

# 煤化工智能工厂运行管理系统软件功能架构

郭建钊 刘东庆 招庚 宋凯峰

石化盈科信息技术有限责任公司 北京 100020

**【摘要】**：煤化工智能工厂运行管理系统以实时数据感知、动态建模和智能推演为基础，将生产装置、物流环节、能源系统与安全管控纳入统一架构，通过高度集成的数字平台实现跨环节协同与快速响应机制。系统在复杂工况识别、运行状态优化与风险预警等方面形成自适应能力，确保关键指标能够在高负荷、变工况条件下保持稳定。通过引入机器学习、边缘计算和多源数据融合方法，运行管理模式逐渐从经验驱动转向模型驱动，使资源配置更趋精细化，过程控制更加透明可追溯，设备运行状态得到持续优化。该系统为煤化工行业在能效管理、装置稳定性与安全控制方面提供新的技术路径，也推动生产方式向智能化和高可靠性方向演进。

**【关键词】**：煤化工；智能工厂；运行管理；数据融合；智能决策

DOI:10.12417/2811-0722.26.04.006

## 引言

煤化工生产过程跨装置、跨系统、跨专业，工况波动频繁，能耗结构复杂，传统的管理方式难以实现对全流程的实时感知与快速响应。随着感知技术、智能算法与工业网络的持续发展，生产过程的关键变量能够更加清晰地被捕获、分析与推断，使复杂系统具备动态调控的可能性。越来越多的实践表明，借助智能化运行管理体系，装置间的联动关系得以被重新刻画，生产组织方式也呈现新的特征。围绕这一趋势构建的系统架构，为提升安全韧性与运行效率提供全新的技术基础，并促使煤化工生产向更加稳定、高效、透明的方向迈进。

## 1 煤化工运行难题的主要表现

煤化工生产在高温、高压、强腐蚀等复杂条件下展开，运行过程呈现多变量、高耦合与强扰动的综合特征。装置之间的物料、能量与信息流交织，形成显著的链式影响机制，使细微偏差也可能放大为系统层面的波动。装置开停、负荷切换，更使过程稳定性承受持续压力。实时监测维度有限、动态信息不完整的状况，使工况演变规律难以被全面掌握，许多关键变量的变化速度快于人工分析能力，导致判断延迟与调节滞后频繁出现<sup>[1]</sup>。面对复杂反应路径与物性差异明显的原料结构，传统控制逻辑在适应性方面表现不足，装置性能难以在高负荷区间保持稳定，波动累积带来的能耗上升、安全裕度削弱等问题更加突出。

随着生产规模扩大，数据来源分散且格式差异明显，使运行决策缺乏可视化与统一性支持。自动化装置之间协议不一致、信息隔离严重，使数据流无法形成连续链路，各类监测平台独立运转，难以支撑跨装置的整体优化。能源系统对煤化工影响显著，但蒸汽、余热、燃料气等多能源耦合强度高、时变性明显，单装置优化往往与全流程目标存在偏差。由于装置多处于高能耗、高换热强度运行区间，设备劣化速度快，状态参数频繁偏离设计点，导致运行管理在维持稳定性方面投入大量人力。设备间缺乏全生命周期的数据支撑，使故障征兆难以及

早暴露，振动、泄漏、结焦等常见风险在隐蔽阶段缺乏有效识别手段，生产系统运行弹性不足。

安全管控面临的挑战也在持续积累。煤化工过程普遍伴随易燃、易爆、有毒介质，任何局部异常均可能引发连锁反应。报警量过大、干扰信号密集，使真正关键事件容易被淹没，风险识别与应急联动的有效性受到削弱。环境扰动与负荷切换带来频繁过渡工况，现有控制策略在变量预测与路径规划方面能力有限，难以保障操作窗口保持在安全边界内。操作经验依赖度高、标准化程度不足，使不同班组间的运行水平差异明显。加之管理系统之间数据壁垒未完全打通，安全、生产、设备等要素难以实现协同判断，使复杂系统的风险传播链条难以被准确刻画，形成煤化工运行中长期存在的突出难点。

## 2 智能工厂体系的核心框架构建

智能工厂体系的核心框架在于构建覆盖全流程的多层级协同结构，使生产装置、管控单元与计算资源以统一模型进行组织。底层以高密度感知网络为基础，通过工业传感器、物联网终端与边缘节点采集化工反应、能量流动与设备运行状态等关键参数，形成可持续更新的数据底座。动态数据经由现场总线、工业以太网与时间敏感网络准确传输，使时序特征与突变信息能够被快速捕获<sup>[2]</sup>。围绕这一数据基础搭建的实时模型库涵盖反应动力学模型、热力学平衡模型以及系统级机理模型，为复杂过程的解析与预测提供数学支撑，使运行状态能够被连续、结构化地描述。

在数据基础之上，体系的核心在于构建面向业务场景的数字孪生结构，通过虚实映射方式对关键装置、能源系统与管控单元形成全域镜像。虚拟工厂以高精度模型作为计算核心，以数据流作为驱动源，对真实工况进行并行推演，使负荷变化、扰动传播与装置联动关系得以量化呈现。以数字孪生为技术载体的中枢平台能够实现快速调度、跨装置协调与优化调控，为复杂流程提供统一的运行逻辑。平台内部配置的机器学习模块对波动模式、异常特征与能耗曲线进行持续训练，使模型在不

同工况间具备迁移能力,从而支撑生产策略的自动生成与多维度验证。数据标准化结构进一步保证跨系统信息的互认,使生产、设备、能源、安全等业务单元以同一语义体系进行交互。

在运行与管控层面,体系强调决策闭环的构建,通过调度中心、智能控制室与边缘控制单元形成分布式协同架构。上层调度中心承担全局优化与生产平衡,依据预测结果与风险评估自动生成操作策略;中层控制室合并多系统界面,基于态势感知图谱对关键变量进行连续追踪;底层控制单元与智能执行机构以高速响应模式执行调节命令,实现对反应温度、物料配比与能量分配的动态控制。各层之间通过反馈通道保持同步,使得任何策略变化能够在虚拟系统中快速验证后,应用于实际操作环境,减少偏差放大与操作风险。借由这种多层嵌套式架构,智能工厂体系形成自适应、自感知、自调节的整体运行机制,使煤化工复杂流程具备更高的透明度与可控性。

### 3 运行管理系统的核心技术路径

运行管理系统的核心技术路径依托对复杂过程的深度解析,通过多源数据融合、智能计算模型与实时控制策略的协同构建,实现对煤化工生产活动的识别、推断与调度。系统以工业数据链为驱动,将过程参数、设备状态、能源交换与环境扰动的时序特征进行结构化处理,通过特征提取算法识别关键变量间的耦合关系,使隐藏在大规模数据中的模式得以显现<sup>[3]</sup>。高频采集的数据与机理模型在融合层形成动态反馈,使参数漂移、反应偏移与能耗异常能够被及时捕获。为了提高模型表达能力,系统引入注意力机制、深度时序网络与贝叶斯推断,对波动趋势进行智能化自适应学习,使预测结果能够覆盖快速变化的工况区间,为后续控制策略提供稳定依据。

智能优化模块在体系中承担核心作用,通过强化学习、模型预测控制与多目标求解算法构建可执行策略。复杂装置的非线性、不确定性与耦合关系通过黑箱模型与机理模型的混合结构得到刻画,使系统能够在非稳态区间生成可行路径。优化模块对物料平衡、能量梯级利用、约束边界与安全余量进行综合计算,使运行策略保持在可控区间内。为提升计算速度,在关键节点部署边缘计算装置,使部分调控任务能够在现场完成,减少中心系统的负载压力,并降低延迟带来的控制误差。多尺度建模方法进一步拓展了系统能力,使装置级、系统级与全流程级模型保持一致性,为跨区域联动调节提供可靠基础。

在执行层面,系统通过人机协同界面、智能操作单元与执行机构建立闭环调控通道。态势感知界面对关键参数、异常趋势与装置间耦合状态进行可视化表达,使运行人员能够及时捕捉系统变化。智能操作单元根据模型反馈生成可执行指令,并在数字孪生环境中进行快速验证,以减少策略实施过程中的不确定性。执行机构与智能阀门、变频调节装置协同响应,将策略转化为实际调控动作,使反应器温度、压力波动、物料切换与能量分配保持在设定区间内。借由这种结构化技术路径,运

行管理系统形成贯穿数据采集、状态识别、策略优化与执行反馈的连续链路,为煤化工智能工厂提供稳定的运行支撑。

### 4 生产协同与安全管控的智能化实现

生产协同的智能化依托对全流程资源流与装置联动关系的动态掌握,以统一的数据基线对物料、能量与信息通道进行同步管理。系统通过多场景调度模型解析装置负荷变化、反应强度波动与能源需求差异,使不同单元之间的匹配度得以实时量化。生产节拍、物流路径与能量分配在动态优化机制下不断调整,使流程内部的耦合强度被有效控制<sup>[4]</sup>。数字孪生环境为跨装置协调提供推演能力,通过虚拟计算评估各类扰动对系统平衡的影响,使调度策略能够保持连续性与可行性。生产组织在此基础上形成更具弹性的结构,使高负荷区间的波动不再集中传递,而是通过智能分配机制得以分散与平滑。

安全管控的智能化建立在多维感知系统的基础上,对易燃、易爆、有毒介质的行为特征进行连续捕捉。系统通过声发射、红外成像、气体指纹识别等技术监测潜在异常,使设备早期退化信号具备可识别性。模型对压力跃变、温度漂移与流量细微波动进行关联分析,从中提取隐蔽风险的形成路径,使管控逻辑能够提前介入。报警系统基于事件关联度与风险权重自动筛选关键警报,减少干扰信息对运行人员决策过程的影响。安全边界在动态预测模型的计算下得到及时修正,使控制指令始终位于可操作区域之内,避免因变量偏离造成的连锁后果。

协同生产与安全管控在智能系统中通过统一决策中枢实现融合。该中枢以态势感知图谱为基础,将生产状态、设备健康度与环境风险纳入同一监测空间,使事件传播路径得以完整呈现。调度策略在生成过程中自动避让高风险区域,使产能提升与风险抑制能够并行推进。执行层通过智能联锁、自动防护逻辑与快速切断机制,将决策转化为可响应的安全动作。系统的闭环结构保证生产效率的提升不会以牺牲安全为代价,使煤化工流程在复杂条件下仍能维持稳定、清晰且可控的运行秩序。

### 5 智能工厂运行成效的综合归纳

智能工厂的运行成效体现在流程调控能力、资源配置效率与生产稳定性的整体提升。通过多维数据融合与动态预测机制,复杂过程的关键变量得以持续追踪,使装置在高负荷区间仍能维持稳定运行。生产系统对扰动的敏感性降低,负荷切换、原料波动与环境变化对整体平衡的冲击显著减弱。装置间的耦合关系经由模型推演被重新刻画,生产节奏与物料路径在实时优化逻辑下更加清晰,能源梯级利用结构也随之得到改善<sup>[5]</sup>。智能调控策略的实施使反应温度、压力、转化率等指标呈现更高的稳定度,为连续化生产提供可靠支撑。工厂整体运行状态的透明度提升,使管理层能够以全局视角对过程进行干预,从而减少依赖个人经验带来的偏差。

在设备与能源体系方面,智能化运行机制增强了状态识别与精准调配能力。设备健康度模型能够捕捉早期退化信号,对振动异常、密封衰减与换热效率下降等问题实现提前预判,使计划性检修策略更加合理,减少突发停机概率。能源系统基于负荷预测与流向计算形成更具弹性的调节模式,使蒸汽网络、燃料气系统与余热回收设施在动态环境下保持稳定分配。高能耗单元通过模型预测控制缩小偏离范围,使单位产品的能耗进一步优化。设备全生命周期数据的积累使管理模式从被动响应转向主动维护,提高了运行的连续性与可靠性,也为提升装置利用系数提供了技术基础。资源配置的精准化进一步增强成本控制能力,使生产组织更加稳定。

在安全与协同管理领域,智能工厂运行展现出明显成效。多源感知手段强化了隐蔽风险的暴露能力,使高危介质状态与管道微泄漏等细微异常能够被及时识别。风险模型在事件形成阶段即介入判断,使警报体系更加聚焦,减少不必要的信息干

扰。态势感知图谱打通了生产、设备与安全之间的数据链路,使事件传播路径得以完整呈现,调度系统据此调整生产策略,避免潜在风险向关键区段扩散。自动化防护逻辑通过智能联锁、快速切断与紧急处置策略构建高响应能力,使安全边界在动态条件下保持有效。协同运行能力的增强不仅减少了装置之间的冲突,还提升了整体生产节奏的流畅性,使煤化工智能工厂在复杂工况下展现出更强的稳定性。

## 6 结语

智能工厂的建设使煤化工生产在复杂性、连续性与安全性方面展现出全新的运行格局。多源数据的融合、智能模型的介入以及分层协同的控制结构,使流程调控更为精细,系统韧性显著增强。生产节奏的稳定、设备健康度的提升与风险识别能力的加强共同构成了新的运行优势,使传统流程具备更高的可控性与透明度。随着技术体系不断完善,煤化工智能化运行将持续推动工厂向高效、稳态与安全的方向迈进。

## 参考文献:

- [1] 李丹杰,田敏慧,李豪,等.煤化工废水深度除氟技术试验研究[J].工业用水与废水,2025,56(06):29-34.
- [2] 宋卫,徐海军.智能工厂梯度培育体系构建与实施路径[J].企业科技与发展,2025,(11):76-83.
- [3] 阿都庆.煤化工管道系统的腐蚀失效分析与防护对策[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(22):15-17.
- [4] 刘彦波,邵嘉铭,赵路军.流程工业智能工厂建设方法及应用实践[J].石油化工自动化,2025,61(06):1-9+30.
- [5] 马军忙,张安平,史晶.煤化工智能工厂建设的实践与研究[J].自动化应用,2023,64(18):10-14+17.