

# 工业4.0背景下化工自动化系统的集成与升级路径分析

刘 航

山西阳光卓越工程有限公司 山西 太原 030032

**摘要:**新一轮科技革命下,以智能制造为核心的工业4.0正重塑全球制造业格局。化工行业作为国民经济基础性、支柱性产业,面临安全、环保、效率与柔性生产挑战,需借工业4.0理念与技术转型升级。本文聚焦工业4.0背景下化工自动化系统集成与升级路径,先梳理其核心特征,以及给传统化工自动化体系带来的冲击与机遇;接着剖析化工企业自动化系统集成时,普遍存在信息孤岛、系统异构、数据利用率低、安全风险高等问题;进而提出“顶层设计—平台构建—数据驱动—智能应用—安全保障”五位一体的升级路径;最后从组织文化等维度探讨保障措施。研究表明,以数据为核心、平台为支撑、智能为导向的集成化升级,是化工企业高质量、绿色化、智能化发展的必由之路。

**关键词:**工业4.0;化工自动化;系统集成;数字孪生;工业互联网平台

## 引言

化工行业流程复杂、连续性强,对生产安全性、稳定性及能效要求严苛。传统上,化工企业依赖DCS、PLC、SIS等自动化技术保障基本生产运行。但随着市场竞争加剧、环保法规趋严及客户定制化需求提升,传统系统在数据贯通、实时决策、预测性维护和柔性调度等方面弊端渐显。工业4.0是德国提出的国家战略,其核心是借助CPS、IoT、大数据、AI、云计算等新一代信息技术,实现制造系统中人、机、物、料、法、环全面互联与智能协同,改变了制造模式,也为化工自动化系统重构带来新思路。当下,如何将工业4.0理念融入现有化工自动化体系,打破“烟囱式”系统壁垒,构建开放、互联、智能的新一代自动化平台,是行业亟待解决的关键问题。

## 1 工业4.0的核心特征及其对化工自动化的影响

### 1.1 工业4.0的核心内涵

工业4.0并非单一技术的叠加,而是一种系统性变革,其本质在于通过深度融合信息技术与工业技术,实现制造全过程的数字化、网络化与智能化。这一变革的核心特征体现为互联互通、信息透明、技术辅助与去中心化决策四个方面。互联互通强调设备、系统乃至供应链之间的无缝连接,使数据能够在不同层级间自由流动;信息透明则通过高密度传感与边缘计算,将物理世界的运行状态精准映射到数字空间,形成对现实工厂的实时镜像;技术辅助意味着系统不仅执行预设指令,还能基于数据分析为操作人员提供决策支持,甚至自主完成部分任务;而去中心化决策则赋予现场设备一定的智能判断能力,使其在局部范围内实现快速响应,从而提升整体系统的灵活性与鲁棒性<sup>[1]</sup>。这些特征共同构成了工

业4.0区别于前三次工业革命的根本标志。

### 1.2 对传统化工自动化系统的冲击与赋能

传统化工自动化系统采用“金字塔”式层级架构,各层级协议封闭、接口不统一,数据难跨域流通,呈“竖井式”割裂,虽保障了特定阶段生产稳定,但难适应现代化工敏捷响应等需求。工业4.0的引入动摇了这一传统范式:开放通信协议(如OPC UA、MQTT)使架构扁平化,实现端到端数据贯通;人工智能算法嵌入控制回路,让系统自学习、自适应,如软测量技术提升过程感知精度;基于设备数据的预测性维护取代定期检修,降低非计划停机风险;数字孪生技术可在虚拟空间进行工艺仿真等,提升管理决策科学性。巴斯夫等国际化工巨头的实践表明,工业4.0不仅是技术升级,更是深刻的运营模式变革。

## 2 化工自动化系统集成面临的现实挑战

尽管前景广阔,但化工企业在推进自动化系统集成与升级过程中仍面临多重障碍:(1)系统异构性与协议碎片化:化工厂内往往存在多个年代、不同厂商的DCS、PLC、SCADA系统,采用Modbus、Profibus、HART、Foundation Fieldbus等多样化的通信协议,缺乏统一的数据模型与接口标准,导致“数据看得见但用不了”。(2)信息孤岛现象严重:生产执行系统(MES)、实验室信息管理系统(LIMS)、设备管理系统(EAM)等上层应用独立建设,与底层控制系统数据交互有限,无法形成闭环优化。例如,质量检测结果难以实时反馈至工艺参数调整环节。(3)数据质量与治理能力不足:大量传感器数据存在噪声、缺失、时序错位等问题;缺乏统一的数据湖或数据中台,导致数据资产难以沉淀与复用。(4)网络安全风险加剧:系统互联

在提升效率的同时，也扩大了攻击面。传统OT（运营技术）网络长期处于“物理隔离”状态，安全防护薄弱<sup>[2]</sup>。一旦遭受勒索软件或APT攻击，可能导致重大安全事故。

（5）组织与人才瓶颈：IT与OT部门长期分离，缺乏协同机制；既懂化工工艺又精通数据科学的复合型人才稀缺，制约了智能化应用的落地。

### 3 化工自动化系统集成与升级的系统性路径

面对上述挑战，化工企业必须摒弃零敲碎打的技术堆砌思维，转而采取系统性、战略性的升级路径。本文提出“顶层设计—平台构建—数据驱动—智能应用—安全保障”五位一体的集成框架，旨在为企业提供一条清晰、可行、可持续的转型路线。

#### 3.1 顶层设计：制定清晰的数字化转型战略

成功的系统集成始于高屋建瓴的战略规划。企业应首先明确自身在工业4.0进程中的定位与发展目标，是聚焦于能效提升、安全强化，还是柔性生产与质量优化？在此基础上，制定分阶段、可量化的实施路线图至关重要。盲目追求“大而全”的全面改造往往导致资源浪费与项目失败。更为稳妥的做法是采用“试点先行、逐步推广”的策略，选择一条关键产线或一个核心装置作为示范单元，集中资源验证技术方案的可行性、经济性与可扩展性。通过小范围试错积累经验，形成可复制的标准化模板，再向全厂推广，既能有效控制风险，又能增强组织信心，为后续大规模部署奠定坚实基础。

#### 3.2 平台构建：打造统一的工业互联网平台

工业互联网平台是实现系统集成的核心载体，其作用在于打破异构系统间的壁垒，提供统一的数据接入、处理与应用支撑能力。一个成熟的平台架构应涵盖边缘层、基础设施层、数据中台与应用使能层。在边缘层，通过部署具备多协议解析能力的智能网关，实现对各类现场设备数据的统一采集与初步清洗；在IaaS/PaaS层，依托云原生技术提供弹性计算与存储资源，支持微服务化应用的快速部署与迭代；数据中台则负责建立统一的数据模型（如遵循ISA-95或ISO 22400标准），对来自DCS、MES、LIMS等系统的多源异构数据进行融合治理，形成高质量的数据资产池；应用使能层则提供低代码开发工具、AI训练平台与数字孪生引擎，赋能业务人员快速构建面向具体场景的智能应用<sup>[3]</sup>。万华化学与华为云合作构建的“智慧万华”平台，正是通过这一架构成功整合了20余套孤立系统，实现了全厂数据的统一管理与共享，为后续智能化应用奠定了坚实基础。

#### 3.3 数据驱动：构建高质量数据资产体系

数据是工业4.0时代的核心生产要素，但其价值释

放依赖于高质量的数据治理体系。企业首先需从源头抓起，规范传感器选型、采样频率与时钟同步机制，确保原始数据的准确性与时序一致性。在此基础上，应建立制度化的数据治理流程，设立专职的数据管家角色，定期评估数据的完整性、一致性与时效性，并对异常数据进行溯源与修复。更为重要的是，应推动数据从“资源”向“资产”转变。通过构建工艺知识图谱，将分散在操作规程、设备手册、历史工单中的非结构化知识转化为机器可理解、可推理的语义网络，不仅能提升故障诊断的准确性，还能为新员工培训与专家经验传承提供有力支撑。只有当数据真正成为可管理、可复用、可增值的资产，智能化转型才具备坚实的根基。

#### 3.4 智能应用：聚焦高价值场景落地

##### 3.4.1 智能控制

传统PID控制在面对原料波动、设备老化或工况频繁切换时往往难以维持最优性能。基于强化学习（Reinforcement Learning, RL）等先进算法的自适应控制策略，能够在线学习过程动态特性，实时调整控制参数，实现对反应器温度、压力、液位等关键变量的精准调控。例如，在聚合反应过程中，通过RL控制器动态调节冷却水流量与进料速率，可有效抑制“飞温”风险，同时提高产品批次一致性，降低次品率。

##### 3.4.2 预测性维护

关键动设备（如离心泵、压缩机、搅拌器）的非计划停机会严重影响生产连续性。通过部署振动传感器、电流互感器、红外热像仪等多源传感装置，结合边缘计算与机器学习模型（如LSTM、XGBoost），可构建设备健康状态评估体系。该体系不仅能识别早期异常征兆（如轴承磨损、不对中、气蚀），还可基于退化趋势预测剩余使用寿命（RUL），从而优化备件库存、合理安排检修窗口，大幅降低运维成本并提升设备可用率。

##### 3.4.3 智慧能源管理

化工是能源密集型行业，蒸汽、电力、冷却水等公用工程消耗占总成本比重高。借助数字孪生技术，可对全厂能源管网进行高保真建模与实时仿真，动态反映负荷变化、管道压损、换热效率等关键因素。在此基础上，利用优化算法（如混合整数线性规划MILP）制定最优蒸汽分配、冷却塔群控及空压机启停策略，实现能源流的精细化调度。

##### 3.4.4 智能安全防控

化工过程涉及高温高压、易燃易爆介质，安全风险始终是重中之重。通过融合气体浓度探测、视频AI分析（如火焰识别、人员越界检测）、气象数据及DCS工

艺参数,可构建多维联动的安全预警平台。一旦发生泄漏,系统可立即启动CFD(计算流体力学)模拟,预测毒气/可燃气体扩散路径,并结合人员定位信息自动生成最优应急疏散路线,同步联动通风、切断阀、喷淋等执行机构,实现“感知—研判—响应”闭环,显著提升事故防控与应急处置能力。

### 3.5 安全保障:构建纵深防御体系

安全是化工自动化系统集成不可逾越的红线。随着系统互联程度的加深,网络安全风险呈指数级增长,必须构建覆盖网络、终端、数据与应用的纵深防御体系。首先,应严格遵循IEC 62443等国际安全标准,对工厂网络进行科学分区,采用工业防火墙、单向网闸等技术手段实现IT与OT网络的有效隔离;其次,对PLC、DCS操作站等关键终端部署白名单机制与漏洞扫描工具,防止恶意代码注入;再次,对涉及工艺配方、控制指令等敏感数据实施端到端加密,确保其在传输与存储过程中的机密性与完整性;最后,建立安全运营中心(SOC),集成日志审计、入侵检测与自动化响应功能,实现对安全事件的实时监测、快速溯源与高效处置。唯有将安全理念贯穿于系统设计、建设与运维的全生命周期,才能为智能化转型保驾护航。

## 4 实施保障与未来展望

### 4.1 关键保障措施

技术路径的正确性只是成功的一半,强有力的实施保障同样不可或缺。企业应首先打破IT与OT部门之间的组织壁垒,成立由首席技术官(CTO)、首席信息官(CIO)与生产副总共同牵头的数字化转型办公室,统筹协调资源、统一目标与考核机制。在人才方面,亟需加强复合型人才培养,一方面可与高校合作开设“智能化工”“工业大数据”等交叉学科方向,另一方面应在企业内部开展全员数据素养培训,提升一线员工对智能化工具的理解与使用能力。此外,积极参与国内外相关标准制定工作,如IEC/TC65、全国工业过程测量控制和自动化标委会等,推动接口协议、数据模型与安全规范统一,有助于降低系统集成的复杂度与成本。最后,应

建立科学的投资回报评估机制,将短期效益(如节能降耗)与长期价值(如柔性提升、品牌溢价)相结合,确保数字化转型投入的可持续性。

### 4.2 未来发展趋势

展望未来,化工自动化将在工业4.0的持续演进中迈向更高阶形态<sup>[4]</sup>。AI原生自动化将成为新趋势,控制系统将内嵌大语言模型能力,支持自然语言指令交互与自主优化决策;绿色智能制造将深度融合,碳足迹追踪系统将工艺优化引擎联动,助力企业实现“双碳”目标;云边端协同架构将日益普及,在保障关键控制实时性的同时,充分利用云端强大算力进行复杂分析;更重要的是,随着国家对产业链安全的高度重视,国产化的DCS、工业操作系统、实时数据库等核心技术将加速替代进口产品,构建更加自主可控的工业自动化生态体系。

### 结语

工业4.0为化工自动化系统的革新提供了历史性机遇。本文研究表明,成功的集成与升级绝非简单的技术堆砌,而是一项涵盖战略、架构、数据、应用与安全的系统工程。企业需立足自身实际,以业务价值为导向,采取“平台筑基、数据赋能、场景突破、安全护航”的实施策略,方能在数字化浪潮中实现安全、高效、绿色、智能的可持续发展。未来,随着技术的持续演进与生态的日益成熟,化工自动化将从“自动化”迈向“自主化”,最终构建起具有高度韧性与自适应能力的下一代智能制造体系。

### 参考文献

- [1]胡轶哲.化工自动化控制技术中的应用与发展[J].化工设计通讯,2021,47(10):42-43.
- [2]邢东,高翔,曲波.化工自动化仪表及控制系统智能化分析[J].中国信息界,2024,(08):43-45.
- [3]叶得强,赵转霞,张彦龙.我国精细化工自动化控制的现状与发展趋势[J].当代化工研究,2023,(17):17-19.
- [4]王伟,安争邦.化工自动化控制系统的应用与发展[J].化工管理,2022,(20):112-114.