

基于遗传算法的常减压装置多目标优化

黄小侨¹, 李娜¹, 李军¹, 宋丽娟², 张玉贞¹, 段永生³

(1. 中国石油大学重质油国家重点实验室, 山东青岛 266580; 2. 辽宁石油化工大学, 辽宁抚顺 113001;
3. 中石油燃料油有限责任公司研究院, 山东青岛 266500)

摘要: 利用流程模拟软件 Aspen Plus 建立常减压装置稳态模型, 以经济效益和 CO₂ 排放量为目标, 提出基于遗传算法 NSGA-II 的优化方法, 利用该方法求解常减压装置多目标优化问题, 从而得到一组最优混炼比和操作条件的 Pareto 解集。结果表明, 在保证产品规格的前提下, 经济效益和 CO₂ 排放量呈正比; 增大轻油比例可以提高经济效益, 但也必然会导致 CO₂ 排放量的增大。

关键词: 常减压; Aspen Plus 软件; 多目标优化; Pareto 解集; 混炼比

中图分类号: TP 277 **文献标志码:** A

引用格式: 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.

Multi-objective optimization of crude and vacuum distillation system based on genetic algorithm

HUANG Xiaoqiao¹, LI Na¹, LI Jun¹, SONG Lijuan², ZHANG Yuzhen¹, DUAN Yongsheng³

(1. State Key Laboratory of Heavy Oil Processing in China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;
2. Liaoning Shihua University, Fushun 113001, China;
3. PetroChina Fuel Oil Company limited Research Institute, Qingdao 266500, China)

Abstract: A steady state model was developed to simulate an industrial crude distillation unit by using a process simulator Aspen Plus. On the basis of the genetic algorithm NSGA-II, the optimization approach was proposed in terms of economic benefit and CO₂ emission, through which the multi-objective optimization problem of the crude unit was solved. And the Pareto-optimal solutions of the optimal blending ratio and operational parameters were obtained. The results show that the economic benefit is proportional to the growing of CO₂ emissions on the premise of keeping the product specification on the base of distribution of Pareto front. Therefore, increasing the proportion of light oil can improve economic profit and lead to increased CO₂ emissions inevitably.

Keywords: crude distillation unit; Aspen Plus software; multi-objective optimization; Pareto front; crude oil blending ratio

通过原油混炼可以增加常减压蒸馏的产品收率, 提高经济效益^[1-3]。炼油厂大多根据原油的性质依据经验混合, 实际生产与计划偏离较大^[4]。利用 Aspen Plus 解决混炼比问题, 无法同时优化多个目标函数, 多目标优化问题的解常是一个最优解集, 集

合中的元素称为 Pareto 最优解^[5-7]。求解常减压装置中经济效益和 CO₂ 排放量 2 个目标函数是一个复杂的非线性方程组, 由于两个目标函数具有高度的非线性关系, 且过程变量间具有强烈的相互作用, 使非线性与操作变量的耦合关系更为复杂。遗传算

法可以极好地产生最优解达到优化的目的。应用非支配排序遗传算法 NSGA-Ⅱ^[8-11]解决化工过程的多目标优化^[12-13]成为研究热点。笔者利用 Aspen Plus 建立稳态模型,通过开发 Aspen Plus 和 Matlab 的接口,将 NSGA-Ⅱ应用于常减压多目标优化问题中,确定最佳混炼比,从而优化经济效益和 CO₂ 排放量。

1 常减压装置模型的建立

针对典型石油常减压装置,利用 Aspen Plus 流

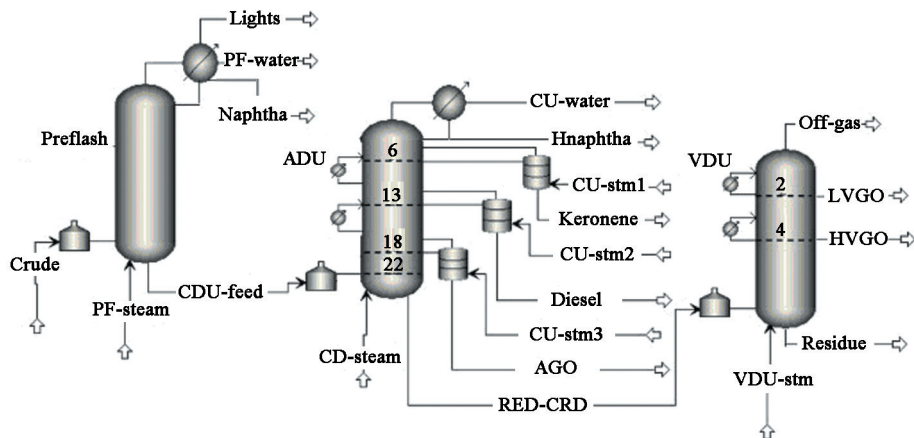


图 1 常减压装置流程模拟图

Fig. 1 Process flow diagram of the crude distillation unit

此常减压装置用以混炼 API 值为 31.4 的重油和 API 值为 34.8 的轻油,原油馏分切割图见图 2。

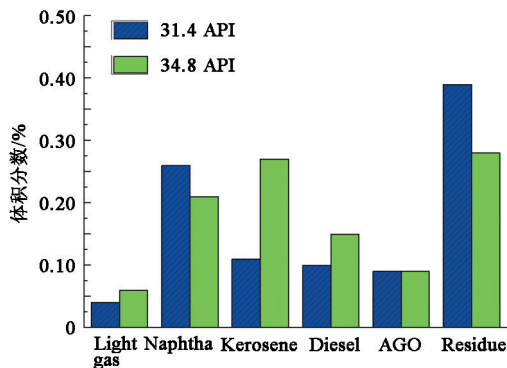


图 2 两种原油馏分切割比例对比

Fig. 2 Petroleum cut distribution of two crude types

2 多目标优化模型

计算软件的集成见图 3。Matlab 调用优化算法 NSGA-Ⅱ,完成遗传算法对常减压装置的多目标优化;Matlab 与 Aspen Plus 接口工具箱是基于 COM 和 ActiveX 技术所开发的,在 Matlab 平台上创建并返回一个 Aspen Plus COM 对象的句柄便可直接调用

程模拟软件模拟初馏塔、常压塔和减压塔的实际工况,其稳态模型见图 1。原油处理量为 662.5 m³/h,模型中初馏塔、常压塔和减压塔选用 Petro Frac 模块,物性方法为 BK10。常压塔包括 25 块理论板,1 个全凝器,3 个侧线采出和 2 个中段循环回流。塔顶采出产品为汽油,侧线产品为航空煤油(常一线)、轻柴油(常二线)和重柴油(常三线)。减压塔包括 6 块理论板,2 个侧线采出和 2 个中段循环回流。常压塔底产品进入减压塔后被分割为减顶瓦斯、侧线产品和减黏渣油。

和操作 Aspen Plus 提供的对象,充分结合 Aspen Plus 的模拟功能和 Matlab 的计算能力。

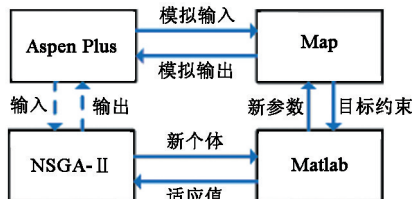


图 3 计算方法

Fig. 3 Computational method

2.1 优化策略

选择经济效益最大和 CO₂ 排放量最小为优化目标。为确保产品符合规格,用产品 ASTM D86 95% 的温度作为约束条件,规定石脑油馏分的 ASTM D86 95% 温度为 190 ℃;柴油的 ASTM D86 95% 温度为 340 ℃。通过分析常减压装置(图 1),确定决策变量为原油混炼比、加热炉热负荷、中段回流量和塔底汽提蒸汽量。目标函数模型^[3]如下:

$$P = \sum_i P_i Q_i - \sum_j (C_j R_j + F_j Z_j),$$

$$F_{CO_2} = Q_{Fuel} a \sigma w_c / NHV.$$

式中, P 为经济效益,美元/h; F_{CO_2} 为 CO₂ 排放量,kg/

h ; P_i 为产品价格,美元/ m^3 ; Q_i 为产品流股的流量, m^3 ; C_j 为混合原油的价格,美元/ m^3 ; R_j 为混合原油流量, m^3 ; F_j 为加热炉燃料的价格,美元/ m^3 ; Z_j 为加热炉燃料的用量, m^3 ; Q_{fuel} 为消耗的热量, kJ/h ; a 为 CO_2 与 C 的摩尔质量比; σ 为密度, kg/m^3 ; w_c 为燃料中 C 的含量; NHV 为燃料单位体积产热值, kJ/m^3 。

2.2 优化过程

如图 4,随机产生规模为 N 的初始种群,非支配排序后通过遗传算法的选择、交叉和变异 3 个基本操作得到下一代,从第二代开始,将父代与子代种群合并,进行非支配排序,同时对每个非支配层的个体进行拥挤度计算,根据非支配关系以及个体的拥挤度得到新的父代种群,最后 NSGA-II 通过约束条件和目标函数评价 Aspen Plus 严格模的结果,并产生新的子种群,根据非劣和拥挤距离进行排序,采用二元锦标赛选择来处理约束,直到满足最大遗传代数,将输出 Pareto 解,否则,将继续产生新的种群,作为 Aspen Plus 的输入进行严格模拟。在保证收敛的前提下,进行遗传算法参数整定,该过程以最小的遗传代数、避免局部最优和 Pareto 解的多样性为目标。

在多平台、多语言的环境下利用 NSGA-II 对常减压装置进行多目标优化,初步获得运行 50 代后不同 NSGA-II 计算参数下的优化解集。求解结果见图 5。当高斯变异概率 P_m 较小时得到的解集范围

较小,随着 P_m 增大解集范围不断增大,当 P_m 达到 0.1 时可以获得最优的 Pareto 解集,然而 P_m 继续增大时得到最优解又会减少。因此,选择 G (种群大小) 为 100、 P_c (中间交叉概率) 为 0.8、 P_m (高斯变异概率) 为 0.1 时可以得到最好的解集。在这种情况下,计算机 (四核 3.16 GHz) 需要运行 6 h。

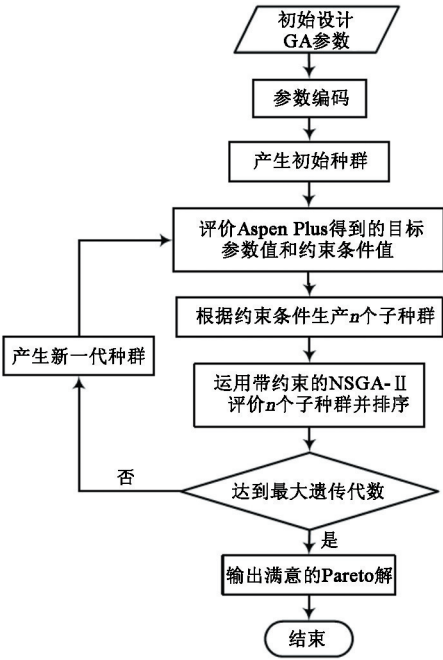


图 4 遗传算法
Fig. 4 Genetic algorithm

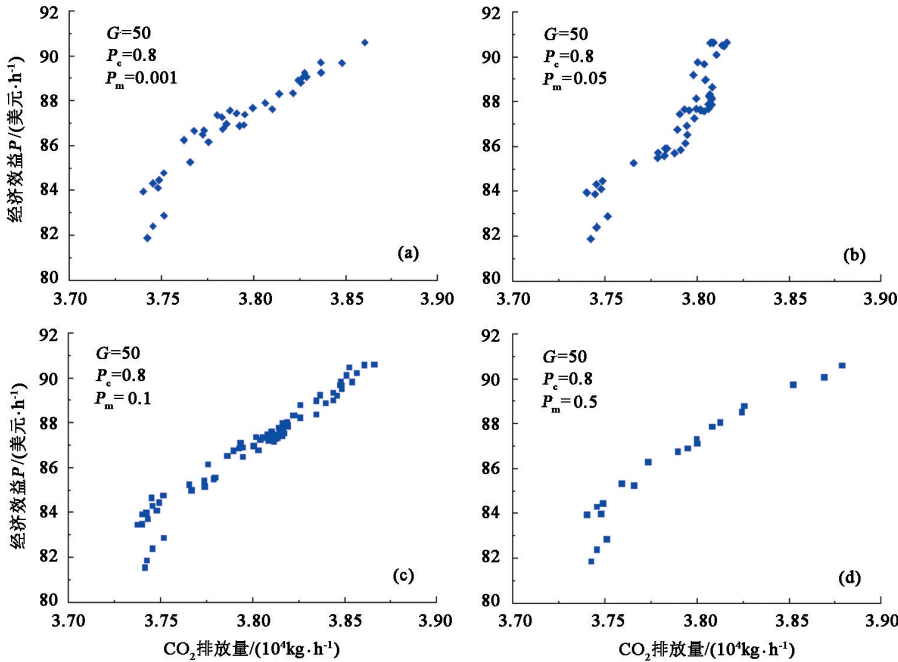


图 5 Pareto 解集
Fig. 5 Pareto solutions

2.3 优化结果

图 6 为最优 Pareto 解集。

由图 6 可知,运行 5 代后只能得到随意分布的解集,随着遗传代数的增加解集逐渐优化,越来越接

近 Pareto 前沿。当遗传代数为 100 时,Parato 边界已经近似接近 Pareto 前沿。计算过程中选择种群大小为 100,遗传代数为 100 时停止。表 1 为遗传算法参数设计,运行后可得到一组 Pareto 解集。

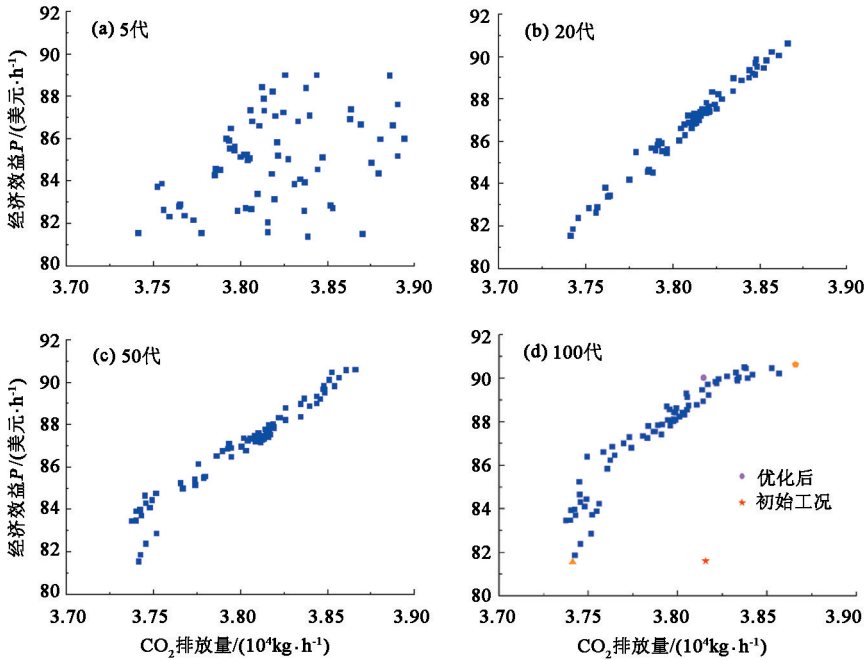


图 6 Pareto 边界
Fig.6 Pareto boundary

表 1 遗传算法参数设计

Table 1 Parameters of genetic algorithm

参数	值或方法
种群大小	100
遗传代数	100
选择	二元锦标赛选择
交叉	中间交叉
交叉概率	0.8
变异	高斯变异
变异概率	0.1

图 6(d)为经济效益最大和 CO₂ 排放量最小时的优化结果,其中三角形为炼厂经济效益最小(81.56×10² 美元/h)时所对应的最小 CO₂ 排放量(3.74×10⁴ kg/h);五边形为经济效益最大(90.63×10² 美元/h)时所对应的最小 CO₂ 排放量(3.86×10⁴ kg/h),经济效益提高了 11%,但 CO₂ 排放量随之增加了 3.2%。常减压装置经济效益增长必然需要消耗更多的能量,释放大量的 CO₂,即两者成正比;在不改变 CO₂ 排放量的基础上增加收益的唯一途径是优化混炼比和操作条件。图 6(d)中的五角星表示优化前工况下的经济效益和 CO₂ 排放量,可以看出,在当前 CO₂ 排放量基础上还可以通过改变混炼

比和操作条件提高经济效益。

3 结果分析

混炼比与目标函数的关系见图 7。其中,五角星点为炼厂初始设计值,轻油含量为 40%,CO₂ 排放量为 3.81×10⁴ kg/h,经济效益为 81.61×10² 美元/h。

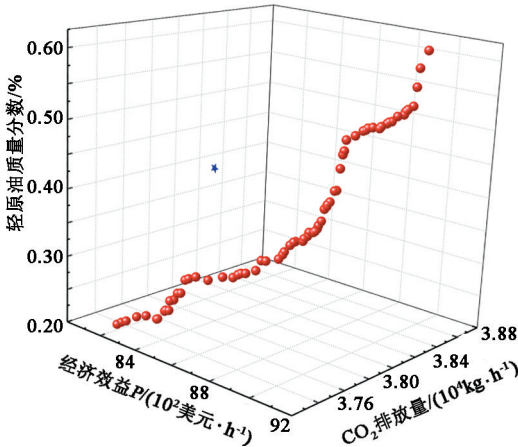


图 7 混炼比与目标函数的关系
Fig.7 Relationship between heavy crude fraction and objective functions

对比初始工况与优化后结果(表 2)可以看出,

在不改变 CO₂ 排放量的情况下,通过优化混炼比和操作条件可以使经济效益提高 10.2%。从混炼比与经济效益和 CO₂ 排放量之间解的分布来看,随着轻油比例的增大,CO₂ 的排放量总体呈增长的趋势,炼厂的经济效益也随之增大。也就是说,要想实现炼厂经济效益最大化,需要增大轻油的比例,同时,CO₂ 的排放量也必然会增大。这是因为轻质油含有更多的轻质馏分,虽然可以提高侧线产品产量,提高经济效益,但需要更多的能量去炼制,必然会增加

CO₂ 的排放量。CO₂ 排放量较小时,轻油含量一直稳定在 20%;虽然混炼比无明显变化,但经济效益和 CO₂ 排放量一直呈上升趋势。也就是说,轻油含量保持在 20%时,可以通过改变其他变量使能耗增加增大经济效益。随着轻油含量由 20% 逐渐上升,经济效益和 CO₂ 排放量也快速增大,直到轻油含量达到 60%时,两个目标函数达到最大值,轻油含量不会再增加,这是由于对石脑油和柴油 ASTM 95% 温度进行了限制。

表 2 优化结果

Table 2 Optimization results

阶段	常压炉 出口温 度/℃	减压炉 出口温 度/℃	轻油 比例	初馏塔 塔底蒸 汽量/ (kg· h ⁻¹)	常压塔 塔底蒸 汽量/ (kg· h ⁻¹)	减压塔 塔底蒸 汽量/ (kg· h ⁻¹)	常一中 回流量/ (m ³ · h ⁻¹)	常二中 回流量/ (m ³ · h ⁻¹)	减一中 回流量/ (m ³ · h ⁻¹)	减二中 回流量/ (m ³ · h ⁻¹)	经济 效益/ (10 ² 美元· h ⁻¹)	CO ₂ 排 放量/ (10 ⁴ kg· h ⁻¹)
优化前	360	400	0.40	2 423	82 032	8 541	542	126	312	380	81.61	3.81
优化后	365	396	0.48	2 146	79 910	9 435	678	144	363	267	89.96	3.81

4 结 论

- (1)运用遗传算法,通过改变混炼比和操作条件优化目标函数,可以优化常减压装置。
- (2)经济效益和 CO₂ 排放量成正比,要提高经济效益必然伴随着 CO₂ 排放量的增加,在相同 CO₂ 排放量下可以通过改变混炼比和操作条件来增加收益。通过最优设计,在相同的 CO₂ 排放量下,轻油比从 40% 提高到 48%,可为炼厂提高 10.2% 的经济效益。

参考文献:

[1] MORE R K, BULASARA V K, UPPALURI R, et al. Optimization of crude distillation system using aspen plus: effect of binary feed selection on grass-root design [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2010, 88(2):121-134.

[2] SZKLO A, SCHAEFFER R. Fuel specification, energy consumption and CO₂ emission in oil refineries[J]. Energy, 2007,32(7):1075-1092.

[3] 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.

[4] PINTO J M, JOLY M, MORO L F L. Planning and scheduling models for refinery operations[J]. Computers & Chemical Engineering, 2000,24(9):2259-2276.

[5] AL-MAYYAH M A, HOADLEY A F A, SMITH N E, et al. Investigating the trade-off between operating revenue and CO₂ emissions from crude oil distillation using a

blend of two crudes [J]. Fuel, 2011,90 (12): 3577-3585.

[6] LOPEZ 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.

[7] 赵瑞艳,李树荣,张晓东,等. 基于混合遗传算法的控制受限热传导系统最优控制问题求解[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2009,33(2):160-163.

ZHAO Ruiyan, LI Shurong, ZHANG Xiaodong, et al. Optimal control solving of heat transfer system with input constraints by applying hybrid genetic algorithm [J]. Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science), 2009,33(2):160-163.

[8] DEB K, PRATAP A, AGARWAL S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II[J]. Evolutionary Computation, IEEE Transactions on, 2002,6 (2):182-197.

[9] AGARWAL A, GUPTA S K. Multiobjective optimal design of heat exchanger networks using new adaptations of the elitist nondominated sorting genetic algorithm, NSGA-II[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2008,47(10):3489-3501.

[10] KASAT R B, GUPTA S K. Multi-objective optimization of an industrial fluidized-bed catalytic cracking unit (FCCU) using genetic algorithm (GA) with the jumping genes operator [J]. Computers & Chemical Engineering, 2003,27(12):1785-1800.

[11] TARAFDER A, RANGAIAH G P, RAY A K. Multiob-

- jective optimization of an industrial styrene monomer manufacturing process [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(2): 347-363.
- [12] INAMDAR S V, GUPTA S K, SARAF D N. Multi-objective optimization of an industrial crude distillation unit using elitist non-dominated sorting genetic algorithm [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2004, 82(5): 611-623.
- [13] 于晓栋, 吕文祥, 黄德先, 等. 基于 HYSYS 和 NSGA-II 的常压塔多目标优化[J]. 化工学报, 2008, 59(7): 1646-1649.
- YU Xiaodong, LÜ Wenxiang, HUANG Dexian, et al. Multi objective optimization of industrial crude distillation unit based on HYSYS and NSGA-II [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, China, 2008, 59(7): 1646-1649.

(编辑 刘为清)