

# 化工自动化控制仪表应用与经济性分析

乔艳民 (青岛石化检修安装工程有限责任公司, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 化工装置运行效率依赖精准过程控制。为了解决传统仪表老化问题, 文章以聚丙烯装置改造为例, 分析了智能仪表选型原则, 探索了分布式控制系统方案, 研究了实施技术路径。研究表明控制精度提升改善了产品质量, 催化剂计量优化降低原料消耗, 装置产能与开工率同步提高, 项目投资回收期短且收益显著, 验证了自动化改造的经济合理性。

**关键词:** 化工自动化控制仪表; 安装调试; 经济性分析

**中图分类号:** TQ056.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2025) 036-0067-03

## Application and Economic Analysis of Chemical Automation Control Instruments

QIAO Yanmin(Qingdao Petrochemical Maintenance and Installation Engineering Co., Ltd., Qingdao Shandong 266000, China)

**Abstract:** The operational efficiency of chemical plants relies on precise process control. To address issues such as aging traditional instruments, this paper takes the revamp of a polypropylene unit as a case study. It analyzes the selection principles for smart instruments, explores distributed control system schemes, and investigates the implementation technical pathways. Research indicates that improved control accuracy enhances product quality, optimized catalyst metering reduces raw material consumption, and both plant capacity and operating rates increase simultaneously. The project demonstrates a short investment payback period with significant returns, validating the economic rationality of the automation revamp.

**Keywords:** Chemical Automation Control Instruments; Installation and Commissioning; Economic Analysis

化工生产装置长周期运行对工艺参数稳定性提出了苛刻要求, 温度波动超过  $\pm 2^{\circ}\text{C}$  可能导致产品收率下降 3-5 个百分点, 压力失控更会引发安全事故造成停车损失。自动化控制仪表系统能够将关键参数控制精度提升至人工操作的 5-8 倍, 反应釜温度偏差从  $\pm 3^{\circ}\text{C}$  收窄至  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$  以内, 既保障了产品质量稳定性又降低了原料消耗比例。企业在自动化改造时往往面临初期投资与长期收益的权衡难题, 单套仪表系统投入动辄数百万元, 但缺乏系统化的成本效益评估方法难以科学决策。文章以实际化工项目为依托, 分析控制仪表从选型配置到运行维护全生命周期的经济性表现, 为企业自动化投资决策提供可量化的参考依据。

### 1 工程概况

以某年产 30 万 t 聚丙烯装置的自动化仪表控制系统改造工程为例, 装置采用 Spheripol 工艺技术路线, 涵盖预聚合反应器、主聚合反应器、气相反应器三大核心单元, 整个生产流程需要实现温度、压力、流量、液位等关键参数的精确调控。原有仪表系统服役已达 15 年, 存在测量精度下降、响应速度迟缓、故障率攀升等突出问题, 直接影响产品质量稳定性, 优等品率较设计值低 8 个百分点。改造范围包括 382 个测量回路, 涉及温度变送器 127 台、压力变送器 95 台、流量计 68 台、液位计 42 台、分析仪表 50 套, 同时配套更新 DCS 控制站 12 套、操作站 8 套、工程师站 2 套。聚合反应温度控制要求偏差不超过  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ , 催

化剂流量计量精度需达到  $\pm 0.2\%$ , 氢气浓度分析响应时间须控制在 30s 以内, 这些严苛的技术指标对仪表选型提出了极高要求。项目投资预算为 2800 万元, 计划工期 6 个月, 其中设备采购占 55%, 安装调试占 30%, 备品备件占 15%。

### 2 化工自动化控制仪表的应用实践

#### 2.1 控制仪表的选型配置

温度变送器选型优先采用罗斯蒙特 3144P 型智能变送器, 该型号配备铂电阻传感元件, 测量精度达到  $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ , 满足聚合反应器苛刻的温控要求, 其数字信号输出方式有效消除了电磁干扰对信号传输的影响。压力测量环节针对不同工况分类配置, 反应器高压区域选用 EJA530E 型差压变送器, 量程范围覆盖 0-10MPa, 过压保护能力达到额定压力的 200%, 确保设备在压力波动时依然稳定运行; 物料输送管线则配置 EJA110A 型绝对压力变送器, 其膜片材质采用哈氏合金 C-276, 能够抵御催化剂溶液的腐蚀侵袭。流量计量系统根据介质特性差异化部署, 催化剂进料采用科氏力质量流量计 CMF100, 重复性误差仅为  $\pm 0.05\%$ , 直接测量质量流量避免了密度补偿环节带来的累积误差; 丙烯单体输送选用涡街流量计, 其无可动部件的结构设计降低了维护频次; 氢气调节则使用热式气体质量流量计, 响应时间控制在 2s 以内, 满足快速调节需求。此外, 液位测量全部采用导波雷达液位计, 发射频率 26GHz, 在聚合物浆液存在泡沫干

扰的工况下仍能准确测量，安装法兰尺寸 DN80，配备 PTFE 天线保护套管防止物料黏附<sup>[1]</sup>。

## 2.2 自动化控制系统的实施方案

控制系统采用横河 CENTUM VP DCS 平台构建三层架构体系，最底层为现场设备层，包括各类智能变送器、执行机构、分析仪表等 382 个测控点位，全部采用 HART 协议实现双向数字通信。中间层为控制层，部署 12 套 FCS 现场控制站，每站配置双冗余 CPU 模块、电源模块、通讯模块，单站最大可接入 128 个 I/O 点，控制站之间采用高速以太网环网连接，网络传输速率达到 100Mbps，任意单点故障不会导致系统瘫痪<sup>[2]</sup>。最上层为监控层，操作站基于 Windows Server 2019 系统运行，配置 27 英寸工业显示器，操作员可实时监控全装置 382 个回路参数变化趋势。控制策略编程采用模块化设计理念，预聚合反应器温度控制配置串级 PID 算法，主回路测量反应温度，副回路调节冷却水流量，控制周期设定为 1s；催化剂配比控制采用前馈-反馈复合控制方案，根据丙烯进料量实时计算催化剂需求量，同时监测产品熔融指数反馈修正配比参数；气相反应器压力控制引入模糊控制算法，建立压力偏差、偏差变化率双输入模糊规则库，输出阀门开度调节量，有效抑制压力波动。系统冗余配置覆盖关键节点，见表 1 所示配置方案确保装置安全稳定运行，控制站电源采用 1+1 热备份，任一路故障自动切换时间小于 50ms，通讯网络构建双环冗余拓扑，单条链路中断不影响数据传输。

表 1 控制系统冗余配置方案

设备类型	冗余方式	切换时间	配置数量
CPU 模块	双机热备	<50ms	24 套
电源模块	1+1 备份	<50ms	24 套
通讯网络	双环冗余	自动	2 套
操作站	N+1 备份	手动	8+1 套

## 2.3 控制仪表的安装调试

仪表安装前需完成出厂标定复核工作，将温度变送器置于恒温槽内进行五点检定，标准温度分别设定为 0℃、25℃、50℃、75℃、100℃，记录实际输出值与理论值偏差，确保全量程误差不超过 ±0.1%；压力变送器采用压力校验台施加标准压力，检定点选取量程的 0%、25%、50%、75%、100% 五个位置，正行程各测量一次，线性度偏差需控制在 ±0.075% 以内。现场安装阶段严格遵循工艺管道仪表流程图标注位置，温度测点插入深度达到管道中心线位置，保证

测温元件充分接触介质，套管焊接采用氩弧焊工艺，焊缝需进行 100% 射线探伤检测；压力测点安装位置选择管道直管段，距离上游阀门不少于 5 倍管径，距离下游阀门不少于 3 倍管径，导压管敷设坡度保持 1:10 倾斜，避免介质在管内积聚影响测量准确性。单回路调试采用信号发生器模拟现场信号，输入 4-20mA 标准电流，观察 DCS 画面显示数值是否对应，见表 2 所列调试项目逐项验证控制回路功能完整性，PID 参数整定采用临界比例度法，先增大比例增益至系统出现等幅振荡，记录临界增益值，再按经验公式计算比例、积分、微分三个参数初值，投入自动运行后根据阶跃响应曲线微调优化<sup>[3]</sup>。

表 2 控制回路调试验证项目

验证项目	测试方法	合格标准
信号传输	输入 4-20mA 电流	显示值偏差 <0.2%
控制响应	阶跃信号测试	调节时间 <120s
报警功能	超限值设定	声光报警正常
联锁动作	模拟故障信号	执行机构动作正确

## 2.4 自动化控制系统的运行效果

新系统投运后聚合反应温度控制精度显著提升，实际波动范围稳定在 ±0.3℃ 以内，较改造前 ±1.2℃ 的波动幅度收窄了 75%，反应条件的恒定性直接改善了产品分子量分布均匀性，聚丙烯熔融指数标准偏差从 0.8 降至 0.3，优等品率从原来的 76% 提升至 91%，单位时间内需要降级处理的产品量减少了约 18t 每天。催化剂计量系统采用质量流量计后消除了温度压力波动对体积流量的干扰，配比精度提高至 ±0.15%，催化剂单耗从改造前的 4.2kg/t 降低到 3.6kg/t，年节约催化剂成本达 360 万元，同时聚合效率提升使装置实际产能从设计值 28.5 万 t 提高到 31.2 万 t。控制系统故障率从改造前的月均 12 次下降至月均 2 次，仪表维护工作量减少约 60%，操作人员从原来的每班 6 人优化至 4 人，人力成本节省约 120 万元。此外，DCS 操作界面采用分层显示模式，操作员响应异常工况的平均时间从 8min 缩短至 3min，紧急停车次数从年均 5 次降至 1 次，装置开工率从 88% 提升至 95%，增产带来的直接经济效益超过 1200 万元每年<sup>[4]</sup>。

## 3 化工自动化控制仪表的经济性分析

### 3.1 初期投资成本分析

项目总投资 2800 万元中设备采购支出达到 1540 万元，其中现场仪表设备占据主要份额约 980 万元，

具体包括罗斯蒙特温度变送器 127 台单价 1.8 万元共计 228.6 万元, EJA 系列压力变送器 95 台平均单价 2.2 万元共计 209 万元, 科氏力质量流量计等各类流量仪表 68 台总价 342 万元, 导波雷达液位计 42 台单价 3.5 万元共计 147 万元, 在线分析仪表 50 套总价约 53.4 万元。DCS 系统投资 560 万元涵盖横河 CENTUM VP 控制站硬件、操作站工作站、系统软件授权费用, 其中 12 套冗余控制站单价 28 万元占 336 万元, 8 套操作站配套显示器单价 18 万元占 144 万元, 工程师站、系统组态软件占 80 万元。安装调试费用 840 万元细分为仪表安装施工 420 万元, 包含取源部件制作安装、电缆敷设桥架施工、仪表接线调校等人工材料费, 系统集成调试 320 万元涵盖 DCS 组态编程、通讯网络搭建、控制回路联调等技术服务, 性能验收测试 100 万元用于 72h 连续运行考核。备品备件储备 420 万元按照关键仪表 10% 配置比例, 确保故障快速响应更换需求。

### 3.2 日常运行成本分析

新系统年度运维支出主要集中在仪表校验、备件补充、系统维保三大领域, 总额约 192 万元。智能变送器每季度须委托第三方计量机构开展精度核查, 年检定服务费达 52 万元, 其中温度测点因热循环应力影响, 传感元件按 7% 比例需更换, 年耗资 16 万元, 压力膜盒受介质冲刷作用, 损耗率维持在 6% 水平, 年支出 13 万元, 流量计电子部件故障率约 4%, 年备件采购 7.2 万元, 液位计天线套管因聚合物黏附每年需全部更换, 耗资 14.7 万元, 在线分析仪表探头寿命仅 10 个月, 年更换支出高达 53 万元, 备件库动态补给累计 104 万元。横河 DCS 年度维保合同费按初始投资 4% 提取 22.4 万元, 涵盖软件升级包、远程诊断服务。控制机柜散热耗电量年累积 9.2 万度, 按工业电价 0.68 元每度折算 6.3 万元, 仪表风系统时耗压缩空气 16 标立方, 全年运转 8200h 消耗 13.1 万标立方, 按气价 0.13 元每标立方计支出 7.1 万元。

### 3.3 综合经济效益评价

改造投资 2800 万元带来的年度收益呈现多元化特征, 催化剂单耗降幅达到 0.6kg 每吨聚丙烯, 按照催化剂市场采购价 6000 元每吨计算, 年节约化学品支出达 360 万元, 占总收益的 21.4%。产能提升至 31.2 万 t 较设计产能增加 2.7 万 t, 增量部分按照聚丙烯市场均价 8200 元每吨测算, 年创造销售收入 2214 万元, 扣除原料成本、能源消耗等变动成本后净增利润约 486 万元, 构成收益主体部分<sup>[5]</sup>。优等品率提升 15 个百分点减少降级损失, 按每吨降级品损失 500 元估算, 年挽回经济损失约 657 万元, 人员精简节省人

力成本 120 万元, 装置开工率提高带来的产量增加折合利润约 180 万元。上述各项年收益合计 1803 万元, 扣除年度运维支出 192 万元后年净收益达 1611 万元, 静态投资回收期仅需 1.74 年, 见表 3 所示经济指标显示项目具备显著盈利能力, 按照 15 年运行周期测算, 动态投资回报率超过 52%, 净现值达到 1.38 亿元, 内部收益率高达 56.8%, 远超化工行业基准收益率 12% 的评价标准。

表 3 项目经济效益评价指标

评价指标	数值	备注
初始投资	2800 万元	含设备、安装、备件
年运维成本	192 万元	含校验、备件、维保
年收益合计	1803 万元	含节约、增产、降损
年净收益	1611 万元	收益减运维成本
静态回收期	1.74 年	初始投资 / 年净收益
动态投资回报率	52%	15 年运行周期
净现值 (NPV)	1.38 亿元	贴现率 8%
内部收益率 (IRR)	56.8%	远超行业标准 12%

## 4 结束语

装置改造实践揭示了化工生产向精细化管理转型的内在驱动, 智能仪表替代传统设备已从可选项转为生存必需, 控制精度微幅提升在长周期运行中持续释放经济价值, 技术投资本质是将工艺波动转化为稳态收益的战略布局, 自动化深度直接映射企业竞争位势, 预测维护、自学习控制将重塑技术格局, 保持技术迭代节奏方能确保持久盈利能力。

### 参考文献:

- [1] 李毅. 化工自动化仪表的应用现状与发展趋势 [J]. 广东化工, 2025, 52(18):95-96+71.
- [2] 曹俊平. 现代化工仪表及化工自动化技术的协调应用研究 [J]. 山西化工, 2023, 43(09):128-130.
- [3] 赵婕. 浅谈化工自动化仪表在生产中的应用和管理 [J]. 中国设备工程, 2022, (18):43-45.
- [4] 王浩华, 王伟. 化工自动化仪表及在生产中的应用 [J]. 化工管理, 2022, (20):109-111.
- [5] 尹徽. 化工仪表中的自动化控制技术探究 [J]. 天津化工, 2021, 35(02):24-26.