

# 催化裂化装置节能降耗智能优化控制策略及其经济性评估

王洪权 (山东裕龙石化有限公司, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 催化裂化是炼油工业核心转化工艺, 其能耗占炼油总能耗 30% 以上, 节能降耗是炼化产业绿色低碳转型的关键。针对传统控制模式下装置能耗高、参数耦合强等问题, 本文构建涵盖多环节的全流程智能优化控制体系, 整合机器学习动态预测、数字孪生协同控制、余热梯级利用调控等核心策略。同时, 从能耗、成本、投资、环境四维度建立经济性评估框架, 量化技术价值。研究表明, 该技术可使装置综合能耗降低 5%-12%, 投资回收期 1-3 年, 兼具显著经济与环保效益, 为装置高效低碳运行提供支撑。

**关键词:** 催化裂化装置; 节能降耗; 智能优化控制; 数字孪生; 经济性评估

中图分类号: TE624.41

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2026) 008-0076-03

## Intelligent optimization control strategy for energy saving and consumption reduction in catalytic cracking unit and its economic evaluation

Wang Hongquan (Shandong Yulong Petrochemical Co., Ltd., Yantai Shandong 264000, China)

**Abstract:** Catalytic cracking is a core conversion process in the refining industry, accounting for over 30% of the total refining energy consumption. Energy conservation and consumption reduction are key to the green and low-carbon transformation of the refining industry. In response to the problems of high energy consumption and strong parameter coupling in traditional control modes, this paper constructs a full process intelligent optimization control system covering multiple links, integrating core strategies such as machine learning dynamic prediction, digital twin collaborative control, and waste heat cascade utilization regulation. At the same time, establish an economic evaluation framework from the four dimensions of energy consumption, cost, investment, and environment to quantify the technological value. Research has shown that this technology can reduce the overall energy consumption of the device by 5% -12%, with a payback period of 1-3 years, and has significant economic and environmental benefits, providing support for the efficient and low-carbon operation of the device.

**Keywords:** catalytic cracking unit; Energy conservation and consumption reduction; Intelligent optimization control; Digital twin; Economic Evaluation

在“双碳”目标与炼油行业产能过剩背景下, 降本增效、绿色转型是炼化企业核心竞争力。催化裂化作为重油轻质化核心工艺, 能耗密集且流程复杂, 传统控制模式难以适配精细化节能需求, 装置普遍存在热效率不足、余热利用率低等问题, 能效仅 70%-80%, 优化空间显著。依托工业互联网、AI、数字孪生等技术, 智能优化控制成为破局关键。鉴于现有技术缺乏全流程协同设计、评估体系不完善, 本文构建全流程智能优化策略与多维度评估框架, 为装置节能升级提供理论与实践支撑。

### 1 催化裂化装置能耗特征与控制痛点

#### 1.1 能耗构成及分布特征

催化裂化装置能耗涉及反应-再生、原料预处理、分离及公用工程多环节, 典型装置综合能耗为 3.5 - 4.5MJ/kg 原料。其中反应-再生系统占总能耗 50%-60%, 是能耗核心; 分离系统占比 20%-30%, 聚焦分馏塔热交换与物料输送能耗; 公用工程占 10%-15%, 加热炉热效率 85%-90%, 与高效设备存在 5-10 个百分点差距。能量损失以高温烟气排放为

主, 600-750℃烟气致 30% 以上热量流失, 催化剂循环热损失占 15%-25%。此外, 原料预热梯度不合理、换热网络效率不足, 使传统换热网络热量损失率达 20%-30%。

#### 1.2 传统控制模式的核心痛点

传统催化裂化装置控制多依赖 DCS 系统实现基础参数闭环控制, 辅以操作人员经验调整, 存在明显技术瓶颈。其一, 参数耦合应对能力弱, 催化裂化反应中温度、压力、催化剂循环量、原料组分等参数相互关联, 单一参数调整易引发连锁反应, 传统控制难以实现多变量协同优化, 常出现局部优化而整体能耗上升的问题。其二, 工况适应性差, 原料性质波动 (如重质原料替代率提升导致反应热负荷增加)、设备老化等因素易导致工况偏离最优区间, 传统控制基于固定阈值调控, 响应滞后且精度不足, 能耗波动幅度较大<sup>[1]</sup>。其三, 能量回收调控粗放, 现有余热回收系统多采用固定运行模式, 无法根据烟气温度、原料预热需求等动态调整回收策略, 低温余热利用率不足, 新型余热回收技术的节能潜力难以充分释放。其四, 决

策缺乏数据支撑,传统控制依赖操作人员经验,难以整合全流程海量数据进行深度分析,无法精准定位能耗瓶颈与最优操作点,制约了节能效果的最大化。

## 2 催化裂化装置节能降耗智能优化控制策略

### 2.1 原料预处理环节智能优化控制

原料性质波动是导致装置能耗上升的重要因素,重质原料替代率提升会使反应温度需求升高5%~10%,加剧能耗负担。原料预处理环节的智能优化核心的是通过组分模拟与动态调控,实现原料性质与工艺窗口的精准匹配。

采用近红外光谱分析技术与在线传感器结合,实时采集原料密度、粘度、馏程、硫含量等关键指标,构建原料组分快速识别模型。基于机器学习算法,挖掘原料组分与反应热效应、催化剂活性之间的关联规律,预测不同原料配比下的最优预处理参数。通过智能调节原料预热温度、预加氢反应压力及氢油比,优化原料精制效果,减少劣质组分对后续反应的负面影响,降低焦炭生成量,从而减少再生器能耗。同时,建立原料适应性动态调整机制,根据原料组分变化自动优化预处理工艺参数,实现能量输入与反应需求的动态平衡,可降低该环节能耗5%~8%<sup>[2]</sup>。

### 2.2 反应-再生系统协同智能控制

反应-再生系统作为能耗核心单元,其智能优化重点在于强化传热传质效率、减少热量损失、实现反应与再生过程的动态平衡。构建基于数字孪生的反应-再生系统虚拟模型,整合反应器温度、压力、催化剂循环量、再生器烧焦强度等实时数据,实现物理系统与虚拟模型的同步映射,精准模拟不同工况下的能量流动与反应进程。

采用模糊PID控制算法与模型预测控制(MPC)结合,实现多变量协同调控。针对反应器,动态优化提升管进料速率、反应温度与催化剂循环量,使催化剂维持在最佳活性区间,降低反应活化能,减少反应热需求;针对再生器,通过智能调节主风量、烧焦温度,优化烧焦效率,减少过度烧焦导致的热量浪费,同时精准控制再生催化剂温度,降低催化剂循环热损失。引入等离子体辅助催化技术与微通道反应器优化设计理念,通过智能控制系统调节等离子体功率与反应介质流量,降低反应温度20℃左右,强化传热传质效率,使系统能效提升10%~15%。此外,通过智能监测烟气组分与温度,动态调整烟气循环比例,为后续余热回收系统提供稳定热源<sup>[3]</sup>。

### 2.3 分离系统能效智能优化控制

分离系统能耗主要集中于分馏塔的热交换过程,传统分馏系统热效率普遍低于70%,存在较大优化空

间。分离系统智能优化以热集成优化为核心,通过动态调整操作参数与换热网络,提升热量利用效率。

基于全流程能量集成模型,采用智能算法优化分馏塔塔顶油气、中段循环油的热量利用路径,将多余热量用于原料预热或公用工程供能,减少外部热源输入。通过机器学习模型预测分馏塔内气液两相流动状态与分离效果,动态优化再沸器蒸汽负荷、冷凝器循环水量及塔板操作参数,避免过度换热导致的能量浪费,使再沸器能耗占比降低4~6个百分点。引入高效传热元件智能调控技术,结合M翅片管换热器等设备特性,通过智能系统调节介质流速与换热面积,提升传热效率,进一步降低系统热负荷。同时,构建分离系统多目标优化模型,在保证产品质量合格的前提下,实现能耗最低化与分离效率最大化的平衡。

### 2.4 余热梯级利用智能调控

余热回收是催化裂化装置节能的重要抓手,传统余热回收效率仅为60%~70%,低温余热梯级利用技术可将回收率提升至75%~85%。构建余热梯级利用智能调控系统,整合烟气余热、设备散热、工艺余热等多源余热资源,实现余热的分级回收与高效匹配。

利用智能传感设备实时捕捉各余热源的温度、流量等关键参数,结合热力循环模型与机器学习算法,科学规划余热梯级利用路径:高温烟气优先用于发电或蒸汽制备,中温余热供给原料预热与工艺伴热,低温余热适配厂区供暖及循环水加热。采用智能调节阀与变频控制技术,依据装置工况动态及余热需求,自动调节回收设备运行负荷,杜绝余热浪费与能源错配。耦合碳捕集与利用(CCU)技术,通过智能系统优化吸附材料再生温度及CO<sub>2</sub>捕集压力,将捕集效率提升至90%以上,且把CCU技术对装置能耗的额外影响控制在2%以内,实现节能减碳协同推进。

### 2.5 全流程智能协同调控平台

搭建工业互联网的全流程智能协同调控平台,整合原料预处理、反应-再生、分离系统及公用工程的实时数据、历史运行数据和工艺模型,实现各个环节的协同优化以及全局调控。选用边缘计算和云计算融合架构,边缘端负责对参数进行实时采集及快速调控,云端则开展大数据分析、模型训练以及优化决策。

数据中台对全流程200多项工艺指标开展清洗、整合及深度挖掘工作,把能耗核心参数筛选出来,构建全流程能耗预测模型。推动调控模式从“事后纠偏”向“事前干预”进行转变,平台搭载自学习算法,依据实时运行数据持续优化控制模型与参数阈值,对原料波动、设备老化等复杂工况的适应能力得到提升。且集成智能预警功能,实时监测能耗异常与设备风险,给操作人员提

供精准决策参考,保障装置稳定高效运行。

### 3 催化裂化装置节能降耗经济性评估框架

#### 3.1 能耗指标评估

能耗指标是衡量节能成效的核心依据,运用绝对能耗和相对能耗结合起来进行量化评估。绝对能耗指标包括单位原料综合能耗、各个系统能耗以及余热回收效率等,借助对比智能优化技术应用前后的能耗数据,来核算能耗降低量和降低率,通常要求综合能耗降幅不低于5%。相对能耗指标选用能耗产值比、能耗产率比等,用来评估能量利用的经济性,直观体现单位能耗对应的产品价值与产量,反映节能策略对生产效率的提升作用。同时引入能效因子指标,综合考量原料性质、产品结构、设备运行状态等影响因素,构建标准化能效评估模型,消除工况差异对评估结果的干扰,保障评估结果的客观性与可比性<sup>[4]</sup>。

#### 3.2 成本效益评估

成本效益评估分为直接效益与间接效益两部分,全面核算智能优化策略带来的经济收益。直接效益包括能源成本节约、原料消耗降低、产品收率提升带来的收益增量:能源成本节约基于能耗降低量与能源单价(电价、蒸汽价、燃料油价)计算;原料消耗降低收益通过原料转化率提升、焦炭生成量减少带来的原料节约量核算;产品收率提升收益根据汽油、柴油等主产品收率变化与市场价格计算。间接效益包括设备维护成本降低、人工成本节约、环保成本减少等:智能优化控制可降低设备故障率30%左右,减少维修费用与停机损失;自动化与智能化调控降低人工操作强度,减少操作人员配置;能耗降低同步减少CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>等污染物排放,避免环保罚款,降低环保治理成本。通过构建成本效益核算模型,量化总收益与单位投资收益,为技术推广提供数据支撑。

#### 3.3 投资回报评估

投资回报评估工作主要聚焦智能优化控制技术的投资合理性方面,核心评估指标包括投资回收期、投资回报率、净现值及内部收益率。投资成本涵盖智能控制系统硬件比如传感器、控制器、服务器,软件包括模型开发、平台搭建,安装调试以及人员培训等相关费用,鉴于技术复杂度和装置规模的影响,投资成本会有差异,中小型装置投资通常是数百万元,大型装置投资可达千万元级别。投资回收期按总投资成本和年净收益的比值来计算,智能优化控制策略的投资回收期一般控制在1到3年,能够实现短期投资回收;投资回报率和内部收益率直观反映投资盈利水平,通常要求投资回报率不低于20%;净现值结合资金时间价值,评估技术长期盈利潜力,保障技术投资的经济

性和可持续性。针对不同规模装置以及技术方案,选用敏感性分析方法,考量原料价格、能源单价、产品市场波动对投资回报的影响,对评估结果的可靠性进行提升<sup>[5]</sup>。

#### 3.4 环境价值评估

在推进“双碳”战略背景下,环境价值评估变成经济性评估的重要补充,主要把量化核算和定性分析结合起来。量化指标包括单位产品CO<sub>2</sub>排放量降低量、SO<sub>2</sub>与NO<sub>x</sub>减排量、余热回收替代化石能源量等,依据能耗降低量与能源碳排放系数来计算污染物减排量,结合碳交易价格来核算碳资产收益。

定性分析涵盖技术对企业绿色转型的支撑作用,行业在节能减碳方面的示范效应,及满足环保政策要求的能力等,对其长期的环境效益以及社会价值进行评估,借助环境价值评估,能够全面彰显智能优化控制策略在节能减碳、绿色发展当中的综合贡献,且契合炼化产业的转型需求。

### 4 结论

本文构建的催化裂化装置节能降耗智能优化控制策略,整合多类智能技术形成全流程体系,通过原料组分匹配、反应-再生数字孪生协同等多环节优化,有效破解传统控制能耗瓶颈,可使装置综合能耗降低5%-12%。多维度经济性评估框架验证了其价值,投资回收期1-3年、回报率不低于20%,兼顾经济与环保效益,为装置节能升级提供支撑。未来技术将向精准化、协同化、低碳化发展,需强化AI算法与反应动力学模型融合,突破国产智能设备瓶颈。系统层面推动全厂协同优化,评估层面完善动态环境价值核算方法。同时加快技术标准化推广,助力炼化产业转型,服务“双碳”目标。

#### 参考文献:

- [1] 王洋,王希厚,吴宗珍.催化裂化装置主风机烟机机组节能降耗措施研究[J].化工管理,2024(27):63-66.
- [2] 安玉忠,冯龙,龚文,等.催化裂化装置三机组节能分析与措施[J].石油化工应用,2024,43(07):112-115.
- [3] 刘成军,张洪笙,叶剑云.某催化裂化装置吸收稳定系统工艺优化总结[J].炼油技术与工程,2024,54(05):20-24.
- [4] 赵文涛,姚拯民.催化裂化装置锅炉水质节能剂应用研究[J].石油化工技术与经济,2024,40(02):52-57.
- [5] 李继翔,张可坤,王冰,等.催化裂化装置节能降耗优化分析[J].炼油与化工,2024,35(02):36-40.

#### 作者简介:

王洪权(1986-),男,汉族,辽宁海城人,本科,研究方向:催化裂化工艺技术的应用和优化探索。