基于仪器仪表的化工生产自动化能效提升

王 鑫
国家能源集团宁夏煤业有限责任公司烯烃一分公司 宁夏 银川 750001

摘 要：化工生产能耗高、工况复杂，仪器仪表自动化水平是制约能效提升的关键因素。本文梳理化工自动化与智能仪表能效管控理论，剖析当前仪表老旧失准、数据互通不畅、能效管控粗放等突出问题及成因，结合行业典型能耗短板案例，从仪表智能化升级、系统融合、精细化管控等维度制定优化策略。通过试点应用与指标比对验证方案成效，旨在依托智能仪表与自动化技术，实现化工生产能耗压降与能效长效提升。

关键词：仪器仪表；化工生产自动化；能效提升

引言：化工行业作为高耗能支柱产业，生产工况复杂、能耗损耗环节多，能效管控是企业降本增效、绿色发展的核心重点。传统人工管控与老旧仪表设备，难以适配现代化工精准生产需求，易引发参数偏移、能耗浪费与设备低效运行等问题。为破解能效管控碎片化、粗放化难题，本文以智能仪器仪表与自动化控制系统为核心，探究化工生产自动化能效提升路径，为行业节能优化提供实操参考。

1 化工生产自动化与仪器仪表能效管控理论基础

1.1 化工生产能效核心内涵与评价指标

（1）化工生产能效是指单位产品产出所消耗的能源量，其管控核心在于以最小能源投入获取最大生产效益，本质是能量流与物质流的协同优化，涉及反应热力学效率、设备运行效率及过程控制精度等多维要素。（2）评价指标体系涵盖三大类：能耗指标（综合能耗、单位产品能耗）、产能指标（生产负荷率、产品收率）及损耗指标（热损耗、物料损耗、设备待机能耗），三者相互关联、共同构成能效评估的量化依据。（3）能效损耗主要成因包括：工艺参数偏离最优工况导致反应转化率下降、设备运行偏离设计工况引发附加能耗、蒸汽管网泄露与散热损失、以及频繁开停车及非计划停机造成的过渡时段能源浪费。

1.2 化工自动化控制系统核心架构

（1）DCS（集散控制系统）适用于大型连续生产过程，实现多回路协调控制；PLC（可编程逻辑控制器）擅长逻辑联锁与顺序控制，响应速度快；SCADA（数据采集与监控系统）侧重广域分布式站点的远程监测与调度管理。（2）化工生产全流程自动化控制遵循"检测—比较—运算—执行—反馈"的闭环运行逻辑，通过串级、比值、前馈等控制策略，维持温度、压力、流量等工艺参数稳定在设定范围内[1]。（3）自控系统通过精准调控操作变量，减少人工操作随意性与响应滞后，使生产工况趋近最优能效点，同时通过数据采集与分析为能效优化决策提供基础支撑。

1.3 智能仪器仪表核心类型与工作原理

（1）温度仪表（热电偶、热电阻）基于热电效应或电阻热效应测温；压力仪表（压阻式、电容式）将压力转换为电信号；流量仪表（电磁、涡街、质量流量计）分别依据法拉第电磁感应、卡门涡街及科里奥利力原理工作；液位仪表（雷达、差压式）通过回波时间或静压换算实现液位测量。（2）智能计量与能耗监测仪表集成了高精度传感、数字信号处理及通信功能，能够实时采集电、蒸汽、燃料气等各类能源介质的瞬时流量与累计消耗量，并具备自诊断与数据远传能力。（3）在线分析仪表（气相色谱仪、红外分析仪、热导分析仪等）通过连续采样分析物料组分浓度，实时反映反应进程与分离效果，为操作人员或自控系统提供调整依据，确保工艺始终处于高效区间运行。

1.4 仪器仪表赋能能效提升的作用机理

（1）高精度监测能够及时发现工艺参数的微小偏移，使操作人员或控制系统迅速纠偏，避免因偏差累积而导致的反应不充分、过度加热或过度冷却等无效能耗。（2）实时数据为自控系统提供了动态优化的输入基础，控制系统依据仪表反馈的实时数值，通过模型预测或自适应算法持续调整操作参数，使生产工况跟踪最优能效轨迹。（3）智能预警通过对关键参数的长期趋势分析与阈值判断，提前识别设备性能劣化、换热器结垢、仪表漂移等隐患，避免因设备故障或效率下降而引发的非计划停车与高耗能生产状态。

2 化工生产仪器仪表自动化能效现状与问题分析

2.1 化工生产仪表自动化应用现状

（1）现有仪器仪表设备配置与服役现状方面，大

中型化工企业已基本完成基础监测仪表布设，温度、压力、流量、液位四大参数检测手段相对齐备，但仍有相当比例企业使用传统模拟仪表或早期智能仪表，设备服役年限普遍超过8年，部分关键测点仪表长期缺乏系统性更新，存在测量漂移、响应迟缓等突出问题。（2）仪表自动化监测与控制覆盖范围方面，常规工艺参数监测覆盖率较高，但在物料组分在线分析、转动设备状态监测、蒸汽管网热损追踪、循环水系统能效监控等环节覆盖明显不足，部分企业仍依赖人工取样化验，监测频次低且信息维度单一，难以支撑全流程能效精准诊断。（3）当前能效管控的整体实施水平方面，多数企业停留在月度综合能耗统计与产品单耗核算的粗放阶段，尚未建立基于实时仪表数据的动态能效评估体系，能源消耗与工艺运行参数之间缺乏有效关联分析，能效改善多依赖经验判断。

2.2 能效提升存在的核心问题

（1）传统仪表精度不足，工艺参数监测偏差较大。在高温高压、强腐蚀等苛刻工况下，常规仪表信号漂移显著，导致反应温度偏离最优区间、进料配比失准，直接降低转化率并推高能耗，监测偏差造成的无效能耗损失通常在5%—15%之间。（2）仪表与自控系统数据互通性差，管控碎片化。现场仪表品牌繁杂、通信协议不统一，大量数据仅就地显示而未能汇入中控系统，形成信息孤岛，先进协调控制策略难以落地。（3）老旧设备能耗监测滞后，能耗浪费无法及时管控。循环水、压缩空气、蒸汽伴热等公用工程缺乏分级计量仪表，跑冒滴漏、换热效率下降等隐性浪费长期无法被及时发现与定位。（4）缺乏基于仪表数据的智能化能效优化机制，现有系统仅具备数据采集与显示功能，缺少异常诊断、能耗预测与优化建议等高级应用，大量实时数据处于"采而不用"状态[2]。

2.3 问题成因深度分析

（1）仪表设备老化、智能化升级滞后，根本在于智能改造一次性投入较高且施工期间需部分停产，企业倾向于"能延尽延"，同时高性能智能仪表的选型集成对技术人员专业能力要求较高，人才储备不足制约了升级进程。（2）自动化控制系统算法与能效适配性不足，表现为现有控制策略以安全生产为首要约束，参数整定偏于保守，未将能耗指标纳入优化目标，且常规PID控制应对原料波动时自适应能力较弱，装置长期偏离经济最优工况运行。（3）企业能效管控体系与运维管理制度不完善，未建立仪表准确度周期性核查制度，现场仪表长期缺乏标准校准；能效管理职能分散于多个部门，缺少统一的数据分析平台和闭环改进机制。

2.4 行业典型能效短板案例分析

（1）某合成氨装置转化工段采用常规热电偶监测炉膛温度，因热电偶长期服役出现热电极氧化导致测温偏低约10℃，操作人员依据失准示值持续加大燃料气供给，实际炉膛温度超设计值近20℃，不仅造成大量燃料浪费，还加速了炉管损伤，年度超额能耗损失折合约280万元。（2）某精细化工精馏单元采用独立PLC完成温度与回流控制，塔顶在线色谱分析仪数据未与PLC系统打通，操作人员每2小时人工读取分析结果后手动调整回流量，响应滞后严重。上游来料组分波动时产品不合格率上升，被迫大幅提高回流比，塔底再沸器蒸汽消耗较设计值高出约20%，持续半年多才被发现，累积损耗相当可观。

3 基于仪器仪表的化工生产自动化能效提升优化策略

3.1 仪器仪表设备智能化升级改造方案

（1）高精准智能监测仪表的选型与替换优化方面，针对精度不足、漂移明显的传统仪表，优先对影响反应转化率与产品质量的关键测点实施升级。选用高精度传感器、数字信号处理与自诊断功能的智能变送器，如质量流量计替代容积式流量计、0.075级压力变送器替换0.5级传统变送器，提升数据准确性与可靠性，为能效优化奠定基础[3]。（2）全维度能耗计量仪表的全覆盖配置设计方面，构建覆盖电、蒸汽、燃料气、循环水、压缩空气等全部能源介质的分级计量体系。在车间、装置、单元三级分别部署智能计量仪表，形成“总表—分表—单元表”三级能耗数据采集网络，确保各环节能耗可计量、可追溯、可考核，消除计量盲区，清晰呈现能耗流向。（3）恶劣工况下仪表防护与稳定性优化措施方面，针对高温高压、强腐蚀、易结晶等苛刻环境，选用耐温耐压材质、隔膜密封结构及防腐涂层，配套加装散热装置、伴热保温、吹扫冲洗等辅助设施，保障长期稳定运行和测量精度。增设备表冗余配置，当主表异常时可自动切换，避免因仪表故障导致控制失效。

3.2 仪表与自动化控制系统融合优化

（1）打通仪表数据与DCS、SCADA传输通道，统一现场通信协议，优先采用HART、Profibus、ModbusTCP等开放标准，完善接口转换与网关配置，实现智能仪表与中控系统双向数字通信。在此基础上构建统一数据平台，集中管理实时、历史及设备状态信息，支撑全局调度与优化决策。（2）基于实时仪表数据实施工艺参数动态调控，将关键监测数据引入DCS控制回路，替代人工设定与周期整定。开发基于反馈的先进控制算法，推行反应温度串级控制、进料流量比值控制、精馏塔温差-回

流协调等策略，利用实时组分分析动态调整操作参数，使装置逼近最优工况，降低参数漂移导致的能耗损失。（3）构建仪表数据驱动的能效闭环管控体系，建立“实时监测—数据分析—优化决策—自动执行—效果评估”闭环机制。融合能耗数据、工艺参数、质量指标于统一能效平台，通过能效目标分解与在线监控，实现数据驱动的能效持续改进循环[4]。

3.3 基于智能仪表的能效精细化管控优化

（1）能耗数据实时采集、分析与溯源机制搭建方面，部署能效数据采集终端与边缘计算网关，实现各能源介质的秒级或分钟级数据采集与预处理。建立能耗异常自动报警机制，当某单元能耗出现突增时系统自动推送预警并追溯至具体设备与时间段，结合工艺参数历史数据进行根因分析，为快速处置提供精准定位。（2）设备运行状态智能监测与预防性维护优化方面，对压缩机、泵、风机等关键动设备增设振动、温度、电流等多参数智能监测仪表，建立设备健康状态评分模型。通过趋势分析与特征参数识别，提前预判轴承磨损、叶轮结垢、电机绝缘老化等潜在故障，将事后维修转变为预测性维护，有效降低非计划停机频率与重启过程中的额外能耗[5]。（3）生产负荷与能耗匹配的自动化调控策略方面，依据实时能耗数据与生产负荷需求，建立多工况条件下的能耗基准模型。当负荷变化时，系统自动优化调整设备运行台数与转速匹配，如循环水系统根据工艺负荷动态调节变频泵频率、空压机组根据用气量自动启停加载，避免大马拉小车的低效运行状态。

3.4 优化方案应用效果验证

（1）方案实施流程与测试环境搭建方面，选取典型生产装置或工段作为试点，按照“现状摸底—方案设计—设备改造—系统集成—调试投运—效果评估”六个阶段有序推进。在试点装置上部署新增智能仪表与数据采集系统，保留原有仪表作为对照参考，建立测试期间的数据记录与比对机制，确保改造效果可量化、可评价。（2）改造前后能效指标对比分析方面，以改造前连续三个月的平均运行数据为基准，在改造后同等运行条件下采集同期数据进行对比。重点对比单位产品能耗下降率、关键工艺参数标准偏差缩小幅度、非计划停机频次降低比例等核心指标，通过同比、环比与目标值三重对照，客观量化仪表自动化能效提升的实际成效。（3）方案可行性、节能性与经济性综合评估方面，从技术可行性角度确认改造方案对装置正常运行的影响程度与可操作性；从节能性角度计算年度综合节能量与能效提升幅度；从经济性角度测算项目总投资、年节能收益与投资回收期。结合设备使用寿命延长、维护成本降低等间接效益，形成全面客观的项目效益评价结论，为后续全面推广提供决策依据。

结束语

本文聚焦仪器仪表对化工生产自动化能效的赋能作用，系统分析行业能效管控现状与核心痛点，针对性提出设备升级、系统融合、精细管控的一体化优化方案。通过智能化改造与闭环能效管控，可有效解决仪表监测偏差、数据孤岛、隐性能耗浪费等问题，显著降低生产能耗、稳定生产工况。本次研究可为化工企业自动化能效升级提供借鉴，助力行业实现节能降耗与提质增效双重目标。

参考文献

[1]张悦.智能仪表在化工精准控制中的应用与能效优化研究[J].化工自动化及仪表,2023,50(04):321-326.

[2]刘辉.先进仪表测控算法在化工生产节能增效中的应用[J].计算机与应用化学,2024,41(02):123-128.

[3]赵晓娟,祁超.自动化控制技术在石油化工智能仪表中的融合应用[J].化工设计通讯,2022,48(10):82-84.

[4]黄永祥.智能自动化仪表赋能化工生产能效提升技术研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(19):99-104.

[5]牟怿,刘飞鹏.化工仪表控制系统节能优化与自动化能效提升策略[J].行车指南,2026,15(05):109-111.