及数字中国等战略任务, 布局开展了智能工厂建设。虽然在局部场景和个别环节上取得了一定成效, 但也存在智能工厂建设系统性不强、数字化技术供给碎片化、核心场景覆盖不足及价值成效不显著等问题。本文面向石油石化类工厂核心场景的业务需求, 研究形成统一的数据架构、平台底座和十大应用模块, 提出了石油石化行业“数据+平台+应用”的智能工厂系统整体方案, 并对智能工厂发展方向进行了展望。通过智能工厂系统建设, 升级了运营模式, 提升了工作时效, 降低了人员成本, 同时提高了生产的安全性和质量的可靠性, 为企业塑造核心竞争能力提供了坚实保障。

关键词: 石油石化; 智能工厂; 数字化系统

中图分类号: TP339; F 426.72 **文献标志码:** A

Research and Prospects of Scenario-Driven Smart Factory Systems in the Petroleum and Petrochemical Industry

LIU Huanlai

(CNOOC Energy Development Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: With the vigorous development of new quality productive forces, petroleum and petrochemical enterprises have actively responded to national strategies, focusing on accelerating new industrialization and advancing the construction of a manufacturing powerhouse, quality-driven economy, cyber powerhouse, and digital China. While progress has been made in localized scenarios and specific processes, challenges persist, including fragmented digital technology integration, insufficient coverage of core scenarios, and limited value realization. This study addresses the operational demands of core scenarios in petroleum and petrochemical plants by proposing a unified data architecture, platform foundation, and ten application modules. A holistic smart factory system framework based on the “Data + Platform + Application” model is established, and future development directions are explored. The implementation of this system has optimized operational models, enhanced work efficiency, reduced labor costs, and improved production safety and quality reliability, thereby providing a robust foundation for cultivating core competitiveness in enterprises.

Keywords: petroleum and petrochemical industry; smart factory; digital system

1 引言

智能工厂是指利用物联网、云计算、大数据、移动互联网和人工智能等先进的数字技术手段, 对工厂生产、管理、服务等过程进行智能化升级, 从而实现高效、智能、

可持续的生产方式。智能工厂可以实现生产流程的自动化、数字化、智能化, 有效提高生产效率和质量, 降低劳动力成本, 提高生产的灵活性和适应性。早在 2010 年, 壳牌公司、埃克森美孚公司、巴斯夫公司等国外石油和化工企业就已经开始在全球范围内推行数字化转型。

基金项目: 飞机地面集中除冰精确感知及作业协同控制技术研究 (U2333205) 国家级

2012年，中国石化率先在国内提出石化智能工厂概念^[1]。2013年年底，德国正式发布“工业4.0”战略计划，在全球范围内引起了极大的反响。2015年，中国全面部署实施制造强国战略。同时，美国、日本、法国等多国竞相布局智能制造领域，以高端制造、协同机器人、无人工厂和高附加值制造等为核心，重振实体经济并驱动新兴产业蓬勃发展。智能工厂作为智能制造的核心阵地，被普遍视为提升国家竞争力与实现可持续发展的战略要地，正引领全球制造业迈向智能化、高效化的新纪元^[2]。

2 智能工厂核心场景

石油石化行业作为典型的资本密集型与技术密集型领域，具有高投入、高风险、高能耗、技术壁垒深厚和劳动力需求广泛等显著特征，在产业链上游，油气勘探与生产展现了离散工业的特性；而下游加工环节，则遵循着传统流程工业的运作模式^[3]。石油石化领域智能工厂的核心场景可分为生产计划优化、生产执行管控、仓储物流管理、设备管理、安全管理，以及能源管理与优化。

2.1 生产计划优化

石油石化行业智能工厂均面临生产计划制定与优化的场景需求，油气上游智能工厂大多属于离散型智能工厂，生产计划优化主要借助智能排程算法考虑整单拆解重构的复杂问题，根据业内技术标准与实际业务需求，形成适用于多业务场景类型的通用建模技术，构建多决策变量、复杂问题约束、多目标优化的混整模型；对于油气下游流程型石化智能工厂，在生产计划优化上，需融合排产调度算法与装置精确机理模型，动态调整规划参数，达成生产计划与过程控制的深度集成，并跨越局部最优，实现全流程的协同优化，以应对流程工业的复杂性与动态性^[4]。

2.2 生产执行管控

石油石化智能工厂在边缘计算层面，构建了全面的数据实时采集系统，进行生产现场环境状况、设备运行的所有关键参数与状态，以及流水线作业中核心岗位的生产效能数据采集，确保数据获取的完整性与即时性。通过引入成套或部分关键工序的自动化产线，实现少人化或无人化；通过生产作业数据分析、生产工艺优化、质量数据算法等模型，实现生产执行过程的实时监控与在线分析，生产异常的预警与闭环跟进，以及质量的精

准追溯，结合工艺流程改进、生产运行参数的动态调节优化，达到优化生产效率、维持生产节拍的目的。

2.3 仓储物流管理

石油石化仓储物料具有种类多、波动大、采办周期长等特点，通过构建仓储模型，结合无人立体仓库，实时监控库存情况、自动调整库存水平、降低库存成本，实现库存优化；通过部署无人叉车、AGV智能小车，实现物料领取、半成品流转及成品入库的全程自动化，构建一个无需人工干预的分拣与搬运体系，推动进出场作业迈向无人化、智能化^[5]；根据生产计划和订单需求，构建配送模型，自动规划运输路线，实现路径优化，提高物流效率。

2.4 安全管理

从设备监测、设备巡检、故障管理和备件管理等方面实现设备全流程精细化管理。实时监测动设备、静设备、机电仪设备等工厂各类设备的运行状态；通过设备预防性维护的各类模型，进行辅助决策，充分利用在线专家库资源，实现设备运行状态预警和故障诊断；全量采集设备运维工程师维修过程数据，对数据进行加工整理后形成维修知识库，不断沉淀设备运维经验。

2.5 设备管理

石油石化行业是高风险行业，安全管理具有复杂性、专业性、系统性的特点，智能工厂的安全管理覆盖人身安全、设备安全、作业安全和环境安全等，通过加强人员不安全行为管控、重大危险源管理、工艺生产预警管理、作业风险分级管控和隐患排查治理，结合边缘侧各类安全设备产生的数据获取及分析，实现生产安全一体化管理及生产过程中的各类安全异常事件的实时识别，达到事后管理向事前预测转变的目标。

2.6 能源管理与优化

通过在石油石化智能工厂边缘侧引入物联网技术及对能源计量仪表进行智能化改造，加强水、电、气等用能数据的全量全过程采集，实时监控设备的能耗情况，发现能耗异常并进行预警和优化；通过大数据分析能与流建模技术，推动能源管理从单一设备、装置的局部优化，向全厂范围的协同优化转变，有效减少能源消耗与污染物排放，实现绿色生产，在重点石化类智能工厂，加强对化工产品的碳足迹管理。

3 智能工厂系统

本文借鉴了石油石化头部企业智能工厂建设先进实践，通过深入分析生产、管理、安全、仓储和能源等核心业务场景需求，基于各类工厂数字化转型特点及需求情况，遵循集成、统一、共享原则，以统筹共享的建设理念，以平台化为建设策略，构建了应用与业务深度融合、流程无缝拉通的智能工厂数字化体系，以统一的数据架构和平台底座为支撑，打造可复制推广、可优化升级的

智能工厂应用模块，实现技术自主可控与持续迭代成长，促进资源共享及业务优化配置。

3.1 智能工厂系统整体架构

智能工厂系统整体架构如图 1 所示。架构以数据层为坚实基础，平台层为核心支撑，应用层为领航先锋，三者紧密融合，共同构建了“数据+平台+应用”的一体化智能工厂数字化系统，支撑智能工厂生产及运营全过程的管控与智能分析。

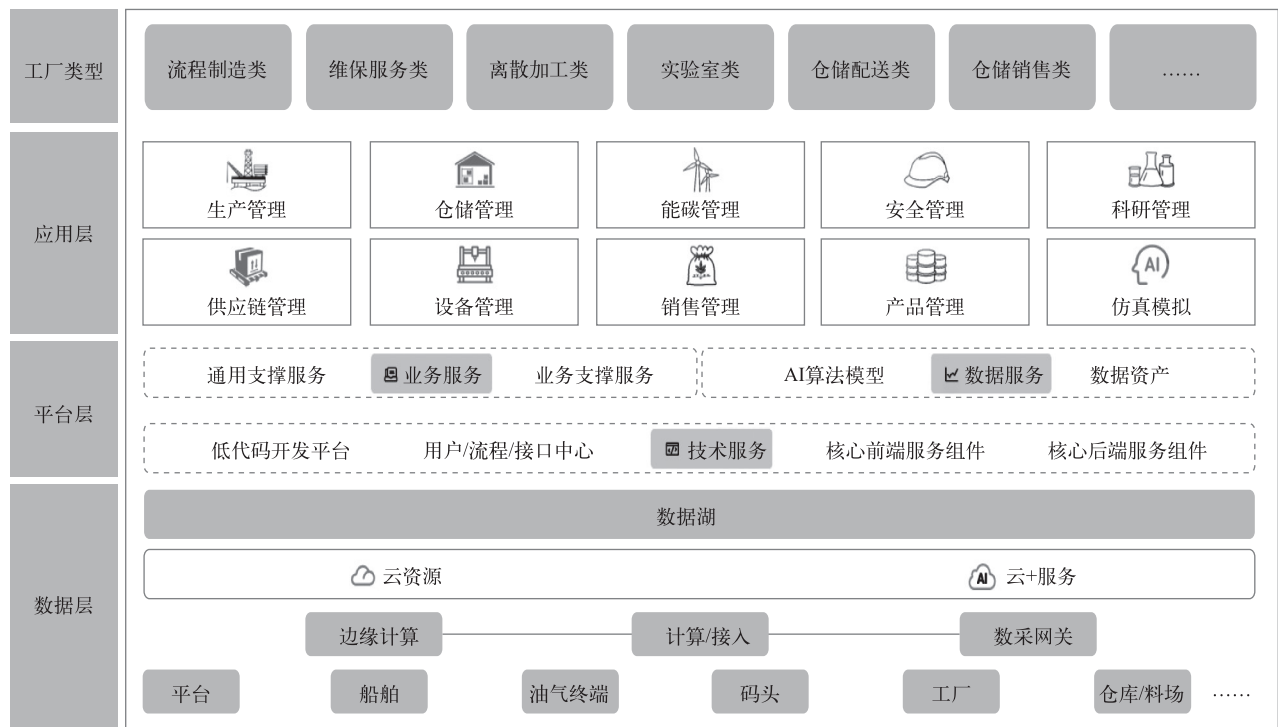


图 1 智能工厂系统整体架构

3.2 数据架构

智能工厂数据架构如图 2 所示。在工厂边缘侧实现现场数据的统一采集、统一上云、统一管控；在云端提供算力、存储及网络等基础资源；石油石化企业将智能工厂各类数据全量传入自建或购置的大数据平台，实现智能工厂相关数据全量上云、分类划域存储、数据有序归集；开展数据分层建仓，实现分析指标建设；开展数据特征工程，建立数据算法模型；提供统一对外服务，实现可视化呈现及多端业务应用的直接调用，满足智能工厂系统采集、存储、管理和应用层面提出的数据需求。

3.3 平台底座

平台层构筑基础支撑底座如图 3 所示。智能工厂系

统以统一平台底座为基础开展建设，实现组件分域沉淀与敏捷复用，形成适配不同场景的应用模块，各模块灵活快速组合，为各类工厂提供“少量定制、实施为主”的敏捷化低成本推广建设模式。平台层构筑基础支撑底座，建立技术、业务、AI 三大服务，实现工业组件及工业算法模型能力的沉淀及快速复用。其中业务服务包括通用支撑组件和业务支撑组件，业务支撑组件分为生产管理域、仓储管理域、安全管理域和能碳管理域等十大业务域，石油石化企业的各类工厂根据自身工厂情况全面梳理业务，沉淀相关组件至对应业务域中，实现平台底座的共同繁荣。

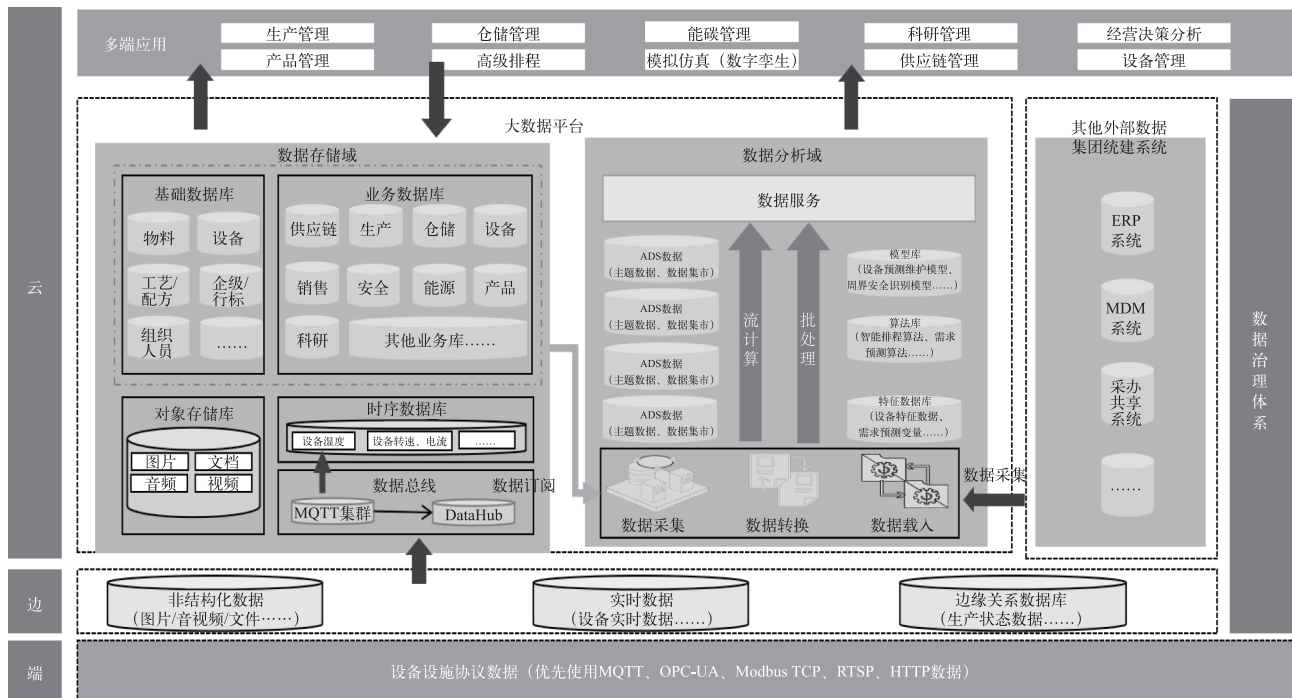


图2 智能工厂数据架构

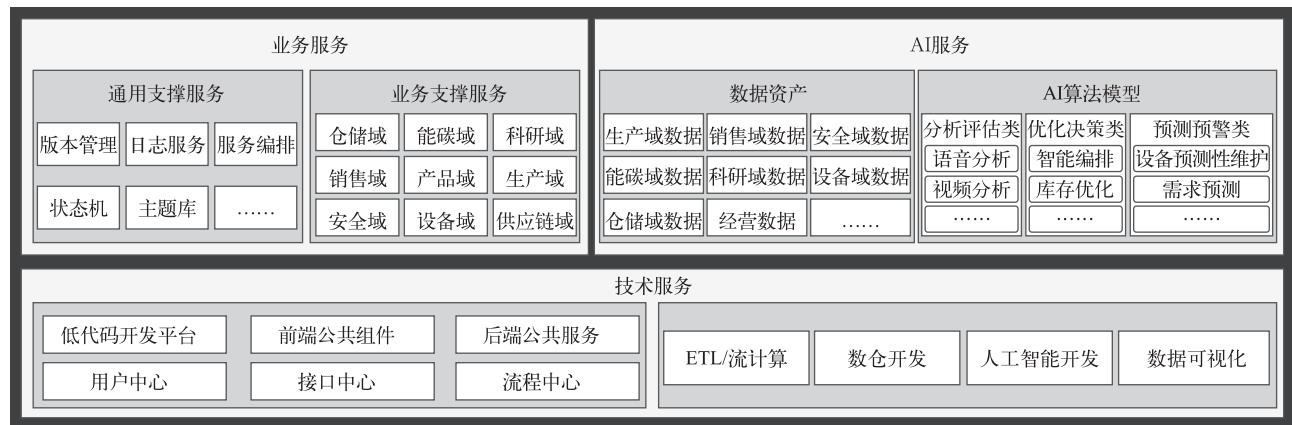


图3 智能工厂平台架构

4 智能工厂系统应用模块

智能工厂应用模块如图4所示。通过智能工厂数字化系统建设与应用，形成基于数据分析与反馈的协同优化能力，推动应用与业务之间的全面拉通。该系统集成了生产管理、仓储管理、科研管理、安全管理、能碳管理、设备管理、供应链管理、销售管理、产品管理及仿真模拟等十大核心应用模块，工厂运营中各类核心场景与功能需求的全面覆盖与精准响应。依托各应用模块高度灵活性与快速重构能力，进行快速复制与推广，实现技术

自主可控，打造数据驱动的高效运营管理新模式，引领智能工厂迈向更高层次的智能化与可持续发展。

4.1 生产管理

通过智能排程的算法模型，自动生成符合多重约束条件的优化生产计划，细化至具体作业安排，确保效率最大化。同时，系统持续监控生产要素状态，对突发异常实施即时自主决策与灵活调度，实现生产的动态优化与平稳运行^[6]；利用模型对生产作业数据进行在线深度剖析，精准调整生产工艺与设备参数，优化资源配置，

提升效率；全程捕捉原料、生产及用户反馈的质量信息，建立产品质量的无缝追溯体系；结合数据分析与知识库

智慧，精准诊断产品缺陷，提出针对性改进策略，推动产品质量持续升级^[7]。

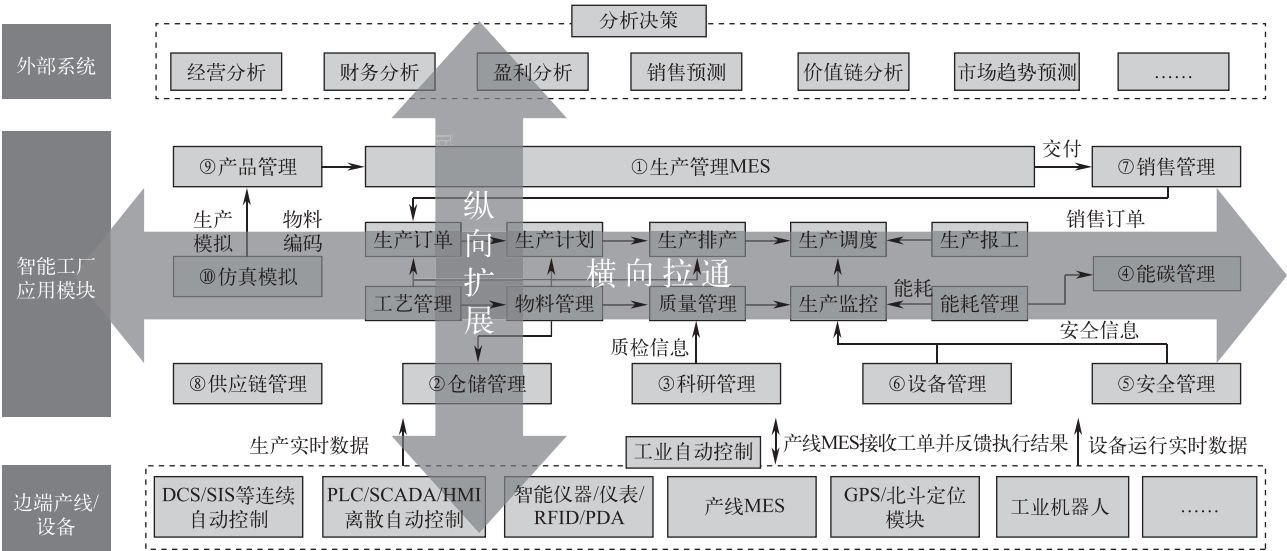


图4 智能工厂应用模块

4.2 仓储管理

通过数字化仓储设备与仓储管理模块深度融合，根据实时生产动态灵活调度物料配送，实现仓库内、外精准定位，流转信息实时可查，有效管理仓库内的各项操作，包括入库、出库、库存管理、订单管理和货物跟踪等；通过仓储模型，提供多方案库位优化适配，助力用户决策，从而实现仓库高效管理，有效削减仓储成本，加速运营周转，提升仓储管理的综合能力与效率。

4.3 科研管理

通过科研日常管理、科研要素管理和科研过程管理，建立符合智能工厂要求的科研管理系统，通过实验过程管理，实验报告生成、电子记录本管理、实验谱系管理等功能，提高实验生产效率，提升实验质量，改进实验管理水平。

4.4 安全管理

以安全生产管理全场景建设为基础，将危险源管理、双重预防机制、作业管理等安全管理重点工作内容的关键要素全流程纳入安全生产数字化管控范畴，强化安全生产管理的预见性与可控性，构建企业快速响应机制，实现安全态势的实时监测、前瞻预警与动态优化。通过智能决策支持，促进跨部门联动与全局协同，系统评估风险，从根本上消除隐患，推动安全管理的全面提质增

效与稳健发展。

4.5 能碳管理

以“能源监测、节能减排、经济运行”为目的，以能源管理及重点耗能设备管理为主线，以能源计划管控为核心，采用在线方式广泛接入生产过程中能源相关的指标数据，并利用大数据和算法，实时监测和强化跟踪能源消耗和碳排放状态，从能源设备的静态管理转向动态分析、实时管理，协助工厂辨识节能降碳机会，合理制定节能降碳目标，进一步压降企业生产过程成本，促进企业可持续发展。

4.6 设备管理

通过设备基础数据管理、设备日常管理、设备运行监控、巡检管理、维保管理和维修管理等内容，覆盖工厂设备台账维护、履历查看、运行数据查询、设备巡检、维保和维修等作业执行相关场景，以设备运行模式和设备故障理论为基础，自动提供设备运行状态预测及维护处理措施，通过对设备综合效果的统计分析，自主驱动流程优化和生产作业优化，全方位支持石油石化智能工厂设备的精细化管控。

4.7 供应链管理

通过构建供应链与制造流程的智能互联与协同机制模型，实现两者间的紧密对应与动态联动^[8]，打通工厂、

物流、供应商全流程供应链，实现仓储、生产、物流多方联动，详尽记录所有物料流转的细节，支持对整个物流链及生产过程进行订单级、物料级、工位级的实时模拟与验证，确保流程的精准无误，有效提高订单信息的运转时效性及质量可追溯性，提高物流周转效率，降低库存成本。

4.8 销售管理

通过深度挖掘并分析客户数据，精细化调整需求预测模型，以数据驱动制定更为精准的销售策略规划，动态调整设计、采购、生产、物流等方案，实现产、销高效协同，聚焦销售全流程管理、销售订单精细化管理等，与生产管理、仓储管理等模块联动形成业务链路闭环。

4.9 产品管理

将产品的设计、生产、检验和运维等全生命周期数据融入数字化模型中，实现模型驱动的产品数据管理。依托综合的设计仿真与试验验证平台，对产品进行全面深入的仿真分析、试验验证，通过迭代优化，不断提升产品的外观、结构、性能及工艺水平。

4.10 仿真模拟

融合建模仿真、实时映射、先进预测算法及多模型融合技术，形成覆盖装备、产线、车间至工厂各层级的数字孪生体系。无缝对接现场实时数据，确保物理与虚拟世界即时同步，从而显著增强对生产环境的感知精度、分析能力、预测准确性及智能控制效能。

5 未来展望

石油石化智能工厂建设作为石油石化行业数字化转型的主战场，不仅深刻影响着产品从设计到废弃的全生命周期管理，还全面渗透到生产制造流程的每一个细微环节，以及供应链的每一个关键节点，推动着整个行业向更高效、更智能、更持续的方向迈进。未来，智能工厂系统在未来表现为三大发展方向。

5.1 具身智能

工业机器人作为智能制造领域的核心自动化工具，汇聚了多种尖端技术，展现了现代工业高效益与软硬件深度融合的特质，是构建智能工厂不可或缺的关键要素，但工业机器人无法完全替代人类岗位，原因是机器人在处理模糊任务和应对生产中的突发状况的能力较弱。然而，随着具身智能技术的逐步成熟，生产模式愈发向“无人化”方向演进。具身智能作为一种基于物理实体

进行感知和与物理世界互动的智能系统，能够表现出智能行为和适应性，不仅能通过主动式感知，像人类一样完成物理任务，还能感受周围的世界、对世界进行建模，主动进行学习和认知，这将进一步提高生产效率和产品质量，同时降低生产成本。

5.2 数字孪生

数字孪生是一种技术手段，融合物理与数字世界，通过实时互动模型实现实体的精准模拟、深入分析及高效优化^[9]。数字孪生技术集成多维信息，包括物理模型、传感器数据等，在虚拟环境精准映射实体装备全生命周期活动，促进物理与数字空间的深度融合与高效协同，通过智能分析优化决策流程，以低成本高效率的数字模拟替代实物实验，为现实生产提供精准控制与优化方案^[10]。

5.3 工业大模型

工业大模型应用到工业领域将带来三大趋势：一是大模型可以处理庞大的数据量，工业领域拥有海量的生产数据、设备运行数据等，大模型可以帮助企业从这些数据中找到规律，提供更为准确的预测和决策；二是大模型能够把复杂的数据翻译成人类能理解的形式，帮助工业现场运行操作人员做出判断；三是大模型可以提前发现潜在问题，避免生产中断。然而，大模型在工业领域的应用面临数据质量、计算资源、耗费时间、数据隐私和安全等问题，需要企业及相关方的共同努力。未来工业大模型将朝着定制化、边缘计算和产业协作方向发展。

6 结束语

随着智能工厂系统的相关理论和技术蓬勃发展，智能工厂系统将变得越来越智能化、绿色化、高端化，但开展智能工厂系统建设，始终要回答：“智能工厂系统建设能给工厂带来什么价值贡献”，这个过程不可能一蹴而就，要遵循实事求是、价值导向的原则，按照场景驱动、平台化的建设策略，强化数据采集与治理，选择适合工厂特点的应用模块进行部署，不断提升石油石化行业智能工厂的数字化、智能化水平，为石油石化企业高质量发展提供坚实的保障。IM

参考文献

- [1] 李蕾，李瑞，高雪颖. 智能制造之路石化智能工厂设计思考与探索 [J]. 石油化工设计，2024 (1)：50-54.

- [2] 陈明, 梁乃明. 智能制造之路: 数字化工厂 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
- [3] 肖立志. 数字化转型推动石油工业绿色低碳可持续发展 [J]. 世界石油工业, 2022 (4): 12-20.
- [4] 王子宗, 高立兵, 索寒生. 未来石化智能工厂顶层设计: 现状、对比及展望 [J]. 化工进展, 2022 (7): 3387-3401.
- [5] 任敏. 智数合一, 智慧工厂的四大典型应用场景 [J]. 中国信息化, 2021 (1): 47-49.
- [6] 武迪, 王妮, 张文雯. 基于 MES 系统的智能工厂研究应用 [J]. 中国设备工程, 2021 (6): 26-27.
- [7] 中华人民共和国工业和信息化部. 智能制造能力成熟度模型: GB/T 39116—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [8] 邱伏生. 制造供应链数智化建设与发展 [J]. 物流技术与应用, 2022 (2): 78-83.
- [9] 于红. 霍尼韦尔发布首份流程工业智能工厂白皮书 助力企业持续推进智能制造 [J]. 今日制造与升级, 2019 (11): 32-33.
- [10] 蒋白桦. 从石油化工制造的本质看其智能化转型的基本路径 [J]. 智能制造, 2022 (4): 8-12.

作者简介: 刘换来 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为信息化发展和数字化转型。

收稿日期: 2024-11-03



(图片来源: 中海油集团官网)