



原油蒸馏过程换热网络 —加热炉联合系统的 最优操作

浙江大学 曾文华 高衿畅 周春晖

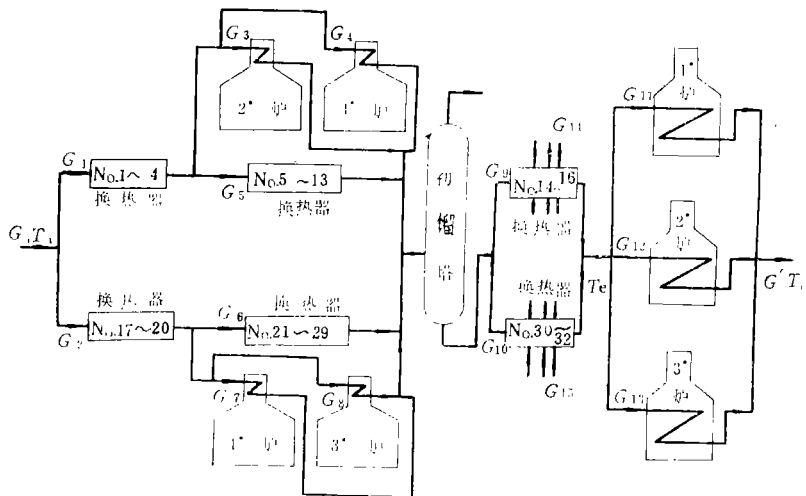
〔摘要〕本文研究了原油蒸馏过程换热网络-加热炉联合系统的最优控制问题。首先分别讨论换热网络和加热炉的最优操作问题，在此基础上，考虑到这两个系统之间存在的关联，提出了换热网络-加热炉联合系统的最优操作问题。在应用大系统分解协调理论求解该问题时，针对系统之间的特殊性，提出了一种新的协调算法——预估平衡协调法。由某炼油厂大型原油蒸馏过程换热网络-加热炉联合系统的仿真结果表明，本文提出的最优操作方法将带来显著的节能效果。

一、引言

原油蒸馏过程的加热系统通常包括换热网络和加热炉（一般为多台并行运行）两部份，图一为某炼油厂大型原油蒸馏过程的换热网络和加热炉系统工艺流程图。加热系统的目的是将原油经过换热网络预热到一定的温度后，再送到加热炉进一步加热，以达到

工艺要求的加热温度。在这里换热网络是一个利用能量的过程，而加热炉则为一直消耗能量的环节。显然如何改变网络中各物流的分配，使网络的换热终温最高，以及如何分配加热炉的热负荷，使炉子的能耗最小，是一个十分重要的问题。

目前文献中对换热网络的最优设计报导



图一 原油蒸馏过程换热网络、加热炉系统工艺流程图

较多，而对网络的最优操作则鲜见报导。对于一个实际运行的换热网络，即使是按最优条件（通常优化设计的目标函数并不是取换

热终温最高）进行设计的，但当工况改变时，换热网络将偏离其设计值，此时有必要对网络进行优化操作，使换热终温最高。

对于加热炉，目前研究得较多的是单台加热炉的动态控制，如炉出口温度控制、炉膛负压控制、烟气氧含量控制等，对于多台加热炉（并行运行）的最佳热负荷分配控制的研究，文献中几乎没有报导。

本文首先分别讨论换热网络和加热炉的最佳操作问题。在文献〔6〕的基础上，研究了考虑加热炉对流段（换热网络的一部份）变化影响的网络操作优化问题，基于加热炉的工艺计算，建立了加热炉辐射段和对流段的热平衡模型，并提出了加热炉的最佳热负荷分配控制问题，最后针对图一的换热网络-加热炉系统之间存在的关联特性，提出了换热网络-加热炉联合系统的综合优化问题。

二、换热网络的最优操作

换热网络操作优化的目的就是在给定的热源流量和温度下，如何调节各原油分组（冷源）的流量，使网络的换热终温最高。文献〔6〕报导了在不考虑图一中加热炉对流段变化影响的情况下，换热网络的操作优化问题。即假设经过每台加热炉对流段的流量和对流段出口温度不变，可调变量有 3 个，即图一中 G_1/G_2 、 G_9/G_{10} 和 G_{14}/G_{15} ，这是一个无约束的非线性最优化问题。显然在其它条件固定的情况下，换热终温 T_e 仅是 $x_1 = G_1/G_2$ 、 $x_2 = G_9/G_{10}$ 、 $x_3 = G_{14}/G_{15}$ 的函数，要写出 T_e 与 x_1 、 x_2 、 x_3 关系的显式表达式几乎是不可能的，但是在给定的一组 x_1 、 x_2 、 x_3 下，可以通过网络模拟的方法，求出 T_e 。优化方法采用 Box 复合形法。一组操作工况下的优化结果如下：

实际操作值： $x_1 = 1.0$ 、 $x_2 = 1.0$ 、 $x_3 = 1.0$ ， $T_e = 284.31^\circ\text{C}$

优化值： $x_1^* = 1.1549$ ， $x_2^* = 0.8171$ ， $x_3^* = 1.5257$ ， $T_e^* = 285.69^\circ\text{C}$

我们考虑把加热炉对流段流量（图一中 G_3 、 G_4 、 G_7 、 G_8 ）亦作为可调变量。这样该换热网络共有 7 个调节变量，即 x_1 、 x_2 、

$$x_3, \quad x_4 = G_3 / (G_3 + G_4), \quad x_5 = G_4 / (G_3 + G_4), \quad x_6 = G_7 / (G_7 + G_8), \quad x_7 = G_8 / (G_7 + G_8)。$$

从下节讨论加热炉模型中知道，加热炉的对流段可等效为一换热器，这样在给定的加热炉入对流段烟气流量和烟气温度下，对流段出口温度由对流段原油流量及入口温度确定。同样，在其它条件不变的情况下，网络的换热终温 T_e 只是 $x_1 \sim x_7$ 的函数，类似，用网络模拟〔2、4〕的方法，可以求取一组操作变量 $x_1 \sim x_7$ 下的 T_e 。采用单纯形加速法求解这个 7 变量的无约束非线性规划问题。在与文献〔6〕相同的操作工况下的优化结果如下：

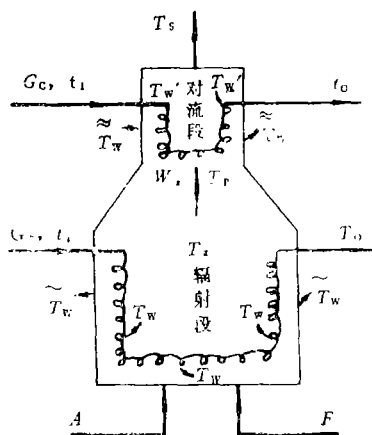
实际操作值： $x_1 = 1.0$ ， $x_2 = 1.0$ ， $x_3 = 1.0$ ， $x_4 = 0.3929$ ， $x_5 = 0.6071$ ， $x_6 = 0.3667$ ， $x_7 = 0.6333$ ， $T_e = 284.79^\circ\text{C}$

优化值： $x_1^* = 1.1413$ ， $x_2^* = 0.9231$ ， $x_3^* = 1.4625$ ， $x_4^* = 0.5233$ ， $x_5^* = 0.4767$ ， $x_6^* = 0.3956$ ， $x_7^* = 0.6044$ ， $T_e^* = 287.63^\circ\text{C}$

三、加热炉的最优操作

1. 加热炉辐射段的热平衡模型

对于图二所示的加热炉辐射段，可以建立其热平衡模型〔3〕。



图二 加热炉的工艺流程图

进入辐射段的热量 Q_{12} 与辐射段带出的

热量 Q_{out} 相等: $Q_{in} = Q_{out}$ (3.1)

$$Q_{in} = f_{in}(F) \quad (3.2)$$

$$Q_{out} = f_{out}(F, T_1, T_o, T_p) \quad (3.3)$$

$$f_{in}(F) = f_{out}(F, T_1, T_o, T_p) \quad (3.4)$$

辐射段中辐射及对流总传热 Q_R 与原油经辐射段传入热量 \tilde{Q}_R 相等:

$$Q_R = \tilde{Q}_R \quad (3.5)$$

$$Q_R = f_R(T_1, T_o, T_p) \quad (3.6)$$

$$\tilde{Q}_R = G_R(H(T_o) - H(T_1)) \quad (3.7)$$

$$f_R(T_1, T_o, T_p) = G_R[H(T_o) - H(T_1)] \quad (3.8)$$

利用上述两个热平衡方程,在给定的 G_R, T_1, T_o 下,可求得 F, T_p 。

2. 加热炉对流段的热平衡模型

对于图二所示的加热炉对流段,热平衡模型^[8]为:

进入对流段的热量 Q_{in} 与对流段带出的热量 Q_{out} 相等: $Q_{in} = Q_{out}$ (3.9)

$$Q_{in} = \tilde{f}_{in}(F, T_p) \quad (3.10)$$

$$Q_{out} = \tilde{f}_{out}(F, t_1, t_o, T_p, T_1) \quad (3.11)$$

$$\tilde{f}_{in}(F, T_p) = \tilde{f}_{out}(F, t_1, t_o, T_p, T_1) \quad (3.12)$$

对流段中对流传热量 Q_c 与原油经对流传入热量 \tilde{Q}_c 相等: $Q_c = \tilde{Q}_c$

$$Q_c = f_c(t_1, t_o, T_p, T_1)$$

$$Q_c = G_c[h(t_o) - h(t_1)]$$

$$f_c(t_1, t_o, T_p, T_1)$$

$$= G_c[h(t_o) - h(t_1)]$$

利用上述两个热平衡方程,在给定的 G_c, t_1, F, T_p 下,可求得 t_o, T_1 。

3. 加热炉的最佳热负荷分配问题

对于图一所示的三台并行的加热炉,工艺要求每台加热炉的出口温度相等(这可通过单台加热炉的炉出口温度控制来实现)。由于每台加热炉的热效率不同,很显然从节

能的角度,对于效率高的炉子应该充分利用,而对效率较低的炉子则应尽可能少些利用,因此如何合理分配各台加热炉的热负荷,使总的加热炉的燃油消耗最小,是一个十分重要的问题。

由上面讨论得知,加热炉辐射段出口温度可表示为($G_1' = G_{11}, G_2' = G_{12}, G_3' = G_{13}, T_i = T_o$)

$$T_i = f_i(F_i, G_i, T_i) \quad (3.17)$$

$$j = 1, 2, 3$$

在 T_i, T_i 固定的情况下, F_i 可表示为 G_i 的函数。即

$$F_i = g_i(G_i) \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.18)$$

这样加热炉的最佳热负荷分配问题可表示为:

$$\min(F_1 + F_2 + F_3) \quad (3.19)$$

$$\text{s.t. } F_i = g_i(G_i) \quad j = 1, 2, 3 \quad (3.20)$$

$$G_1' + G_2' + G_3' = G' \quad (3.21)$$

这是一个三变量的非线性优化问题,若将 $G_3' = G' - G_1' - G_2'$ 代入式(3.20)的目标函数表达式中,该问题则变成一2变量的无约束最优化问题,用单纯形加速法求解,对一组操作工况的优化结果如下:

$$\text{炉进口温度: } T_i = 292.5^\circ\text{C}$$

$$\text{炉出口温度: } T_o = T_o = T_o = 370.0^\circ\text{C}$$

加热炉原油分组流量:

$$G_1' = 103170\text{kg/h}, G_2' = 103170\text{kg/h}$$

$$G_3' = 111130\text{kg/h}, G' = 317470\text{kg/h}$$

加热炉燃料油消耗量:

$$F_1 = 1009\text{kg/h}, F_2 = 1003\text{kg/h}, F_3$$

$$= 1242\text{kg/h}, F = 3254\text{kg/h}$$

最佳的加热炉原油分组流量:

$$G_1'^* = 110392\text{kg/h}, G_2'^* = 106265$$

$$\text{kg/h}, G_3'^* = 100813\text{kg/h}, G'^* = G' = 317470\text{kg/h}$$

最优条件下的加热炉燃料油消耗量:

$$F_1^* = 1044\text{kg/h}, F_2^* = 1018\text{kg/h},$$

$$F_3^* = 1022\text{kg/h}, F^* = 3084\text{kg/h}$$

很显然,在最优操作的情况下,加热炉的燃油消耗量要降低。

四、换热网络-加热炉联合系统的操作优化

原油蒸馏的加热过程是一个利用能量和消耗能量的过程,其直接的能量消耗即表现为加热炉燃油量的多少。因此如何通过寻找最佳的操作条件,使在满足工艺要求(炉出口温度)的情况下,加热炉的燃油量最小,将是一个非常重要的问题。对图一所示的原油蒸馏加热过程,从节能的角度来看,最优操作的目标函数应取为:

$$\min (F_1 + F_2 + F_3) \quad (4.1)$$

约束条件为:

$$T_1^i = T_1^o = T_2^o = T_3^o = T_e \quad (4.2)$$

如果换热网络与加热炉只是简单的前后串联关系,那么很显然,联合系统的操作优化问题等价于下列两个最优化问题:

换热网络的操作优化:

$$\max T_e(x_1, \dots, x_7) \quad (4.3)$$

$$x_1, \dots, x_7$$

加热炉的最佳热负荷分配

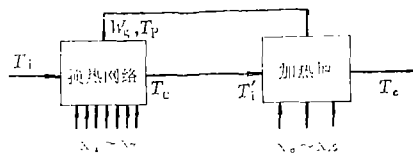
$$\min (F_1 + F_2 + F_3) \quad (4.4)$$

$$\text{s.t. } F_j = g_j(G_j^i) \quad j = 1, 2, 3 \quad (4.5)$$

$$G_1^i + G_2^i + G_3^i = G^i, T_1^i = T_1^o = T_2^o = T_3^o = T_e \quad (4.6)$$

但是,换热网络有四股流量(参见图一)经过加热炉的对流段。这表明,联合系统的优化问题并不能简单地等价于换热网络与加热炉的操作优化问题,而必须考虑系统之间的关联,研究整体优化的问题。

从前面分别讨论的换热网络和加热炉操作优化问题中可以看出,换热网络对加热炉的关联为网络终温 T_e (即加热炉辐射段原油入口温度),而加热炉对网络的关联为加热炉中入对流段(这里把加热炉的对流段亦看作是换热网络的一部份)的烟气流量和温度。联合系统中的各子系统的信息传递关系如图三所示。



图三 换热网络、加热炉间信息传递关系

定义: $c_1 = (x_1 \dots x_7)^T$,

$$u_1 = (W_2^i \dots W_4^i, T_1^i \dots T_4^i)^T, Y_1 = T_e \quad (4.7)$$

$c_2 = (x_8 = G_1^i, x_9 = G_2^i, x_{10} = G_3^i)^T$

$$u_2 = (T_1^i = T_e, Y_2 = (W_1^i, W_2^i, W_3^i, W_4^i, T_1^i, T_2^i, T_3^i, T_4^i))^T \quad (4.8)$$

图一中的4[#]炉为减压炉,假设其进入对流段的烟气流量与温度不变,即 W_4^i, T_4^i 为常数。

由前两节讨论有:

$$Y_1 = T_e = f(x_1 \dots x_7, W_1^i \dots W_4^i, T_1^i \dots T_4^i) \equiv H_1(c_1, u_1) \quad (4.9)$$

$$W_j^i = f_w^j(x_8, x_9, x_{10}, T_e),$$

$$T_j^i = f_T^j(x_8, x_9, x_{10}, T_e) \quad j = 1, 2, 3 \quad (4.17)$$

$$\text{即: } Y_2 = H_2(c_2, u_2) \quad (4.11)$$

子系统间的关联方程为:

$$x_1 = Y_2, x_2 = Y_1 \quad (4.12)$$

子系统的目标函数为:

$$\max J_1 = T_e = Y_1 \equiv f_1(c_1, u_1, Y_1) \quad (4.13)$$

$$\min J_2 = F_1 + F_2 + F_3 = \tilde{f}_2(x_1, x_2, x_3, T_e) \equiv f_2(c_2, u_2, Y_2) \quad (4.14)$$

总系统的目标函数为:

$$\min J = F_1 + F_2 + F_3 = J_2 \quad (4.15)$$

由于总系统的目标函数并不是子系统目标函数和的形式,因而通常大系统的分解协调原则^[8]在此不能适用。

针对系统关联的特殊性,我们提出一种新的协调方法——预估平衡协调法。这里取协调变量为 T_e ,协调算法如下。

第一步:给定初始的 T_e^0 ,令 $k = 0$;

第二步: 在给定的 T_e^k 下, 对于系统 2 (加热炉) 进行优化。

$$\min_{C_2} f_2(c_2, u_2 = T_e^k, Y_2) \quad (4.16)$$

$$\text{s.t. } c_2 \in C_2 \equiv [c_2 \in R^3;$$

$$x_8 + x_9 + x_{10} = G'] \quad (4.17)$$

得最优的 c_2^* , 由 T_e^k 和 c_2^* 可确定 W_g^j 、 T_p^j , $j = 1, 2, 3$

$$W_g^j = W_g^j(c_2^*, T_e^k),$$

$$T_p^j = T_p^j(c_2^*, T_e^k) \quad (4.18)$$

第三步: 在给定的 W_g^j , T_p^j , $j = 1, 2, 3, 4$ 对于系统 1 (换热网络) 进行优化。

$$\max_{C_1} f_1(c_1, u_1 = (W_g^1 \dots W_g^4,$$

$$T_p^1 \dots T_p^4)^T, Y_1) \quad (4.19)$$

得最优的 c_1^* 和 T_e^* =

$$f_1(c_1^*, u_1, Y_1)$$

第四步: 若 $|T_e^{k+1} - T_e^k| < \epsilon$, 迭代终止, 否则令 $T_e^{k+1} = T_e^k + d(T_e^{k+1} - T_e^k)$, $k + 1 \rightarrow k$, 转第二步。

对于一组操作工况, 联合系统的优化结果列于表 3。为便于比较, 单个换热网络和加热炉的操作优化结果(见第二、三节)分别列于表 1、表 2 中。

比较表 1、表 2 和表 3 的优化结果, 不难发现联合系统的最佳网络终温要比单独的换热网络优化的终温低, 但是联合系统的最佳加热炉燃油消耗量亦要比单独的加热炉优化操作的燃油消耗量低。由于加热炉的燃油量为直接能量消耗, 因此, 联合系统的优化要比单独的网络和加热炉优化带来更多的经济效益。

表 1

实际值	$x_1 = 1.0$	$x_2 = 1.0$	$x_3 = 1.0$	$x_4 = 0.3929$	$x_5 = 0.6071$	$x_6 = 0.3667$	$x_7 = 0.6333$	$T_e = 284.79^\circ\text{C}$
优化值	$x_1^* = 1.1413$	$x_2^* = 0.9231$	$x_3^* = 1.4625$	$x_4^* = 0.5233$	$x_5^* = 0.4767$	$x_6^* = 0.3956$	$x_7^* = 0.6044$	$T_e^* = 287.63^\circ\text{C}$

表 2

实际值	$G_1'(x_8) = 103.170$	$G_2'(x_9) = 103.170$	$G_3'(x_{10}) = 111.130$	$F = 3.254$
优化值	$G_1^*(x_8^*) = 110.392$	$G_2^*(x_9^*) = 106.265$	$G_3^*(x_{10}^*) = 100.813$	$F^* = 3.084 \text{ kg/h}$

表 3

实际值	$x_1 = 1.0$	$x_2 = 1.0$	$x_3 = 1.0$	$x_4 = 0.3929$	$x_5 = 0.6071$	$x_6 = 0.3667$	$x_7 = 0.6333$	$x_8 = 103.170 \text{ kg/h}$	$x_9 = 103.170 \text{ kg/h}$	$x_{10} = 111.130 \text{ kg/h}$	$T_e = 284.79^\circ\text{C}$	$F = 3.245 \text{ kg/h}$
优化值	$x_1^* = 1.1755$	$x_2^* = 0.9046$	$x_3^* = 1.3748$	$x_4^* = 0.5442$	$x_5^* = 0.4558$	$x_6^* = 0.3837$	$x_7^* = 0.6163$	$x_8^* = 110.944$	$x_9^* = 105.734$	$x_{10}^* = 100.792$	$T_e^* = 288.71^\circ\text{C}$	$F^* = 2.991 \text{ kg/h}$

五、结束语

原油蒸馏的加热过程既是一个利用有效能量又是一个直接消耗能量的过程。单独的

换热网络操作优化的目的是如何最大地利用有效能量, 而单独的加热炉最佳热负荷分配问题的目的则是如何降低直接消耗的能量。

大规模多目标线性规划的新 算法及其应用

华东化工学院 自动化研究所 胡泽新 邵惠鹤 蒋慰孙

〔提要〕本文提出了求解大规模多目标线性规划问题的一种新方法。该方法考虑了决策者的知识、经验和思维方式,通过人机交互过程完成了多目标折衷。该方法通过引入罚系数构成增广拉格朗日函数,将一个线性规划问题变为一个非线性规划问题来处理。该方法利用大系统的分解协调原理对决策空间进行了分解,使原问题的求解规模大大减小。该方法具有所需计算机内存容量少、收敛速度快等优点。将该方法应用于某大型化工企业的生产计划优化模型。运算结果表明可取得显著的经济效益。

一、引言

许多社会、经济、生态、环境、工程等大型复杂系统的优化问题都可以归结为一个大规模多目标线性规划问题,因此如何开发这一问题的有效解法有着重要的意义。目前已有的方法〔1〕,是将大规模单目标线性规划的分解方法和小系统的多目标优化方法相结合得到的。这些方法有一个共同的缺点,就是计算复杂。针对这一情况,本文提出了一种新方法即交互式满意折衷分解方法(简称为ISTODM),克服了以上文献中存在的不足。

二、问题的描述

考虑由 N 个相互关联的子系统组成的复杂大系统的多目标线性规划问题,如图1所示。设 x_i 代表第 i 个子系统的决策向量。 $F = [F_1(x) \cdots F_k(x)]^T$, 其中 $F_i(x)$

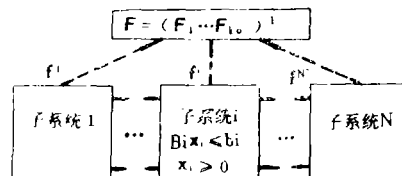


图1 系统和目标的结构
(目标用虚线表示)

在换热网络与加热炉为简单的串联关系时,这两个问题是一致的。然而实际过程中经常会遇到换热网络与加热炉之间存在关联(加热炉的对流段作为换热网络的一部分)的情况。本文通过分析实际过程系统关联的特殊性,提出了预估平衡协调法,很好地求解了联合系统的操作优化问题。计算机仿真结果表明,联合系统的操作优化会产生很好的经济效益。

参 考 文 献

〔1〕E. Sanchez, C. Foulard, Energy Saving in Crude Distillation process, Large

Scale, Systems, 4 (1983), 81~90

〔2〕何小荣等, 换热网络模拟系统, 《石油炼制》, 1982年, 第2期, P10~17

〔3〕石油化学工业部石油化工规划设计院, 《管式加热炉的工艺计算》, 石油工业出版社, 1979年

〔4〕北京炼油设计研究院、上海炼油厂, 上海炼油厂1^o蒸馏装置技术改造取得效果, 《石油炼制》1980年第8期, P1~14

〔5〕北京炼油设计研究院、上海炼油厂, “冷进料, 热油预热空气”改造小结, 《石油炼制》1980年, 第8期, P15

〔6〕叶银忠, 常减压蒸馏装置换热网络的操作优化, 华东化工学院研究生毕业论文, 1985年

〔7〕陈丙珍等, 换热网络的最优综合, 《石油炼制》, 1980年, 第12期, P20~26

〔8〕M.G. Singh, A. Titli, Systems Decomposition, Optimisation and Control, Pergamon Press, Oxford, 1978