

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.