

基于过程系统工程的化工生产能耗优化与节能控制策略研究

李建民

山东龙焱工程监理有限公司, 山东省滨州市, 256600;

摘要: 过程系统工程以系统分解与集成优化为核心路径, 将机理模型与运筹决策相结合, 用以识别能耗结构与传递链路中的关键环节, 进而重构物料与能量的耦合关系。化工生产的能耗由装置本征需求与操作策略共同决定, 若以跨单元目标函数统一约束, 可在稳定产能的条件下降低单位能耗并压缩峰值负荷。本文从能耗表征、模型优化与控制实施三个层面展开, 构建分层指标体系与可计算的约束集, 并提出面向不确定性的协同控制思路, 使热功互补、余热回收与调度鲁棒性形成闭环。

关键词: 过程系统工程; 能耗优化; 热整合; 鲁棒调度; 预测控制

DOI: 10.69979/3060-8767.25.06.060

引言

化工过程的能源消耗呈现跨尺度耦合特征, 单元内部的传热传质影响设备效率, 装置间的物流与热流匹配决定系统能效, 而生产计划与公用工程供给又改变瞬时负荷与峰谷分布。过程系统工程提供从模型到决策的统一语言, 通过图网络、拓扑结构与约束表达, 可在保证安全与品质的条件下挖掘可行的节能空间。与单点改造不同, 系统方法强调多目标权衡与跨层协调, 使热整合、余能再利用与柔性调度以可验证的方式协同推进。为了减少试错成本, 需要建立自上而下的分层模型与自下而上的数据校准, 让机理与数据两类证据在一致性检验中相互补充, 并通过在线辨识与反馈修正保持模型有效。针对负荷波动与原料变化, 还需在设计阶段就引入不确定性与扰动情形, 对可行域进行收缩与重心化处理, 使运行策略在长期周期内保持稳定收益。在实施层面, 还应将设备维护与能效管理打通, 把换热器结垢与密封泄漏等状态关联到能耗画像, 用计划性检修替代被动反应。

1 能耗表征与系统分解

1.1 多尺度能耗解析与指标体系

化工生产的能耗来源可划分为单元本征消耗与系统协同损失两类, 前者由反应热力学与设备效率决定, 后者由物流组织与公用工程匹配决定。为避免局部最优, 应在装置外建立统一边界, 以能量守恒与第二定律为约束, 构造覆盖反应段与分离段的综合评价量。指标体系包含等效比耗、单元不可逆度、峰值负荷率与余热可用度等量, 分别对应连续运行的稳态表现与动态运行的负荷弹性^[1]。多尺度解析以单元为最小块, 以装置群为中尺度, 以全厂为全局层, 三层之间通过物料流与能量流

的映射实现耦合描述。为识别瓶颈, 需要引入图结构的路径度量, 将热功传递链表示为节点与边的集合, 通过最短路与最大流的组合度量定位高不可逆通道, 使结构优化与操作优化能够共享同一证据。指标的可操作性依赖可测变量, 故需把温度流量压力与成分等观测量映射到能耗因子上, 形成可在线更新的能效画像。若结合场景库, 可把不同季节与负荷水平下的典型状态记录为基线, 再以偏差分析定位可挖掘区间, 以此确保节能改造与运行优化在统一的参照下进行。指标落地需要与数据治理同步推进, 应建立跨系统的数据字典与质量规则, 对采样频率与时间对齐作出明确要求, 避免由数据漂移导致的能效误判。为提高对短周期扰动的敏感性, 可在关键设备处布置高分辨监测, 并通过窗口化统计得到局部不可逆度的时变画像。对于难以直接测量的能量流, 可利用平衡闭合与软测量推断, 以约束驱动的方式校正偏差。最终将装置画像与系统画像在统一看板中呈现, 让操作人员能够从空间位置与时间趋势两个维度识别异常, 从而在不改变产量与质量的前提下完成精细化节能操作。对于难以直接分摊的公用工程损耗, 可按因果分析拆解到可执行的单元目标, 以免责任不清导致改进停滞。

1.2 能源网络与热功耦合机理

全厂能源网络由蒸汽冷媒电力与压缩气体等公用工程构成, 热与功之间存在可替代与互补关系。若仅以局部负荷为目标, 可能引入跨网络的反向放大效应, 导致全局能耗上升。为此需要以统一目标函数驱动网络级配置, 使不同品位的热源按可用度排序与配对, 实现近似品位匹配与分段复用^[2]。对于换热网络, 可在传统夹点思想的基础上引入负荷波动与启停频次的成本项, 使

网络既满足稳态热回收,又在动态场景下保持可调余度。功与热的耦合可通过热泵与余热发电等单元实现,但应设置品位门槛以避免低价值循环导致隐形损失。对于含多相与相变的过程,能量在传递路径中常伴随压力与相态改变,需要把压降与机械功纳入评估,使热功转换的真实代价在模型层得到反映。能源网络的弹性可通过分区供能与层级供能实现,以高可靠节点为核心构建环路与旁路,提高在异常与检修场景下的服务连续性。为保证执行性,还需将网络约束转化为调度平台可理解的规则集,与生产计划的时间分辨率一致,使能量与产量在同一时间轴上实现协调。在存在多热源多用能单元的场景中,应把网络的控制可行域与优化可行域同时表述,针对不同时间尺度设定切换逻辑与缓冲策略,避免频繁切换引起的效率损失。为了降低实施门槛,可采用分区改造的路线,先在能量密度高与回收潜力大的区域试点,再通过并联复制向外扩展,使网络结构与运行策略在迭代中逐步收敛。对于涉及外购能源与对外供能的场景,可把价格与供需合约纳入同一目标,使内部热功匹配与外部交易形成联动,获得综合成本的最优解。对新旧装置并存的场景,还可构建过渡期的双轨网络,使老旧单元在边际投资下获得可观收益,同时为后续深度改造预留接口。

2 模型与优化方法

2.1 分层建模与混合整数优化框架

节能优化的模型来源于机理方程与经验回归的组合,需在精度与计算复杂度之间建立平衡。分层建模将单元层的连续变量与结构层的离散选择解耦,上层负责设备配置与网络拓扑,下层负责操作设定与负荷分配。为保持可解性,可采用线性与凸近似对非线性传热与平衡关系进行分段表达,通过误差界限保证工程可用度。混合整数规划在这一框架中承担结构决策的角色,包含开停状态与管线连接等变量,同时在目标函数中嵌入能耗与启停成本的权衡。为避免维度爆炸,需要采用列生成与情景分解,将时间轴与场景集切分为若干窗口,并通过滚动优化把长周期目标转化为短周期可执行决策^[3]。模型的可信度来自数据同化与现场校准,需在运行中以软硬传感构成的数据流对关键参数进行辨识,并以惩罚项限制偏离。对于跨装置的热回收与能量耦合,必须设置跨边界一致性约束,确保多模型的耦合处在任何时刻都满足物质与能量平衡,同时维持安全与质量下限。约束的表达需要兼顾工程可读性与计算友好性,对关键关系可采用凸包与余量变量给出上界与下界的双边限制,

并通过灵敏度分析确认对结果的主导因素。为避免过度简化带来的偏差,应在滚动运行中定期进行回放校验,使用历史窗口的真实数据重求解并比较能耗差异,据此调整近似粒度与误差惩罚。对于规模超大的问题,可将网络拆分为若干耦合子区,子区内部采用高精度模型,子区之间采用等效边界量进行交互,从而在保证精度的同时维持求解速度。当存在多重时间尺度时,可在框架中引入慢变量与快变量的分离表达,使日内与周际的决策互不干扰而又相互呼应。

2.2 不确定性与鲁棒节能调度

原料性质波动与市场需求变化使节能方案面临不确定性,若仅以名义场景优化,往往在实际运行中导致能耗回弹。鲁棒调度以集合不确定集为框架,对原料指标公用工程价格与环境温度等变量设置范围与几何形状,将最坏情况下的能耗作为约束或目标,从而获得在大多数情形下稳定的节能收益。若需要兼顾收益与风险,可采用机会约束与风险度量,在满足高概率可行的同时对超限损失给出惩罚。动态运行中还涉及随机工况的序贯影响,应以滚动时域的方式更新可行域,并将切换损耗与启停成本显式计入,使调度策略避免频繁震荡^[4]。在多单元并行的系统里,鲁棒性还体现在负荷转移能力上,应为关键设备预留缓冲区与备用路径,使高能耗设备在不利情形下获得优先保障,同时不损及全局的热回收结构。为提高可实施性,可将鲁棒半径与操作余度转化为现场可读的指令,如限制换热器端差与塔顶回流的上下限,以直接的方式传递节能边界。在不确定性描述上,可结合历史数据与机理知识构造多重集合,既包含区间与多面体,也包含基于样本的统计半径,以适应不同变量的分布形态。对突发事件与极端天气,可在情景集中预留应急状态,并把恢复时间与备用容量纳入目标,使调度方案在极端情况下仍然保持服务连续。为提升沟通效率,鲁棒参数应被翻译为现场阈值与操作票据,明确何时降低负荷与何时启用备用路径,使不同岗位能够在统一规则下协同执行。对于价格大幅波动的环境,可把需求响应与能量存储一并纳入调度,使负荷在价格低谷时适度前置,在高价时段保持刚性下限,从系统层面削峰填谷。

3 控制策略与实施路径

3.1 预测控制与能效约束协同

节能控制的核心在于把能耗指标直接纳入控制目标,使质量与产能不受影响的前提下对公用工程用量进行主动管理。预测式的控制思路以模型为内核,利用滚

动优化在有限时域内求得参考轨迹,并以反馈环节修正模型偏差。为了避免对质量与安全造成不利影响,应在目标函数中设置软硬约束的层级,硬约束对应温度压力与组成的限值,软约束对应能耗与波动的罚项,二者通过权重与边界调谐达到平衡。在多单元耦合的情况下,需引入分布式协调机制,按网络拓扑把控制问题拆分为若干相互作用的子问题,各自解决局部目标并通过迭代交换边界信息实现一致。为提高鲁棒性,可在时域内注入扰动情景,求解对多个可能轨迹均保持可行的控制指令,使运行在负荷与环境变化下仍保持能效边界。工业现场存在测量噪声与滞后,应配置状态观测器与偏差校正机制,并以自适应增益限制突发信号对阀位的放大。对于公用工程侧的分配与切换,要把设备效率曲线与最小稳定负荷嵌入控制逻辑,避免在低效率区间停留过长,减少无效循环与隐形损耗。能效协同的实现还依赖跨层指标的下传与上收,下传体现在把系统级目标分解到设备级的约束与权重,上收体现在把设备级的执行状态聚合为系统级的能效反馈。为减少通信与计算压力,可采用事件触发的更新机制,在状态接近边界或扰动幅度超过阈值时才触发优化并下发新指令,其余时刻由本地控制维持稳定。对于大型装置群,应在局部控制回路之外配置信号限幅与速率限制,避免多回路耦合导致的振荡,从控制层面降低无效能量消耗。在人机协同方面,控制系统应提供可解释的建议与边界提示,让操作与调度理解节能意图,从而在异常情况下做出一致响应。

3.2 能源集成与数字孪生闭环

节能控制的实施需要结构与运行的双重配合,能源集成提供结构层的复用通道,数字孪生提供运行层的验证平台。能源集成通过换热网络重构与品位匹配实现余能再利用,同时在公用工程侧配置可变频与分级供能,使供给与需求在时间与品位两个维度上匹配。数字孪生以机理模型与现场数据共同驱动,以在线校准维持模型与装置的一致,并在虚拟空间中验证节能操作的可行性与风险边界。为缩短部署周期,可采用可插拔的模块化模型库,把反应分离与公用工程等子系统以标准接口拼装,并以统一数据字典管理变量名称与量纲,减少跨系统沟通成本。闭环运行时,孪生体将预测轨迹与实际轨迹进行比较,通过偏差诊断定位瓶颈,并向控制层下发修正建议或新的约束参数,形成持续优化的循环。为保

证长期收益,还需要建立以绩效为导向的考核与可视化看板,把单位能耗峰值比例碳排放系数与设备健康度等指标纳入常态管理,使节能策略从项目化治理转向常态化运营。实施过程中还需要建设知识与经验的组织化存储,将每一次节能试验与运行调整形成可复用模板,并记录条件范围与适用边界,避免随人员变动造成方法断层。对多地点多厂区的企业,可在云端汇聚关键指标与模型版本,以统一的验证流程管理上线与回退,确保不同基地在一致的规则下持续改进。随着数字基础设施的完善,孪生体还可承载跨学科仿真,把安全约束与环保指标联动纳入,使节能目标与多重约束协同共存。针对组织层面的推进,可设立跨部门的能效委员会,定期审视指标变化与项目进展,并以激励与约束并行的方式推动持续改进,使节能成为长期机制。

4 结语

微观机理与系统决策的结合为化工节能提供了可执行的路径。通过多尺度能耗表征与统一指标体系,可在设计与运行两端同时约束损失来源。以分层建模为基础的优化方法使结构配置与操作设定得以协同,并在不确定性场景中保持收益稳定。将能效目标嵌入控制回路,并以能源集成与数字孪生构成闭环,可把节能由一次性改造转化为持续改进,进而在安全与质量边界内实现长期的效率提升。面向未来的发展,应在标准化接口与数据治理层持续投入,让模型与控制得以复用与迁移,形成可扩展的节能生态。

参考文献

- [1] 尹晓娟,丁文涛. 化工生产过程中的能耗管理与节能减排技术分析[J]. 皮革制作与环保科技, 2025, 6(07): 145-147. DOI: 10. 20025/j. cnki. CN10-1679. 2025-07-50.
- [2] 周恒,童凯,李玉军,等. 化工工艺中节能降耗技术应用与优化策略[J]. 清洗世界, 2024, 40(01): 114-116.
- [3] 张旨博,向世炎,李力,等. 浅析化工工艺中的新型节能降耗技术及其应用[J]. 清洗世界, 2023, 39(05): 53-55.
- [4] 黄莹. 化工工艺中常见节能降耗技术研究[J]. 化工管理, 2019, (20): 59-60.