

智能控制系统在丙烯制冷压缩机中的应用 及经济效益量化研究

侯旭峰（国能新疆化工有限公司，新疆 乌鲁木齐 831400）

摘要：丙烯制冷压缩机是石油化工行业乙烯装置的核心冷量供给设备，其运行稳定性与能效水平直接决定装置生产效率与能耗成本。针对传统控制系统控制精度低、能耗高、故障响应滞后的问题，本文设计基于“PLC+DCS+神经网络预测”的智能控制系统，通过多维度数据采集与耦合调节算法实现参数优化。以某30万t/a乙烯装置压缩机为测试对象，结果显示：智能系统控制精度提升15%-20%，年耗电量降低8.2%-10.5%，故障停机时间缩短70%以上；经济效益量化分析表明，系统投资回收期1.8-2.3年，年均净收益126万元，具备显著技术与经济价值。

关键词：丙烯制冷压缩机；智能控制系统；PLC/DCS

中图分类号：TP273；TH452

文献标识码：A

文章编号：1674-5167（2025）031-0048-03

Application of Intelligent Control System in Propylene Refrigeration Compressor and Quantitative Study on Economic Benefits

Hou Xufeng(CHN Energy Xinjiang Chemical Co., Ltd., Urumqi Xinjiang 831400, China)

Abstract: The propylene refrigeration compressor is the core cooling supply equipment for ethylene plants in the petrochemical industry. Its operational stability and energy efficiency directly determine the production efficiency and energy consumption cost of the plant. In response to the problems of low control accuracy, high energy consumption, and delayed fault response in traditional control systems, this paper designs an intelligent control system based on “PLC+DCS+neural network prediction”, which optimizes parameters through multi-dimensional data acquisition and coupling adjustment algorithms. Taking the compressor of a 300000 ton/year ethylene plant as the test object, the results showed that the intelligent system improved the control accuracy by 15% -20%, reduced the annual power consumption by 8.2% -10.5%, and shortened the downtime due to faults by more than 70%; Quantitative analysis of economic benefits shows that the investment payback period of the system is 1.8-2.3 years, with an average annual net income of 1.26 million yuan, possessing significant technical and economic value.

Keywords: propylene refrigeration compressor; Intelligent control system; PLC/DCS

丙烯制冷压缩机作为乙烯装置核心设备（化工行业标志性产物），处于“冷箱系统”关键位置，对-40℃~10℃级冷量提供支撑，其能耗水平达全厂总能耗25%-30%（《中国石化行业能效白皮书（2024）》）。现阶段压缩机智能控制的应用仅集中于单个控制参数的优化，并没有形成面向多参数耦合控制、变负荷控制、全生命周期成本控制等领域的系统解决方案。本文基于硬件架构设计、算法创新、测试验证、效益量化等角度，从技术可行性、经济合理性等维度打造丙烯压缩机智能系统，以提供相关技术与经济参考依据。

1 传统丙烯制冷压缩机控制系统的现状与问题分析

1.1 传统控制系统构成与运行逻辑

国内多数企业采用西门子S7-300PLC控制系统，核心构成包括：S7-300CPU315-2PN/DP（控制周期100ms）、FisherDVC6200智能阀门定位器（调节精度±0.5%）、仅配置排气压力（0-2.5MPa，±0.2%FS）、吸气温度（-50℃~20℃，±0.3℃）等

基础传感器（采样频率1次/s），采用固定参数单回路PID控制（如排气压力设定1.8MPa， $K_p=2.5$ ， $T_i=8s$ ， $T_d=2s$ ）。运行逻辑为冷量需求增加时，PLC提升电机频率（50Hz→55Hz）；冷量过剩时，打开回流阀（0%→30%）回流丙烯，调节延迟30-45s。

1.2 传统控制系统核心问题

①控制精度不足。裂解气负荷从100%降至85%时，传统系统需30-45s调节，多余冷量节流浪费，冷量利用率仅85%-88%；且缺乏精馏塔回流量等关联参数协同控制，裂解气分离温度波动±3℃（超工艺要求±1℃），乙烯纯度波动0.2%-0.3%。②能耗过高。回流阀开度20%时，吸气容积利用率80%，但电机功率仍维持90%以上，比功耗达0.42kW·h/kg。以30万t/a乙烯装置为例，年耗电量186万kW·h，电费成本120.9万元（0.65元/kW·h）。③故障预警薄弱。无振动、轴承温度梯度等传感器，依赖每周人工巡检，叶轮振动超标（≥7.1mm/s）难以及时发现。

某企业 2021–2023 年因压缩机故障停机 6 次，单次停机 8h，累计损失 288 万元（乙烯产值 1.2 万元/t）。

2 智能控制系统在丙烯制冷压缩机中的应用设计

2.1 系统总体架构设计

①感知层：多维度数据采集网络。新增 6 类传感器构建三维采集网络，压电式振动传感器（0–50g， $\pm 0.5\%$ FS，100Hz，主轴轴承座）、铂电阻温度传感器（–50℃–200℃， ± 0.1 ℃，10Hz，径向/轴向轴承）、电容式液位传感器（0–5m， $\pm 0.1\%$ FS，1Hz，低压储罐）、气相色谱传感器（95%–100%， $\pm 0.05\%$ ，1 次/5min，吸气管道）、电磁流量计（0–500m³/h， $\pm 0.2\%$ FS，10Hz，排气管道）、红外温度传感器（0–200℃， ± 0.3 ℃，5Hz，电机外壳）。采用“光纤+Profinet”双传输，速率 ≥ 100 Mbps，丢包率 $\leq 0.01\%$ 。②控制层：PLC+DCS 协同。西门子 S7–1500PLC（1516–4PN/DP，控制周期 20ms，Profinet-IRT）承担实时控制；霍尼韦尔 TDC3000DCS（OPCUA 协议，数据更新 100ms）接入裂解气负荷等全局数据；主备机 ≤ 100 ms 切换，系统可用性 $\geq 99.99\%$ 。③应用层：智能算法与监控。基于 WinCC+Python 开发，LSTM 预测模块（输入 10min 历史数据，预测 5min 最优参数，误差 $\leq 3\%$ ）、三变量耦合 PID 算法（调节响应 ≤ 500 ms）、Web/移动端监控平台（实时参数、能耗、故障预警，历史数据存储 1 年）。

2.2 数据采集与处理模块设计

①数据预处理。卡尔曼滤波+小波阈值滤波（SNR ≥ 40 dB）、工艺机理校验（偏差超 5% 触发报警）、[0,1] 区间归一化（统一算法输入）。②数据存储。边缘计算网关（研华 UNO–2484G）存储 72h 高频数据（响应 ≤ 100 ms）；MySQL 集群存储预处理历史数据（压缩比 1:10，查询 ≤ 1 s）。

2.3 远程监控与故障诊断模块设计

①远程监控。SCADA 实时界面（设备状态、参数，超限变色报警）、趋势分析（1h–1 年参数曲线，叠加工艺负荷）、分级权限操作（工程师级以上可改参数，日志留存）。②故障诊断。构建故障知识库（如“轴承磨损”对应“温度梯度 > 5 ℃/h 且振动 > 6.0 mm/s”）、“阈值判断+CNN 分类”（诊断准确率 $\geq 92\%$ ）、分级处置（预警级推信/邮件，紧急级自动停机并提处置建议）。

3 智能控制系统应用效果测试与分析

3.1 测试方案设计

①测试对象与环境。作为测试对象的某 30 万 t/a 乙烯装置 BCL457 压缩机，其功率为 1600kW，制冷量为 800kW，工作压力 1.8MPa，工作温度为 –40℃到

100℃，属于乙烯生产装置的核心设备。测试时段为 2024 年 1 月–3 月，1 月份采用常规控制系统运行，2–3 月份切换到智能控制系统，通过前后 2 个阶段的数据比较，使得测试结果真实有效。期间严格把控工艺负荷稳定控制在 28–32 万 t/月，丙烯纯度控制在 99.5%，排除外界工艺条件变化对系统性能测试的影响，使得测试期间 2 种控制系统的运行环境达到一致。②测试指标。考核参数主要从控制精度、节能、可靠 3 个方面进行衡量和评估，确定了制冷量控制误差为 $\pm 3\%$ ，吸气压力控制误差为 $\pm 2\%$ ，排气温度控制误差为 $\pm 5\%$ 的控制精度考核准则，并通过比功耗、年度用电量和能效比值考核运行系统的用能效率，比功耗衡量的是以单位制冷量为基准的能耗值，年耗电量为客观的年度能源消耗数据，能效比值衡量的是制冷量的利用效率。

3.2 测试过程与数据记录

为了获取全面精确的测试数据，在数据获取方法上选取了“自动采集+人工核验”的形式。自动采集是通过安装在云端的数据采集软件，每间隔 10min 采集一次压缩机运行参数，同时采集运行小时能耗和故障信息，达到对系统运行状况的在线监视以及对数据轨迹的跟踪；而人工核验采取每天定时组织专人方式，主要是通过人体感官来识别压缩机轴承温度和压缩机振动值，将检测的人工采集数据与自动采集数据进行比对，确定真实性，排除因设备故障或其他故障造成的采集数据的误差。

3.3 应用效果分析

①控制精度提升。将 1 月传统系统与 2~3 月智能系统的运行数据进行对比，智能控制系统在控制精度上得到了大幅改善，成功将制冷量波动控制在允许偏差范围内，控制精度较传统系统提升了 18%，避免了因制冷量不稳造成的工艺参数波动而出现的波动，保证了其后的生产过程，使得生产过程平稳。吸气压力波动为 ± 0.028 MPa，超差 1.5%，仅为传统系统吸气压力波动的 1/3 左右，控制精度提升了 19.2%，稳定的吸气压力，有助于压缩机的高效运行。排气温度波动为 ± 1.8 ℃，超差 0.8%，控制精度提升了 18.5%，避免了因排气温度过高过低对设备部件的消耗，延长了设备使用寿命。②能效优化。智能控制系统能效指标显著，在降低用能的同时提升了能源利用水平，系统比功耗由常规系统的 0.41kW·h/kg 降低到 0.37kW·h/kg，下降幅度达到 9.8%，单位制冷量的耗电量大幅度降低，能源利用率明显提升。每月能耗由 15.5 万 kW·h 降至 14.0 万 kW·h，按此估算每年可节能 18 万 kW·h，节电率 9.7%，每年能源消耗

成本大幅降低。冷量利用率由 86.5% 升高至 95.2%，制冷量的有效利用程度明显增加，同时丙烯补充频次由 1.2 次/月下降为 0.8 次/月，降低了原料丙烯的浪费，降低生产成本。③可靠性提升。智能控制系统使压缩机可靠性更高，故障停机次数减少，故障停机恢复时间更短。统控制系统在 1 月的系统测试期停机 2 次，停机时间 16h；智能控制系统在 2~3 月的系统运行期故障预警停机 3 次，系统故障停机 0 次，避免了因故障停机而导致的装置生产中断损失。平均恢复时间 (MTTR) 由常规系统 4.5h 下降至 1.2h，降低了 73.3%，故障修复效率更高，避免或减少设备故障对生产的影响时长。设备可用度由 99.78% 提高至 99.99%，系统正常运行时间占比大幅增加，装置稳定生产，对乙烯的顺利生产提供了有力支持。

4 经济效益量化研究

4.1 成本分析

①前期投资。智能控制系统前期建设投资费用 210 万元，其中，硬件设备投资费用 (传感器 18 万元、PLC/DCS 系统升级 25 万元、边缘网关与数据库 12 万元)，总投入 55 万元，系统数据采集、传输和控制硬件设备支撑，软件开发费用 20 万元，主要用于智能控制算法、数据处理软件等定制开发，实现系统智能控制与数据处理，安装调试费用 15 万元，主要包括系统设备安装、系统调试、人员培训等，确保智能控制系统运行。设备升级补充费用 120 万元，用于配套对压缩机设备等相关设备的改造升级，适应智能控制系统要求，发挥整套系统性能优势。②后期运维。后期年均运维费 28 万元，设备折旧按 10 年折旧年限、5% 残值率计，年均折旧费 20.5 万元，反映设备资产的逐年折旧损耗。传感器更换振动传感器和气相色谱传感器每 3 年更换 1 次，年均更换费 6 万元，保障数据采集设备的正常运行。软件维护费每年 5 万元，保障软件系统的日常维护、功能变更、系统故障等软件服务。

4.2 收益计算

①能耗节约。每年节约电量 18 万 kW·h，按照工业用电价格计算，每年可节省电费 11.7 万元。丙烯补充频次减少，每年少补充丙烯 1.2t，以丙烯单价 8000 元/t 计算，每年节省原料费用 0.96 万元。能耗节约总计 12.66 万元，有效降低生产过程中的能源与原料成本。②生产效率提升。传统系统年均停机 2 次，每次停机造成的生产损失较大，智能系统通过故障预警避免停机，每年可避免停机损失 96 万元。智能系统稳定的冷量供应，减少因冷量波动导致的装置降负荷时长 24h，据此可增产 0.09 万 t 乙烯，以乙烯单价 8000 元/t 计算，增加收益 72 万元。结合实际生产情

况修正后，辅助能耗节省 5 万元，生产效率提升带来的年均收益为 101 万元 (96 万元 + 5 万元)，显著提升装置生产效益。③运维节约。智能控制系统的应用减少了人工运维工作量，巡检频次减半，故障维修次数减少，人工成本从每年 20 万元降至 12 万元，年均节约运维人工成本 8 万元。

4.3 投资回报率计算

年均总收益减去年均运维成本，即 150 万元 - 28 万元 = 122 万元。前期总投资除以年均净收益，210 万元 ÷ 122 万元 ≈ 1.72 年，反映不考虑资金时间价值情况下收回投资的时间。按照 8% 的收益率计算，动态回收期约 1.85 年，考虑资金时间价值后，仍能在较短时间内收回投资。年均净收益除以前期总投资再乘以 100%，即 $(122 \text{ 万元} \div 210 \text{ 万元}) \times 100\% \approx 58.1\%$ ，远超行业 15%-20% 的平均投资回报率水平，投资效益显著。

5 结论

智能控制系统解决了原有控制系统在控制精度、能效和可靠性方面存在的缺陷，提高了控制精度，保证了压缩机关键运行参数控制在最佳范围，下一步可在更大程度上提高系统中 LSTM (长短期记忆网络) 的输入维度，提高算法适应复杂工况的能动性及预测准确性；探究与数字孪生的协同运用，建立设备数字孪生模型，对设备全生命周期进行监控、诊断及优化，更好地开发系统效能，提高设备运行水平及管理水平。

参考文献：

- [1] 黄心远, 刘厚涛. 丙烯制冷压缩机防喘振开度分析与优化 [J]. 乙烯工业, 2024, 36(02): 47-53+71.
- [2] 李中涛. 低温乙烯罐区丙烯制冷系统的模拟与优化 [J]. 化工设计, 2024, 34(03): 10-13+22+1.
- [3] 柳坤. 丙烯制冷压缩机系统管道设计 [J]. 化工设计, 2023, 33(05): 32-37+45+1.
- [4] 李昕晨. 气化制氢装置丙烯压缩制冷的工艺方案研究 [J]. 石化技术, 2023, 30(06): 259-261.
- [5] 王建国, 陈敏, 高宇. 基于数字孪生的离心式压缩机智能控制与故障预警系统研究 [J]. 化工进展, 2023, 42(8): 89-98.
- [6] 周颖, 吴凯, 孙启文. 基于模型预测控制 (MPC) 的乙烯装置冷区节能优化实践 [J]. 石油化工, 2023, 52(5): 89-96.
- [7] 张伟, 王磊, 赵建国. 基于 LSTM 的工业压缩机智能预测控制与能效优化研究 [J]. 化工学报, 2023, 74(5): 102-115.
- [8] 陈浩, 刘静, 孙博. DCS 与 PLC 系统在大型化工装置中的协同设计与应用 [J]. 制造业自动化, 2023, 45(4): 175-179.