

两种换热网络综合优化方法对比研究

刘新文^{1,2}, 罗 行^{1,3}, 马虎根¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 宁波工程学院 化学工程学院, 宁波 315016;
3. 汉诺威大学 动力工程学院, 汉诺威 D-30167)

摘要: 换热网络的全新优化设计 (grassroots design) 和换热网络的改造优化设计 (retrofit design) 均可提高过程工业能量综合利用效率. 为了对两种优化设计方法进行比较, 分别在分级超结构的基础上, 以费用函数为目标函数, 建立了两种换热网络综合优化方法的数学模型. 通过对混合遗传算法进行改进, 实现了对数学模型的优化求解, 并从节能水平、投资费用及投资回收期等方面对两种优化方法进行了对比. 结果表明, 通过对原有换热器单元的重新利用, 使得换热网络的改造优化设计虽然在节能水平方面稍低于换热网络的全新优化设计, 但在投资费用和投资回收期方面优势明显.

关键词: 换热网络; 全新设计; 改造设计; 节能
中图分类号: TK 124 **文献标志码:** A

Contrastive Studies on the Two Types of Optimal Synthesis Method of Heat Exchanger Network

LIU Xinwen^{1,2}, LUO Xing^{1,3}, MA Hugen¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;
2. School of Chemical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China;
3. Institute for Thermodynamics, Gottfried Wilhelm Leibniz University, Hannover D-30167, Germany)

Abstract: It is feasible for the grassroots design and retrofit design of the heat exchanger network (HEN) to enhance the efficiency of energy utilization for process industries. In order to realize the comparison of these two methods, the mathematical models with the objective function of cost were built on the base of the stepwise superstructure. The developed hybrid genetic algorithm was employed to solve them. The comparisons were done from the aspects of energy saving, capital cost and payback period of these two methods. The results demonstrate that the retrofit design is little worse than the grassroots design in energy saving, but much better in capital cost and payback period obviously by the way of reusing of existing heat exchangers.

Key words: heat exchanger network; grassroots design; retrofit design; energy saving

换热网络在许多工业过程中有广泛的应用,换热网络的效率在很大程度上制约了整个生产过程的用能效率^[1]. 换热网络综合优化是过程工业提高能量综合利用效率和节能的重要手段,可分为全新优化设计和换热网络的改造优化设计^[2]两种. 换热网络的全新优化设计是指不受原有换热网络的约束,设计满足冷热流股进出口温度需求的包括换热器费用和冷热公用工程费用的总费用最小的换热网络^[3]. 而换热网络的改造设计则是在充分考虑对原有换热网络结构和换热器单元充分利用的基础之上,设计满足冷热流股进出口温度需求的包括总改造费用和冷热公用工程费用的总费用最小的换热网络^[4]. 对于换热网络的全新优化设计而言,由于不考虑利用原有的换热网络的换热器单元和换热网络结构匹配,导致投资费用大幅度增加,但经过优化的换热网络的运行费用减少. 而换热网络的改造优化设计,能够充分利用原有的换热网络的换热器单元和换热网络结构匹配,投资费用会大大降低,而由于受到原有的换热网络结构和换热器单元的限制,运行费用减少的潜力则相对较小. 因此,对这两种优化设计方法进行对比分析,能够为高耗能企业选择适当的节能改造方法提供理论指导.

本文结合前期在换热网络改造方面研究成果^[5],对换热网络改造的两种方法分别建立数学模型,应用改进的混合遗传算法进行优化求解,并从节能潜力、投资费用及投资回收期等方面进行了对比研究.

1 换热网络综合优化数学建模

本文中换热网络(heat exchanger network, 简称 HEN)综合优化模型建立在 Yee 等^[6]的分级超结构基础之上. 整个 HEN 被分为 N_s 级($N_s = (k | k = 1, 2, \dots, N_s)$), N_s 取 N_h 和 N_c 的最大值,即 $N_s = \max\{N_h, N_c\}$. N_h 和 N_c 代表 HEN 的热、冷流股数目, $N_h = (i | i = 1, 2, \dots, N_h)$, $N_c = (j | j = 1, 2, \dots, N_c)$. k 为分级序号, i 为热流股序号, j 为冷流股序号. 每一级 HEN, 冷热流股都通过流股分流的方式实现相互匹配,匹配最大数目是 $N_h N_c$. 加热器和冷却器分别位于冷、热流股的末端.

1.1 约束条件

现介绍换热网络综合优化数学模型约束条件.

a. 流股热平衡.

$$(t_{H, \text{in}, i} - t_{H, \text{out}, i}) f_{h, i} = \sum_k \sum_j q_{ijk} + q_{\text{CU}, i}, \quad i \in N_h, j \in N_c, k \in N_s \quad (1)$$

$$(t_{C, \text{out}, j} - t_{C, \text{in}, j}) f_{c, j} = \sum_k \sum_i q_{ijk} + q_{\text{HU}, j} \quad (2)$$

式中, $q_{\text{CU}, i}$ 和 $q_{\text{HU}, j}$ 分别表示热流股 i 和冷流股 j 所需的冷、热公用工程负荷; $t_{H, \text{in}, i}$ 为热流股 i 在 $k = 0$ 级的进口温度; $t_{C, \text{in}, j}$ 为冷流股 j 在 $k = N_s$ 级的进口温度; $t_{H, \text{out}, i}$, $t_{C, \text{out}, j}$ 分别为热流股 i 和冷流股 j 的目标温度; $f_{h, i}$ 和 $f_{c, j}$ 分别为热流股 i 和冷流股 j 的总热容流率; q_{ijk} 表示换热器交换热负荷.

b. 换热器热平衡.

$$(t_{h, i, k} - t_{h, ijk}) f_{h, ijk} = (t_{c, ijk} - t_{c, j, k+1}) f_{c, ijk} = q_{ijk}, \quad i \in N_h, j \in N_c, k \in N_s \quad (3)$$

式中, $t_{h, ijk}$ 和 $t_{c, ijk}$ 分别是热流股 i 和冷流股 j 在第 k 级换热网络换热后相应的换热器出口温度; $f_{h, ijk}$ 和 $f_{c, ijk}$ 分别为热流股和冷流股热容流率; $t_{h, i, k}$ 和 $t_{h, i, k+1}$ 分别为热流股 i 在第 k 级和第 $(k+1)$ 级换热网络换热器换热前的进口温度; $t_{c, j, k}$ 和 $t_{c, j, k+1}$ 分别为冷流股 j 在第 k 级和第 $k+1$ 级换热网络换热混合后出口温度.

c. 第 k 级换热网络流股分流.

$$\sum_{j=1}^{N_c} f_{h, ijk} = f_{h, i} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{N_h} f_{c, ijk} = f_{c, j} \quad (5)$$

d. 第 k 级换热网络每一分流热能平衡.

$$\sum_{j=1}^{N_c} t_{h, ijk} f_{h, ijk} = t_{h, i, k+1} f_{h, i} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^{N_h} t_{c, ijk} f_{c, ijk} = t_{c, j, k} f_{c, j} \quad (7)$$

e. 每一流股的进口温度.

$$t_{H, \text{in}, i} = t_{h, i, 0} \quad (8)$$

$$t_{C, \text{in}, j} = t_{c, j, N_s} \quad (9)$$

f. 可行温度约束.

$$t_{h, i, k} \geq t_{h, ijk}, t_{c, j, k+1} \leq t_{c, ijk}, \quad t_{H, \text{out}, i} \leq t_{h, i, N_s}, t_{C, \text{out}, j} \geq t_{c, j, 0} \quad (10)$$

式中, $t_{c, j, 0}$ 为冷流股 j 在第 1 级出口温度.

g. 冷热公用工程负荷.

$$(t_{h, i, N_s} - t_{H, \text{out}, i}) f_{h, i} = q_{\text{CU}, i} \quad (11)$$

$$(t_{C, \text{out}, j} - t_{c, j, 0}) f_{c, j} = q_{\text{HU}, j} \quad (12)$$

式中, t_{h, i, N_s} 为热流股 i 在第 N_s 级出口温度.

h. 换热最小温差约束.

换热器

$$t_{h, i, k} - t_{c, ijk} \geq \Delta t_{\min}, t_{h, ijk} - t_{c, j, k+1} \geq \Delta t_{\min} \quad (13)$$

热公用工程

$$t_{HU,j,in} - t_{C,out,j} \geq dt_{min}, t_{HU,j,out} - t_{c,j,0} \geq dt_{min} \quad (14)$$

冷公用工程

$$t_{h,i,N_s} - t_{CU,i,out} \geq dt_{min}, t_{h,out,i} - t_{CU,i,in} \geq dt_{min} \quad (15)$$

式中, $t_{HU,j,in}$ 和 $t_{HU,j,out}$ 分别为热公用工程的进出口温度; $t_{CU,i,in}$ 和 $t_{CU,i,out}$ 分别为冷公用工程进出口温度; dt_{min} 是允许传热的最小温差.

i. 其它约束.

换热器面积 A 和热容流率 f 为连续变量且非负. $y_{ijk}, y_{CU,i}, y_{HU,j}$ 等(0-1)变量用于表示换热器、加热器和冷却器是否需要.

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & A_{ijk} > 0 \\ 0, & A_{ijk} \leq 0 \end{cases} \quad (16)$$

$$y_{CU,i} = \begin{cases} 1 & t''_{h,i} - t_{h,out,i} > 0 \\ 0 & t''_{h,i} - t_{h,out,i} \leq 0 \end{cases} \quad (17)$$

$$y_{HU,j} = \begin{cases} 1 & t_{c,out,j} - t''_{c,j} > 0 \\ 0 & t_{c,out,j} - t''_{c,j} \leq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中, A_{ijk} 表示热流股 i 和冷流股 j 在第 k 级换热网络匹配换热器所需换热面积; $t''_{h,i}, t_{h,out,i}$ 表示热流股 i 换热后温度和目标温度; $t''_{c,j}, t_{c,out,j}$ 表示冷流股 j 换热后温度和目标温度.

冷却器面积 $A_{CU,i}$, 加热器面积 $A_{HU,j}$ 能够通过下述方程求得:

$$A_{CU,i} = \begin{cases} \frac{f_{h,i}(t''_{h,i} - t_{h,out,i})}{U_{CU,i} \Delta t_{m,CU,i}}, & t''_{h,i} - t_{h,out,i} > 0 \\ 0, & t''_{h,i} - t_{h,out,i} \leq 0 \end{cases} \quad (19)$$

$$A_{HU,j} = \begin{cases} \frac{f_{c,j}(t_{c,out,j} - t''_{c,j})}{U_{HU,j} \Delta t_{m,HU,j}}, & t_{c,out,j} - t''_{c,j} > 0 \\ 0, & t_{c,out,j} - t''_{c,j} \leq 0 \end{cases} \quad (20)$$

为了求得换热面积 A_{ijk} 和热容流率 $f_{h,ijk}$ 和 $f_{c,ijk}$, 出口温度矩阵 $\mathbf{T}'' = [t''_1, t''_2, \dots, t''_{N_h}, t''_{N_h+1}, t''_{N_h+2}, \dots, t''_{N_h+N_c}]^T$, 应用文献[7]提出的 HEN 温度迭代方法求解. 此处, $t''_1, t''_2, \dots, t''_{N_h}$ 是热流股 N_h 个出口温度. $t''_{N_h+1}, t''_{N_h+2}, \dots, t''_{N_h+N_c}$ 是冷流股 N_c 个出口温度. 在式(19)和式(20)中, $\Delta t_{m,CU,i}, \Delta t_{m,HU,j}$ 分别表示热流出口温度与冷公用工程温度差和冷流出口温度与热公用工程温度差. $U_{CU,i}, U_{HU,j}$ 表示总换热系数, 假定为常量.

约束条件 c 用下述关系式校正:

$$f_{h,ijk} = \frac{f_{h,ik}}{N_c} \sum_{j=1} f_{h,ijk}^* \quad (21)$$

$$f_{c,ijk} = \frac{f_{c,jk}}{N_h} \sum_{i=1} f_{c,ijk}^* \quad (22)$$

上标 * 表示参数需要修正.

引入(0-1)变量 m_{ijk} 表示是否购置新换热设备.

$$m_{ijk} = \begin{cases} 1, & A_{ijk} \neq A_{ijk}^e \\ 0, & A_{ijk} = A_{ijk}^e \end{cases} \quad (23)$$

式中, A_{ijk}, A_{ijk}^e 分别表示在节点 ijk 处需要的换热器换热面积和原有的换热器换热面积.

z_{ijk} 也是(0-1)变量, 表示流股是否分流.

$$z_{ijk} = \begin{cases} 1, & (f_{h,ijk} < f_{h,i}) \cup (f_{c,ijk} < f_{c,j}) \\ 0, & (f_{h,ijk} = f_{h,i}) \cup (f_{c,ijk} = f_{c,j}) \end{cases} \quad (24)$$

1.2 目标函数

为了获得满足最优结构匹配和最少公用工程消耗的目标 HEN, 全新优化的目标函数被设计成包含冷热公用工程费用、加热器、冷却器和换热器费用. 改造优化的目标函数设计为包含冷热公用工程费用、加热器、冷却器和新增换热器费用及布管费用. 两类设计的换热器费用计算式为

$$C_f + CA^B \quad (25)$$

式(25)中的第一项 C_f 表示换热器的固定费用(\$), 第二项表示换热器面积费用. C, A, B 分别表示换热器面积费用系数、换热器面积和面积费用指数. 另外, C_{CU}, C_{HU} 分别表示单位冷热公用工程费用(\$). C_p 表示重新布置一条单管的费用(\$). 因此, 全新设计优化目标函数式为

$$\min \left[\sum_i \sum_j \sum_k ((C_f + CA_{ijk}^B) y_{ijk}) + \sum_i ((C_f + CA_{CU,i}^B) y_{CU,i}) + \sum_j ((C_f + CA_{HU,j}^B) y_{HU,j}) + \sum_i C_{CU} q_{CU,i} y_{CU,i} + \sum_j C_{HU} q_{HU,j} y_{HU,j} \right] \quad (26)$$

改造优化设计目标函数式为

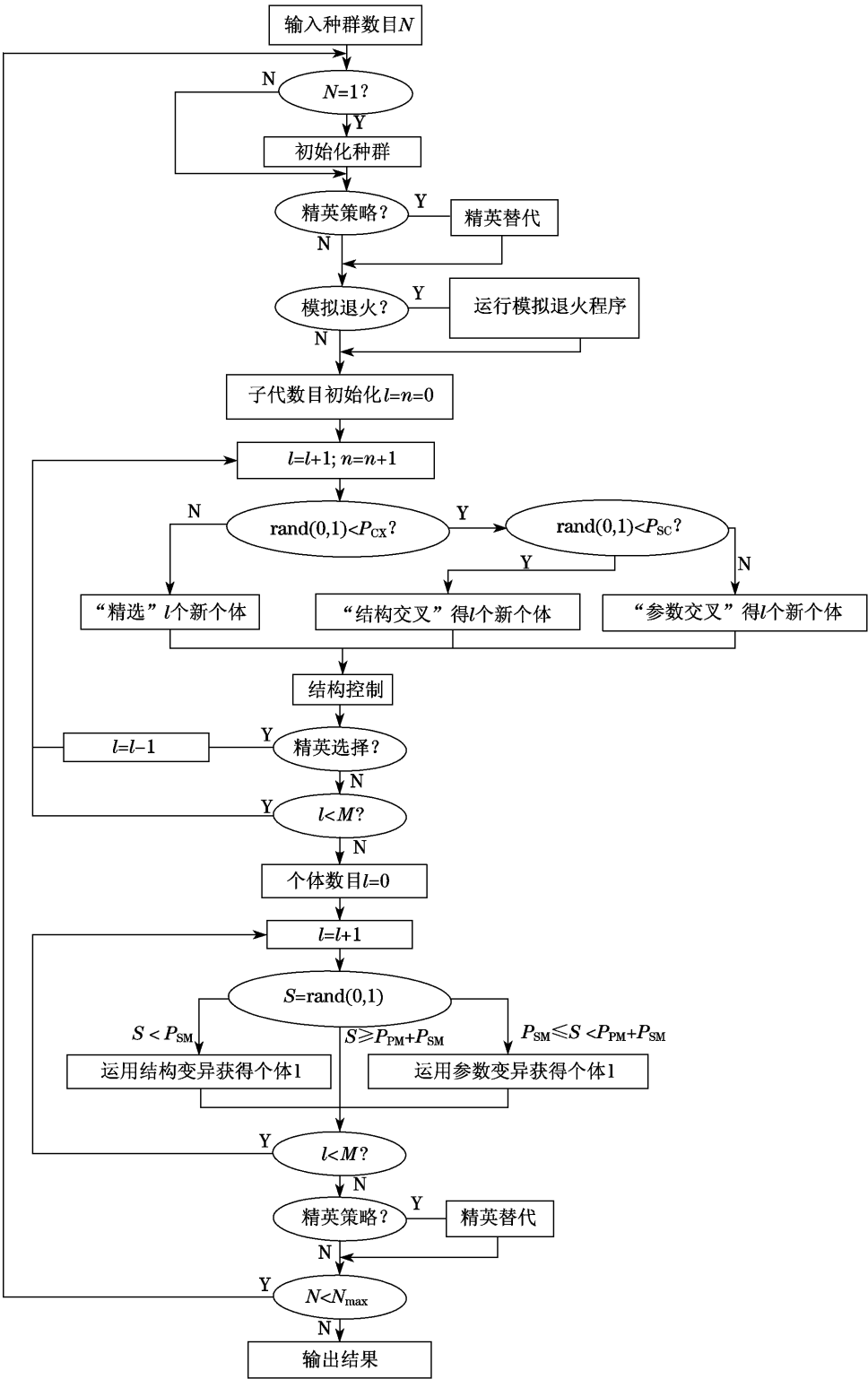
$$\min \left[\sum_i \sum_j \sum_k ((C_f + CA_{ijk}^B) y_{ijk} m_{ijk}) + \sum_i ((C_f + CA_{CU,i}^B) y_{CU,i}) + \sum_j ((C_f + CA_{HU,j}^B) y_{HU,j}) + \sum_i C_{CU} q_{CU,i} y_{CU,i} + \sum_j C_{HU} q_{HU,j} y_{HU,j} + \sum_i \sum_j \sum_k (C_p z_{ijk}) \right] \quad (27)$$

2 算法研究

由于 HEN 综合优化数学模型属于混合整数非

线性规划问题,存在非凸、多极值点和非连续的特点,经典的梯度优化方法极易陷入局部最优解.而根据 Luo 的研究,混合遗传算法具有较强的全局寻优

能力^[3],因此,本文采用混合遗传算法优化该数学模型,其算法流程如图 1 所示.当目标函数取得最优解时,即获得最优的换热网络综合改造方案.



P_{CX} 为交叉概率, P_{SC} 为结构交叉概率, P_{SM} 为结构变异概率, P_{PM} 为参数变异概率.
 l 为子代数目, n 为计算次数, M 为个体最大数目, N_{max} 为最大种群数目.

图 1 混合遗传算法流程图

Fig.1 Diagram of hybrid genetic algorithm

为了实现对已有换热网络结构和换热器的充分利用,减少改造费用,本文尝试对原有的混合遗传算法进行了改进.具体操作步骤如下:

步骤 1 对已有的换热网络按照文献[3]进行分级,并顺序从左至右进行编号;

步骤 2 原有换热器在换热网络中的位置通过 ijk 值表示, $ijk = (k - 1)N_h N_c + (i - 1)N_c + j$, ijk 值能够代表在第 k 级换热网络热流股 i 和冷流股 j 的匹配;

步骤 3 分析原有的 HEN 结构,并对原有 HEN 的换热器进行顺序编号,并计算 UA_{ijk}^e , U 为总换热系数, A_{ijk}^e 为热流股 i 和冷流股 j 在第 k 级匹配处的原有换热器面积;

步骤 4 原有的换热器 UA_{ijk}^e 作为精英算子直接引入到混合遗传算法;

步骤 5 修改混合遗传算法的相应位置程序.
当寻找新个体的 UA_{ijk} 不大于 UA_{ijk}^e , 购置新换热器的费用置为零, 即 $m_{ijk} = 0$; 否则, $m_{ijk} = 1$. 若分流, 则取 $z_{ijk} = 1$; 否则, $z_{ijk} = 0$. 换热网络改造流程如图 2 所示. 运行改进的混合遗传算法程序获得最优的换热网络改造方案.

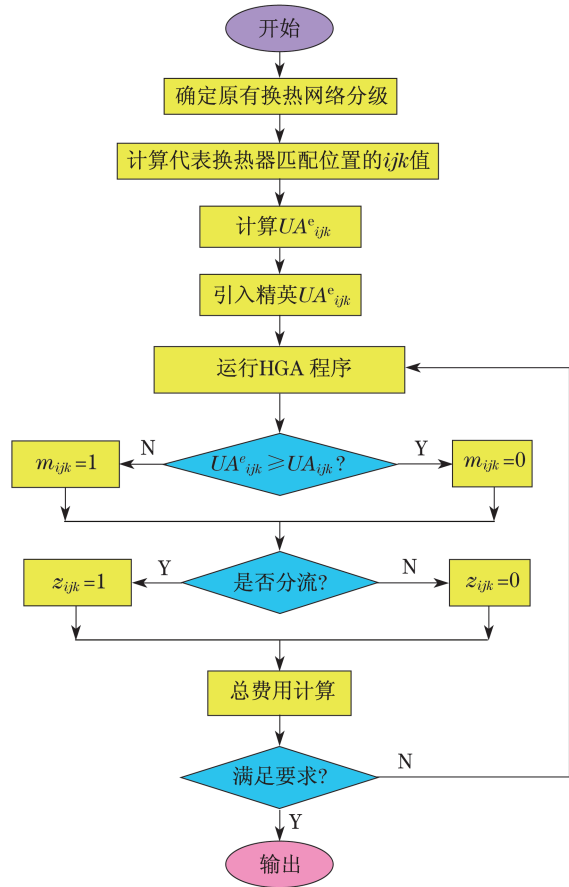


图 2 换热网络改造流程图
Fig.2 Diagram of HEN retrofit

3 实例研究与对比分析

本例取自文献[8],原油精馏单元的原有换热网络包括 7 股热流和 3 股冷流及一组冷、热公用工程. 冷热流股的进出口温度、换热系数和热容流率如表 1 所示. H1, H2, ..., H7 为热流股, C1, C2, C3 为冷流股, HU 为热公用工程, CU 为冷公用工程. 原有的换热网络结构如图 3 所示, 包括 6 组冷热流股匹配单元. 换热器、加热器、冷却器投资总费用为 2.86×10^6 美元. 冷热公用工程的需求分别为 1.0×10^5 kW 蒸汽和 6.6×10^4 kW 冷却水, 公用工程费用约为 $6.33 \times 10^6 / (\text{美元} \cdot \text{a}^{-1})$. 换热网络综合优化费用函数关系如表 2 所示. 其中, A 为新换热器面积, X 为原有换热器面积.

表 1 冷热流股的物性及费用数据

Tab.1 Characters and cost data of cold and hot streams

流股	热容流率/ (kW·℃ ⁻¹)	进口 温度/℃	出口 温度/℃	换热系数/ (kW·m ⁻² ·℃ ⁻¹)	单位费用/ (美元·kW ⁻¹ ·a ⁻¹)
H1	470.00	140	40	0.4	
H2	825.00	160	120	0.4	
H3	42.42	210	45	0.4	
H4	100.00	260	60	0.4	
H5	357.14	280	210	0.4	
H6	50.00	350	170	0.4	
H7	136.36	380	160	0.4	
C1	826.09	270	385	0.4	
C2	500.00	130	270	0.4	
C3	363.64	20	130	0.4	
HU		500	499	0.4	60
CU		20	40	0.4	5

表 2 换热网络综合优化费用函数关系

Tab.2 Cost function relationship of HEN optimization

项目	费用/美元
新换热器面积费用	300A
原有换热器面积费用	300X
换热器固定费用	0
原换热器移位费用 ^[9]	300
单流股布管费用 ^[9]	50

本文在分级超结构基础上分别建立了换热网络综合优化数学模型和改造优化数学模型,并应用混合遗传算法^[3]进行优化求解.结果表明,进行换热网络全新优化设计的换热网络结构包括 12 组冷热流股匹配单元(如图4所示).换热器、加热器、冷却器投资总费用

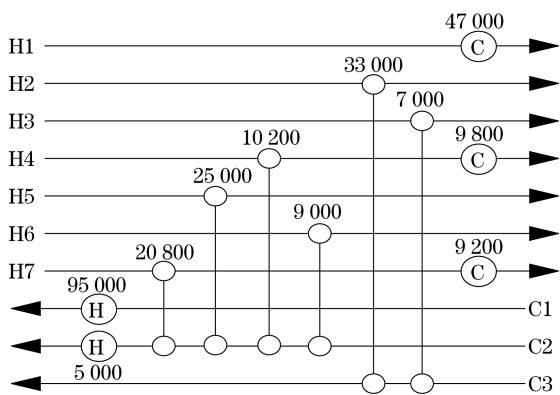


图3 换热网络结构原图

Fig.3 Structure of existing HEN

为 2.89×10^6 美元,与原换热网络的投资总费用相当。该换热网络所需的冷热公用工程蒸汽负荷为 9.24×10^4 kW和冷却水负荷为 5.84×10^4 kW,公用工程费用约为 $5.84 \times 10^6 / (\text{美元} \cdot \text{a}^{-1})$ 。较初始换热网络公用工程费用节省了 $4.9 \times 10^5 / (\text{美元} \cdot \text{a}^{-1})$ 。投资回收期约为 6 a。

换热网络改造优化结果表明,被改造的换热网络结构包括 11 组冷热流股匹配单元(图 5),位于分级超结构第 1 级的 H6C1 和 H6C2,第 2 级的 H6C2,第 3 级的 H5C2 和第 6 级的 H7C2 属于被改造换热网络新增换热单元。新增换热器和重新布管费用约 2.45×10^5 美元。该换热网络所需的冷热公用工程分别为 9.29×10^4 kW 蒸汽和 5.89×10^4 kW 冷却水,公用工程费用约为

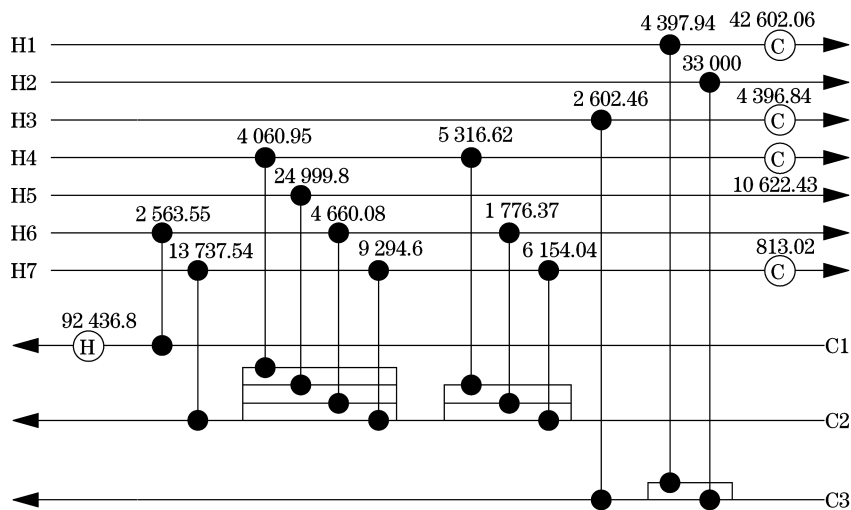


图4 换热网络全新优化设计方案

Fig.4 Grassroots design of HEN

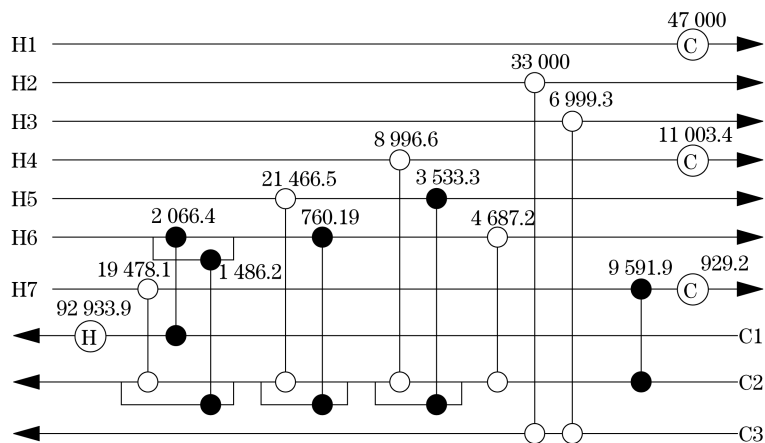


图5 换热网络改造优化设计方案

Fig.5 Retrofit design of HEN

$5.87 \times 10^6 / (\text{美元} \cdot \text{a}^{-1})$ 。公用工程费用较原换热网络的节省了 $4.6 \times 10^5 / (\text{美元} \cdot \text{a}^{-1})$,较全新优化设计换热

网络的节能潜力下降了0.05%。另外,为了确保热流股 H4 的出口温度,冷却器 H4CU 的换热面积需增加到

360.20 m²,即新增面积费用6 120美元.总改造费用为 2.51×10^5 美元.投资总费用较原有换热网络和全新改造换热网络分别节省了91.22%和91.31%.投资回收期约为0.546 a.

4 结 论

应用混合遗传算法实现了对换热网络的全新设计方案和换热网络改造优化设计方案的优化.实例优化结果表明:

a. 对换热网络进行全新设计能够实现更大程度的节能.与换热网络改造优化设计方案相比,换热网络全新设计方案的节能潜力提高了约0.05%;与原有的换热网络相比,换热网络全新设计方案和换热网络改造方案的节能潜力分别能提高约7.74%和7.27%.

b. 对换热网络进行改造设计能够大幅度节省投资费用.由于原有的换热器面积得到了重新利用,使得投资总费用较全新设计换热网络方案节省约91.31%.

c. 就投资回收期而言,换热网络全新设计最优方案的投资回收期约为6 a,而换热网络改造设计最优方案的投资回收期约为0.546 a.

参考文献:

- [1] 胡沛,崔国民.换热网络优化影响因素分析及局部最优解的跳出策略[J].上海理工大学学报,2013,35(5):479-483.
- [2] Björk K M, Nordman R. Solving large-scale retrofit heat

exchanger network synthesis problems with mathematical optimization methods [J]. Chemical Engineering and Processing, 2005, 44(8): 869-876.

- [3] Luo X, Wen Q Y, Georg F. A hybrid genetic algorithm for synthesis of heat exchanger networks [J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(6): 1169-1181.
- [4] Rezaei E, Shafiei S. Heat exchanger networks retrofit by coupling genetic algorithm with NLP and ILP methods [J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(9): 1451-1459.
- [5] Liu X W, Luo X, Ma H G. Studies on the retrofit of heat exchanger network based on the hybrid genetic algorithm [J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 62(2): 785-790.
- [6] 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.
- [7] 温卿云,罗行,姚平经,等.一种分级超结构换热器网络综合优化方法及其应用[J].上海理工大学学报,2007, 29(2): 103-108.
- [8] Ahmad S, Petela E. Supertarget: applications software for oil refinery retrofit [C] // AIChE Annual Meeting, 1987: 21-23.
- [9] Ciric A R, Floudas C A. A mixed integer nonlinear programming model for retrofitting heat-exchanger networks [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 1989, 29(2): 239-251.

(编辑:石 瑛)