

流量为 E_{n-1} 的冷凝水则直接排掉。

1.2 目标函数表达式

以图1所示系统的年总费用 J 为目标函数,可以表达为:

$$J = J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5 \quad (1)$$

式中, J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 采用文献[1]的模型计算,即

$$J_1 = 3600 \theta D_1 (a + bT_0) \quad (2)$$

$$J_2 = F_c \sum_{i=1}^n \{ [4400 + (B - 620)] \times 1.2 \times (0.667 + 0.0287 A_i) \cdot h_i \} \quad (3)$$

式中, $A_i = D_i r_i / (K_i \Delta t_i)$ (4)

$$J_3 = 3600 c_1 c_2 \theta (21 + 1450 V_w) V_w \rho (102 T_b) \quad (5)$$

$$J_4 = F_c f_1 f_2 \sum_{i=2}^n a_i V_{i-1}^b \quad (6)$$

预热系统各级预热器中的加热蒸汽是由相关效蒸发器中引出的额外蒸汽,其年操作费用是隐含在蒸发系统中,故 J_5 只考虑预热器的年设备折旧费用,用式(7)^[3]计算,

$$J_5 = F_c f_1 f_2 \sum_{j=1}^{n-1} a_2 A_{p,j}^b \quad (7)$$

由预热器的传热方程式和热量衡算式可得

$$A_{p,j} = Q_{p,j} / (K_{p,j} \Delta t_{m,j}) \quad (8)$$

$$Q_{p,j} = E_i r_i = F_0 c_0 (t_j^0 - t_{j-1}^0) \quad (9)$$

$$\Delta t_{m,j} = (t_j^0 - t_{j-1}^0) / \ln [(T_i - t_j^0) / (T_i - t_{j-1}^0)] \quad (10)$$

式(2)~(6)中 θ 、 a 、 b 、 F_c 、 B 、 h_i 、 Δt_i 、 r_i 、 c_1 、 c_2 、 V_w 、 ρ 、 T_b 、 f_1 、 f_2 、 a_1 、 b_1 、 V_{i-1} 的意义及取值或算法见文献[1],式(7)中换热器回归系数 a_2 、 b_2 和压力及材质矫正因子 f_1 、 f_2 的取值见文献[3],式(9)中 c_0 的定义见文献[1]。

1.3 系统物料衡算与热量衡算的矩阵方程

在对目标函数搜索寻优的每一步,都要求解蒸发系统的物料衡算与热量衡算非线性方程组以便得到所需 D_i 、 W_i 、 G_i 等参数值^[1],其计算量相当大。本文采用与文献[1,2]类似的方法对图1的流程进行物料衡算与热量衡算可得

$$W = \sum_{i=1}^n W_i = F_0 (1 - x_0 / x_n) \quad (11)$$

$$W_i = \{ \alpha_i D_i + [F_0 c_0 - c^* (W_i + \dots + W_{i-1})] \beta \} \eta \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} i = 1 \text{ 时, } D_i &= D \\ i \geq 2 \text{ 时, } D_i &= W_{i-1} - E_{i-1} + G_{i-1} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

$$\left. \begin{aligned} i \geq 3 \text{ 时, } G_{i-1} &= (D_i + W_i + \dots + W_{i-2}) c^* \alpha_{i-1} \\ i = 2 \text{ 时, } G_1 &= D_1 c^* \alpha \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式(12)中 α_i 、 β 、 η 、 c^* 的定义及算法见文献[2],式(14)中 α_{i-1} 、 α 的定义及算法见文献[1]。

把式(13)代入式(12)可得各效蒸发水分量 W_i ($i=1, 2, \dots, n$) 的计算式,由式(14)可得各效冷凝水闪蒸汽量 G_{i-1} ($i=2, 3, \dots, n$) 的计算式,由式(11)可得总蒸发水分量 W 的计算式,总共可得 $2n$ 个方程,待求的未知量也有 $2n$ 个(包括 D_i 、 W_i 、 W_2, \dots, W_n 、 G_1, G_2, \dots, G_{n-1})。将上述 $2n$ 个方程写成矩阵方程,其具体结构如下

$$\begin{bmatrix} A & A_3 \\ A_2 & A_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中 C_2 为零矩阵,块矩阵 A 、 B_1 、 C_1 分别与文献[2]的块矩阵 A 、 B 、 C 相同,块矩阵 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B_2 则与文献[1]的块矩阵 A_2 、 A_3 、 A_4 、 B_2 相同。用矩阵算法^[1,2]求解式(15)可得到上述 $2n$ 个参数。

2 目标函数的求解

2.1 系统决策变量分析

与文献[1]的目标函数相比,本文的目标函数中多了 J_5 。根据式(7)~(10)可知,影响 J_5 的独立变量为 $t_1^0, t_2^0, \dots, t_{n-1}^0 = t_0$ 共 $n-1$ 个,结合文献[1]的分析结果可知影响 J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 的独立变量为 T_0 、 $T_K, \Delta t_1, \Delta t_2, \dots, \Delta t_n$ 共 $n+2$ 个,故本文的优化设计问题是一个有约束的 $2n+1$ 维(即决策变量为 T_0 、 $T_K, \Delta t_1, \dots, \Delta t_n, t_1^0, \dots, t_{n-1}^0 = t_0$ 共 $2n+1$ 个)非线性规划问题,即

$$\min J = F(T_0, T_K, t_1^0, \dots, t_{n-1}^0 = t_0, \Delta t_1, \dots, \Delta t_n) \quad (16)$$

s. t.

$$\left. \begin{aligned} 100 &\leq T_0 \leq 180 \\ 30 &\leq T_K \leq 80 \\ \Delta t_i &\geq 5 \\ c &= \sum_{i=1}^n \Delta t_i = (T_0 - T_K) - \sum_{i=1}^n \Delta t_i \\ t_{j-1}^0 &< t_j^0 < T_i - 5 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

式(17)中 T_0 、 T_K 、 Δt_i 的不等式约束条件及 c 的等式约束条件是按文献[1]的方法确定; t_j^0 的不等式约束条件由传热知识确定:离开第 j 级预热器的淡碱液温度 t_j^0 必须比该级预热器中的加热蒸汽即从第 i 效蒸发器中引出的二次蒸汽温度 T_i 小 5°C ,又必须

大于进入该级预热器的淡碱液温度 t_{j-1}^0 。

2.2 预热系统决策变量及约束条件的转换

预热系统各级预热器的传热面积存在一最佳分配 $A_{p,j} (j = 1, 2, \dots, n - 1)$ 会使整个预热系统的传热面积最小, 而 $A_{p,j}$ 与 t_j^0 有关, 且最后一级 t_{n-1}^0 即等于进入第一效蒸发器的淡碱液温度 t_0 , t_0 又影响到蒸发系统的热量衡算。所以, 序贯预热系统不是一个独立的系统, 它与序贯蒸发系统密切相关。

包括多效蒸发和多级预热 2 个密切相关的序贯系统的最优化问题极为复杂, 未见有该问题求解的算法报道。该问题求解的一个主要困难是预热系统的决策变量 t_j^0 必须满足式(17)中的不等式约束条件, 这是一个动态约束问题, 因为不等式约束右端的 T_i 在搜索求解过程是变量。最优化方法中的动态约束问题是一个难题, 在寻找本文模型的求解算法之前, 为避免动态约束问题, 引入中间决策变量 $t_{m,j}^0$, 将预热系统的决策变量 t_j^0 转换成中间决策变量 $t_{m,j}^0$, t_j^0 的不等式动态约束亦相应转换为 $t_{m,j}^0$ 的不等式约束。 $t_{m,j}^0$ 的定义及约束范围分别如下。

$$t_{m,j}^0 = (t_j^0 - t_{j-1}^0) / (T_i - 5 - t_{j-1}^0) \quad (18)$$

$$\text{s.t.} \quad 0 < t_{m,j}^0 < 1 \quad (19)$$

在式(19)的约束范围内搜索 $t_{m,j}^0$, 然后由式(18)计算 t_j^0 。当 $j=1$ 时, $t_{j-1}^0 = t_0$ 是原料液的温度为已知值, 搜索得到 $t_{m,1}^0$ 后即可求出 t_1^0 , 类似可求出 $t_2^0, t_3^0, \dots, t_{n-1}^0 = t_0$, 计算过程所需的 T_i 根据文献[1, 2]的方法计算。 t_j^0 求出后即可计算 $A_{p,j}$, 进而计算 J_s 。

2.3 遗传算法结合拉格朗日乘法

经过上述转换后, 目标函数式(16)可表达为

$$\min J = F(T_0, T_K, T_{m,1}^0, \dots, t_{m,n-1}^0 = t_0, \Delta t_1, \dots, \Delta t_n) \quad (20)$$

现在, 本文系统的优化问题就是在约束条件下求式(20)的极小值问题。该问题的目标函数极为复杂, 包括多效蒸发和多级预热 2 个序贯系统, 对 n 效蒸发器有 $2n + 1$ 个决策变量, 其中决策变量 $T_0, T_K, \Delta t_i$ 的约束条件根据式(17)确定, 中间决策变量 $t_{m,j}^0$ 的约束条件根据式(19)确定。对于如此复杂的非线性多变量函数优化问题, 若采用传统的复合形法搜索寻优, 因其全局寻优能力差, 容易陷入局部最优。新兴的遗传算法^[4]具有很强的全局寻优能力及寻优效率高的特点, 近年来得到了快速发展与广泛应用, 但未见遗传算法在多效蒸发系统优化中应用的报道。本文首次用遗传算法解决多效蒸发系统的优化设计问题。

将目标函数式(20)的求解过程分解成两层, 外层决策变量为 $T_0, T_K, t_{m,j}^0$, 在各自的约束范围内采用遗传算法搜索寻优; 内层的决策变量为 Δt_i , 当 T_0, T_K 在遗传算法的每一代搜索中确定后, 满足式(17)中等式约束条件 c 的各效蒸发器最佳传热温度差可用文献[1]介绍的拉格朗日乘法确定, 即

$$\Delta t_i = c \sqrt{S_i D_i r_i / K_i} / \sum_{i=1}^n \sqrt{S_i D_i r_i / K_i} \quad (21)$$

式中, $S_i = 1.2 \times 0.0287[4400 + (B - 620)] h_i F_c$ 。

若式(21)计算的 Δt_i 不满足式(17)中 Δt_i 的不等式约束条件(即 $\Delta t_i < 5^\circ\text{C}$), 则必须返回重新随机产生 T_0, T_K 。

2.3.1 编码 目标函数的外层决策变量为 $n + 1$ 个实型变量(即 $T_0, T_K, t_{m,1}^0, \dots, t_{m,n-1}^0$) 可采用二进制编码方法, 根据精度要求每个变量可用 20 位二进制代码表示, 变量与代码的对应关系即解码公式为^[4]

$$x_k = a_k + \left[\frac{b_k - a_k}{2^{20} - 1} \right] \sum_{l=1}^{20} S_{k,l} 2^{l-1} \quad (22)$$

式中, x_k 为实型变量, 分别指代 $T_0, T_K, t_{m,j}^0$; $S_{k,l}$ 是二进制代码, 0 或 1; k 为变量序号, $k = 1, 2, \dots, n + 1$; l 是代码位号, $l = 1, 2, \dots, 20$; a_k, b_k 为变量的取值范围, 其中 $a_k \leq x_k \leq b_k$ 。

2.3.2 种群初始化及规模 初始种群一般随机产生, 种群规模凭经验确定。本文的种群规模取 40 个, 其中每代新产生 35 个个体, 5 个是上一代保留下来的优秀个体。保留部分上一代优秀个体可使算法更快、更稳定。

2.3.3 适应度的计算 由于所求问题是目标函数的最小化, 故适应度函数 $F(J)$ 可采用“界限构造法”^[4]来确定, 即

$$F(J) = \begin{cases} C_{\max} - J & J < C_{\max} \\ 0 & J \geq C_{\max} \end{cases} \quad (23)$$

其中, C_{\max} 为目标函数 J 的最大估计值, 取 3000000。

2.3.4 选择概率分配及轮盘赌选择法 选择概率分配采用基于排序的选择概率分配法, 种群按个体适应度进行排序。选择概率 p_i 用 Michalewicz 公式^[4]计算, 即

$$p_i = e(1 - e)^{i-1} \quad (24)$$

式中, i 为个体的排序号, e 为第一个个体的选择概率, 取 0.12。

选择方法采用轮盘赌选择法^[4]。为了选择交配个体, 要进行多轮选择, 每轮产生一个 $[0, 1]$ 的均匀随机数, 将随机数作为选择指针, 根据积累概率来确

定被选个体。

2.3.5 交叉 采用单点交叉方式。交叉概率太大会增加搜索时间,太小则无法保证新种群的多样性,本文取 0.65。

2.3.6 变异 二进制代码的变异实现方便,只要取要变异位代码的反码,即 $S' = 1 - S$ 。其中 S 为变异前代码, S' 为 S 变异后的代码。变异概率一般取 0.001 ~ 0.1, 本文取 0.08。

2.3.7 算法步骤 1) 随机产生 40 个初始化个体基因代码; 2) 基因解码, 求出目标函数值, 计算适应度; 3) 按适应度从大到小排序, 计算选择概率; 4) 根据选择概率采用轮盘赌选择法选择交叉个体, 进行交叉操作, 产生 35 个新个体代码; 5) 对新产生的 35 个新个体代码按 0.08 的概率进行变异操作; 6) 重复 2)、3)、4)、5) 的操作, 直到满足收敛条件要求为止。

3 算例及讨论

用三效并流蒸发装置浓缩淡碱。已知: 淡碱液量 $F_0 = 0.16667 \text{ kg/h}$, 年操作时间 $\theta = 7200 \text{ h/a}$, 淡碱

液浓度 $x_0 = 0.047$, 完成液浓度 $x_3 = 0.237$ (x_0 与 x_3 均为质量分率), 各效蒸发器传热系数分别为 $K_1 = 2320 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{C)}$ 、 $K_2 = 1740 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{C)}$ 、 $K_3 = 928 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{C)}$, 各级预热器传热系数相等即 $K_{p,1} = K_{p,2} = 500 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{C)}$ 。分别取淡碱液温度 t_0^0 为 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 。按以下几种情况进行设计: 1) 生蒸汽温度 $T_0 = 126.7 \text{ }^\circ\text{C}$, 冷凝器中二次蒸汽温度 $T_K = 59.6 \text{ }^\circ\text{C}$, 淡碱液不预热即 $t_0 = t_0^0$, 无冷凝水闪蒸, 按等面积原则常规设计; 2) 设计条件与 1) 相同, 用拉格朗日乘子法优化设计; 3) T_0 、 T_K 为变量, 其余设计条件与 1) 相同, 用遗传算法结合拉格朗日乘子法优化设计; 4) 淡碱液不预热, 有冷凝水闪蒸, T_0 、 T_K 为变量, 优化设计算法同 3); 5) 引出额外蒸汽预热淡碱液 t_0 为变量, 有冷凝水闪蒸, T_0 、 T_K 为变量, 优化设计算法同 3)。

将设计参数输入本文开发的软件, 计算结果见表 1。表 1 序号栏中 1) 2) 3) 4) 5) 分别代表算例中相应的 5 种情况。

表 1 设计结果

序号	t_0^0 ($^\circ\text{C}$)	T_0 ($^\circ\text{C}$)	T_K ($^\circ\text{C}$)	t_0 ($^\circ\text{C}$)	D_1 (kg/s)	A_1 (m^2)	A_2 (m^2)	A_3 (m^2)	$A_{p,1}$ (m^2)	$A_{p,2}$ (m^2)	J (万元/a)	节省年 总费用 (%)
1)	70	126.7	59.6	70	0.6085	73.42	73.42	73.42	0	0	650680.4	-
	50	126.7	59.6	50	0.6677	75.48	75.48	75.48	0	0	708042.9	-
2)	70	126.7	59.6	70	0.6048	64.14	63.95	89.01	0	0	646412.2	0.66
	50	126.7	59.6	50	0.6646	68.29	64.97	90.41	0	0	704530.0	0.50
3)	70	115.3	39.5	70	0.5718	70.02	71.79	100.00	0	0	607900.2	6.57
	50	115.5	38.8	50	0.6308	73.52	71.78	99.99	0	0	663448.3	6.30
4)	70	116.3	40.5	70	0.5534	66.92	69.27	99.93	0	0	591664.3	9.07
	50	116.4	39.7	50	0.6103	70.16	69.18	100.00	0	0	645670.5	8.81
5)	70	115.9	42.1	98.5	0.5165	65.89	70.07	97.46	15.48	19.71	563250.4	13.44
	50	115.1	41.4	97.7	0.5363	69.38	73.90	96.40	25.54	19.87	582300.1	17.76

从表 1 可知, 对序号 2) 即 T_0 、 T_K 为常量, 淡碱液不预热, 无冷凝水闪蒸的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况, 优化设计结果仅比序号 1) 相应的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况常规等面积设计节省年总费用 0.5% 左右, 说明各效有效温差 Δt_i 的分配影响不显著; 对序号 3) 即 T_0 、 T_K 为变量, 淡碱液不预热, 无冷凝水闪蒸的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况, 优化设计结果比序号 1) 相应的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况节省总费用 6% 左右, 说明 T_0 、 T_K 的影响显著; 对序号 4) 即 T_0 、 T_K 为变量, 有冷凝水闪蒸, 淡碱液不预热的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况, 优化设计结果比序号 1) 相应的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况节省年总费用 9% 左右, 说明除了 T_0 、 T_K 的影响显著以外, 冷凝水闪蒸亦是有效的节能措施; 对序号 5) 即 T_0 、 T_K 为变量, 引出额外蒸汽预热淡碱液, 有冷凝水闪蒸的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和

$50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况, 优化设计结果比序号 1) 相应的 $70 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 情况分别节省年总费用 13% 和 17% 左右, 说明除了 T_0 、 T_K 、冷凝水闪蒸的影响显著外, 引出额外蒸汽预热淡碱液节能效果显著, 且淡碱液温度越低预热节能的效果越显著。

4 结论

1. 采用引出额外蒸汽预热淡碱液、冷凝水闪蒸等节能措施的并流多效蒸发淡碱浓缩工艺优化设计模型包含了多效蒸发和多级预热 2 个密切相关的序贯系统, 提出一种新算法——遗传算法结合拉格朗日乘子法用于求解模型。算例表明, 新算法全局寻优效率高, 算法稳定, 收敛速度快。

2. 当 T_0 、 T_K 为变量并采用冷凝水闪蒸, 引出额

外蒸汽预热淡碱液时优化效果最显著,且淡碱液温度越低优化效果越好。故在并流多效蒸发淡碱浓缩工艺设计时应尽可能按本文的模型及算法进行优化设计,以追求最大的节能效果。

注:符号说明

- A_i ——第 i 效蒸发器传热面积, m^2
 $A_{p,j}$ ——第 j 级预热器传热面积, m^2
 D_1 ——生蒸汽流率, kg/s
 D_i ——第 i 效加热蒸汽流率, kg/s
 E_i ——第 i 效引出的额外蒸汽量, kg/s
 F_0 ——原料液流率, kg/s
 G_i ——第 i 效冷凝水闪蒸汽量, kg/s
 J ——蒸发系统的年总费用, 元/a
 J_1 ——年生蒸汽费用, 元/a
 J_2 ——蒸发器年折旧及维修费用, 元/a
 J_3 ——真空系统的年总费用, 元/a
 J_4 ——冷凝水闪蒸器年折旧及维修费用, 元/a
 J_5 ——预热系统的费用, 元/a
 K_i ——第 i 效蒸发器的传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$
 $K_{p,j}$ ——第 j 级预热器传热系数, $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$

- $Q_{p,j}$ ——第 j 级预热器传热速率, W
 T_0 ——加热生蒸汽的饱和温度, $^\circ C$
 T_i ——第 i 效二次蒸汽温度, $^\circ C$
 T_K ——冷凝器中二次蒸汽温度, $^\circ C$
 t_0 ——第 1 效蒸发器的进料温度, $^\circ C$
 t_0^0 ——原料液的温度, $^\circ C$
 $t_{m,j}^0$ ——预热系统的中间决策变量, 无因次
 t_j^0 ——第 j 级预热器出口淡碱液温度, $^\circ C$
 Δt_i ——第 i 效有效传热温度差, $^\circ C$
 $\Delta t_{m,j}$ ——第 j 级预热器的对数平均传热温度差, $^\circ C$
 W ——总蒸发水分量, kg/s
 W_i ——第 i 效蒸发水分量, kg/s
 x_0 ——料液浓度, 质量分率
 x_i ——第 i 效完成液浓度, 质量分率

参 考 文 献

- 1 阮 奇等. 多效蒸发系统优化设计目标函数的建立与求解. 计算机与应用化学, 2001(1):69~75.
- 2 阮 奇等. 并流多效蒸发淡碱浓缩的矩阵算法. 纺织学报, 2004(1):33~36.
- 3 葛维寰等. 化工过程设计与经济. 上海:上海科学技术出版社, 1987:84~86.
- 4 王小平等. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安:西安交通大学出版社, 2002.