

化工工艺流程优化设计与应用研究

曾凡刚

1 合肥工业大学, 安徽 合肥 230000

2.安徽华功科技发展有限公司, 安徽 合肥 230000

[摘要]化工生产过程优化是以提高能源利用率, 降低成本, 实现绿色可持续发展的重要手段。本文综述了化工生产过程优化设计总体框架的基础上对流程模拟、能量整合及夹点技术为主要的生产过程优化方法进行研究, 在此基础上, 对过程强化、反应工程、分离过程以及设备操作等方面的优化方案进行了详细分析, 最后提出大数据、安全保障和全生命周期集成等支撑体系对生产过程优化的重要性。

[关键词]化工工艺流程; 优化设计; 流程模拟; 夹点技术

DOI: 10.64635/ja.2026.1064

中图分类号: TQ021

文献标识码: A

Research on Optimization Design and Application of Chemical Processes

Zeng Fangang

Hefei University of Technology, Hefei 230000, Anhui, China

Anhui Huagong Technology Development Co., Ltd., Hefei 230000, Anhui, China

Abstract: Process optimization in chemical production is an important means of improving energy efficiency, reducing costs, and promoting green and sustainable development. Based on a review of the overall framework for chemical process optimization design, this paper examines major optimization methods, including process simulation, energy integration, and pinch technology. It further analyzes optimization schemes in process intensification, reaction engineering, separation processes, and equipment operation. Finally, the importance of supporting systems such as big data, safety assurance, and full life-cycle integration in chemical process optimization is discussed.

Keywords: chemical process; optimization design; process simulation; pinch technology

引言

化工行业属于国家的支柱性行业, 化工产品的生产工艺能耗大、物耗高、污染重。面对全球自然资源匮乏、环境标准越来越严格和“两个碳”目标要求下, 传统的化工工艺设计及管理方式受到严重冲击。生产工艺的设计和改造已经从过去的只针对某一产品或是某项单元操作的最大产出量转变为集能效、环保、经济效益、安全性为一体的多项指标综合性工程了。据资料显示整个化工行业的能耗约占到我国整个工业总能耗的百分之二十以上, 经过系统化的流程优化改造后能够节省出 10%~30%左右的能耗。所以对化工过程的设计优化理论以及工程的应用研究是非常有必要有帮助的, 在今后的化工行业中起到一定的指导意义。

1 化工工艺流程优化设计的基本框架

化工工艺流程改进设计是一个复杂的过程, 在整个过

程中采用由整体到部分再到整体的循环改进的思想。该框架一般有三个重要的层面分别为: 目标层、模型层以及求解层。

目标层是优化的起点与终点。最早期的流程优化大多围绕着一个单纯经济效益指标即最简年度总支出、最大投资回报率等展开^[1], 而当前的优化设计理念注重的是多目标统一考虑, 把经济效益、效率以及环境等各方面因素比如 CO₂ 排放量、安全指数等等均包含在内作为优化的目标。例如, 对于乙烯裂解炉而言, 不仅要考虑产品的产率还要兼顾到炉管焦化速度以及裂解炉 NO_x 排放量作为重要的限制条件或是子目标。

模型层是最基本的设计优化依据, 在此要精准地表达工艺过程中所涉及的物料、能量、动量及化学反应间的内在联系。根据其建立的方式不同可以分为两大类: 一类是以严密的热力学以及动力学为基础的机理模型, 例如

Aspen Plus、HYSYS 流程模拟器里面的单元操作模型等；另外一类是以工业生产数据为基础建立起来的统计学模型，例如人工神经网络和支持向量机等等，用来解决过程机理比较复杂或者是很难被精确刻画的问题。模型的质量关系到优化的结果是否可信。

求解层主要包括各种优化方法的应用。根据不同的优化问题及模型种类选择相应的求解方法，对线性和非线性规划的问题一般使用序列二次规划（SQP）、内点法等传统的方法进行处理；而存在整数变量或者高度非线性的复杂问题时，就会采用遗传算法（GA）、粒子群算法（PSO）等智能搜索的方法。求解的过程始终围绕着一个闭环的“模拟-分析-优化-验证”，利用灵敏度分析、经济效益评估等方式得出最佳的工艺路线参数以及结构设计方案。

2 化工流程优化的主要方法

2.1 流程模拟与仿真技术

工艺仿真就是工艺流程最根本的基础。把具体的化工生产过程转化为一组数学关系式的集合，然后求解出工艺流程的结果；目前工艺仿真已经由原来的单纯的稳态仿真发展到了如今的稳态与动态仿真相融合的应用方式上。而稳态仿真主要是用于工艺方案设计、设备的选择以及工况优化等方面；通过对一些主要的操作变量进行变化，比如：反应温度、压力、回流比等等，通过仿真软件可以迅速地得出物料平衡式、能量平衡式以及设备大小的数据等为优化提供准确的起始值；比如在精馏塔的优化当中，利用其敏感性分析功能就可以很快地画出相应的理论塔板数与回流比之间的联系图，找出经济效益最好的那种操作条件。从表 1 看出了一个精馏塔在不同的回流比下的能耗以及塔板的变化情况，说明了稳态模拟对于平衡设备投资和运行费用的作用。

表 1 某精馏塔回流比对操作费用与设备投资的影响
(模拟数据)

回流比	回流比	回流比	回流比	回流比
(R)	(R)	(R)	(R)	(R)
再沸器热负荷(GJ/h)	再沸器热负荷(GJ/h)	再沸器热负荷(GJ/h)	再沸器热负荷(GJ/h)	再沸器热负荷(GJ/h)
理论塔板	理论塔板	理论塔板	理论塔板	理论塔板

动态模拟主要是用于系统开停车、扰动以及控制方法所引起的动态行为特点研究。针对反应精馏、聚合等具有较强动态特性的过程，动态仿真可以模拟出温度压力变化趋势并调整控制变量使操作更加安全平稳可靠^[2]。有资料显示，在一个 MMA 装置设计过程中加入动态模拟后

提前发现了由于热量积累造成的“飞温”的问题，并将开车时间提前了 30%。

2.2 能量集成与夹点技术

能量集成是化工过程节能降耗的重要途径，而夹点技术是最典型、最实用的能量集成方法之一。它的基本思路是通过对整个工艺流程中的冷热物料流进行分析求得总合成曲线并确定出能量消耗的主要障碍即“夹点”。夹点技术给换热网络设计提供三个重要的规则：（1）不允许有越过夹点的热传递；（2）夹点上方不能放置外置冷却器；（3）夹点下方不能放置外置加热器。遵守这三个准则，就能获得最优的过程热回收性能，最省的公用工程量。在工艺改进中，夹点技术和换热网络合成一样，也可以用来指导反应器、精馏塔等单元的操作条件控制。如通过对反应釜压强和进料温度的调节，使物料热流得到提升或者降低，更好的适应冷流体的要求，以达到更高的节能目标。图 1 是某化工过程总的综合曲线及夹点示意图，可以看到整个过程的能量利用障碍以及最大的热量回收空间在哪里。

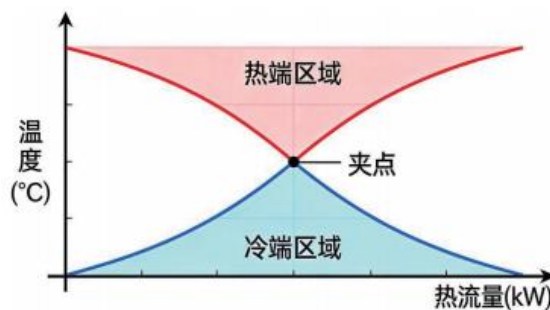


图 1 某化工过程总组合曲线与夹点示意图

众多工业案例证明了利用夹点技术改造换热系统，一般都可获得 20%~50%左右的节能效益，投资回收期一般为 1~3 年。如某炼油厂常减压单元能耗优化项目，在此基础上运用夹点技术重新设计其换热系统，使原油进料温度由原来的 250℃ 提高到 285℃，降低了加热炉的燃料消耗量，每年节约标准煤 1.2 万吨，减排 CO₂ 3 万多吨。

3 过程强化与设备优化

3.1 过程强化途径

过程强化的目标是利用新的装置、技术大幅度地减小装置尺度，增大能源效率以及降低废弃物量等。实现的过程主要包括设备强化与方法强化两种方式。装置强化就是用新型高效的设备取代原来的传统设备，比如用静态混合器代替传统的搅拌釜，可以加大混合强度，降低停留时间分布标准偏差，旋转填充床(RPB)作为一种超重力装置，

它的传质速率要比常规的塔类设备高出一个甚至几个数量级，可以大大减少装置体积。表二比较了传统的塔式设备和超重力旋转填充床之间二氧化碳捕集过程中的传质特性。

表 2 不同设备在 CO₂ 化学吸收过程中的传质性能对比

设备类型	设备类型	设备类型	设备类型
传质单元高	传质单元高	传质单元高	传质单元高
度(HTU, m)	度(HTU, m)	度(HTU, m)	度(HTU, m)

手段强化主要集中在调整工艺路线或者是操作形式上面。比如反应一萃取耦合(包括反应精馏,膜反应器等)把反应和提取环节相结合,打破化学平衡的约束,大大地提高了转化率和收率,酯化反应中应用了反应精馏技术,在反应过程中产生的水可以得到及时排出,可以使单程转化率达到了 99% 以上,而且能耗也降低了 30%~50%。

3.2 反应工程优化

反应工程改进作为工艺优化的重点,就是要达到在安全的基础上尽可能提高所要产品的产率以及选择性的目的。改进方向主要有反应器的选择、操作参数的选择、催化剂的设计以及选择等。操作条件的调整包括温度、压力、浓度以及停留时间等参数准确调控,在放热反应中热点温度的调整尤为重要,通过对催化剂填充形式的设计,采取分批加入或者设立冷剂等措施来调节温差,降低副产物的比例,在每年 30 万 t 乙苯脱氢生成苯乙烯生产装置上,通过控制反应起点温度与汽/烃比(由 1.2 优化到 1.0)使苯乙烯的选择率提升 1.2%,可为公司增加经济效益超过 2000 万元以上。反应器结构设计也是十分必要的内容^[3]。对于强放热反应比如费托合成、甲醇合成来说,使用浆态床反应器代替固定床反应器可以更有效的去除反应热量保证等温条件,延长催化剂使用寿命并控制产物分布。

3.3 分离过程优化

提取过程是化工装置能源消耗及投资额最大的部分,占化工总体能耗的 40~70%,所以提取过程的改进尤为重要。精馏是最重要的分离工艺。对其改进的方向主要有:(1)热集成精馏,例如使用热泵精馏、双塔或多塔精馏等;对于沸程相近的物系,热泵精馏的能量利用效率可高达传统精馏的 3~5 倍。(2)筛板塔,它是在精馏塔内部装设筛板的方式来进行三股或以上的分离,可以把两座塔的装置整合成一座塔来完成,节省设备费用的 30%~40%,减少消耗量 20%~40%。新分离方法的应用也带来了新的节能潜力,膜分离法用于气体分离(氢气回收、CO₂分离)时具有耗能低、无相变的特点,在一个合成氨

企业利用膜法回收驰放气中的氢气,可达 90%~95% 回收率,大大节约了原料气用量;而渗透汽化的应用适合于共沸体系或接近沸点体系的分离,与常规共沸精馏相比可以节省夹带剂量,不会产生产品质量受污染的问题,同时能耗可以下降 30% 以上。

3.4 设备设计与操作优化

机械设计 & 操作改进注重的是每一台机器都能可靠有效的工作,在这里就包含了流体动力学、传热学、材料学等多个学科的知识。对于换热器的设计改进,除了传统的管壳式之外,板式换热器、螺旋板式换热器由于其结构紧凑、传热效率高也逐渐受到重视。从使用角度来考虑,则可以在对换热器进行建模的基础上,同时利用在线检测的数据,进行自动在线清洗的选择,在线监测到换热器传热系数低于一定数值的时候就会自动的进行在线清洗的工作,使设备一直工作在高效率区间内,研究显示,对于容易结垢的体系,使用智能化在线清洗的方法以后,可以提高换热器一年总的传热系数达 15%,一年维修成本减少 25%。而流体输送装备的改良主要体现在变频调速、管路匹配上,在此,通过加装变频器以实现电机频率的变化来满足生产中不同的工况,可以大大的降低由于阀门开合程度造成的节流损耗。而在过程制造业中对负荷变化幅度大的离心泵实施变频化,则节电率可以达到 20~40% 左右。

4 化工流程优化的支持系统

4.1 数据驱动与智能优化

伴随着工业互联网以及大数据的发展,基于数据分析的智能化优化成为了对化工工艺进行优化的新思路。大量地安装传感器,不间断获取温度、压力、流速、组成的信息,同时融合机器学习、深度学习的方法建立起过程的虚拟仿真模型。模型的应用包括但不限于以下两方面:(1)重要的指标的软测控,针对一些无法在运行时直接监测的重要参数(例如产品质量的粘度、反应转化率)建立预测模型来对实时优化起到支撑作用;(2)操作条件的即时调控,用强化学习等手段根据市场行情、原料情况的变化,对生产过程的操作参数做相应的调节,以达到最大的利润收益。(3)故障预测、诊断,通过对历史数据库内数据中规律性的挖掘来发现出现异常工况的预兆信号从而超前报警,防止非计划停车。如在某大型聚烯烃装置中采用深度神经网络进行软测量建立熔融指数的预测模型误差(RMSE)由原来的 ±0.8 降至 ±0.3,支持了牌号切换过程中精细化的过程管控,降低了过渡料的产生等。

4.2 安全与环保约束下的优化

传统流程改造大多把安全、环保问题当作约束条件来对待,而今的理念把它们提升到与经济效益一样重要的地位来进行考虑。本质化安全设计是从生产工艺流程的设计开始就尽可能地采取措施来预防和减少事故的发生,比如改反应性蒸馏代替间歇硝化反应,及时将热量带出,有效地减少了事故发生概率。优化算法时,加入安全指标:道化学火灾爆炸指数,工艺危险指数作为优化的目标,通过对设备布置,储罐大小,中间存货量等等的优化使得全厂的风险降到最低点。环保方面则是在源头消减和过程控制上下功夫,在末端治理的同时注重工艺路线的选择以达到减少废物的目的。比如,在农药生产环节,改进溶剂的选择、路线的选择,研发出无溶剂或是少溶剂的技术来从根本上降低了VOCs排放量;对于环氧丙烷(PO)的生产,传统的氯醇法,生产1t的产品会排放出40~60t的废水,而经过优化后的过氧化氢直接氧化法(HPPO)工艺,废水量仅为原来的十分之一甚至更低,而且不存在废盐的副产物,这个工艺的设计涉及到反应以及分离两部分的内容。

4.3 全生命周期与系统集成

全生命周期(LCA)优化是以整个生命周期的角度进行考量,把评价对象由生产加工环节扩大到了产品的整个“从摇篮到坟墓”生命周期的过程即原料获取、生产、运输、使用及废弃处理等,这样的整体优化可以有效防止环境影响的发生转移问题,比如说在新的催化剂开发中,如果只注重反应活化性能的话,则可能使用稀有的贵金属造成大量资源浪费并且开采带来的环境污染严重,而LCA优化则会结合催化剂合成、反应过程以及最后回收处置的环境代价来选取最优的方式。系统集成是对上述两种层面的进一步提升,即厂间以及区域内的能源综合利用。如,在化工园区内可建立“一体化公用工程岛”,把各企业间的蒸汽、电、冷凝水等管网连接起来进行能量梯级利用,A厂的低品位余热可做为B厂加热线,C厂富余的氢气

可用于D厂生产原料等等,这样的系统级的优化,能极大的提高园区整体能源利用率。

5 结束语

化工工艺流程优化设计是一项跨学科、跨层次、跨维度的复杂系统任务。本文全面总结了从基础框架到核心技术再到先进支撑体系的知识框架结构。化工生产过程正由单体设备、单步操作条件向整个工艺链路、全产业链甚至整个园区层面进行整合,而基于大数据以及AI的数据导向式优化正在同基于原理模型的方法相结合,形成了具有机理指导与数据分析双重优势的新一代混合智慧优化方案,对流程制造业数字化转型提供了强有力的支撑。在实现绿色低碳目标的大背景下,成本、能耗、碳强度、健康、生态压力等多重目标综合权衡将构成下一步的设计准则。未来,伴随着计算能力增强、高精度传感器的研发及AI算法的进步,化工生产工艺过程也将向更高精度、更高效、更鲁棒发展。开发综合考虑经济、环境、社会等各方面因素的综合评价体系和优化手段是实现化工行业绿色可持续发展的核心基础。

[参考文献]

- [1]姚益挺.化工工艺流程设计与优化方法研究[J].四川化工,2025,28(03):40-43.
 - [2]高海明,李品,徐红新.复杂化工工艺流程的模拟与优化方法探讨[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(13):112-114.
 - [3]王浩,沙帅,胡泽华.化工工艺流程安全设计与优化[J].化工管理,2024,(19):143-145.
 - [4]崔玉红.化工工艺流程模拟与优化方法研究[J].化纤与纺织技术,2024,53(09):63-65.
- 作者简介:曾凡刚(1983.12—),男,毕业院校:安徽大学本科,所学专业:化学专业,当前就职单位:安徽华功科技发展有限公司,职务:项目经理,21年,职称:工程师。