

文章编号:1673-5005(2019)01-0162-07

doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2019.01.020

原油蒸馏装置及其换热网络的协同优化

黄小侨^{1,2}, 张宛丽¹, 单越², 李如春¹, 李军¹, 宋丽娟³

(1. 中国石油大学(华东)化学工程学院, 山东青岛 266580; 2. 中国石油燃料油有限责任公司, 北京 100102;
3. 辽宁石油化工大学化学化工与环境学部, 辽宁抚顺 113001)

摘要:利用流程模拟软件 aspen plus 建立原油蒸馏装置和耦合换热网络的稳态模型,以经济利润最大和系统热负荷最小为目标,利用多目标遗传优化算法对常减压系统进行优化研究,并获得相应的帕内托(Pareto)最优解集,在权衡经济利润和系统热负荷目标后选择最优操作工况,利用 aspen 能量分析器(AEA)对优化前后常减压系统的换热网络进行夹点分析。结果表明:与初始工况相比,最优工况的经济利润增长了 6.12%,热负荷下降了 3.57%,蒸馏产品产量增加了 2.82%,冷热公用工程消耗量分别下降了 20.35% 和 21.13%,该协同优化方法能有效优化常减压系统。

关键词:原油蒸馏装置; 换热网络; 协同优化; 流程模拟; 遗传算法

中图分类号:TE 08 **文献标志码:**A

引用格式:黄小侨,张宛丽,单越,等. 原油蒸馏装置及其换热网络的协同优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2019,43(1):162-168.

HUANG Xiaoqiao, ZHANG Wanli, SHAN Yue, et al. Collaborative optimization of a crude oil distillation system and coupled heat exchanger network[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2019, 43(1): 162-168.

Collaborative optimization of a crude oil distillation system and coupled heat exchanger network

HUANG Xiaoqiao^{1,2}, ZHANG Wanli¹, SHAN Yue², LI Ruchun¹, LI Jun¹, SONG Lijuan³

(1. School of Chemical Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. PetroChina Fuel Oil Company Limited, Beijing 100102, China;
3. College of Chemistry, Chemical Engineering and Environmental Engineering, Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China)

Abstract: The steady simulation model of crude oil distillation unit and its coupled heat exchange network was established using the process simulation software aspen plus. With the goal of maximizing the economic profit and minimizing the system heat duty, the multi-objective genetic optimization algorithm was used to optimize the atmospheric and vacuum system. The corresponding Pareto optimal solution set was obtained. And the optimal operating conditions was selected from the Pareto optimal solution set after making a trade-off between economic benefit and the system heat duty. The aspen energy analyzer (AEA) was used to analyze the pinch point of the heat exchange network of the atmospheric and vacuum system before and after optimization. The results show that, compared with the initial working condition the economic profit of the optimal working condition is increased by 6.12%, the heat load is decreased by 3.57%, the output of distilled products increased by 2.82%, and the consumption of hot and cold public utilities decreased by 20.35% and 21.13%, respectively. It is concluded that the collaborative optimization method can effectively optimize the atmospheric and vacuum system.

Keywords: crude oil distillation unit; heat exchanger network; collaborative optimization; process simulation; genetic algorithm

收稿日期:2018-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(21276279);山东省优秀中青年科学家科研奖励基金项目(BS2014NJ010)

作者简介:黄小侨(1984-),男,博士研究生,研究方向为化工过程模拟与优化。E-mail:115666817@qq.com。

蒸馏过程的能耗约占炼油装置能耗的 35% ~ 45%^[1], 换热网络是化工过程中最主要的能量回收场所, 其设计、运行的优劣直接影响全厂能耗。原油蒸馏装置与其耦合的换热网络是两个联系最为紧密的系统, 因此原油蒸馏装置与其耦合换热网络之间的协同优化显得非常必要。常减压系统和换热网络设计和改造几乎是独立进行的, 在设计问题或评级问题中^[2], 操作优化引起了关注。化工过程优化问题是一个多目标优化问题^[3-4]。Liu 等^[5]提出了一种数学规划方法(即混合遗传算法)以获得原油蒸馏装置的最佳换热网络改造方案, 然而优化策略没有涉及蒸馏系统和换热网络之间的相互作用。Luo 等^[6]采用 aspen plus 软件中的简捷模型模拟原油蒸馏装置, 并以最小能量消耗和最大产品产量为目标函数采用随机算法优化该蒸馏系统, 尽管采用简捷模块^[6], 但优化结果合理且准确。Miranda 等^[7]提出了一个模型来优化多期运行的换热网络, 换热网络设计采用了 Yee 和 Grossmann^[8]提出的多步计算方法, 目标函数是最小年度总成本(TAC)。在 Miranda^[7]等的工作中, 换热网络设计方法采用分时程序, 不引入等温混合假设, 提高了模型的准确性。人工神经网络(ANN)算法^[9]和遗传算法(GA)^[10-11]等在处理非线性优化问题(优化目标和约束通常构成混合整数的非线性规划问题)时起到了重要作用。Lazzaretto 等^[12-15]提出的概率性方法也得到了很好的发展和应用, 为了降低高度非线性严格模型和相变计算的复杂性, 计算过程中采用了相应的简单替代模型。Hohmann^[16]提出的夹点分析方法广泛应用于能量回收系统。Linnhoff 等^[17-18]对夹点理论的发展做了大量工作。Quirante 等^[19]利用夹点定位方法提出了一种同时进行优化和热集成的新型分离模

型。Hafizan 等^[20]提出了一种基于夹点分析的方法以研究最佳换热网络设计的固有安全性和可操作性。夹点分析可以用于探究换热网络的节能潜力。与单独的换热网络优化相比, 蒸馏系统及其换热网络系统的协同优化会得到更好的结果^[21]。笔者对原油蒸馏装置及其换热网络进行协同优化研究, 基于前人的设计优化研究^[22-25], 建立常减压装置和耦合换热网络的稳态模型; 以经济利润和系统热负荷为优化目标, 提出原油蒸馏装置及其换热网络的多目标协同优化模型; 通过优化原油蒸馏装置及其耦合换热网络, 确定最佳工艺操作参数; 采用夹点分析方法对优化前后的常减压装置换热网络进行对比分析。

1 常减压系统模型建立

以某炼油厂 436×10^4 t/a 的常减压系统为研究对象, 原油蒸馏装置由初馏塔、常压塔和减压塔组成, 其中的初馏塔有 14 块理论板, 塔底采用蒸汽汽提, 塔顶采用分凝器, 无侧线采出; 常压塔有 48 块理论板, 塔底采用蒸汽汽提, 塔顶采用分凝器, 3 个侧线采出; 减压塔有 17 块理论板, 塔顶采用冷凝器, 4 个侧线采出。换热网络包含换热器和加热冷却器共 34 个以及混合和分流器共 11 个。原油蒸馏装置稳态模型图与简并后的换热网络稳态模型见图 1 和图 2。利用 aspen plus 流程模拟软件模拟原油蒸馏装置与耦合的换热网络的实际工况。原油蒸馏装置稳态模型中塔模型均选用 PetroFrac 模型, 换热网络稳态模型中的换热器模型采用 Heater 或 HeatX 模型。物性方法选用 BK10^[26]。

常减压系统进料为沙特阿拉伯轻质原油, API 重度为 31.11。原油的实沸点数据见表 1。

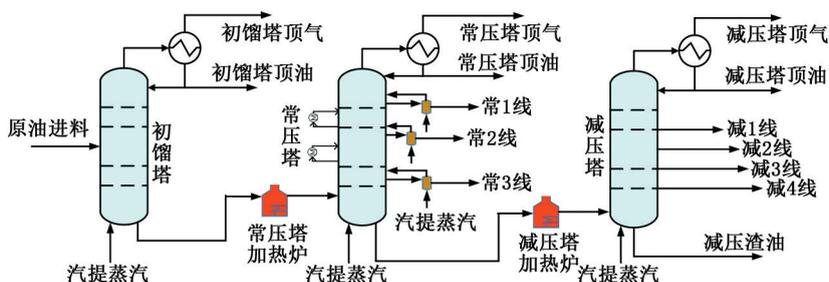


图1 原油蒸馏装置流程

Fig. 1 Process flow diagram of rude oil distillation system

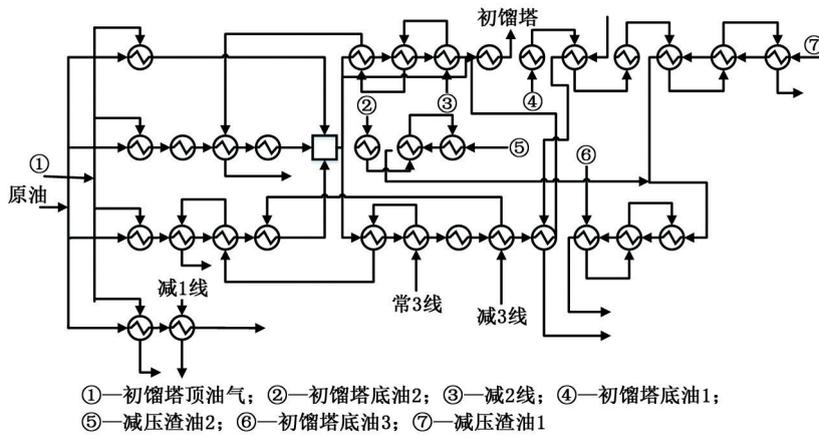


图2 换热网络

Fig. 2 Diagram of heat exchanger network

表1 原油实沸点蒸馏数据

Table 1 True boiling point data of crude oil

实沸点 / °C	液体体积 分率/%	实沸点 / °C	液体体积 分率/%
HRK ~ 15	0.29	260 ~ 280	3.76
15 ~ 60	1.63	280 ~ 300	3.62
60 ~ 80	1.92	300 ~ 320	3.66
80 ~ 100	2.58	320 ~ 350	4.98
100 ~ 120	2.52	350 ~ 380	2.43
120 ~ 140	3.45	380 ~ 400	2.26
140 ~ 160	3.55	400 ~ 420	3.43
160 ~ 180	3.83	420 ~ 440	3.74
180 ~ 200	3.52	440 ~ 460	3.61
200 ~ 220	4.06	460 ~ 480	3.93
220 ~ 240	3.81	480 ~ 500	3.20
240 ~ 260	3.74	500 ~ 530	4.24

局优化,排除模拟不能收敛的工况,得到相应的 Pareto 最优解集。选择热负荷最小和经济利润最大作为优化目标。为保证产品规格,选择石脑油与柴油产品的 ASTM D86(质量分数为 95%,温度为 138 和 214.5 °C)、常压塔的侧线采出流量作为约束条件。通过分析常减压系统确定原油换热终温($T_{1,b}$)、初馏塔底油换热后温度($T_{2,b}$)、常压炉出口温度($T_{Atm-furnace}$)、减压炉出口温度($T_{Vac-furnace}$)和初馏塔塔底、常压塔塔底以及常压塔侧线 3 汽提塔的汽提蒸汽流量(分别为 F_{steam1} 、 F_{steam2} 和 F_{steam3})为决策变量。决策变量的取值见表 2。

常减压系统的热负荷和经济利润模型如下:

$$Q = CP_{oil}(T_{1,b} - T_a) + CP_{bottom}(T_{2,b} - T_{bottom}) + Q_{Furnace}, \quad (1)$$

$$B = \sum_i P_i F_i - C_c R_c - M_Q Q_Q - M_C Q_C - \sum_g Z_g S_g. \quad (2)$$

式中, Q 为热负荷, $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$; CP_{oil} 和 CP_{bottom} 分别为原油和初馏塔底油的热容流率, $\text{kJ} \cdot \text{°C}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$; $T_{1,b}$ 和 T_a 分别为原油换热终温和原油进装置温度, °C ; T_{bottom} 和 $T_{2,b}$ 分别为初馏塔底油换热前后温度, °C ; $Q_{Furnace}$ 为加热炉热负荷, $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$; B 为经济利润, $\text{元} \cdot \text{h}^{-1}$; P_i 为 i 产品的价格, $\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$; F_i 为 i 产品的流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; C_c 为原油价格, $\text{元} \cdot \text{m}^{-3}$; R_c 为原油流量, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$; M_Q 和 M_C 分别为燃料和冷却水价格, $\text{元} \cdot \text{kJ}^{-1}$; Q_Q 和 Q_C 分别为燃料和冷却水负荷, $\text{kJ} \cdot \text{h}^{-1}$; Z_g 为汽提蒸汽 g 的价格, $\text{元} \cdot \text{kg}^{-1}$; S_g 为汽提蒸汽 g 的流量, $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$; g 表示初馏塔塔底、常压塔塔底以及常压塔侧线 3 汽提塔的汽提蒸汽。

原料与产品馏分价格参考 Mittal 等^[27]的数据。计算经济利润参考的沙轻原油、石脑油、煤油、柴油、重柴油、减压蜡油和减压渣油价格分别为 3 402.56、3 894.19、3 933.77、3 896.97、3 797.67、3 485.88 和

2 多目标协同优化

2.1 优化模型

采用多目标优化方法对常减压系统的原油蒸馏装置与耦合的换热网络进行协同优化,模型见图 3。利用 aspen plus 建立常减压系统模型,利用 Matlab 编写 NSGA-II 算法程序。通过 COM 以及 ActiveX 技术开发的接口工具实现软件信息交互功能,采用 Matlab 调用遗传算法 NSGA-II 运行 aspen plus 完成常减压系统的多目标协同优化。

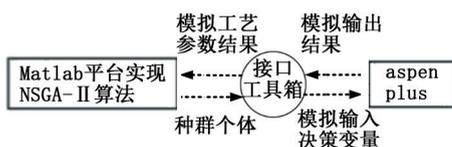


图3 协同优化模型

Fig. 3 Diagram of collaborative optimization model

2.2 优化策略

采用多目标遗传算法(NSGA-II)对常减压系统进行协同优化研究。该算法不仅能处理带有约束的多目标优化问题,并且能基于任何模拟初值进行全

2013.76 元 · m⁻³。

表 2 决策变量的类型和可行域

Table 2 Type and feasible region of decision variable

决策变量	原油换热 终温/°C	初馏塔底油换热 后温度/°C	常压炉出口 温度/°C	减压炉出口 温度/°C	初馏塔塔底汽提 蒸汽量/(kg · h ⁻¹)	常压塔塔底汽提 蒸汽量/(kg · h ⁻¹)	常压塔侧线 3 汽提 蒸汽量/(kg · h ⁻¹)
初始	182	283.5	360	370	3 000	20	400
可行域	[163,189]	[255,300]	[347,366]	[365,400]	[2 000,4 000]	[10,30]	[100,700]

2.3 优化过程

遗传算法优化程序见图 4。其中算法采用的选

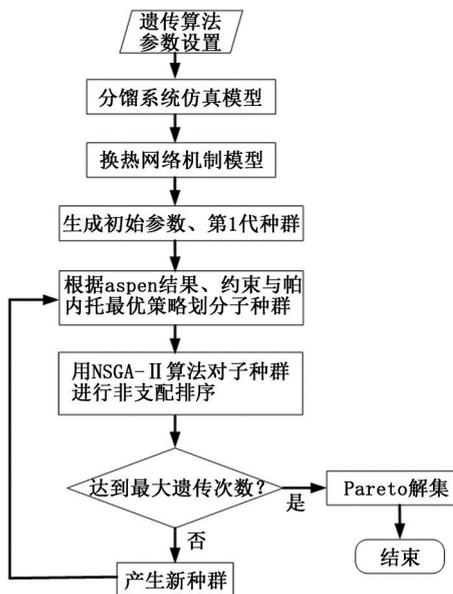


图 4 遗传算法优化步骤图

Fig. 4 Optimization procedure of genetic algorithm

择、交叉和变异算子分别为二元锦标赛选择、中间交叉和高斯变异;设置遗传算法参数,种群大小设为 100 个,最大遗传代数设为 100,交叉概率和变异概率分别为 0.8 和 0.5;利用 aspen plus 建立常减压系统模型;利用 NSGA-II 随机产生初始种群,根据 aspen plus 模拟结果对初始种群的个体进行目标函数与约束条件评价,利用约束条件和 Pareto 最优策略对种群个体进行排序并将种群分为数个子种群;利用遗传算法操作算子对种群进行选择、交叉以及变异操作以产生新一代种群;根据 aspen plus 模拟结果对新一代种群个体进行目标函数与约束条件评价;重复上述过程,直到遗传优化代数达到设定的最大遗传代数。

2.4 优化结果

不同遗传代数优化得到的解集见图 5。由图 5 看出,运行 5 代后只得到了随意分布的解集。随着遗传代数的增加,解集逐渐趋于集中且接近近似的 Pareto 最优解集。当遗传代数达到 100 代时,优化算法终止。第 100 代的优化结果得到了较好的 Pareto 最优解集。

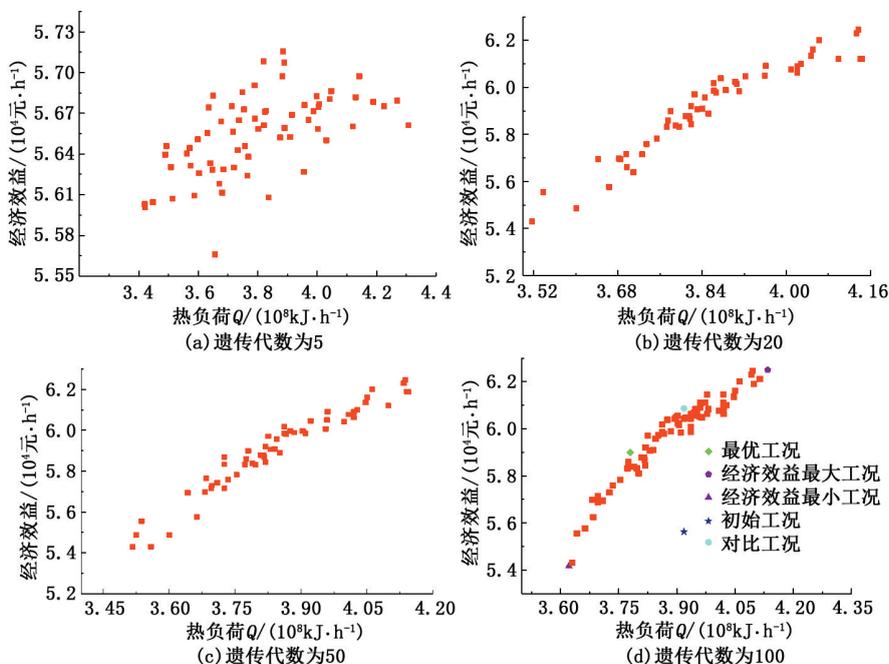


图 5 优化的 Pareto 解集

Fig. 5 Optimal Pareto solutions

3 结果分析

3.1 遗传算法优化结果分析

图5(d)为最终的优化解集,优化工况的经济效益比原始工况的经济效益高,且热负荷小。这表明多目标协同优化方法可实现降低能耗与提高效益的目的。图中初始工况的热负荷为 $3.92 \times 10^8 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$,经济利润为 $5.56 \times 10^4 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}$ 。图5中绿色菱形代表在权衡经济利润与热负荷目标后所选择的最优工况,最优工况与初始工况对比见表3。可以看出,在不改变原油换热终温的前提下,优化后的常减压系统的经济利润提高了6.12%,热负荷下降了3.57%。优化前后的馏分产量对比见表4。可以看

出,石脑油和减压蜡油产品流率与初始工况相比分别增加了2.97%和5.06%,其余产品流率没有改变,总产品流率则增加了2.82%,减压渣油流率减少了7.25%。图中的三角形代表经济利润最小所对应的工况,此工况对应的热负荷最小。与初始工况相比,其经济利润减少了2.52%,热负荷减少了7.65%。图5中,经济利润最大时所对应工况的热负荷最大,与初始工况相比,其经济利润增长了12.4%,热负荷却增大了5.36%。经济效益最小和最大时所对应的工况对比见表5。图5中圆形代表与初始工况热负荷相同的对比工况,此工况对应的经济利润为 $6.09 \times 10^4 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}$,比初始工况提高了9.53%。

表3 优化结果

Table 3 Optimization results

项目	决策变量							目标函数	
	原油换热终温/ ℃	初馏塔底部 油换热后 温度/℃	常压炉出 口温度/ ℃	减压炉出 口温度/ ℃	初馏塔塔底 汽提蒸汽量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	常压塔塔底 汽提蒸汽量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	常压塔侧线3 汽提蒸汽量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	热负荷/ ($10^8 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$)	经济效益/ ($10^4 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}$)
优化前	182	283.5	360.0	370.0	3 000	20.0	400	3.92	5.56
优化后	182	292.4	354.4	372.6	3 898	16.5	568	3.78	5.90

表4 优化产品流率

Table 4 Flow rates of optimization production

项目	进料油		蒸馏产品油				未分馏油品
	轻沙原油/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	石脑油/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	煤油/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	柴油/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	重柴油/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	减压蜡油/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	减压渣油/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)
优化前	520 074	72 755	21 000	69 724	53 005	176 705	123 281
优化后	520 074	74 913	21 000	69 724	53 005	185 644	114 342

表5 经济利润极值对比

Table 5 Comparison of extremum of economic profit

项目	决策变量							目标函数	
	原油换热终温/ ℃	初馏塔底部 油换热后 温度/℃	常压炉出 口温度/ ℃	减压炉出 口温度/ ℃	初馏塔塔底 汽提蒸汽量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	常压塔塔底 汽提蒸汽量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	常压塔侧线3 汽提蒸汽量/ ($\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$)	热负荷/ ($10^8 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$)	经济效益/ ($10^4 \text{ 元} \cdot \text{h}^{-1}$)
极小值	164.00	289.99	355.06	365.00	2 000.21	22.9	300.00	3.62	5.42
极大值	184.32	266.21	361.28	380.89	2 255.60	21.4	454.12	4.13	6.25

从图5(d)中也可以看出,随着热负荷增大,经济利润也增加。这是因为产品增产带来的收益高于热负荷增加带来的成本。

3.2 夹点分析

夹点分析可以用来评价换热网络的热量回收能力^[28-29]。针对优化前后的工况,利用AEA对常减压系统的换热网络进行夹点分析。将夹点温度设定为19.5℃,然后对常减压系统优化前后的换热网络进行夹点分析,相应的分析结果见表6。在优化后的换热网络中,热/冷公用工程分别在夹点的上方/下方引入,而且不存在跨夹点的传热。因

此优化的换热网络符合夹点设计原则。相比优化前换热网络所需的热公用工程用量和冷公用工程用量,优化后换热网络所需的热公用工程用量和冷公用工程用量(分别为 3.06×10^8 和 $3.60 \times 10^8 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$)分别降低了21.13%与20.35%。相比优化前换热网络的冷热夹点温度(分别为86.1和105.6℃),优化后换热网络的冷热夹点温度均降低。这是由优化后的产品流率发生变化而导致的。综上所述,常减压系统原始工况的冷热夹点温度得到了优化以降低公用工程量,因此提出的协同优化方法是可行的。

表6 夹点分析结果

Table 6 Results of pinch analysis

项目	热物流夹 点温度/ ℃	冷物流夹 点温度/ ℃	夹点温 度差/ ℃	热公用工程 消耗量/ (10 ⁸ kJ·h ⁻¹)	冷公用工程 消耗量/ (10 ⁸ kJ·h ⁻¹)
优化前	105.6	86.1	19.5	3.88	4.52
优化后	103.1	83.6	19.5	3.06	3.60

4 结束语

基于 aspen plus、Matlab 和 NSGA-II 的集成优势,提出一种原油蒸馏装置与耦合换热网络协同优化方法,完成了原油蒸馏装置与换热网络的多变量多目标协同优化。常减压系统的热负荷和经济效益正相关,随着热负荷增加,经济效益增大。在保持原油换热终温不变的前提下,与初始工况相比,优化后的常减压系统的经济利润提高 6.12%,热负荷降低 3.57%,产品产量增加 2.82%,冷热公用工程消耗量分别下降 20.35% 和 21.13%。该方法优化了常减压蒸馏装置,提高了产品产量,增加了经济效益,也优化了耦合的换热网络,减少了换热网络的冷热公用工程用量,因此是一种可行的常减压系统优化方法。

参考文献:

- [1] SZKLO A, SCHAEFFER R. Fuel specification, energy consumption and CO₂ emission in oil refineries[J]. Energy, 2007,32(7):1075-1092.
- [2] LUYBEN W L. Distillation design and control using aspen simulation[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2013.
- [3] ZHANG J, ZHU X X. Simultaneous optimization approach for heat exchanger network retrofit with process changes[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000,39(12):4963-4973.
- [4] 黄小侨,李娜,李军,等. 基于遗传算法的常减压装置多目标优化[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2016,40(2):163-168.
HUANG Xiaoqiao, LI Na, LI Jun, et al. Multi-objective optimization of crude and vacuum distillation system based on genetic algorithm[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2016,40(2):163-168.
- [5] LIU X W, LUO X, KABELAC S. Optimal retrofit strategy of heat exchanger networks applied in crude oil distillation units[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016,55(43):11283-11290.
- [6] LUO Y, WANG L, WANG H, et al. Simultaneous opti-

mization of heat-integrated crude oil distillation systems [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2015,23(9):1518-1522.

- [7] MIRANDA C B, COSTA C B B, CABALLERO J A, et al. Heat exchanger network optimization for multiple period operations [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016,55(39):10301-10315.
- [8] YEE T F, GROSSMANN I E. Simultaneous optimization models for heat integration (II): heat exchanger network synthesis [J]. Computers & Chemical Engineering, 1990,14(10):1165-1184.
- [9] PAKDAMAN M, AHMADIAN A, EFFATI S, et al. Solving differential equations of fractional order using an optimization technique based on training artificial neural network [J]. Applied Mathematics and Computation, 2017,293(2):81-95.
- [10] RAHIMI M, BEIGZADEH R, PARVIZI M, et al. GM-DH-type neural network modeling and genetic algorithm-based multi-objective optimization of thermal and friction characteristics in heat exchanger tubes with wire-rod bundles[J]. Heat and Mass Transfer, 2016, 52(8):1585-1593.
- [11] 王克峰,尹洪超,袁一. 遗传算法最优同步综合换热网络[J]. 大连理工大学学报,1997,37(1):54-58.
WANG Kefeng, YIN Hongchao, YUAN Yi. Genetic-algorithm-based optimization for simultaneous synthesis of heat exchanger network[J]. Journal of Dalian University of Technology, 1997,37(1):54-58.
- [12] LAZZARETTO A, TOFFOLO A. Energy, economy and environment as objectives in multi-criterion optimization of thermal systems design[J]. Energy, 2004,29(8):1139-1157.
- [13] GASSNER M, MARÉCHAL F. Methodology for the optimal thermo-economic, multi-objective design of thermochemical fuel production from biomass[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009,33(3):769-781.
- [14] FAZLOLLAHI S, MARÉCHAL F. Multi-objective, multi-period optimization of biomass conversion technologies using evolutionary algorithms and mixed integer linear programming (MILP)[J]. Applied Thermal Engineering, 2013,50(2):1504-1513.
- [15] PSALTIS A, SINOQUET D, PAGOT A. Systematic optimization methodology for heat exchanger network and simultaneous process design[J]. Computers & Chemical Engineering, 2016,95(12):146-160
- [16] HOHMANN E C. Optimum networks for heat exchanger [D]. Los Angeles: University of Southern California, 1971.

- [17] LINNHOFF B. Thermodynamic analysis in the design of process networks [D]. Leeds; University of Leeds, 1979.
- [18] LINNHOFF B, HINDMARSH E. The pinch design method for heat exchanger networks[J]. Chemical Engineering Science, 1983,38(5):745-763.
- [19] QUIRANTE N, CABALLERO J A, GROSSMANN I E. A novel disjunctive model for the simultaneous optimization and heat integration [J]. Computers & Chemical Engineering, 2017,96(1):149-168.
- [20] HAFIZAN A M, ALWI S R W, MANAN Z A, et al. Optimal heat exchanger network synthesis with operability and safety considerations[J]. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016,18(8):2381-2400.
- [21] OCHOA-ESTOPIER L M, JOBSON M, SMITH R. The use of reduced models for design and optimisation of heat-integrated crude oil distillation systems[J]. Energy, 2014,75:5-13.
- [22] INAMDAR S V, GUPTA S K, SARAF D N. Multi-objective optimization of an industrial crude distillation unit using the elitist non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2004,82(5):611-623.
- [23] YAO H, CHU J. Operational optimization of a simulated atmospheric distillation column using support vector regression models and information analysis[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2012,90(12):2247-2261.
- [24] OCHOA-ESTOPIER L M, JOBSON M, SMITH R. Retrofit of heat exchanger networks for optimising crude oil distillation operation[J]. Chemical Engineering Transactions, 2013,35(1):133-138.
- [25] LÓPEZ C D C, HOYOS L J, MAHECHA C A, et al. Optimization model of crude oil distillation units for optimal crude oil blending and operating conditions[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2013, 52(36):12993-13005.
- [26] KHALILIPOUR M M, SADEGHI J, SHAHRAKI F, et al. Nonsquare multivariable non-minimal state space-proportional integral plus (NMSS-PIP) control for atmospheric crude oil distillation column [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2016,113(9):140-150.
- [27] MITTAL V, ZHANG J, YANG X, et al. E3 analysis for crude and vacuum distillation system[J]. Chemical Engineering & Technology, 2011,34(11):1854-1863.
- [28] GADALLA M A, ABDELAZIZ O Y, ASHOUR F H. Conceptual insights to debottleneck the Network Pinch in heat-integrated crude oil distillation systems without topology modifications[J]. Energy Conversion and Management, 2016,126(20):329-341.
- [29] LI B H, CHANG C T. Retrofitting heat exchanger networks based on simple pinch analysis[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2010,49(8):3967-3971.

(编辑 刘为清)