

# Optimization strategy of energy saving transformation of chemical equipment based on process simulation

Taiyuan Zhang

Jining Mingsheng New Material Co., Ltd., Jining, Shandong, 272100, China

## Abstract

This study investigates energy-saving optimization strategies for chemical equipment through process simulation, exploring the fundamental principles of process simulation technology, its applications in chemical engineering, and existing limitations. It analyzes energy efficiency evaluation methods, common energy-saving retrofitting technologies, and their practical outcomes. Through concrete case studies, the research examines three key approaches: single-unit energy-saving design, process simulation-based optimization, and multi-unit collaborative retrofitting strategies. Case studies include single-unit upgrades using shell-and-tube heat exchangers, parameter optimization combining modeling and genetic algorithms, and system-wide coordinated retrofitting. These findings provide robust support for balancing energy consumption with cost efficiency while maximizing overall system energy savings, thereby facilitating the low-carbon transition in the chemical industry.

## Keywords

process simulation; chemical equipment; energy saving transformation

# 基于过程模拟的化工设备节能改造优化策略

张太远

济宁明升新材料有限公司, 中国·山东 济宁 272100

## 摘要

本文围绕基于过程模拟的化工设备节能改造优化策略展开研究, 阐述了过程模拟技术的基本原理、在化工工程中的应用及局限性, 分析了化工设备能效评价方法、常见节能改造技术及应用效果。重点结合具体实例, 探讨了单设备节能改造方案设计、基于过程模拟的方案优化以及多设备协同节能改造优化策略, 包括以列管式换热器为例的单设备改造、利用模型与遗传算法的参数优化, 以及系统的协同改造等。为平衡能耗与成本、实现系统整体节能效益最大化提供有力支撑, 助力化工行业低碳转型。

## 关键词

过程模拟; 化工设备; 节能改造

## 1 引言

化工行业高能耗问题突出, 设备节能改造对降本减排至关重要, 过程模拟技术可为此提供精准支持, 但当前改造存在方案匹配度低等问题。本文围绕相关策略展开研究, 通过梳理过程模拟基础、分析设备能效与节能技术、探讨改造方案设计与模拟优化, 为提升改造科学性与系统性提供参考, 助力行业低碳发展。

## 2 过程模拟技术概述

### 2.1 过程模拟的基本原理

过程模拟是指用数学模型表达化工过程中物质运动、

能量传递和化学反应等行为, 从而对过程行为进行预测、分析和优化的过程, 最重要的是可以代替或者辅助实验, 节约研发和改造费用, 并且能够获得比真实情况更加准确的过程设计。常见的过程模拟软件有流程级模拟 (AspenPlus、ChemCAD)、内部流动传热模拟 (Fluent、COMSOL Multiphysics) 以及动态过程模拟 (HYSYS), 不同的工具具有不同的特点, 可以根据不同尺度的对象选取不同的软件。建立模拟模型需根据物料衡算、能量衡算、动量衡算及反应动力学理论确定所要建立的模型种类, 并基于模型输入端提供的设备结构参数、操作参数、介质物性参数等关键数据信息通过数学方程建立模型框架; 根据模型种类选择相应的求解方法, 包括数值求解方法和解析求解方法, 一般说来, 在化工过程模拟时多采用数值求解方法, 通过对模型不断迭代使其输出结果收敛至合理范围之内, 最终得到定量的过程描述。

【作者简介】张太远 (1973-), 男, 中国山东济宁人, 本科, 副高级工程师, 从事化工工艺节能技术与自动化研究。

## 2.2 过程模拟在化工工程中的应用

过程模拟在整个化工工程的设计、运行及优化中均起着非常重要的作用：设计阶段根据建好的全流程或者单设备模拟模型，在施工前可以预先虚拟验证各种不同的工艺路线、设备的选择与参数设定等是否合理，比如仿真某台给定条件下不同管径的换热器的传热效率，以最小能耗为目标来选择最优设计方案，避免出现设计不合理的情况而导致后期改造成本增加；运行阶段通过应用基于实时数据驱动的动态模拟模型来监测设备与系统的运行情况，预测关键参数变化趋势，一旦存在异常的工况，则发出预警，根据报警信息进行调整操作参数使装置正常稳定运行；优化阶段可以通过过程模拟对多变量的敏感性分析来识别影响系统能耗或产能的关键因素，并采用不同参数下过程的模拟，寻找到最优的操作区间或者最佳改造方案，做到节能降耗、提高生产率的目的；对一些复杂化工系统而言，可以通过过程模拟优化达到超越经验的传统方式优化所带来的局限性，寻找到更加精准的优化目标。

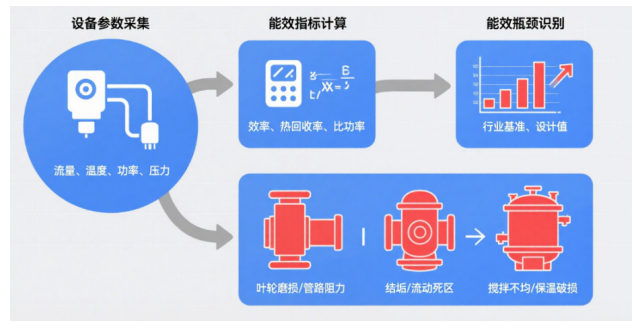
## 2.3 过程模拟的局限性与挑战

过程模拟技术在应用中面临着模型假设与现实复杂性的差距及模拟精度与计算效率难以平衡的局限性与挑战：一方面，为简化计算，模拟模型常基于理想化假设，如忽略设备微小结构缺陷、假设介质物性均匀或简化复杂反应机理等，但实际化工过程中存在诸多不确定性因素，如物料成分波动、设备老化导致的性能衰减、流场非理想分布等，这些假设与现实的偏差可能使模拟结果与实际存在误差，影响对设备真实运行状态的反映；另一方面，追求高模拟精度往往需要构建更精细的模型，这会显著增加计算量，导致模拟耗时延长，甚至难以在工程决策所需时间内完成求解，而若为提升计算效率简化模型，则可能牺牲精度，无法准确捕捉关键过程细节，尤其在涉及多设备协同的复杂系统模拟中<sup>[1]</sup>。

## 3 化工设备的节能改造技术

### 3.1 化工设备能效分析

化工设备的能效分析是节能改造的基础，其核心在于通过科学的评价指标与方法量化设备能耗水平，并精准识别能效瓶颈。设备能效评价指标需结合设备类型确定，例如泵类设备常用轴功率利用率、效率，换热器则以传热系数、热回收率为关键指标，压缩机可采用比功率衡量，这些指标能直观反映设备能量转换与利用的效率；评价方法包括基准对比法、能量平衡法及热力学分析法。在能效瓶颈识别方面，需结合设备运行数据与能量流分析，例如泵的能效瓶颈可能源于叶轮磨损导致的扬程下降、管路阻力过大引起的额外能耗，换热器的瓶颈多表现为结垢导致传热系数降低、折流板设计不合理造成的流动死区，反应釜则可能因搅拌不均匀使反应不完全、保温层破损导致散热损失增加等，通过定位这些瓶颈，可明确节能改造的重点方向。具体如图1所示。



(图1：化工设备能效分析流程图)

### 3.2 常见节能改造技术

常见的化工设备节能改造技术主要围绕能量的高效利用与回收展开，其中热回收与余热利用技术通过装设换热器、余热锅炉等设备，将工艺过程中产生的废热回收并用于预热原料、加热工艺介质或产生蒸汽供其他工序使用，减少对额外能源的依赖；高效压缩机与泵的应用则聚焦于提升动力设备的能量转换效率，例如采用变频调速技术使压缩机、泵的输出功率与实际负荷动态匹配，避免“大马拉小车”的能耗浪费，或选用新型叶轮、蜗壳设计的高效机型，降低机械损耗与水力损失；能源回收装置的优化设计针对设备运行中可回收的能量形式进行升级，如在离心式压缩机出口设置能量回收透平，利用高压介质的余压驱动透平发电或带动其他设备，或对蒸汽疏水阀、凝结水回收系统进行改造，减少蒸汽泄漏与闪蒸损失，提升能源循环利用率<sup>[2]</sup>。

### 3.3 节能技术的应用效果

节能技术的应用在提升化工设备效率、降低能耗方面成效显著，例如某化工厂通过在精馏塔系统中增设余热回收换热器，将塔顶蒸汽的冷凝热用于预热进料，使再沸器的蒸汽消耗降低约15%-20%，精馏系统整体能耗下降12%；某化肥厂将传统离心泵更换为变频调速泵后，根据生产负荷动态调节转速，单台泵的平均功率消耗减少25%-30%，年节电可达数万度。从经济性角度评估，节能改造虽需前期投入设备购置与安装成本，但通常可在1-3年内通过能耗费用节约实现投资回收，如某石化企业对压缩机系统进行能量回收透平改造，初期投资约80万元，改造后年回收电能折合经济效益约35万元，投资回收期不足2.5年；从环境效益来看，能耗降低直接减少了化石能源的消耗，进而降低了二氧化碳、二氧化硫等污染物的排放，以年节能量1000吨标准煤计算，可减少二氧化碳排放约2600吨，对推动化工行业低碳转型具有积极意义<sup>[3]</sup>。

## 4 化工设备节能改造方案设计与模拟优化

### 4.1 单设备节能改造方案设计

单设备节能改造方案设计需结合不同类型化工设备的能耗特性制定针对性策略：对于换热器，其能耗主要源于传热效率不足导致的能量浪费，可采用强化传热技术，如在管程或壳程加装螺旋纽带、折流杆等扰流元件，通过破坏边界

层流动增强湍流程度以提升传热系数,或选用石墨烯涂层、金属多孔材料等高效换热材料减少热阻,实施路径包括根据设备尺寸定制扰流元件规格、进行材料兼容性测试及安装后的传热性能标定;某精细化工企业列管式换热器回收 180℃ 反应釜尾气热量,运行 3 年后传热效率降 25%,症结为壳程结垢。改造方案:加装螺旋纽带扰流元件、换花瓣形折流板、用石墨烯涂层换热管。Fluent 模拟显示,壳程流速均匀性提升,传热系数升至 1100 W/(m<sup>2</sup>·K);实际运行热回收率提升。对于泵与压缩机,能耗多因输出功率与实际负荷不匹配或机械/水力损失过大,采用变频调速改造可通过传感器实时监测流量、压力等参数,由控制系统调节电机转速使输出功率动态适配负荷,降低空载损耗,而叶轮切削优化则通过精确计算切削量缩小叶轮直径,减少过剩扬程以降低轴功率,实施时需结合设备运行曲线确定最优切削量及变频范围,并进行改造后的工况验证;对于反应釜,主要能耗损失为热量通过器壁向环境的散热,优化保温结构可采用多层复合保温材料,并在保温层外增设金属防护壳减少空气对流散热,确保改造后热损失率降低至行业标准范围内<sup>[4]</sup>。

#### 4.2 基于过程模拟的方案优化

在基于过程模拟的方案优化中,需将单设备节能改造方案的具体参数,如换热器扰流元件的直径、长度及间距等尺寸参数与顺排或错排的布置方式,泵与压缩机变频器的频率调节范围,反应釜保温层的材料导热系数及厚度等,代入已构建的设备能耗模型;通过过程模拟工具运行模型,获取不同参数组合下改造方案的能耗表现数据。通过设备能耗模型,输入螺旋纽带直径、螺距、涂层材料导热系数等参数模拟发现:直径 5mm、螺距 200mm、导热系数 600 W/(m·K)时,传热效率提升;直径 6mm、螺距 150mm 时,传热效率提升更大,但投资增加且泵耗上升。经遗传算法以“年节能收益-改造投资”为目标优化,最终选定 5mm+200mm+600 W/(m·K)方案,较其他方案缩短 0.5-1.2 年,印证了模拟优化在平衡能耗与成本中的价值。在此基础上,采用遗传算法等多目标优化算法,将能耗数据与改造所需的设备购置、安装调试等成本数据作为算法输入,不断调整改造参数的取值范围,筛选出兼顾低能耗与合理成本的参数组合,最终确定在技术可

行性与经济合理性之间达到平衡的最优改造方案<sup>[5]</sup>。

#### 4.3 多设备协同节能改造优化

针对化工流程中设备间存在的紧密关联性,多设备协同节能改造优化需先构建包含设备特性、物料与能量传递关系的协同能耗模型,该模型需整合各设备的输入输出参数及相互作用规律;通过过程模拟工具运行此模型,可量化分析单设备改造对上下游设备能耗的连锁反应,避免因孤立改造导致系统整体能效不升反降的问题。以某煤化工园区“精馏塔-换热器-循环泵”系统为例,初始仅对精馏塔塔顶冷凝器做余热回收,但因未考虑循环泵与换热器匹配性,导致泵出口扬程富裕 20%,额外能耗抵消了 30% 的节能收益。通过 Aspen Plus 全流程协同模型整合参数模拟发现:将精馏塔回流比降至 3.0,换热器传热面积增 10%,泵转速降至 1200r/min,系统总能耗下降,设备负荷匹配度提高,印证了协同优化的必要性。在此基础上,通过模拟不同工况下设备间的匹配参数,识别制约系统能效的关键协同瓶颈,进而设计针对性的协同改造方案;对泵组进行负荷分配调整,根据系统总流量需求动态调控各泵的运行台数与转速,实现泵组总能耗最低。

### 5 结语

综上所述,本文系统分析了该技术的原理、应用及局限,探讨了单设备与多设备协同改造的模拟优化策略,形成完整技术路径。研究表明,结合过程模拟的改造可实现节能效益最大化,未来需进一步完善模型,提升复杂系统优化效率。

#### 参考文献

- [1] 房会伟.化工装置在“碳中和”目标下的节能技术应用[J].设备管理与维修,2024,(16):194-196.
- [2] 廖宇.化工设备升级与节能改造方法分析[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(12):33-35.
- [3] 李涛.化工设备升级改造和节能技术探讨[J].中国设备工程,2023,(03):216-218.
- [4] 李响.“碳中和”背景下化工设备节能改造技术研究进展[J].化工装备技术,2023,44(01):4-8.
- [5] 乔平.试论化工设备升级改造和节能技术[J].当代化工研究,2020,(17):148-149.