

# 炼油装置节能降耗的技术优化与经济效益分析研究

张 泳 (中海油气(泰州)石化有限公司, 江苏 泰州 225300)

**摘要:** 面向炼油装置全流程能效提升与绿色低碳转型, 本文从系统视角分析能耗关键症结, 提出面向工程落地的技术优化路径, 并建立兼顾能耗成本、装置可靠性与碳减排的综合效益评价框架, 并强调以“工艺—设备—公用工程”一体化优化为主线, 通过加热炉燃烧精准调控与深度余热回收、换热网络智能重构与流程优化、蒸汽动力系统集成优化与能量梯级利用以及设备运行参数实时监测与智能优化调控, 形成“源头减耗、过程提效、系统协同、智能闭环”的闭环改进模式, 从而为炼油企业构建可复制、可推广的节能降耗技术路线与效益评估方法学。

**关键词:** 炼油装置; 余热利用; 智能控制; 经济效益评价

**中图分类号:** TE08 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5167 (2026) 001-0067-03

## Research on Technical Optimization and Economic Benefit Analysis of Energy Conservation and Consumption Reduction in Refining Units

Zhang Yong (CNOOC Gas (Taizhou) Petrochemical Co., Ltd., Taizhou Jiangsu 225300, China)

**Abstract:** Aiming at improving the overall energy efficiency and promoting the green, low-carbon transition of refining units, this paper analyzes the key issues of energy consumption from a system perspective. It proposes technically optimized pathways for practical engineering implementation and establishes a comprehensive benefit evaluation framework that considers energy cost, unit reliability, and carbon reduction. Emphasizing the integration of “process-equipment-utility systems” as the core optimization strategy, this approach focuses on precise combustion control and deep waste heat recovery in heating furnaces, intelligent reconstruction and process optimization of heat exchanger networks, integrated optimization and cascaded energy utilization of steam power systems, as well as real-time monitoring and intelligent optimal control of equipment operating parameters. This forms a closed-loop improvement model characterized by “source reduction, process efficiency enhancement, system synergy, and intelligent closed-loop control,” thereby providing a replicable and scalable technical roadmap and a benefit assessment methodology for energy conservation and consumption reduction in refining enterprises.

**Keywords:** Refining units; Waste heat utilization; Intelligent control; Economic benefit evaluation

在“双碳”目标与能源结构转型驱动下, 炼油行业面临产品结构深度调整与用能复杂度上升的双重挑战。一方面, 装置建成年代跨度大、流程差异显著, 局部优化难以支撑全厂能效跃升; 另一方面, 公用工程与过程系统耦合度高, 能量降级与“跑冒滴漏”造成系统性损耗。国家层面已明确以系统节能与数智化改造为抓手, 推动炼油行业向清洁低碳、高效协同方向演进, 强调跨系统能量集成、低温热高效利用与电驱替代以及全流程智能管控。

### 1 炼油装置能耗问题分析

#### 1.1 加热炉热效率低下

多套装置在役时间长、负荷波动与燃料结构变化叠加, 使加热炉实际运行偏离设计工况, 排烟热损失与不完全燃烧损失显著上升; 常见现象包括排烟温度偏高、过剩空气系数偏大、炉体散热与漏风、燃烧器雾化与配风不均、空气预热器结垢或低温腐蚀致传热效率下降等。由此带来的直接后果是燃料气单耗上升、炉管结焦与灰渣增多、受热面污染加剧, 形成“效率下滑—污染加重—进一步降效”的恶性循环。在高硫、

高灰分燃料与低温余热回收不足的场景下, 问题更为突出; 同时, 在线监测与燃烧优化手段不足、检修与清洗周期不合理, 使低效工况长期得不到及时纠正, 热效率难以稳定在标杆水平, 影响全厂能效与环保绩效的同步达标<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 换热网络匹配不合理

既有换热网络普遍存在夹点温度偏低、有效能损偏大、冷热端匹配失衡以及“穿越夹点”换热等问题, 导致高温位热源未能优先用于关键加热任务, 低温余热回收不足且品位降级使用; 典型表现为原油换热终温偏低、塔顶回流与中段取热配置与负荷变化不匹配、换热设备结垢与通道堵塞造成总传热系数衰减、旁通与备用设备长期闲置等。

#### 1.3 蒸汽动力系统能效损失

蒸汽系统“源—网—荷—储”多环节耦合度高, 常见痛点包括: 产汽、输配与使用环节存在能级不匹配与减温减压损失, 管网保温与疏水不良导致散热与泄漏, 透平与背压机组负荷率低与调度不协同, 抽汽、回热、乏汽回收与低温热利用衔接不足, 导致高品质

蒸汽被低效降级使用。

#### 1.4 设备运行参数偏离最优

分馏塔、换热网络与公用工程之间强耦合，但实际控制多停留在单装置、单回路层面，导致关键参数长期偏离经济最优区，如塔顶、中段回流比与取热负荷未按季节与原油性质动态调整，导致塔内热量分配失衡与再沸/冷凝负荷被动增加；机泵与压缩机在非设计工况下效率下降、阀门节流损失偏大；换热设备运行温差与压降设置不合理，造成有效能损上升。加之在线监测—机理模型—优化算法闭环不足、数据质量与模型精度有限、操作边界与质量约束处理不充分，难以实现多变量、多约束条件下的稳定最优运行，装置在全生命周期内的平均能效与可靠性受到影响。

### 2 炼油装置节能降耗的技术优化策略

#### 2.1 加热炉燃烧精准调控与余热深度回收

面向加热炉群的运行优化，应以低氧燃烧与多变量协同控制为核心，构建从测量到执行的闭环体系，并以烟气余热的全温域回收为主线，系统降低燃料气与电力消耗<sup>[2]</sup>。实践中，在燃烧侧建立以炉内多点氧含量、一氧化碳、炉膛负压与排烟温度为约束的多变量控制，采用模型预测控制或先进过程控制对燃料阀位、风门与引风机转速进行联动优化，使炉膛维持在微负压与低过剩氧的稳定工况，同时抑制热力型氮氧化物的生成。同时，在设备侧实施高效空气预热与低温省煤器组合，优先回收高温段烟气显热，并针对中低温段配置热管或板式换热器，将排烟温度稳步降至经济下限，同步减少散热损失与风机电耗。工程实践中，多家企业通过低氧燃烧与余热回收改造实现了显著收益，例如重整四合一炉在增加余热回收后排烟温度低于90℃、氮氧化物排放低于50mg/m<sup>3</sup>、热效率超过94%，年节约5168t标准煤；另有企业通过加热炉理论配比燃烧将一氧化碳控制在150ppm以下、氧含量低于1%，年节约1200t标准煤，并在全厂范围将氧含量统一至1.0%—2.0%，使炉群平均热效率提升至93%以上。

在低温热深度利用上，应将装置间热联合与低温热升级利用相结合，构建热水、蒸汽与制冷的多能互补体系，实现能量的梯级匹配与全厂统筹。一方面，依托余热回收站集中制取95℃/75℃热水，驱动溴化锂吸收式制冷机组制取7℃/12℃冷水，用于集中空调与工艺冷却，替代高品位蒸汽或电制冷，降低综合能耗。另一方面，针对难以直接利用的中低温热，适度配置热泵、蒸汽再压缩或低温发电模块，将低品位热升级为可驱动精馏再沸或供热的有效能，并通过跨装置热互供减少重复加热与冷却。为提升系统弹性，可

在低温热网中引入相变蓄热或热水储槽，平抑负荷波动并增强与蒸汽、电力调度的协同能力。

#### 2.2 换热网络智能重构与流程优化

换热网络是炼化装置能量系统的中枢，其长期运行面临结垢引起的传热衰减与工况漂移，因此需在设计与运行两端协同发力，既要在初始阶段通过夹点技术实现结构最优，又要在全生命周期内保持控制与能效的动态最优。在设计层面，应以最小公用工程负荷与最小换热面积为双目标，结合夹点分析与数学规划法开展网络合成与改造，优先挖掘高温位热量的内部回收潜力，并合理设置中间再沸器与中间冷凝器，减少跨温区传热不可逆损失。在运行层面，应针对结垢导致的慢时变特性，引入在线控制系统重构机制，基于非参数相对能量增益矩阵等变量配对方法，周期性评估控制自由度与增益衰减，自动切换操纵变量与被控变量配对，从而在控制不失稳的前提下维持出口温度与能耗的最优平衡。工程与学术研究表明，在线重构控制能够显著延长换热网络的可控寿命，并在相同条件下进一步释放能耗优化空间，为长周期节能提供可验证的技术路径<sup>[3]</sup>。

在流程与运行一体化优化上，应把换热网络与装置流程、公用工程与低温热系统纳入统一框架，通过过程模拟与实时优化实现从设计到运行的闭环迭代。首先，在装置层面优化塔器操作与热集成，降低塔顶冷凝负荷与塔底再沸负荷，减少低温热产生，并通过塔间热耦合与中间换热提升整体回收率。其次，在系统层面统筹蒸汽、燃料气与循环水等公用工程的负荷分配，减少减温减压与输送损耗，推动低温热制冷、发电与工艺加热的协同利用。最后，在数字化底座上建设能源管理中心，打通水、电、冷、气、热的一体化监测与精准调控，形成从单元设备到全厂系统的能流、物流与信息流协同优化。

#### 2.3 蒸汽动力系统集成优化与能量梯级利用

蒸汽动力系统的优化应以能级匹配与梯级利用为主线，通过系统诊断、管网重构与背压化改造，减少减温减压损失，提升综合热效率与经济性。首先，开展全厂蒸汽平衡与能级审计，识别高品位蒸汽的降级使用与不必要的减压节点，优先以背压透平或抽汽驱动取代节流减压，实现做功优先、供热随后的用能秩序。其次，围绕锅炉、汽轮机、余热锅炉与管网保温开展综合改造，提升可用能品位与输送效率，并通过凝结水与闪蒸汽的全量回收降低水处理与补水能耗。行业经验显示，蒸汽系统存在多等级管网复杂、低压放空量大与减压损失显著等问题，通过优化管网结构与运行方式，能够有效缓解瓶颈并减少能量贬值。同时，

在动力设备侧推进通流改造与高效烟机应用,可显著提高回收效率与系统出力,为全厂能效提升创造空间。

在多能互补与电驱替代方面,应结合清洁低碳能源与电气化改造,构建以电驱透平、燃气轮机联合循环与热电联产为核心的新型动力系统,稳步提高绿电与绿氢比例,降低化石能源依赖。同时,在具备条件的装置中实施电驱压缩机替代蒸汽透平驱动,减少蒸汽需求并提升系统灵活性;在区域层面推动大型热电联产、核能供热与风光储协同,形成跨行业耦合的能源网络,实现余热余能的广域梯级利用<sup>[4]</sup>。

#### 2.4 设备运行参数实时监测与智能优化调控

设备层的节能降耗离不开高精度的计量、在线监测与智能控制,应从数据可信、模型可用与执行可控三方面协同推进,形成从感知到优化的完整闭环。具体应完善能源与碳资产的计量体系,提升水、电、气、冷、热的分项计量覆盖率与计量精度,并在关键设备增设温度、压力、流量、振动与烟气组分等在线测点,确保过程数据的完整性与时效性。同时,建设数字化能源管理中心,打通生产、设备与能源管理的信息孤岛,实现能源流、物质流与信息流的协同可视化,为运行优化与绩效考核提供依据。在此基础上,针对加热炉、换热网络、精馏塔与压缩机等重点设备,部署先进过程控制与实时优化,利用多变量预测模型与约束优化算法,在波动工况下保持能效与产能的最优平衡。

在过程强化与智能运维方面,应把设备健康管理与能效优化相结合,通过在线监测与模型诊断实现从被动检修向预测性维护的转变,减少非计划停机与性能衰减带来的能效损失。针对换热网络与加热炉等慢时变系统,引入在线重构与自适应控制,持续抵消结垢与漂移影响,保持长期可控与高效运行。同时,围绕机泵、压缩机与风机实施变频调速与液力耦合等高效驱动技术,降低低负荷工况下的无效能耗,并结合负荷预测与多能互补优化启停与调度策略。通过设备级智能优化与系统级协同调度,能够在保障安全与质量的前提下,稳步降低燃料、电力与蒸汽的单耗,并提升装置长周期运行的经济性与稳定性<sup>[5]</sup>。

#### 3 经济效益综合分析

面向全流程的系统优化通过“源头减耗—过程提效—系统协同—智能闭环”,在保障安全与质量的前提下,持续降低燃料气、蒸汽、电力等外购能源成本,并同步削减运维、检修、放空与排放相关费用;同时,因能效提升与负荷匹配优化带来的产能弹性与产品收率改善,有助于增强边际贡献与现金回笼,形成降本—增收—现金流改善的复合效应。综合来看,该方法能够在投资可控、风险可管的条件下,稳步提升全厂能

源成本竞争力与经营韧性,并为企业中长期低碳转型与结构升级创造财务空间。

在评价时上,建议采用以增量法为核心的财务评价框架,围绕财务内部收益率、财务净现值、投资回收期、单位产品成本节约额、单位节能量投资额、项目节能率等指标,结合敏感性分析对投资额、能源价格、工期与运行边界进行情景检验,确保结果稳健可靠;同时,将节能效益与产量变化、可燃气体回收等增量收益一并纳入,统一费用与效益口径,并明确节能量的计量与折算规则,以提升评估的可比性与可审计性。最后,依托数字化能源管理中心与在线监测,可显著提高数据可信度与模型可用性,支撑滚动优化与绩效考核,使经济效益评估与运行改进形成闭环并持续迭代。

#### 4 结语

面向“双碳”目标与行业转型,炼油装置节能降耗应以工艺—设备—公用工程一体化为主线,持续推进加热炉低氧燃烧与深度余热回收、换热网络智能重构与流程优化、蒸汽动力系统梯级利用与电驱替代以及在线监测与智能优化控制,形成源头减耗、过程提效、系统协同、智能闭环的长效机制,兼顾能效、可靠性与碳减排。在未来,建议以全厂系统优化为牵引,分阶段实施改造与运行优化,优先挖掘高温位余热与低温热的协同潜力,配套完善计量与数字化能源管理中心,以滚动评估—闭环改进确保收益兑现。经济效益评价遵循增量法与全生命周期原则,围绕内部收益率、净现值、回收期、单位能耗成本等指标开展情景与敏感性分析,统一费用—效益口径并明确节能量计量与折算规则,实现可复制、可推广的工程化路径与稳健的收益评估闭环。

#### 参考文献:

- [1] 马飞,王云云,张景.炼油化工装置节能降耗策略探讨[J].石化技术,2025,32(05):44-45+26.
- [2] 张超,胡永宏,齐永亮,等.炼油装置节能降耗措施探讨[J].辽宁化工,2024,53(05):742-745.
- [3] 郭启纯.炼油装置节能降耗优化措施分析[J].石化技术,2023,30(06):37-39.
- [4] 秦玉建,周梓桐,闫忠玉,等.常减压蒸馏装置节能降耗优化措施[J].石化技术与应用,2022,40(03):190-193.
- [5] 王伟,张玉鹏.炼油企业节能降耗改造[J].山东化工,2016,45(14):68-69.

#### 作者简介:

张泳(1976-),男,汉族,江苏泰州人,本科,助理工程师,研究方向:石油化工生产工艺。