

# 化工生产换热网络节能优化设计

聂栩冬

天津亚长技术开发有限公司 天津 300041

**【摘要】：**换热网络是化工生产系统的能量枢纽，其设计合理性直接决定企业能耗水平与生产经济性。当前化工换热网络普遍存在能量匹配失衡、换热设备冗余、传热效率低下等问题，造成大量能源浪费。本文以节能为核心目标，基于夹点技术、数学规划等理论方法，从网络结构优化、设备选型升级、运行参数调控及智能化优化四个维度，系统阐述化工换热网络的节能优化设计策略，结合工程实践分析优化效果，为化工企业降低能耗、提升能源利用率提供理论与实践支撑。

**【关键词】：**化工生产；换热网络；节能优化；夹点技术

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.042

## 引言

化工生产过程伴随大量热量传递，换热网络作为连接各工艺单元的能量桥梁，承担着热量回收与梯级利用的关键职能，其能耗占化工企业总能耗的40%以上。“双碳”目标下，化工行业节能降耗压力凸显，传统换热网络因设计粗放、缺乏系统优化，导致能源回收率低、公用工程消耗过高。本文聚焦换热网络节能优化，结合化工生产工艺特性，探索网络结构、设备及运行的协同优化路径，对推动化工行业绿色低碳发展具有重要现实意义。

## 1 化工换热网络节能优化的理论基础与核心目标

### 1.1 核心理论支撑

化工换热网络节能优化以热力学定律为基础，核心方法包括夹点技术、数学规划法及启发式算法。夹点技术通过识别冷热流股温度匹配临界点（夹点），确定最小传热温差与能量需求下限，能直观揭示能量浪费环节，避免无效设计<sup>[1]</sup>。

数学规划法借助线性、非线性规划等模型，构建含投资、能耗、运维费用的多目标函数，求解得到兼顾技术与经济的最优配置，适用于精细化优化。启发式算法基于工程经验形成规则，可快速生成可行方案，适用于复杂网络初步优化或应急调整。

三种方法各有侧重且互补，实际应用需结合工艺复杂度、生产规模与优化需求组合使用。

### 1.2 节能优化核心目标

换热网络节能优化以“能量高效回收、成本精准控制”为核心，具体目标包括四方面：一是提升热量回收率，通过优化冷热流股匹配关系，最大化回收工艺余热，减少蒸汽、冷却水等公用工程消耗，这是节能优化的首要目标。二是降低网络总能耗，涵盖换热设备运行能耗、流体输送泵耗、风机能耗等，通过参数优化与设备升级实现系统能耗最小化。三是优化设备配置，减少功能冗余的换热设备，淘汰低效老旧设备，降低设备初期投资与长期维护成本，提升资产利用效率。四是提升运行稳定性与灵活性，确保优化后的网络能适应化工生产负荷波动、原料组分变化等工况，避免因参数失衡导致的生产中断或效率骤降，保障连续生产。

原料组分变化等工况，避免因参数失衡导致的生产中断或效率骤降，保障连续生产。

### 1.3 化工生产对换热网络的特殊要求

化工生产的连续性、复杂性与高风险性对换热网络提出特殊要求，这些要求直接影响优化方案的落地效果。一是适应性强，化工工艺中物料组分、温度压力常因原料变化或生产负荷调整而动态波动，换热网络需具备一定的参数调节范围。二是抗堵塞能力优，化工物料常含固体杂质、高粘度组分或易结晶物质，换热网络设计需减少设备内部死角与狭窄流道，优先选用大口径流道、可拆卸结构的换热器，降低堵塞风险与清洗难度。三是安全性高，涉及高温、高压、强腐蚀性物料（如强酸、强碱、有毒介质）的换热网络，需强化设备密封性能与防腐设计，采用耐腐蚀材料（如哈氏合金、石墨）或衬里技术，设置压力报警、泄漏检测等安全装置，确保运行安全。四是易操作性好，网络结构需简洁清晰，管线布局合理，关键设备预留巡检空间，重要参数设置在线监测点，便于日常巡检、维护与故障快速处理，降低运维人员工作强度与操作风险<sup>[2]</sup>。

## 2 化工换热网络结构优化设计

网络结构是决定换热效率的基础，通过优化流股匹配方式、简化网络拓扑结构、整合冗余设备，可显著提升能量回收效率，降低能耗。

### 2.1 基于夹点技术的流股匹配优化

流股匹配优化是结构优化的核心，需以夹点技术为指导，严格遵循“热量梯级利用、避免夹点穿越”原则，这是提升能量回收效率的关键。首先通过收集各工艺流股的温度、流量、比热容等基础数据，绘制冷热流股组合曲线与温焓图，精准确定夹点温度与最小传热温差。夹点以上区域为“热端”，仅允许热流股与热流股、热流股与需加热的冷流股进行换热；夹点以下区域为“冷端”，仅允许冷流股与冷流股、冷流股与需冷却的热流股进行换热，坚决避免跨越夹点的换热设计，因为跨夹点换热会导致高温端热量浪费与低温端冷量浪费的双重损失。

对于多流股换热系统，采用“优先匹配温差大、流量稳定的流股”的策略，减少传热面积浪费。

## 2.2 网络拓扑结构简化与整合

传统换热网络常因长期工艺迭代、局部改造而形成“多分支、多冗余”的复杂结构，不仅增加流体输送能耗与设备维护成本，还可能导致流股分布不均，降低整体传热效率。拓扑结构优化需通过“合并冗余分支、简化换热路径、整合功能设备”实现精简。

采用“集中式+分布式”混合拓扑结构，核心工艺单元采用集中式换热网络，实现大规模热量回收；辅助单元采用分布式小型换热网络，提升操作灵活性。例如，炼油厂常减压装置采用集中式换热网络回收原油与产品的热量，而罐区伴热系统采用分布式换热，降低输送能耗。

## 2.3 多流股换热设备的集成应用

多流股换热器可实现多股冷热流股在同一设备内的热量交换，减少设备数量与占地面积，提升网络集成度。常用的多流股设备包括多通道板式换热器、釜式重沸器等，多通道板式换热器通过隔板划分不同流道，实现3-5股流股的同时换热，适用于中小规模换热系统；釜式重沸器则可同时实现物料加热、汽化与回流换热，整合多个单股换热功能。

集成应用需基于流股温度等级分组，将温度区间相近的流股匹配至同一多流股设备，避免温度交叉导致的效率损失。例如，将化工生产中30-50℃的冷流股与60-80℃的热流股整合至同一多通道换热器，实现热量高效传递。

## 3 换热设备选型与升级优化

换热设备是网络运行的核心载体，其性能直接影响传热效率与能耗，通过选用高效设备、优化设备参数、升级传热表面，可提升网络整体换热性能。

### 3.1 高效换热设备的选型适配

设备选型需结合化工物料特性（粘度、腐蚀性、含固量、相变特性）与工艺参数（温度、压力、换热负荷），实现“设备类型-物料特性-工艺参数”精准匹配，这是提升传热效率与设备寿命的基础。

对于低粘度、清洁流体（如轻油、工艺水、甲醇溶液），优先选用板式换热器，其传热系数为管壳式的2-3倍，结构紧凑且占地面积仅为传统设备的1/3-1/2，传热效率提升30%-50%，适配中小温差、大流量场景。

对于高粘度、易结垢流体（如原油、聚合物溶液、煤焦油），选用螺旋板式换热器，螺旋形流道可增强流体扰动、破坏边界层、减少污垢沉积，流动阻力比管壳式降低20%-30%，且便于清洗维护。

对于高温高压、强腐蚀物料（如合成氨合成气、氯碱工业

氯气），选用管壳式换热器，采用钛合金、双相钢、石墨等耐腐蚀材料，管板与壳体采用焊接+胀接复合连接强化密封，确保极端工况下安全运行。

对于含相变流股（如蒸汽冷凝、物料汽化、溶剂回收），选用浮头式或U型管式管壳换热器，浮头式可适应热膨胀差异，U型管式抗振动性能更优，两者均便于清洗维护，能有效应对相变工况波动。

## 3.2 传热表面强化与设备参数优化

传热表面强化是提升设备效率的关键，通过采用扩展表面、异形流道等技术，增加传热面积与流体扰动，降低传热热阻。常用强化技术包括翅片管、螺纹管、波纹管等，翅片管通过在管壁增加翅片扩大传热面积，适用于气-液换热场景；螺纹管通过内壁螺纹增强流体旋转扰动，减薄边界层，适用于液-液换热；波纹管则通过管壁波纹结构使流体产生剧烈湍流，适用于易结垢流体。

设备参数优化需结合传热需求与能耗成本，合理确定传热面积、壳程与管程流速。传热面积需避免“过大导致投资浪费、过小导致传热不足”，通过传热速率计算与工况波动预留量确定；壳程与管程流速需控制在合理范围，流速过低易导致流体层流、传热效率下降，流速过高则增加流动阻力与泵耗，通常液-液换热流速控制在1-3m/s，气-液换热流速控制在5-15m/s。

## 3.3 老旧设备的节能改造与升级

针对化工企业大量运行的老旧换热设备，采用“局部改造+性能升级”的节能方案，降低改造成本。对于传热表面结垢严重的设备，采用化学清洗或机械清洗去除污垢，恢复传热性能；对于传热效率下降的管壳式换热器，将普通光管更换为螺纹管或翅片管，提升传热系数；对于密封性能差的设备，更换为新型密封材料，减少热量泄漏。

对于能耗过高的老旧设备，采用“以旧换新+系统整合”模式，例如将多台低效小换热器替换为单台高效大换热器，同时优化周边管线布局，减少流体输送能耗。改造过程中需同步开展设备防腐处理，采用涂层、衬里等技术延长设备使用寿命，例如在处理酸性物料的换热器内壁涂覆陶瓷涂层，提升耐腐蚀性能。

## 4 换热网络运行参数与系统协同优化

换热网络的高效运行需依托精准的参数调控与系统协同，通过优化运行参数、整合公用工程、构建智能化控制系统，实现能耗动态最低。

### 4.1 运行参数的动态优化调控

运行参数优化需建立“负荷联动、动态调节”机制，根据化工生产负荷波动、原料组分变化实时调整换热器进出口温度、流体流量与传热温差，避免固定参数运行导致的能耗浪费。

当生产负荷降低至设计值的 70%以下时，应通过变频泵降低换热流体流量，或关闭部分并联换热器，避免“小负荷、大流量”导致的泵耗激增；当原料组分变化导致热流股温度升高时，需同步增加冷流股流量或开启备用冷却回路，充分回收余热，防止热量浪费<sup>[3]</sup>。

针对多台并联换热器，采用“流量均匀分配”策略，通过调节阀门开度使各换热器负荷均衡，避免单台设备过载或负荷不足。对于串联换热器，优化流体流向，采用逆流换热方式提升平均传热温差，逆流换热效率比顺流提升 10%-20%，适用于高温差换热场景。

#### 4.2 与公用工程系统的协同优化

换热网络与蒸汽、冷却水、电力等公用工程系统存在强耦合关系，两者的协同优化是实现化工企业整体能耗降低的核心路径。蒸汽系统优化需构建“余热梯级产汽、蒸汽梯级利用”模式，优先利用换热网络回收的高温余热产生低压蒸汽，替代外部工业蒸汽供应；对于需蒸汽加热的工艺单元，采用“高温余热预热+中压蒸汽加热+低压蒸汽保温”的梯级加热方式，避免直接使用高压蒸汽加热低温物料造成的能力品位浪费。

冷却水系统优化需结合换热网络需求，调整冷却水温度与流量，例如将吸收塔冷却器的冷却水出口温度与换热器进口温度匹配，实现冷却水的梯级利用；采用循环水水质稳定技术，减少水垢生成，提升冷却效率。

#### 4.3 智能化控制系统的构建与应用

智能化控制是参数动态优化与系统协同的核心，通过“实

时监测-精准调控-故障预警-智能决策”闭环管理，大幅提升换热网络运行效率与稳定性。构建基于分布式控制系统（DCS）与物联网（IoT）的监控平台，在各换热器进出口及关键管线节点安装温度、压力、流量、液位传感器，集成传热系数、能耗等衍生参数的实时计算与可视化展示，实现全网络工况动态监控。

采用模糊控制、PID 控制等算法实现参数自动调控，如换热器出口温度高于设定值 5%时，系统自动增减冷/热流股流量；传热系数降至初始值 80%时，自动发出结垢预警并提示清洗周期。基于大数据分析构建能耗预测模型，结合生产计划、原料特性等数据提前优化运行参数，例如预测生产负荷提升 30%时，提前 2 小时调整换热流体流量与冷却系统负荷，保障热量供应稳定。

### 5 结语

化工换热网络节能优化设计是实现化工企业降本增效、绿色转型的核心路径，其本质是通过科学的理论方法与工程技术，实现能量的梯级利用与资源的高效配置。这一过程需以夹点技术为基础构建能量回收框架，通过网络结构优化搭建高效传热路径，依托设备升级提升核心载体性能，借助参数调控与智能化系统保障运行效率，最终形成“理论-结构-设备-运行”四位一体的优化体系。未来，随着新型高效传热材料（如纳米复合涂层、多孔介质）、人工智能优化算法（如深度学习、强化学习）与数字孪生技术的发展，换热网络将向精准化设计、智能化运行、绿色化发展方向升级，为化工行业实现“双碳”目标、推动高质量发展提供更坚实的技术支撑。

### 参考文献：

- [1] 李倩.夹点技术在某纺织工程换热网络优化设计中的应用[J].纺织科学研究,2023(7):58-61.
- [2] 林华锋,罗祖云.丙二酸二甲酯加氢生产 1,3-丙二醇工艺及节能优化设计[J].化工设计通讯,2024,50(12):13-15,18.
- [3] 李鹏飞,刘吉波,章平毅,等.8 万 t/a 戊烷工艺换热网络优化设计[J].应用技术学报,2024,24(2):160-166.