

# 化工换热网络节能方案设计

王慧宁

旭阳工程科技有限公司天津分公司 天津 300131

**【摘要】：**化工生产过程伴随大量冷热流体交换，换热网络作为能量回收与利用的核心系统，其设计合理性直接决定企业能耗水平与生产经济性。当前多数化工企业换热网络存在匹配失衡、能量梯级利用不足、设备冗余等问题，导致能源浪费严重。本文以化工换热网络节能为核心目标，阐述换热网络的节能机理与设计原则，系统分析现有网络的节能潜力，重点探讨流程集成、设备优化、智能调控等方面的节能方案设计策略，结合典型化工场景的应用实践，提出一套科学高效的节能设计体系，为化工企业降低能耗、提升能源利用率提供理论依据与工程参考。

**【关键词】：**化工换热网络；节能方案；流程集成；优化设计

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.050

## 引言

化工行业是能源消耗与碳排放的重点领域，换热过程作为化工生产的核心环节，能源消耗占比高达总能耗的50%以上。换热网络通过实现冷热流体间的热量传递，完成物料加热、冷却等工艺需求，同时回收余热资源，其节能潜力巨大。随着“双碳”目标与节能政策的推进，传统换热网络暴露出的热量匹配不合理、余热回收率低等问题愈发突出，制约企业绿色转型。因此，开展化工换热网络节能方案设计研究，通过流程优化与技术创新提升能源利用效率，对化工企业降低生产成本、实现低碳发展具有重要现实意义。

## 1 化工换热网络节能机理与设计原则

### 1.1 核心节能机理

化工换热网络的节能本质是通过优化热量传递路径与匹配关系，最大化回收工艺过程中的余热资源，减少外供能源（如蒸汽、燃料）与冷却介质（如循环水）的消耗，实现能量的高效循环利用。其节能机理基于能量梯级利用原理，即根据不同工艺流股的温度需求，将高温流股的余热按温度等级依次传递给中低温流股，形成“高温-中温-低温”的热量传递链条，避免高品位能源直接用于低品位需求的能源浪费。

换热网络的节能效果主要体现在两个方面：一是直接节能，通过优化冷热流股匹配减少外供能源消耗，降低能源采购成本；二是间接节能，通过减少冷却介质用量降低循环水系统、制冷系统的能耗，同时减少余热排放带来的环境治理成本。

### 1.2 节能设计核心原则

温度匹配原则是换热网络节能设计的首要原则，要求冷热流股温度差合理匹配，避免能量浪费。设计中需精准把控最小传热温差（ $\Delta T_{min}$ ），其过小会增加换热面积与设备投资，过大则降低余热回收率，需结合工艺特性与经济成本确定最优值。

流程集成原则强调换热网络设计与化工工艺流程整体结合，而非孤立优化。设计初期需梳理全流程冷热流股的流量、

温度等参数，结合反应、分离等单元操作工艺要求，将换热网络融入整体流程，实现“工艺-换热-节能”协同优化。

经济合理性原则要求节能方案兼顾节能效果与投资、运行成本平衡，需进行技术经济分析，避免极致节能导致成本过高。例如余热回收方案选择中，需对比不同方案投资回报率，选择适配节能需求与企业经济承受能力的方案。

灵活性与可扩展性原则适用于多品种、变负荷生产场景，节能方案需具备调节能力以适应工况变化，设计中可采用模块化结构、预留扩容空间，便于后续系统升级，提升长期适用性。

## 2 化工换热网络现状及节能潜力分析

### 2.1 现有换热网络常见问题

冷热流股匹配失衡是当前化工企业换热网络最突出的问题。部分企业的换热网络为满足单一工艺需求逐步扩建，缺乏整体规划，导致高温流股的余热未被充分回收直接排放，同时低温流股却依赖外供蒸汽加热，形成“余热放空与能源外购并存”的矛盾局面。

设备配置不合理制约节能潜力发挥。一方面，部分换热设备选型不当，如采用普通光管换热器处理高黏度、易结垢流股，导致传热效率低、压降大，增加运行能耗；另一方面，设备布局分散，换热流股输送距离过长，管路热损失与输送能耗增加。

运行调控粗放导致动态节能效果差。多数化工企业的换热网络采用固定运行模式，未根据生产负荷、原料性质等工况变化进行实时调控。当生产负荷降低时，冷热流股流量减少，但换热设备与辅助系统仍按满负荷运行，导致能源与冷却介质浪费；当原料性质变化导致流股温度波动时，无法及时调整换热匹配关系，影响余热回收效率与工艺稳定性。

余热回收层级单一也是常见问题之一。现有网络多集中于高温余热（如反应产物、精馏塔顶气相）的回收，而中低温余热（如塔底液相、冷却器出口流股）的回收利用不足，大量中低温余热通过冷却系统直接排放，造成能源浪费<sup>[1]</sup>。

## 2.2 节能潜力评估维度

热量平衡分析是评估节能潜力的基础手段，通过梳理全流程冷热流股的热量供需，统计高温流股总余热量与低温流股总热需求量，经热量平衡计算最大可能余热回收量，进而确定理论节能潜力。

有效能分析（㶲分析）用于精准评估能源品位浪费带来的节能潜力。有效能反映能量可用程度，高温流股有效能远高于低温流股，通过计算各流股有效能值与损失，可识别温度匹配不合理导致的有效能浪费。

设备性能评估聚焦现有换热设备节能潜力，通过检测传热系数、压降、结垢情况等参数，判断设备是否性能衰减。对传热效率低的设备，可通过清洗维护、结构改造或更换高效设备提升性能；对冗余设备，可经流程优化精简，降低运维成本与能耗。

运行工况适应性评估针对变负荷生产场景，通过模拟不同负荷、原料性质下的网络运行状态，评估现有网络适应能力，识别工况变化导致的能源浪费环节，为动态调控方案设计提供依据。

## 3 化工换热网络节能方案核心设计策略

### 3.1 流程集成优化

流股整合与排序是流程集成优化的基础，通过梳理全流程流股信息，剔除无效流股，合并性质相近的流股，减少换热匹配的复杂性。采用“温度区间法”将流股按温度等级划分，构建温度区间图（T-H 图），直观呈现各温度区间的热量供需关系，优先实现同一温度区间内冷热流股的直接匹配，减少跨区间换热带来的有效能损失。对于无法直接匹配的流股，通过中间换热介质（如导热油、熔盐）实现间接匹配，提升热量传递的灵活性。

pinch 技术（夹点技术）是流程集成优化的核心工具，通过确定换热网络的夹点温度（即冷热流股热量供需平衡的临界点），将网络分为夹点以上（需外供能源）与夹点以下（需冷却介质）两个区域，明确夹点以上区域仅进行热流股间的热量传递，避免冷却介质介入；夹点以下区域仅进行冷流股间的热量传递，避免外供能源介入，从根本上消除夹点处的能源浪费。通过 pinch 技术优化，可显著提升余热回收率，减少外供能源与冷却介质消耗<sup>[2]</sup>。

多单元协同优化将换热网络与反应、分离等核心工艺单元结合，实现能量的“产生-回收-利用”闭环。在反应单元，利用反应放热加热原料或溶剂，减少外供加热能源；在精馏单元，采用多塔集成换热模式，将高沸点塔底液的余热用于低沸点塔顶气相的冷凝，同时利用塔顶冷凝液预热塔进料，形成精馏系统内部的热量循环。

### 3.2 设备优化升级

高效换热设备选型是设备优化的核心，根据流股物性与工艺需求选择适配的高效设备类型。对于清洁、低黏度流股，采用螺旋板式换热器、板式换热器等高效设备，其传热系数远高于传统列管式换热器，可在相同换热面积下提升传热效率；对于高黏度、易结垢流股，采用刮板式换热器、螺旋槽管换热器等，通过强化流体扰动减少结垢，维持长期稳定的传热性能；对于气-液换热场景，采用翅片管换热器扩大传热面积，提升对流传热效率。

设备结构改造适用于现有设备的节能升级，通过改进传热表面结构、优化内部流道设计提升传热性能。例如，对传统列管式换热器的换热管进行表面改性，采用激光加工形成微纳纹理或涂覆高导热涂层，增强流体扰动与传热效果；对板式换热器的板片波纹结构进行优化，提升流体湍流程度，降低流动阻力。

设备集群化与模块化设计适用于大型化工装置或多品种生产场景。将功能相近的换热设备整合为集群模块，如原料预热模块、产品冷却模块等，实现流股的集中换热与统一调控，提升设备利用率与换热效率。采用模块化设计便于设备的维护检修与升级改造，当生产工艺调整时，可通过更换模块实现换热系统的快速适配，减少对整体生产的影响<sup>[3]</sup>。

### 3.3 余热梯级利用

高温余热回收重点聚焦于温度高于 300℃ 的工艺流股，如反应釜出口物料、裂解气、高温烟气等，这类余热品位高，可通过“直接利用+能量转换”的方式实现梯级回收。优先将高温余热直接用于工艺加热，如原料预热、熔融、蒸馏等；当直接利用需求不足时，通过余热锅炉产生蒸汽，用于发电、驱动蒸汽轮机或作为工艺用汽；对于无法直接利用的高温余热，可通过导热油或熔盐蓄热系统储存，实现余热的跨时段利用，平衡生产过程中的热量供需波动。

中低温余热回收针对温度在 100-300℃ 的流股，如精馏塔底液、换热器出口热流等，这类余热是化工企业最丰富但回收利用不足的能源。可采用“直接换热+热泵升级”的方案，直接换热用于工艺伴热、采暖、热水供应等低品位需求；对于温度较低但余热量大的流股，通过热泵技术提升余热温度等级，满足更高品位的加热需求。

低温余热回收针对温度低于 100℃ 的流股，如冷却器出口水、塔顶冷凝水等，这类余热品位低，主要通过直接利用与能源转换实现回收。直接用于厂区采暖、浴室热水、设备伴热等；通过低温余热发电技术（如有机朗肯循环 ORC）将余热转化为电能，用于装置照明、小型设备驱动等；对于含有一定湿度的低温余热，可通过除湿转轮等技术实现余热与余湿的协同回收，提升回收价值。

### 3.4 智能调控系统

传感监测网络构建是智能调控的基础，通过在关键流股、换热设备、辅助系统上安装温度、压力、流量、液位等传感器，实时采集网络运行数据。采用无线传感网络与工业以太网结合的方式，实现数据的高效传输与集中管理，重点监测冷热流股的温度差、换热设备的传热效率、泵与风机的运行参数等关键指标，为调控决策提供精准数据支撑。

动态优化算法是智能调控的核心，基于实时监测数据与工艺需求，通过建立换热网络数学模型，实现运行参数的动态调整。采用遗传算法、粒子群优化算法等智能算法，针对不同生产工况优化冷热流股的匹配关系、流体流速、设备运行台数等参数，例如当生产负荷降低时，自动减少冗余换热设备的运行数量，调整泵的转速降低输送能耗；当原料温度波动时，实时调整换热流股的配比，确保余热回收效率与工艺稳定性。

自动控制系统实现调控指令的精准执行，通过 PLC（可编程逻辑控制器）与 DCS（集散控制系统）联动，将动态优化算法生成的调控指令转化为设备动作，如调节阀门开度控制流体流量、启动或停止换热设备、调整变频泵转速等。构建“监测-分析-决策-执行”的闭环调控系统，实现换热网络的无人值守与自主优化。

### 3.5 防结垢与维护优化

防结垢设计从源头抑制结垢，需结合流股物性选用适配技术。对易结晶、易沉积的流股，换热前通过过滤、除盐、添加阻垢剂等预处理减少结垢物质；选用表面涂层（聚四氟乙烯、

陶瓷涂层）或特殊结构（螺旋槽管、刮板式）的抗结垢换热器，降低结垢物质附着力；合理调控换热温度与流速，避免流股在传热表面形成过饱和状态，减少结晶结垢。定期维护与在线清洗体系保障设备长期稳定运行，需根据结垢情况与运行周期制定个性化方案。对易结垢设备，采用超声波、化学等在线清洗技术实现不停机清洗，避免生产中断与节能损失；建立设备维护档案，记录清洗时间、维护内容及传热效率变化，通过数据分析优化维护周期，杜绝过度维护或维护不足。人员培训与管理制度为节能方案长期实施提供保障。定期开展操作人员培训，提升其智能调控系统操作能力与节能意识，确保调控指令准确执行；建立节能考核制度，将余热回收率、能源消耗量等指标纳入考核并与薪酬激励挂钩，激发员工积极性；制定换热网络运行规程，明确设备操作、维护、故障处理流程，规范管理，避免人为操作不当导致节能效果下降。

## 4 结语

化工换热网络节能方案设计是实现化工企业节能降耗与低碳发展的核心路径，需以能量梯级利用为核心，遵循温度匹配、流程集成、经济合理等设计原则，通过流程优化、设备升级、余热回收、智能调控等多维度策略，构建高效、稳定、经济的节能体系。当前化工换热网络的节能潜力巨大，通过科学的方案设计与技术创新，可有效提升能源利用效率，降低企业生产成本与环境压力。未来，随着智能算法、高效换热技术的不断发展，化工换热网络节能设计将向精准化、智能化、集成化方向发展，为化工行业的绿色转型提供更有力的支撑。

## 参考文献：

- [1] 徐勤保,胡博.甲醇与苯烷基化生产装置换热网络设计优化[J].山西化工,2022(003):042.
- [2] 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.
- [3] 白松,张健,尚猛,等.轻烃回收装置的换热网络分析与优化[J].齐鲁石油化工,2024,52(3):200-207.