

Application and research of technology to build smart chemical factory in the era of Industry 4.0

Weiwei Yue

Hebei Fengmei Coke Chemical Co., Ltd., Handan, Hebei, 056200, China

Abstract

As the core strategy for the digital transformation of global manufacturing, Industry 4.0 is reshaping the production paradigm of chemical plants through the deep integration of technologies such as the Internet of Things, big data, and artificial intelligence. As a pillar industry of the national economy, the intelligent transformation of chemical plants not only concerns the enhancement of corporate competitiveness but also holds strategic significance for energy security, environmental protection, and industrial chain upgrades. Traditional chemical plants face dilemmas in efficiency optimization, resource integration, and market response speed. By deeply integrating cutting-edge technologies like the Internet of Things, big data computing, artificial intelligence, and industrial internet+, smart factory technologies will construct a production ecosystem with autonomous decision-making capabilities, forming a closed-loop system of “perception-analysis-decision”. Currently, the construction of smart factories still faces practical challenges such as unclear technical standards and difficulties in system integration. How to achieve precise alignment between technology application and production needs in a dynamically changing industrial environment has become a critical issue affecting the success of the intelligent transformation of chemical plants.

Keywords

Industry 4.0; smart factory; technology application

工业 4.0 时代打造智慧化工工厂技术的应用与研究

岳伟伟

河北峰煤焦化有限公司，中国·河北 邯郸 056200

摘 要

工业4.0作为全球制造业数字化转型的核心战略，通过物联网、大数据、人工智能等技术的深度融合，正在重塑化工工厂的生产范式。化工工厂作为国民经济的支柱产业，其智能化转型不仅关乎企业自身的竞争力提升，更对能源安全、环境保护和产业链升级具有战略意义。传统化工工厂在效率优化、资源整合以及市场响应速度等方面面临着两难的困境，而通过深度融合物联网、大数据计算、人工智能、工业互联网+等前沿科技的智慧工厂技术，将构建具备自主决策能力的生产生态系统，呈现出“感知-分析-决策”的闭环体系。就当前而言，智慧工厂建设依旧存在技术标准模糊、系统集成困难等现实挑战，在动态变化的产业环境中怎样达成技术应用与生产需求的精准适配，已然成为影响化工工厂智能化转型成功的关键命题。

关键词

工业4.0；智慧工厂；技术应用

1 引言

化工工厂的智能化转型正在重构全球产业竞争格局，传统化工工厂突破发展困境的新路径由工业 4.0 框架下的智慧工厂技术所提供。智能化生产系统通过实时数据交互与智能算法决策实现了工艺流程的自我优化与资源调配的动态平衡，而工业生产范式从机械化向认知化的跃迁，正是这种技术演进的本质所在。本文以工业 4.0 的技术特征以及化工工厂的转型痛点作为立足之处，对智慧工厂技术体系的内在

逻辑与应用边界展开系统分析，针对不同技术模块在制造场景中的耦合机制进行探讨，进而构建起具有可操作性的技术实施框架。

2 工业 4.0 与智慧工厂概述

2.1 工业 4.0 的特点

“工业 4.0”概念包含了由集中式控制向分散式增强型控制的基本模式转变，目标是建立一个高度灵活的个性化和数字化的产品与服务的生产模式。在这种模式中，传统的行业界限将消失，并会产生各种新的活动领域和合作形式。创造新价值的过程正在发生改变，产业链分工将被重组。工业 4.0 以生产系统的深度数字化为底层逻辑，将设备、物料

【作者简介】岳伟伟（1983-），男，中国河北邯郸人，硕士，工程师，从事机电管理及自动化应用研究。

与人员置于统一的数字线程中运行，使得车间层到管理层的纵向信息流实时穿透物理隔离，形成层级消融的新型制造架构；横向维度打破企业边界的数据孤岛，供应链上下游通过标准化的接口协议共享生产状态与资源信息，这种双向穿透特性推动制造活动从封闭式运营向生态化协作转型。物理空间与虚拟空间的持续映射构建起虚实联动的闭环控制体系，机器设备在获取云端算法支持的同时保留边缘端的自主决策权限，形成分布式智能与集中式优化的动态平衡。人机协作模式在工业 4.0 框架下发生本质重构，操作人员从机械重复劳动中解放，其经验知识被转化为指导算法优化的数字资产，劳动者角色向系统监督者与策略制定者升级^[1]。

2.2 智慧工厂的目标

智慧工厂是现代工厂信息化发展的新阶段，它是在数字化工厂的基础上，利用物联网的技术和设备监控技术加强信息管理和服务；清楚掌握工艺流程、提高生产过程的可控性、减少生产线上人工的干预、及时正确地采集生产数据，以及合理的生产计划编排与生产进度。智慧工厂致力于构建具备自组织能力的生产系统，使原材料流转、设备运行与质量控制等环节形成端到端的可视化闭环，消除传统制造中工序衔接的盲区与信息传递的滞后性；其核心在于建立设备与订单之间的智能匹配机制，让生产资源配置摆脱人工经验依赖，转而基于实时产能数据与市场需求波动形成动态平衡。生产系统被赋予主动感知环境变化的能力，当工艺参数偏移预设阈值时，设备可自主触发补偿机制而非被动等待人工干预，这种闭环反馈特性大幅降低了质量波动风险。人机交互界面设计趋向自然化，操作人员无需理解底层代码逻辑，即可借助增强现实设备获取设备状态诊断与维护建议，将专业技术知识沉淀为可复用的数字解决方案。生产计划与执行层级的界限逐渐模糊，订单信息在抵达系统的瞬间即触发跨部门协同响应，库存周转周期因供需信息的精准对接得以持续压缩。

2.3 工业 4.0 与智慧工厂的关系

工业 4.0 作为化工工厂数字化转型的核心范式，其技术架构与智慧工厂的构建逻辑存在深层次耦合，前者通过物联网、大数据分析和人工智能等底层技术重新定义生产流程的交互模式，后者则将这些技术转化为可操作的工业场景形成动态生产网络。智慧工厂并非单纯的技术堆砌，而是在工业 4.0 框架下将设备感知能力、信息传输效率与决策自主性进行有机整合，使离散的生产单元演变为具备自我优化功能的协同体系，生产系统能够基于实时数据流对资源配置作出精准响应。工业 4.0 提出的纵向集成理念直接推动企业打破传统金字塔式管理结构，智慧工厂通过扁平化信息链路将车间设备、供应链节点与终端用户需求串联，形成覆盖产品全生命周期的价值闭环。两者的互动关系体现在技术标准与落地实践的互补性上，工业 4.0 为智慧工厂提供理论支撑与演进方向，智慧工厂的运营反馈又反向完善工业 4.0 的技术生态。

3 智慧化工工厂技术应用的实践策略

3.1 物联网技术的应用

在化工工厂中，物联网技术从多维度实现智能化管理。生产监控层面，通过在设备、管道、反应釜等关键部位部署温度、压力、流量等传感器，实时采集生产参数，为过程优化提供数据；同时采集设备振动、电流等数据，监测运行状态，实现预测性维护，降低故障与维修成本；安全管理方面，利用定位信标、基站和人员定位标签，实时掌握人员位置，当人员进入危险区域或遇异常时及时报警；部署气体、水质等环境监测设备，超安全阈值即预警，防范污染与事故；在能源管理上，借助智能计量设备采集能耗数据，分析规律找出浪费点，依生产计划优化能源供应与使用，节约成本；供应链管理环节，通过为原材料、半成品和成品加装 RFID 标签或传感器，实时跟踪物料位置、状态和数量，实现精准管理与库存优化，提升供应链效率与可靠性。具体如图 1 所示：



图 1 物联网技术在智慧工厂中的多层级应用架构图

3.2 大数据与数据分析的应用

企业需要构建分布式数据采集架构对设备振动、温度、能耗等多维度参数进行毫秒级抓取，并将异构数据源接入边缘计算节点完成初步清洗与特征提取。工程师团队可依托数据湖技术对历史生产记录与实时工况信息实施分层存储，利用时间序列分析算法识别设备退化趋势，同时结合工艺知识

图谱建立质量缺陷与原料属性的关联规则库。机器学习模型在产线控制系统中承担动态优化任务，例如根据原料的温湿度、压力等变化自动调整阀门、变频电机等进行稳定的工艺调节以及能源消耗，或基于产品的市场经济利润重构化工产品产量的生产计划安排。生产管理部门需开发可视化看板整合设备利用率、能耗峰值与异常停机事件，使车间主任能够

快速定位瓶颈工序并触发自适应调度策略,这种数据驱动的决策模式倒逼工厂打破部门间数据孤岛,推动质量检测报告与设备维保日志在统一平台上实现跨系统联调^[2]。

3.3 人工智能与机器学习的应用

技术人员在质量检测环节部署高AI智能识别系统,训练深度学习模型辨识产品表面细微划痕与装配错位等缺陷,产线摄像装置实时捕捉产品图像后,算法自动比对标准模板生成质量评估报告,质检人员依据系统标注的异常区域进行复核判定,显著提升缺陷检出效率。生产计划工程师开发动态调度算法,整合订单紧急程度、设备负载率与物料库存等多维度参数,生成分钟级精度的生产排程方案,当突发订单插入或设备故障时,系统基于强化学习模型快速重排工序链条,最小化生产中断影响。设备维护团队构建预测性维护知识图谱,关联设备历史维修记录与实时传感器数据,训练随机森林算法识别电机过热或传动部件老化的特征模式,在故障发生前72小时推送维护建议,维修人员根据系统推荐的优先级清单调配备件与人力。能源管理模块引入时间序列分析模型,解析不同生产班次的能耗波动规律,自动调节空压机运行频率与照明系统亮度,在保障产线稳定性的前提下动态匹配能源供给与生产需求。工艺优化专家采用遗传算法迭代仿真,针对复杂零件的加工参数组合进行多维寻优,输出刀具进给速度与主轴转速的最优匹配方案,操作人员依据系统生成的参数包执行加工任务,减少传统试错法导致的材料损耗。

3.4 云计算与边缘计算的应用

在智慧工厂的架构设计中,企业需将云计算平台与边缘计算节点进行梯度式部署,云端承载着跨工厂的产能规划与供应链协同任务,运维团队可借助容器化技术快速部署微服务架构,使ERP系统与MES系统在虚拟化资源池中实现弹性伸缩。边缘侧部署的智能网关需具备协议转换能力,将PLC、DCS、SIS设备的现场总线数据封装为标准OPC UA报文,同时运行轻量级推理模型对摄像头采集的视觉数据进行在线缺陷检测,避免高清图像传输对网络带宽的过度消耗。工艺开发部门应建立混合云架构下的数字孪生 workflow,将CAE仿真结果与云端存储的模具三维模型进行比对验证,产线调整参数可直接下发至边缘控制器驱动伺服电机执行机构。设备维护组要构建分布式计算资源调度策略,当设备出现振动频谱异常时,边缘节点优先调用本地故障诊断算法库进行初步研判,超出处理能力则触发云端专家系统启

动深度分析,维保人员依据诊断报告提前准备替换件与维修方案。

3.5 数字孪生技术的应用

工程师通过构建与物理实体高度对应的虚拟模型,将化工生产设备、工艺流程、厂区环境等进行数字化映射。仪控人员实时采集设备运行数据如温度、压力、转速等,同步传输至数字孪生体,实现对生产过程的可视化、精准化监控,及时发现异常并预警。例如,对反应釜的模拟可直观展示内部反应进程,提前预测潜在风险;设备维护人员借助数字孪生分析设备运行状态,预测故障发生时间,制定科学维护计划,降低非计划停机概率。同时,利用数字孪生技术进行工艺优化,模拟不同工况下的参数调整,寻找最佳生产方案,提高产品质量和生产效率,助力智慧化工工厂的高效、安全运营。能源管理团队利用孪生系统重构车间气电网的三维拓扑结构,分析高负荷时段管道的压降波动与能量损耗热点,制定泵站启停策略与管路冗余配置方案,降低能源传输环节的隐性成本^[3]。

4 结语

智慧工厂技术的深度应用标志着化工工厂正在经历从自动化到智能化的质变过程,其核心价值体现在构建具备环境感知以及自主决策能力的生产体系方面。新型制造范式由技术集群的有机融合所催生,借此让生产过程突破了传统物理空间的限制,进而形成了虚实共生的制造生态系统。当下应重点关注技术标准体系的构建以及跨平台数据交互协议的完善,对边缘计算与云端协同的技术架构设计加以强化,在保障数据安全的条件下,将工业大数据的潜在价值予以释放。未来智慧工厂将向更具弹性的模块化架构演进,人工智能算法与物理系统的深度融合会推动制造系统形成类似生命体的自适应能力。

参考文献

- [1] 王永. 工业4.0时代打造智慧工厂技术的应用与研究[C]// 天津市电子学会. 第三十八届中国(天津)2024'IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集. 德中(天津)技术发展股份有限公司, 2024: 288-291.
- [2] 姜山,唐忠友,宋仕斌,等. 5G与工业PON技术在智慧工厂中的应用研究[J]. 自动化博览, 2024, 41(02): 64-67.
- [3] 周华. 智能工厂建设及典型案例[M]. 化学工业出版社: 2023: 10. 376.