

自动化仪表在化工行业中的应用及对企业经济效益的提升

田花妮 张野 雷荣获 梁立明(中国石油庆阳石化公司,甘肃 庆阳 745002)

摘要: 化工行业作为流程工业的典型代表,其生产过程涉及复杂的物理化学反应与能量传递。自动化仪表通过在线监测与智能控制实现工艺参数精准调节,构建起覆盖全流程的感知与控制网络。从原料投加到产品输出,各类传感器与执行机构形成闭环调节体系,在提升生产连续性的同时优化能源与物料消耗。系统集成DCS与PLC控制架构,实现设备联动与异常工况快速响应,为化工企业创造多维经济效益。

关键词: 自动化仪表; 化工生产; 过程控制

0 引言

化工生产装置具有高温高压、易燃易爆等特性,传统人工操作模式难以满足现代工艺控制精度要求。温度波动超过2℃可能引发副反应,压力控制偏差导致设备超限运行风险。自动化仪表系统实时捕捉工艺参数变化,通过控制算法输出调节指令,将生产过程稳定在最佳工况区间。这种技术变革重构了化工企业的运营模式,在确保安全环保的前提下显著提升经济效益。

1 国内外自动化仪表技术发展现状

当前全球自动化仪表技术呈现智能化与网络化深度融合的发展态势。国际市场上,欧美企业持续引领高端技术创新,西门子、艾默生等厂商开发的智能变送器已实现设备寿命预测与自校准功能,其边缘计算模块在断网状态下仍能维持基础控制。日本企业突破耐腐蚀材料瓶颈,陶瓷传感器在强酸强碱环境下的稳定性达到8000小时连续运行标准。工业物联网推动现场总线向OPCUA架构演进,使得跨国企业的控制系统数据交互延迟压缩至毫秒级。亚太地区成为全球最大智能仪表市场,预计2024年市场规模年增长率达15%,欧盟环保法规与北美技术创新共同推动智能仪表在能源、交通等领域的渗透。国内自动化仪表技术聚焦自主可控与集成创新,高精度压力变送器突破0.05%测量精度,多参数分析仪实现抗干扰算法升级^[1]。政策层面,《仪器仪表行业“十四五”规划》推动国产替代,川仪股份等企业在中端市场形成竞争力,并向高端领域突破。工业物联网技术应用中,DCS系统与PLC控制器实现毫秒级数据交互,边缘计算模块嵌入使本地决策能力提升40%。耐高温压力传感器在炼化装置的应用寿命突破3万小时,国产化率从2019年的32%提升至2024年的57%。当前国内企业正加速布局智能诊断、数字孪生等前沿技术,在华北、华

东地区形成智能仪表产业集聚带。

2 自动化仪表技术在化工行业的应用现状

2.1 提高生产效率的作用机制

2.1.1 实时监控与精准控制

高密度传感器网络覆盖反应器关键区域,通过热成像技术捕捉温度分布的毫米级差异,结合自适应控制算法动态调节加热介质流量,将温度波动范围压缩至传统控制的五分之一。多光谱分析仪以秒级频率扫描反应物料成分,联动智能阀门实现原料配比的即时修正,消除因人工调整滞后导致的批次差异。在线黏度计实时反馈物料流变特性,自主调节搅拌转速与桨叶角度,避免局部剪切过热引发的副反应。精馏塔部署阵列式压力传感器,通过塔板效率模型动态优化回流比,使产品纯度提升的同时蒸汽消耗降低两成。这种全流程的闭环控制将工艺参数稳定性提高一个数量级,推动生产节奏从经验驱动转向数据驱动。

2.1.2 降低人工干预频率

分布式控制系统内置3000余条标准操作程序,自动完成从设备预热到产品采出的全流程控制,夜间生产时中控室仅需保留三分之一的值守人员。智能变送器搭载自诊断芯片,持续监测膜盒应力与电路状态,提前72小时预警潜在故障并生成维护工单,使预防性检修占比提升至八成。多级报警管理系统运用模糊逻辑算法过滤误报信号,将有效报警响应时间缩短至人工处理速度的十分之一。联锁保护系统在检测到参数越限的瞬间触发预设动作序列,其决策速度比人工操作快三个数量级,成功阻断九成以上可能升级为事故的异常工况。生产报表自动生成模块整合实时数据与历史趋势,消除手工转录错误的同时释放三成管理人力投入增值工作^[2]。

2.1.3 缩短生产周期

催化剂活化单元引入微波加热与在线活性监测技

术，将预处理时间从传统工艺的八小时压缩至两小时以内，能耗同步降低四成。连续生产线配置智能启停系统，通过设备协同控制算法消除工序间的等待空转，使有效生产时间占比突破九成五。自适应清洗程序根据反应器内壁残留物的激光光谱分析结果，动态优化清洗剂配方与作用时间，将清洗周期延长一半的同时减少三成废水产生。产品切换阶段采用模型预测控制技术，自主计算最优过渡曲线并实时修正执行参数，使牌号转换期间的过渡料产生量减少六成。设备健康管理系统通过振动频谱与润滑油颗粒分析，提前两周识别潜在故障特征，彻底消除非计划停车对生产连续性的影响。

例如，山东某石化公司 2023 年实施聚丙烯装置智能化改造，通过部署高密度传感器网络与智能控制系统，实现全流程实时监控与精准控制。在反应器关键区域安装 256 个温度传感器阵列，结合红外热成像技术，将温度控制精度从 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 提升至 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ，催化剂活性保持时间延长 35%。多光谱在线分析仪每 5 秒扫描反应物料成分，联动智能调节阀动态修正原料配比，使批次间分子量分布标准差降低 58%，产品合格率从 92% 提升至 99.6%。降低人工干预方面，该公司引入的 DCS 系统集成 4200 条标准操作程序，夜间生产中控室值守人员从 12 人减至 4 人。智能变送器自诊断模块提前 48 小时预警机封泄漏风险，预防性检修占比达 85%，非计划停车次数下降 82%。联锁保护系统响应时间缩短至 80ms，成功拦截反应釜超压等 12 次潜在事故，年避免经济损失超 2000 万元。此外在生产周期优化环节，催化剂微波活化单元将预处理时间从 7 小时压缩至 1.5 小时，单日产能提升 25%。采用激光光谱引导的智能清洗系统，清洗周期从 72 小时延长至 120 小时，废水排放量减少 38%。产品牌号切换时间从 6.5 小时缩短至 2.8 小时，过渡料产生量降低 63%，年增效 1.2 亿元。通过智能化改造，该公司不仅提高了生产效率，还大幅降低了环境负担。结合数据驱动的精细化管理，进一步增强了生产过程的稳定性和可预测性。系统自适应调整能力不断优化，使得设备利用率和资源利用率持续提升，带来更为显著的经济效益。

2.2 降低生产成本的途径

2.2.1 节能降耗效果分析

蒸汽管网安装智能疏水阀组与压力平衡系统，根据实时负荷需求动态调节供汽压力，将管网热损失削

减两成以上。空压机群控平台基于用气需求预测模型自动调配运行机组，使部分负荷工况下的电能浪费减少四成。循环水系统引入变频控制与端差优化算法，根据换热器工况动态调整水泵转速，年节电量相当于中型化工厂一个月的总能耗。精馏塔再沸器配置热泵集成装置，通过余热回收将蒸汽消耗量降低三成。照明系统接入人员定位与环境光感模块，实现按需照明的精细化管理，年节省照明用电相当于三百户家庭的年度消耗。

2.2.2 原材料利用率提升

反应进料系统采用质量流量计与在线色谱联用技术，将原料配比误差控制在万分之五以内，减少过量投料造成的浪费。催化剂监测模块实时跟踪活性衰减曲线，通过原位再生技术延长使用寿命五成以上。溶剂回收塔装备智能压力 - 温度控制系统，将高价值溶剂的回收率提升至接近理论极值。边角料分选线引入机器视觉与近红外光谱技术，自动识别可回用物料并分类收集，使废弃物产生量减少四成。包装环节配置高精度充填机械手，将灌装误差压缩至法规要求的五分之一，年减少物料损耗相当于中型仓库的存储量。

2.2.3 减少停车损失

设备预测性维护系统通过振动分析与油液检测，提前两周预警轴承磨损趋势，避免突发故障导致的全线停产。安全仪表系统采用三重冗余架构，将误动作概率降至百万分之一级别，年减少非计划停车时长相当于增产十五个批次。关键机组配置在线备机自启动装置，在主设备故障时三秒内无缝切换，彻底消除生产中断风险。数字化仓储系统实时跟踪备件库存，结合设备健康数据智能生成采购计划，将备件资金占用减少三成。应急响应平台集成三维工厂模型与实时数据，自动生成最优处置方案，使事故恢复时间缩短六成。

2.3 产品质量提升的保障机制

2.3.1 工艺参数稳定性控制

结晶器配置激光粒度分析仪与过饱和度反馈系统，通过动态调节降温速率使晶体生长环境保持最佳状态，产品粒径分布均匀性提升两个等级。聚合反应器安装扭矩传感器与在线黏度计，采用多变量控制算法维持反应体系流变特性稳定，使分子量分布宽度指数优于行业标准三成。涂层设备集成厚度测量与自动补偿装置，在基材速度波动时即时修正喷涂参数，将膜层均匀度偏差控制在微米级。干燥工序采用露点追踪技术，根据物料含水率变化自主调节热风条件，消

除局部过烘导致的品质劣化。这种全要素的稳定化控制使产品关键指标波动范围收窄八成以上。

2.3.2 产品一致性保障

制造执行系统贯通从原料投料到成品包装的数据链，实时比对 200 余项工艺参数与标准曲线，自动修正偏离设定值的操作变量。颜色在线检测仪联动调色系统，在物料混合阶段即时调整色浆比例，使批次间色差控制在肉眼不可辨范围。金属探测器升级至 X 射线荧光光谱级别，实现非接触式快速筛查，将异物混入风险压制至百万分之一概率。包装线配置高精度称重模块与视觉复核系统，使单件产品净含量误差稳定在法规允许值的五分之一以内。全过程质量数据自动上传至云端追溯平台，任何异常都可溯源至具体设备与操作节点，质量问题定位时间从传统模式的两天缩短至两小时。

2.4 安全与环保效益

2.4.1 事故预防与风险控制

分布式气体检测网络覆盖全厂高风险区域，采用电化学与红外双原理传感器交叉验证，在泄漏发生三十秒内触发立体声光报警。反应釜安全仪表系统实时计算热累积速率，在失控风险显现前启动紧急冷却与泄压程序，将爆炸事故概率压制在万分之一以下。设备腐蚀监测运用超声波与电磁耦合技术，建立管道壁厚退化预测模型，提前三个月预警高风险部位。智能应急指挥平台集成三维厂区模型与人员定位数据，事故发生时自动生成最优逃生路径并启动对应区域的门禁释放。这些技术措施构建起全天候防御体系，使重大工艺安全事故发生率趋近于零。

2.4.2 减少排放与环保达标

废气焚烧炉装备多通道温度监控与燃烧效率优化系统，通过动态调节二次风量将二噁英排放浓度压制至检测限以下。废水处理单元采用多参数联动控制策略，根据进水水质波动自主切换处理工艺，确保出水 COD 稳定达到地表水Ⅲ类标准。溶剂回收塔实施全自动压力-温度复合控制，将有机溶剂的回收率提升至接近理论极值，危废产生量减少八成。噪声治理系统安装阵列式声波传感器与自适应降噪装置，实时抵消设备运行产生的特定频率噪音，使厂界声环境质量优于国家夜间标准。环保设施的智能化升级推动企业清洁生产水平跨入行业前列，为可持续发展奠定技术基础。

比如湖北丽康源化工在 2023 年对其合成氨生产装置实施智能化改造，通过部署自动化仪表系统实现

全流程效率提升。在氢氮比控制环节，采用红外气体分析仪实时监测合成塔入口气体成分，结合前馈-反馈复合控制算法动态调节原料气配比，使氢氮比波动范围从传统控制的 ± 0.3 压缩至 ± 0.05 ，催化剂利用率提升 40%。另外反应器内安装 32 通道光纤温度监测系统，通过三维热场建模技术捕捉温度梯度分布，联动智能调节阀动态调整蒸汽注入量，消除局部热点导致的催化剂烧结风险。在线气相色谱仪每 2 分钟更新一次组分数据，自主优化驰放气回收比例，将原料气损耗降低 25%。精馏塔配置差压变送器阵列，基于塔板效率模型自动计算最佳回流比，蒸汽消耗量减少 18%。此外 DCS 系统集成 2800 条标准化操作程序，实现从造气、净化到合成的全工序自动衔接，夜间生产时中央控制室人员配置减少 60%。智能压力变送器内置自诊断模块，提前 48 小时预警压缩机活塞环磨损趋势，预防性检修占比提升至 82%。联锁保护系统采用三重冗余设计，在检测到气体泄漏的 0.1 秒内触发紧急切断阀，成功避免 5 次合成气爆燃事故。最后催化剂微波再生系统将活化时间从传统工艺的 12 小时缩短至 3 小时，单日投料批次增加 3 次。采用激光诱导击穿光谱 (LIBS) 技术检测反应器内壁结焦厚度，动态优化机械清洗周期，非计划停车次数下降 75%。产品切换阶段引入动态矩阵控制算法，将合成氨与尿素生产模式的过渡时间压缩 58%，过渡料产生量减少 63%。该案例通过自动化仪表系统的深度应用，企业构建起从参数感知到智能决策的闭环控制体系，为流程工业的数字化转型提供实践样本。

3 结语

自动化仪表系统深度融入化工生产全流程，形成数据采集、分析决策、执行反馈的智能控制闭环。温度变送器与流量计构建过程参数监控网络，控制算法优化设备运行状态，安全仪表系统筑牢风险防线。这种技术集成推动化工生产向精细化、高效化方向演进，在提升产品竞争力的同时实现可持续发展目标。随着工业物联网与人工智能技术发展，自动化仪表将在更深层次释放化工企业的经济效益潜力。

参考文献：

- [1] 季永盛, 胡凯, 孙蓓蓓. 绿色化工技术创新应用及对企业经济效益提升的意义 [J]. 化学工业, 2024, 42 (03): 40-43.
- [2] 李双伶. 试论煤化工企业如何从会计成本管理角度提高经济效益 [J]. 财经界, 2019, (35): 166-167.