



大型原油蒸馏过程能量全局优化控制策略

曾文华

高衿畅 周春晖

(杭州电子工业学院, 310037) (浙江大学, 310027)

摘要 本文研究了大型原油蒸馏过程能量全局优化控制问题。通过对原油蒸馏装置各用能环节能量传递关系的分析, 将全装置能量系统分解为四个能量子系统。在对常压塔、减压塔、换热网络和加热炉等四个能量子系统优化控制问题求解的基础上, 运用大系统理论分解协调的原理, 求解了原油蒸馏过程的能量全局优化控制问题。对某炼厂大型原油蒸馏装置现场操作数据优化计算结果表明, 本文提出的能量全局优化控制策略将使装置的总能耗降低 8.46%。

关键词: 原油蒸馏过程 节能控制 操作优化 大系统分解协调方法 非线性规划

1 引言

原油蒸馏过程是一个消耗巨大能量的复杂工艺生产过程, 其能耗占炼厂总能耗的 20% 以上, 因而节能问题一直是原油蒸馏过程优化控制的一个主要问题。

原油蒸馏装置包括众多的消耗和回收能量环节。至今文献中所报导的蒸馏过程节能控制都只局限于对装置中某个能量环节的控制研究。如加热炉的氧含量控制、热效率在线计算与控制; 常压塔的循环回流热值控制、过汽化率控制等。并且绝大多数节能控制方案没有直接从能耗最小的角度去设计, 而只是为了保证质量控制系统或设备的安全、平稳操作等要求。因此从能量最优的角度研究蒸馏装置中各能量环节的优化控制, 就显得十分必要。由于蒸馏装置中各能量环节间存在相互关联, 这使得各个能量环节单独最优并不能保证全装置的能量最优。因此必须采用大系统的方法研究蒸馏装置的能量全局优化控制策略。

本文首先通过对蒸馏装置各用能环节能量传递关系的分析, 提出将全装置能量系统分解为 4 个能量子系统。然后, 分别求解了常压塔、减压塔、换热网络和加热炉能量子系统

的优化控制问题。在此基础上, 最后运用大系统的分解协调原理, 求解了原油蒸馏过程能量全局优化控制问题。

2 能量子系统的划分

图 1 为上海高桥石化公司炼油厂 1 号蒸馏装置工艺流程图。该原油蒸馏装置包括换热网络、常压炉、减压炉、常压塔、减压塔、汽提塔、冷却器及热交换器等许多用能设备。如果从装置中各用能设备间能量的相互影响关系去分析, 可以得到图 2 所示的能量传递信息图。由图 2 可知, 我们将整个蒸馏装置划分为 7 个能量环节。

常压塔的高温位产品和 3 个循环回流用于与原油换热, 塔产品流量由工艺生产方案决定是不可改变的, 循环回流与塔顶冷回流一道取走塔的余热。从有效能的角度分析, 塔顶冷回流无回收价值, 而循环回流热回收率由其取热温位决定。因此通过合理分配各回流取热, 使循环回流总取热(有效能)最大, 将提高换热网络的终温。

减压塔有与常压塔类似的结论。

初馏塔参与换热的为初顶油气, 其是固定的。这里将初馏塔与网络 1、网络 2 合并一

收稿日期: 1993 07 30

起,组成一个总的换热网络。换热网络的终温由各热源的流量、温度以及网络中各冷源的流量比确定。在网络热源固定的情况下,寻找

最佳的冷源流量比,使网络终温最高,将提高常压炉的进料温度,降低炉子能耗。

降低减压炉的能耗是通过改善炉子的操

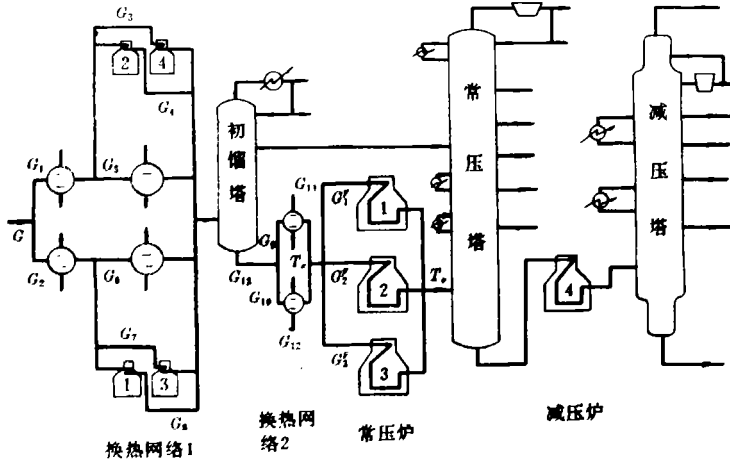


图1 原油蒸馏装置工艺流程示意图

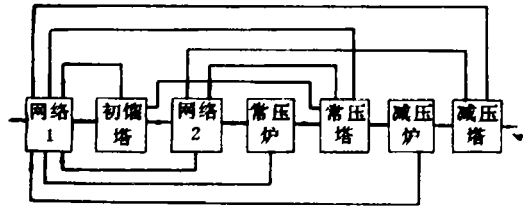


图2 原油蒸馏过程能量传递信息图

作条件,提高炉子热效率来实现。对于3台并联运行的常压炉,由于彼此之间的相互关联,要同时使每台炉子的热效率都达到最大是不可能的。如何合理分配各加热炉的热负荷,使总的热效率最大,将进一步降低加热炉的总能耗。

基于上面的分析,我们将原油蒸馏过程能量全局优化问题分解为如下4个能量子系统优化问题。

- ①常压塔的最佳回流取热分配;
- ②减压塔的最佳回流取热分配;
- ③换热网络的操作优化;
- ④多台并联运行加热炉的最佳热负荷分配。

3 能量子系统优化问题的求解

下面分别讨论4个能量子系统优化问题

的求解方法。

3.1 常压塔的最佳回流取热分配

由于常压塔塔顶冷回流是用空冷(或水冷)来实现的,其热量全部浪费;而三个循环回流用来预热原油,具有较高的热回收价值。因此最佳回流取热分配问题的目的就是要尽量提高循环回流取热,降低冷回流取热,故目标函数表示为:

$$\max C_1^A \cdot Q_1^A + C_2^A \cdot Q_2^A + C_3^A \cdot Q_3^A \quad (1)$$

式中 $Q_i^A, i=1,2,3$ ——各循环回流取热量。

考虑到各循环回流取热温位不一样,其热回收率也不一样,因此在目标函数中引入了加权系数 $C_i^A, i=1,2,3$ 。 C_i^A 的值可由有效能分析的方法得到,这里取

$$C_1^A = 1.0, C_2^A = 2.0, C_3^A = 2.0。$$

显然循环回流取热是不能无限制提高的,当循环回流增加后,将改变塔内汽、液相负荷的分布。这一方面会影响塔的分选效果,导致产品质量下降甚至不合格,另一方面可能引起液泛、漏液等现象,破坏塔的安全操作。因此最佳回流取热分配问题必须考虑保证产品质量及塔的安全操作两方面的约束。

我们用相邻产品间重叠度表示产品的质量,故有如下保证产品质量的约束方程:

$$\text{重叠度 } i \geq \text{工艺要求值 } i, i=1, 2, \dots, 5 \quad (2)$$

塔的安全操作用一组塔板水力学参数来表示,工艺上为保证不发生漏液、液泛等现象,要求:

$$\begin{aligned} & \textcircled{1} v_L \leq v_s \leq v_Y \\ & \textcircled{2} 8.0 \leq F_T \leq 12.0 \end{aligned} \quad (3)$$

式中 v_s, v_Y, v_L, F_T ——空塔速度、允许空塔速度、漏液时最小空塔速度和阀孔动能因子。

我们基于对塔内汽、液相负荷的精确计算,将式(1)、(2)、(3)所示的最佳回流取热分配问题,表示为如下一具有 3 个优化变量、15 个不等式约束的非线性规划问题⁽³⁾:

$$\max C_1^A \cdot R_1^A + C_2^A \cdot R_2^A + C_3^A \cdot R_3^A \quad (4)$$

$$\text{s. t. } G_i(R_1^A, R_2^A, R_3^A) \leq 0, i=1, 2, \dots, 15$$

式中 $R_i^A, i=1, 2, 3$ ——各循环回流取热比。

采用综合约束函数双下降法(SCDD)求解该非线性规划问题,一组操作工况的优化计算结果如表 1 所示。

表 1 常压塔最佳回流取热优化计算结果

	冷回流	顶循环	常一中	常二中	循环回流总和
操作值, %	45.37	10.42	28.74	15.47	54.63
优化值, %	39.85	13.11	29.41	17.63	60.15

3.2 减压塔的最佳回流取热分配

减压塔有与常压塔类似的结果,其最佳回流取热分配表示为如下的一非线性规划问题:

$$\max C_1^r \cdot R_1^r + C_2^r \cdot R_2^r$$

$$\text{s. t. } \mu_i^{\min} \leq \mu_i(R_1^r, R_2^r) \leq \mu_i^{\max}, i=1, 2,$$

...4

$$v_L^r \leq v_s^r \leq v_Y^r \quad (5)$$

$$8.0 \leq F_T^r \leq 12.0$$

式中 $\mu_i, \mu_i^{\max}, \mu_i^{\min}$ ——各侧线产品的粘度及工艺要求的最大、最小值。

粘度与各循环回流取热比的关系由多元试验回归得到。据推导⁽⁶⁾,该非线性规划具有 2 个优化变量、14 个不等式约束。仍采用 SCDD 法求解,一组操作工况的优化结果列于表 2。

表 2 减压塔最佳回流取热优化计算结果

	一线冷回流	减一中	减二中	循环回流总和
操作值, %	34.62	38.75	26.63	65.38
优化值, %	24.39	42.87	32.74	75.61

3.3 换热网络的操作优化

换热网络的终温由参与网络换热的热源流量、温度及冷源的物料流分配比决定。在热源流量、温度固定的情况下,通过寻求最佳的冷源流量比,使网络换热终温最大,是换热网络操作优化的目的。

定义下面 7 个优化变量(参见图 1):

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= \frac{G_1}{G} & x_2 &= \frac{G_9}{G_8} & x_3 &= \frac{G_{11}}{G_2} \\ x_4 &= \frac{G_3}{G_3 + G_4} & x_5 &= \frac{G_5}{G_1} & x_6 &= \frac{G_6}{G_2} \\ x_7 &= \frac{G_7}{G_7 + G_8} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

我们通过对换热网络的综合模拟,将网络换热终温 T_c 表示为 $x_1 \sim x_7$ 的函数关系⁽⁴⁾:

$$T_c = f(x_1, \dots, x_7) \quad (7)$$

这样,换热网络的操作优化问题表示为

$$\max_{x_1 \sim x_7} T_c = \max_{x_1 \sim x_7} f(x_1, \dots, x_7) \quad (8)$$

采用不需求函数导数的单纯形加速法⁽⁷⁾求解该非线性规划问题,一组操作工况的优化计算结果列于表 3。

表3 换热网络操作优化计算结果

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	T_e
操作值	0.5	0.5	0.5	0.546	0.896	0.852	0.376	284.79
优化值	0.533	0.149	0.594	0.523	0.899	0.840	0.396	287.63

3.4 多台并联运行加热炉最佳热负荷分配

多台并联运行的加热炉,由于存在相互关联,每台炉子的热效率最高,并不能保证总的热效率最高。通常各台炉子的热效率是不一样的,并且热效率随操作工况变化。显然对效率高的炉子应充分利用,对效率低的则尽量少用。即存在一个炉子热负荷的分配问题,最佳热负荷分配应使加热炉总能耗最小。

我们通过建立加热炉辐射段和对流段的热平衡模型,得到如下函数关系^[5]:

$$F_i = f_i(G_i^F, T_e, T_{oi}) \quad i=1,2,3 \quad (9)$$

式中 F_i ——每台加热炉的燃料量;

G_i^F ——每台炉子的加热原油量;

T_{oi} ——每台炉子的炉出口温度。

加热炉最佳热负荷分配问题表示为:

$$\min F_1 + F_2 + F_3 = \min \{f_1(G_1^F, T_e, T_{o1}) + f_2(G_2^F, T_e, T_{o2}) + f_3(G_3^F, T_e, T_{o3})\} \quad (10)$$

$$\text{s. t. } G_1^F + G_2^F + G_3^F = G_B \quad (11)$$

$$T_{o1} = T_{o2} = T_{o3} = T_o = T_o^s$$

将式(11)、(12)代入式(10)中,则上述优化问题转化为一具有2个优化变量的无约束非线性规划。仍采用单纯形加速法求解,一组现场操作数据的优化计算结果列于表4。

表4 加热炉最佳热负荷分配优化结果

		1 [#] 炉	2 [#] 炉	3 [#] 炉	总计
加热原油量	操作值	103 170	103 170	111 130	317 470
	优化值	110 392	106 265	100 813	317 470
燃料值	操作值	1009	1003	1242	3254
	优化值	1044	1018	1022	3084

4 能量全局优化问题及求解

由于4个能量子系统之间存在相互关联,因而能量全局优化问题的解不能直接地表示为4个子系统能量优化问题解的和。经分析,4个能量子系统间的相互关联如图3所示。

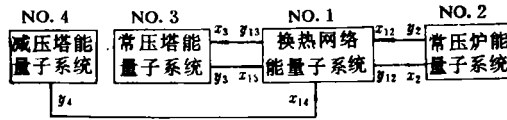


图3 能量优化子系统的相互关联图

能量全局优化问题表示为^[6]

$$\begin{aligned} \min \quad & F_1 + F_2 + F_3 = \min J_2(x_2, M_2) \\ \text{s. t.} \quad & y_{12} = H_{12}(x_{12}, x_{13}, x_{14}, M_1) \\ & y_{13} = H_{13}(x_{12}, x_{13}, x_{14}, M_1) \\ & y_2 = H_2(x_2, M_2) \\ & y_3 = H_3(x_3, M_3) \\ & y_4 = H_4(M_4) \\ & x_{12} = y_2, x_{13} = y_3, x_{14} = y_4, x_2 = y_{12}, \\ & x_3 = y_{13} \\ & G_3(x_3, M_3) \leq 0 \\ & G_4(M_4) \leq 0 \end{aligned} \quad (12)$$

图3及式(12)中各变量的含义如下。

F_i —— $i=1,2,3$;3台常压炉的燃料量;

M_i —— $i=1,2,3,4$;4个能量子系统的优化(控制)变量,参见上节的分析;

y_{12} ——即网络换热终温 T_e ;

y_{13} ——初馏塔一线产品温度;

y_2 ——3台常压炉冷进料段烟气入口流量及温度;

y_3 —— $C_1^A \cdot Q_1^A + C_2^A \cdot Q_2^A + C_3^A \cdot Q_3^A$;

y_4 —— $C_1^r \cdot Q_1^r + C_2^r \cdot Q_2^r$ 。

能量全局优化问题式(12)的Lagrangian函数为:

$$\begin{aligned} L = & J_2(x_2, M_2) + \rho_{12}^T \cdot (x_{12} - y_2) + \rho_{13}^T \cdot \\ & (x_{13} - y_3) + \rho_{14}^T \cdot (x_{14} - y_4) + \rho_2^T \cdot (x_2 - y_{12}) + \\ & \rho_3^T \cdot (x_3 - y_{13}) + \gamma_{12}^T \cdot [y_{12} - H_{12}(x_{12}, x_{13}, x_{14}, \\ & M_1)] + \gamma_{13}^T \cdot [y_{13} - H_{13}(x_{12}, x_{13}, x_{14}, M_1)] + \gamma_2^T \cdot \\ & [y_2 - H_2(x_2, M_2)] + \gamma_3^T \cdot [y_3 - H_3(x_3, M_3)] \end{aligned}$$

$$+\gamma_4^T \cdot [y_4 - H_4(M_4)] + \eta_3^T \cdot G_3(x_3, M_3) + \eta_4^T \cdot G_4(M_4) = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \quad (13)$$

$$\text{其中: } L_1 = \rho_{12}^T \cdot x_{12} + \rho_{13}^T \cdot x_{13} + \rho_{14}^T \cdot x_{14} - \rho_2^T \cdot y_{12} - \rho_3^T \cdot y_{13} + \gamma_{12}^T \cdot [y_{12} - H_{12}(x_{12}, x_{13}, x_{14}, M_1)] + \gamma_{13}^T \cdot [y_{13} - H_{13}(x_{12}, x_{13}, x_{14}, M_1)] \quad (14)$$

$$L_2 = J_2(x_2, M_2) + \rho_2^T \cdot x_2 - \rho_{12}^T \cdot y_2 + \gamma_2^T \cdot [y_2 - H_2(x_2, M_2)] \quad (15)$$

$$L_3 = \rho_3^T \cdot x_3 - \rho_{13}^T \cdot y_3 + \gamma_3^T \cdot [y_3 - H_3(x_3, M_3)] + \eta_3^T \cdot G_3(x_3, M_3) \quad (16)$$

$$L_4 = -\rho_{14}^T \cdot y_4 + \gamma_4^T \cdot [y_4 - H_4(M_4)] + \eta_4^T \cdot G_4(M_4) \quad (17)$$

Lagrangian 函数具有可分的形式,因此能够采用大系统分解——协调原理求解式(12)问题。显然这是一个十分复杂的大系统

优化问题,考虑到各能量子系统间相互关联的不同情况,下面采用一种简化的方法求解式(12)的问题。

通常工艺上认为常压炉的冷进料段烟气入口温度及流量(y_2)变化不大,且其变化对网络终温影响较小;初一线产品由于流量小,其温度(y_{13})变化对常压塔余热影响也不大。这样将图 3 中各子系统的关联都可似为只是单向的关联,如图 4 所示。

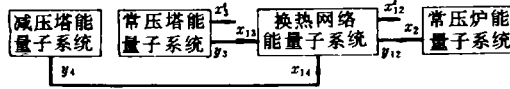


图 4 简化后的能量优化子系统相互关联图

由图 4,能量全局优化问题式(12)将通过求解下列 4 个能量子系统优化问题近似实现:

表 5 原油蒸馏过程能量全局优化计算结果

		操作数据及优化计算结果				说明
常压塔	操作值	$R_1^{\uparrow} = 10.37$	$R_2^{\downarrow} = 28.16$	$R_3^{\downarrow} = 15.82$		循环回流取热增加 6.77%
	优化值	$R_1^{\uparrow} = 12.85$	$R_2^{\downarrow} = 30.29$	$R_3^{\downarrow} = 17.98$		
减压塔	操作值	$R_1 = 38.09$		$R_2 = 26.45$		循环回流取热增加 10.5%
	优化值	$R_1 = 43.29$		$R_2 = 31.75$		
换热网络	操作值	$x_1 = 0.5$	$x_2 = 0.5$	$x_3 = 0.5$	$x_4 = 0.538$	换热网络终温增加 6.72℃
	优化值	$x_1 = 0.538$	$x_2 = 0.489$	$x_3 = 0.581$	$x_4 = 0.515$	
	操作值	$x_5 = 0.887$	$x_6 = 0.863$	$x_7 = 0.381$	$T_c = 282.11$	
	优化值	$x_5 = 0.889$	$x_6 = 0.851$	$x_7 = 0.401$	$T_c = 288.83$	
常压炉	操作值	$G_1^F = 104201$	$G_2^F = 104201$	$G_3^F = 112242$	$G_b = 320644$	加热炉总能耗降低 8.46%
	优化值	$G_1^F = 110944$	$G_2^F = 108383$	$G_3^F = 101317$	$G_b = 320644$	
	操作值	$F_1 = 1019$	$F_2 = 1023$	$F_3 = 1254$	$F = 3296$	
	优化值	$F_1 = 1014$	$F_2 = 1001$	$F_3 = 1002$	$F = 3017$	

$$\textcircled{1} \max_{M_4} y_4 = \max_{M_4} H_4(M_4) \quad (18)$$

$$\text{s. t. } G_4(M_4) \leq 0$$

得最优解为 M_4^* 、 y_4^* 。

$$\textcircled{2} \max_{M_3} y_3 = \max_{M_3} H_3(x_3^s, M_3) \quad (19)$$

$$\text{s. t. } G_3 - (x_3^s, M_3) \leq 0$$

最优解为 M_3^* 、 y_3^* 。

$$\textcircled{3} \max_{M_1} y_{12} = \max_{M_1} H_{12}(x_{12}^s, y_3^*, y_4^*, M_1) \quad (20)$$

最优解为 M_1^* 、 y_{12}^* 。

$$\textcircled{4} \min_{M_2} F_1 + F_2 + F_3 = \min_{M_2} J_2(y_{12}^*, M_2) \quad (21)$$

最优解为 M_2^* 、 J_2^* 。

这里 x_3^s 、 x_{12}^s 为 x_3 、 x_{12} 的给定值, 认为在整个优化过程中保持不变。

可以看出问题式(18)、(19)、(20)、(21)分别是我们在上节中讨论过的减压塔、常压塔、换热网络和加热炉能量子系统优化问题。

表5给出了一组操作工况下, 能量全局优化问题的计算结果。可以看出, 能量全局优化提高常压塔循环回流取热6.77%, 减压塔循环回流取热提高10.5%, 换热网络终温增加6.72℃, 加热炉总能耗降低8.46%。

5 结束语

原油蒸馏过程是一个巨大的耗能过程,

降低装置的总能耗是蒸馏过程工艺操作、优化控制的一个主要问题。原油蒸馏装置包括多个直接耗能环节和能量回收环节, 各个能量环节存在着相互关联。对于这样一个复杂的工业大系统, 采用分解能量子系统的方法是研究能量全局优化的一条可行途径。针对各能量子系统间关联的特殊情况, 进一步可采用简化的方法求解能量全局优化问题。

参 考 文 献

- 1 Sanchcz, E., C. Foulard, Energy Savings in Crude Distillation Process, Large Scale Systems, 4(1983), 81-90
- 2 北京石油设计院. 常减压蒸馏工艺计算, 轻加工出版社, 1982年
- 3 曾文华、高衿畅、周春晖. 原油常压蒸馏塔最佳回流取热分配控制系统, 第二届过程控制科学报告会论文集, 华东化工学院出版社, 1988年, P41~47
- 4 曾文华, 高衿畅, 周春晖. 原油蒸馏过程换热网络的最优操作, 石油炼制, 1989, No. 9, P11~16
- 5 曾文华, 高衿畅, 周春晖. 原油蒸馏过程换热网络——加热炉联合系统的最优操作, 炼油化工自动化, 1990, No. 4, P16~21
- 6 曾文华. 大型原油蒸馏过程能量-收率多目标综合优化, 浙江大学博士学位论文, 1989年5月
- 7 范鸣玉、张莹. 最优化技术基础, 清华大学出版社, 1982年

(上接第14页)

一旦感受元件故障, 两副触点均失去作用, 存在一定的危险性。

③意大利卡劳尔巴气相包谱仪电子卡件国内维修有困难。采样系统快速回路箱在蒸汽(145℃)加热时, 箱内温度高, 供货商对元部件材质选用不当, 出现变形现象。

④质量流量计, 特别是用于测量氢气的热质量流量计均为微小流量(0~0.3kg/h), 标定有一定困难。

⑤料仓料位计设计选用转翼式料位计, 经使用后, 发现故障率高, 本装置已改为音叉料位计。

⑥由分包商 WP 公司提供的挤出造粒工序联锁系统设计过于繁琐, 有些联锁点的设置实际工况并不需要, 给满足开车条件增添了麻烦, 同时产生误动作影响了装置的正常运行。