

精细化工生产自动化与智能化融合路径探索

张惠理^{1,2,3} 张廷敏^{1,2,3}

1. 甘肃艾利特新材料有限责任公司 甘肃 兰州 730020

2. 兰州精细化工有限责任公司 甘肃 兰州 730020

3. 甘肃省化工研究院有限责任公司 甘肃 兰州 730020

摘要:精细化工行业作为高端制造业的重要组成部分,其生产过程具有多变量耦合、非线性动态变化及质量敏感等特征,虽然其已经具有较高的自动化水平,但是随着时代的发展,智能化发展已经成为精细化工行业发展的主流趋势。文章围绕某精细化工企业,系统分析了其生产自动化向智能化融合过程中存在的问题,并进一步探讨了生产自动化与智能化融合中的关键技术,比如部署全域感知网络、整合多系统数据流、开发混合智能模型等技术措施,经过技术改造后生产效率和产品质量显著,并且能耗不断降低,能够为相关企业的智能化转型升级提供参考。

关键词:精细化工自动化;智能制造;融合;关键技术;能效

引言

制造业的智能化、绿色化转型是时代发展的必然趋势,在此背景下,精细化工行业作为高能耗、高排放企业必须进一步加快该方面的发展,积极推进自动化与智能化融合,这样才能够不断提高自身的生产效率和竞争力,满足国家对于化工企业的环保排放要求,实现自身的良性可持续发展^[1]。因此,做好相关融合路径和关键技术的研究,对于精细化工企业的发展具有重要作用。

1 企业概况

某企业成立于2003年,专注于高性能聚合物材料的研发与生产,主要产品包括特种工程塑料、功能性涂层材料等。企业拥有3条连续化生产线和5套间歇式反应装置,生产流程涵盖聚合反应、精馏分离、造粒成型等20余道工序。但是在长期发展中,企业面临工艺控制粗放、数据孤岛严重、能源效率低下、研发周期过长等问题,难以响应市场需求。2019年,企业启动“智能工厂2030”战略规划,核心目标是通过自动化与智能化融合实现质量、成本控制和敏捷制造能力方面的提升。

2 精细化工生产自动化与智能化融合的难点

精细化工生产自动化与智能化融合的难点主要体现在以下几方面:

第一,精细化工生产常涉及气-液-固多相反应,变量间存在强耦合性与非线性动态特征。以缩聚反应为例,温度与压力需保持动态平衡——每升高1℃需同步调节压力0.05MPa,人工操作滞后导致副反应增加3%;物料黏度随反应进程实时变化,黏度每增加10%需调整搅

拌功率15%,而传统DCS系统因控制逻辑固化无法动态响应;质量传递过程更呈现显著非线性,例如分子量增长速率在反应后期呈指数下降,固定控制参数导致40%批次未达理论值。这些特性使得传统PID控制算法难以应对多变量协同优化问题,而纯数据驱动模型又因缺乏工艺机理约束易陷入“黑箱”困境。

第二,数据治理复杂。企业数据资产不仅呈现高维度、高噪声、高异构性的特性,同时也存在低关联性、低时效性、低知识转化率等特点,这种复杂性导致数据孤岛效应显著,关键参数追溯需要人工跨系统比对,工艺知识难以沉淀为可复用的数字资产,严重制约数据驱动决策的落地。

第三,精细化工能源流具有多级转换特性,蒸汽系统从锅炉到反应釜的热能传递效率较低管道散热损失非常高、电力系统中变频与恒速设备混用导致峰谷负荷差达40%。传统能源管理系统(EMS)仅实现基础计量功能,未能建立“生产任务—设备负载—能源消耗”的动态关联模型,这种割裂的能效管理方式,使得企业难以实现能源流与生产流的深度协同,无法挖掘系统性节能潜力。

3 精细化工生产自动化与智能化的技术路径

3.1 总体架构设计

为实现自动化与智能化的深度融合,企业构建了“三横四纵”智能工厂架构,如图1所示,形成从物理设备到数字空间的闭环优化体系。横向三层主要围绕基础设施层进行层级化部署:在设备层,通过智能传感器与边缘计算节点实现生产全要素的数字化映射,例如在反应釜部署光纤光栅阵列实时监测温度场分布;网络层采

基金项目: 高技能人才专项(24RCKA018)重点研发计划-工业领域(24YFGA051)

用5G与TSN（时间敏感网络）融合组网^[2]，确保关键控制指令传输延迟低于10ms，满足结晶过程实时调控需求；平台层依托工业互联网平台，集成数据中台（统一治理多源数据）、AI中台（封装工艺优化算法）与业务中台（支撑生产调度决策），形成智能中枢。纵向四链则与生产环节进行全方位结合：工艺链通过数字孪生实现反应过程的动态优化；设备链基于预测性维护延长关键机组寿命；能源链建立多能流协同模型挖掘节能潜力；质量链利用区块链技术实现从原料到成品的全生命周期追溯，这一架构通过横向资源整合与纵向业务贯通，构建了“感知—分析—决策—执行”的完整闭环。

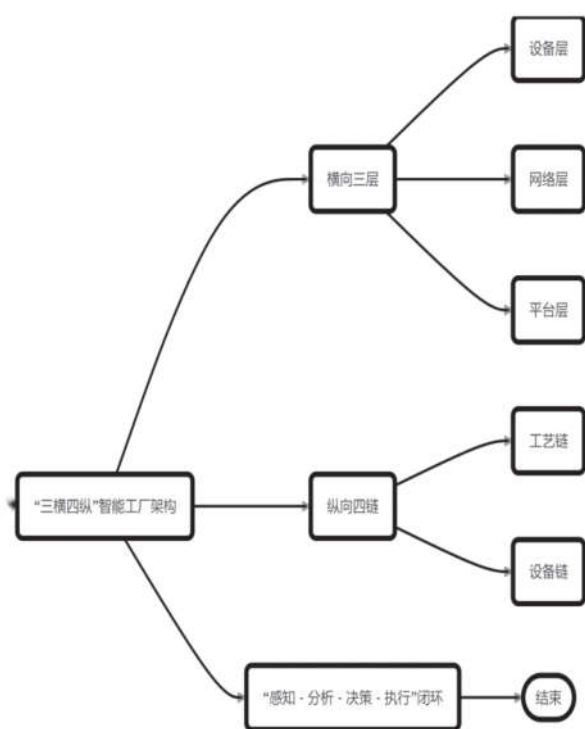


图1 三横四纵示意图

3.2 关键技术实施

3.2.1 建设全域感知网络

针对传统生产过程中“盲人摸象”式的数据采集缺陷，企业构建了覆盖“设备—工艺—环境”的全域感知网络。在设备状态监测方面，反应釜内壁安装的分布式光纤光栅阵列，可实时捕捉温度场三维分布，结合声发射传感器对搅拌桨叶片裂纹进行亚毫米级检测^[3]，解决了传统单点测温导致的局部过热失控问题。对于工艺参数的动态跟踪，在线黏度计（振动式）每5秒更新一次物料流变数据，通过黏度-分子量关联模型（ $R^2 = 0.93$ ）间接监控反应进程，弥补了离线取样检测的滞后性。环境感知层则部署了多光谱成像系统，例如在造粒工序采用高

光谱相机（波长范围400-1700nm）捕捉颗粒表面形貌，结合卷积神经网络（CNN）实现粒径分布在线分析，将质量反馈周期从2小时缩短至10分钟。值得强调的是，边缘计算节点的部署使数据预处理效率提升80%，通过在设备侧完成振动信号FFT变换、温度数据滑动平均滤波等操作，有效降低了云端计算负载。

3.2.2 构建数据智能中枢

智能控制必须建立在大量数据信息和数据挖掘的基础上，企业首先建立数据血缘管理体系，对387个数据实体，如反应温度、蒸汽流量、设备振动频谱等进行元数据标注，明确2056条关联关系，如“反应温度—压力—转化率”的动力学耦合，解决了跨系统数据追溯难题。针对数据质量问题，开发包含32类清洗规则的算法库：采用基于孤立森林的异常检测算法处理电磁干扰导致的温度跳变数据；应用KNN插值法填补因网络中断造成的缺失值；对于高噪声的振动信号，则通过小波阈值降噪提升信噪比至15dB以上。在数据建模层面，构建了机理与数据双驱动的混合模型——以缩聚反应为例，首先基于Arrhenius方程建立反应动力学机理模型^[4]，确定转化率与温度、压力的理论关系；再通过LSTM网络学习历史数据中的非线性特征，如催化剂失活效应，最终采用卡尔曼滤波实现两类模型的动态互校。这种“白箱+黑箱”的融合策略，能够有效降低分子量预测误差，同时模型可解释性显著增强，工艺人员可通过贡献度分析直观查看各变量的影响权重。

3.2.3 智能化控制系统开发

智能化控制的核心在于对整个生产过程进行优化，具体可以围绕工艺控制、设备健康管理和质量追溯几方面构建“感知—决策—执行”闭环控制。

第一，在工艺控制方面，开发了自适应模型预测控制（MPC）算法，以缩聚反应温度—压力协同控制为例，构建包含20个状态变量的动态模型，滚动优化时域设为15分钟，通过求解目标函数实时调整加热功率与泄压阀开度，然后结合生产过程中的温度、压力以及预设的温度压力曲线，根据实时温度和压力变化在生产过程中的影响权重进行滚动调整。

第二，设备健康管理则构建了“信号采集—特征提取—智能诊断”三级体系，从振动信号中提取峭度、波形因子等12维特征，训练1D-CNN网络分类轴承故障类型（准确率95%），并结合Wiener过程预测剩余寿命（误差 $\pm 8\%$ ），使非计划停机减少70%。

第三，质量追溯系统引入区块链技术，将原料批号、工艺参数、检测结果等关键数据上链存证，实现

“一物一码”全流程追踪，质量问题定位时间从4小时压缩至15分钟。当某批次产品出现问题时，系统在15分钟内定位到相应的机器波动事件，并追溯到供应商提供的特定原料批次，提高问题，解决效率。

3.2.4 能效协同优化

为了尽可能降低生产中的能耗，在智能化融合中必须针对各个系统通过能源流来实现对生产系统的精细化管理^[5]。第一，蒸汽系统通过数字孪生技术构建管网阻力模型，采用遗传算法优化阀门开度组合，定义适应度函数为总压降最小化，约束条件包括各用户端最低压力需求，迭代计算后，能够有效降低主干线压降，节约蒸汽。第二，冷凝水闪蒸回收装置将0.3MPa闪蒸汽引入原料预热系统，有效提高了热能利用率。第三，电力系统实施需求侧响应策略，基于GRU网络预测未来24小时负荷，输入变量包含生产计划、天气预报等，在电价峰期自动启动冰蓄冷系统储存冷量，平谷期优先运行高耗能设备，有效节约电力成本。第四循环水系统建立换热网络拓扑模型，定义优化目标为泵耗最小化：

$$\min \sum_{i=1}^N (k_i \cdot f_i^3)$$

此外，开发的多能流耦合优化模型将蒸汽、电力、循环水系统纳入统一框架，每小时求解一次能源成本最优化问题，有效提高能耗利用率，降低生产成本。

多能流耦合优化的本质是建立能源供给、转换、消耗的全链路动态平衡模型。系统架构由以下几层组成：

（1）物理层：部署智能电表、蒸汽流量计（超声波热量表等感知设备；（2）模型层：构建蒸汽—电力—循环水耦合的数字孪生体；（3）优化层：采用混合整数非线性规划（MINLP）求解多目标优化问题。在满足生产计划的前提下，动态调整锅炉产汽压力、电力负荷分配及水泵运行策略，实现全厂能源成本最小化，并破解了多时间尺度、多变量类型的协同优化难题。

4 智能化改造的成效分析

经过智能化改造后在质量控制、设备管理等多方面发挥了良好的效果。首先在质量控制方面，通过部署在线高光谱检测系统与数字孪生驱动的工艺优化模型，实时监控分子量分布、晶型结构等关键质量属性（CQAs），将产品优品率从78%提升至94.3%。例如结晶工序采用拉曼光谱实时反馈晶型转变进程，结合模糊

控制算法动态调节降温速率，使晶型一致性标准差从15%降至3%，客户投诉率下降82%。其次，形成了预测性的维护体系。基于振动信号特征库与1D-CNN故障诊断模型，提前14天识别出搅拌桨轴承磨损趋势，非计划停机率从12%降至3.5%，MTBF（平均故障间隔）延长至6500小时，年减少故障维修成本420万元。最后，通过多能流协同模型实现了能效的提升，例如蒸汽系统应用遗传算法优化管网阀门开度组合，降低压损22%；循环水数字孪生模型动态调整换热网络，使回水温度降低8℃。单位产品综合能耗从2.3tce/t降至1.73tce/t，年节约标准煤1.2万吨，达到国际先进水平（表1）。

表1 生产效能提升关键指标对比

指标	改造前	改造后	提升幅度	核心技术措施
产品优品率	78%	94.3%	+16.3%	高光谱在线检测+数字孪生优化
非计划停机率	12%	3.5%	-70.8%	1D-CNN故障预测模型
单位产品能耗	2.3tce	1.73tce	-24.7%	多能流协同优化模型
质量追溯时间	4小时	15分钟	-93.8%	区块链全生命周期追溯

结语

精细化工生产自动化与智能化的融合，其本质是将化学反应变化与数字智能技术相结合，有针对性地引入相应的智能化、数字化技术，以此来实现生产自动化和智能化融合的目标。但是随着工业5.0理念的深化，精细化工企业在智能化和自动化融合中，仍需要持续跟踪融合的效果，从单点优化逐渐迈向全链条协同，最终实现从“制造”到“智造”的跨越式发展。

参考文献

[1]王飞.智能监控系统在化工环境材料生产过程中的应用[J].电子技术,2024,53(12):236-237.
[2]吴昊.云计算、大数据与人工智能在化工企业生产与管理中的应用实践[J].生态产业科学与磷氟工程,2024,39(12):75-80.
[3]魏红佳,高晓燕,黄顺林,等.浅谈智能化MES系统在化工生产装置中的应用[J].纯碱工业,2024,(06):43-45.
[4]王科平,巩方舟.石油化工行业智能化生产模式的构建与效益分析[J].石化技术,2024,31(11):294-296.
[5]尤彩虹.计算机技术辅助化工企业智能化生产的应用研究[J].热固性树脂,2023,38(06):72.