文章编号：1008－8857(2015)03－0181－05 DOI：10.13259/j.cnki.eri.2015.03.011

一种新的换热网络改造方法探析
——基于原有网络拓扑结构和换热器的最优应用

刘新文[1]，罗 行[2]，黄 辉[1]
（1.宁波工程学院 化学工程学院，浙江 宁波 315016；2.上海理工大学 能源与动力工程学院，上海 200093）

摘 要：通过对原有换热网络的拓扑结构和换热器匹配进行分析，在有分流的分级超结构物理模型的基础上，提出了一种新的可满足一般技改要求的换热网络改造方法.该方法能够在对原有换热网络的拓扑结构和原有换热器面积充分利用并满足冷热流股进出口温度需求的同时，实现对原有换热网络的节能改造.同时建立了换热网络改造的数学模型，并应用混合遗传算法对其进行了求解.实例分析结果表明，该方法具有操作简单、节能潜力大以及投资回收期短等优点.

关键词：换热网络；改造；拓扑结构；节能潜力

中图分类号：TK 124 **文献标志码**：A

Discussion on a novel retrofit method of heat exchanger network: Based on the optimal application of the existing topology structure and heat exchangers

LIU Xinwen[1], LUO Xing[2], HUANG Hui[1]
(1.School of Chemical Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315016, China;
2.School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: A novel method which satisfied the general technical requirements of heat exchanger networks retrofit, was presented based on the step-wise superstructure with splits and the analysis of the topology structure and heat exchangers in the existing heat exchanger networks (HENs). This method could make the retrofitted HENs save energy with full utilization of the topology structure and the heat exchanger area in the existing HENs and meet the demands of the inlet and outlet temperatures of cold and hot streams. The mathematical model of HENs retrofit was built and the hybrid genetic algorithm was employed to solve this model. The case study results showed that this method had the advantages of simple operations, great energy-saving potentials, and short return cycle.

Keywords: heat exchanger network; retrofit; topology structure; energy-saving potential

换热网络作为过程工业能量管理和集成的重要手段，广泛应用于石油化工、能源动力、低温工程等领域[1].随着对能源合理、经济有效利用要求的不断提高，换热网络的综合优化引起了人们的

收稿日期：2014－04－03
基金项目：浙江省自然科学基金资助项目(LQ12B06002)；浙江省教育厅资助项目(Y201431687)
第一作者：刘新文(1978—)，男，博士. 研究方向：能量系统集成技术研究. E-mail：lxwen2003@163.com

高度重视.换热网络改造属于换热网络综合优化的重要分支,是石油化工等高耗能行业提高能量综合利用效率和节能的重要手段.但由于换热网络改造通常需要考虑原有的换热网络结构和设备,使得换热网络改造数学模型包括大量的约束条件,且目标函数复杂,求解难度很大,并且改造结果涉及到大量换热设备的更新和原换热网络拓扑结构的变化,并不适用于一般的节能改造要求.

通常节能改造是指由于市场需求、原料供应和生产方案等因素的影响,换热网络的边界条件发生变化,使原工艺条件下设计的网络变得不合理,所以适时调整网络,使其高效运行,是过程工业特别是石油化工常见的技改任务[2].改造设计过程中,为了节省投资和缩短工期,应尽可能保持原换热网络结构,最大限度地利用原有的换热器和管道.另外,由于装置平面的限制,应尽可能地减少新增换热器的位置[3].因此,换热网络改造设计必须满足的条件有[4]:① 与现有工艺流程相结合,在现有工艺流程基础上优化和完善;② 符合装置现有平面布置情况以及现场的安装施工条件;③ 装置的改造施工周期非常短,因此控制施工工作量也成为装置改造的重要制约因素;④ 节省改造投资.

本文在分析原有换热网络结构的基础上,提出了一种新的换热网络改造方法.该方法通过充分利用原有换热网络的拓扑结构和原有换热器面积,实现对原有换热网络节能改造,可满足一般的换热网络改造的要求.实例分析表明,该换热网络改造方法具有操作简单、节能潜力大和投资回收期短的优点.

1 换热网络综合优化数学建模

本文中换热器网络(heat exchanger networks,HENs)综合优化模型建立在 Yee 等[5]的分级超结构基础上.整个 HENs 分为 N_s 级($\mathcal{N}_s=(k\mid k=1,2,\cdots,N_s)$),$N_s$ 取 N_h 和 N_c 的最大值,即 $N_s=\max\{N_h,N_c\}$,其中 N_h 和 N_c 分别代表换热器网络的热、冷流股数,$\mathcal{N}_h=(i\mid i=1,2,\cdots,N_h)$,$\mathcal{N}_c=(j\mid j=1,2,\cdots,N_c)$.每一级换热器网络,冷、热流股都通过流股分流的方式实现相互匹配,匹配最大数为 $N_h\times N_c$.加热器和冷却器分别位于冷、热流股的末端.

1.1 约束条件

(1) 流股热平衡

$$(TH_{in,i}-TH_{out,i})fh_i=\sum_k\sum_j q_{ijk}+q_{CU,i}$$
$$(i\in\mathcal{N}_h,j\in\mathcal{N}_c,k\in\mathcal{N}_s)$$
$$(TC_{out,j}-TC_{in,j})fc_j=\sum_k\sum_i q_{ijk}+q_{HU,j}$$
$$(i\in\mathcal{N}_h,j\in\mathcal{N}_c,k\in\mathcal{N}_s)$$

式中:$q_{CU,i}$、$q_{HU,j}$分别表示热流股 i 和冷流股 j 所需的冷、热公用工程负荷;$TH_{in,i}$、$TC_{in,j}$分别为热流股 i 和冷流股 j 的进口温度;$TH_{out,i}$、$TC_{out,j}$分别为热流股 i 和冷流股 j 的目标温度;fh_i、fc_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.

(2) 换热器热平衡

$$(th_{i,k}-th_{ijk})fh_{ijk}=(tc_{ijk}-tc_{j,k+1})fc_{ijk}=q_{ijk}$$

式中:th_{ijk}、tc_{ijk}分别为热流股 i 和冷流股 j 在第 k 级换热网络换热后的相应的换热器出口温度;fh_{ijk}、fc_{ijk}分别为热流股和冷流股热容流率;$th_{i,k}$为热流股 i 在第 k 级换热网络换热器换热前的进口温度;$tc_{j,k+1}$为冷流股 j 在第$(k+1)$级换热网络换热混合后出口温度.

(3) 第 k 级换热网络流股分流

$$\sum_{j=1}^{N_c}fh_{ijk}=fh_i,\ \sum_{i=1}^{N_h}fc_{ijk}=fc_j$$

(4) 第 k 级换热网络每一流股热能平衡

$$\sum_{j=1}^{N_c}th_{ijk}\cdot fh_{ijk}=th_{i,k+1}\cdot fh_i$$
$$\sum_{i=1}^{N_h}tc_{ijk}\cdot fc_{ijk}=tc_{j,k}\cdot fc_j$$

(5) 每一流股的进口温度

$$TH_{in,i}=th_{i,0},\ TC_{in,j}=tc_{j,N_s}$$

(6) 可行温度约束

$$th_{i,k}\geqslant th_{ijk},tc_{j,k+1}\leqslant tc_{ijk},$$
$$TH_{out,i}\leqslant th_{i,N_s},TC_{out,j}\geqslant tc_{j,0}$$

式中,$tc_{j,0}$为冷流股 j 在第 1 级出口温度.

(7) 冷、热公用工程负荷

$$(th_{i,N_s}-TH_{out,i})fh_i=q_{CU,i}$$
$$(TC_{out,j}-tc_{j,0})fc_j=q_{HU,j}$$

式中,th_{i,N_s}为热流股 i 在第 N_s 级出口温度.

(8) 换热最小温差约束

换热器

$$th_{i,k}-tc_{ijk}\geqslant dt_{min},th_{ijk}-tc_{j,k+1}\geqslant dt_{min}$$

热公用工程

$$th_{u,j,in}-TC_{out,j}\geqslant dt_{min},$$
$$th_{u,j,out}-tc_{j,0}\geqslant dt_{min}$$

冷公用工程

$$th_{i,N_s} - tc_{u,i,out} \geqslant dt_{min},$$

$$TH_{out,i} - tc_{u,i,in} \geqslant dt_{min}$$

式中：$th_{u,j,in}$和 $th_{u,j,out}$分别为热公用工程的进、出口温度；$tc_{u,i,in}$、$tc_{u,i,out}$分别为冷公用工程进、出口温度；dt_{min}为允许传热的最小温差.

(9) 其它约束

换热器面积和热容流率均为连续变量且非负. y_{ijk}、$y_{CU,i}$、$y_{HU,j}$等取 0、1 值分别表示是否需要换热器、加热器和冷却器.

$$y_{ijk} = \begin{cases} 1, & A_{ijk} > 0 \\ 0, & A_{ijk} \leqslant 0 \end{cases}$$

$$y_{CU,i} = \begin{cases} 1, & th''_i - t_{out,i} > 0 \\ 0, & th''_i - t_{out,i} \leqslant 0 \end{cases}$$

$$y_{HU,j} = \begin{cases} 1, & tc_{out,j} - tc''_j > 0 \\ 0, & tc_{out,j} - tc''_j \leqslant 0 \end{cases}$$

式中：A_{ijk}为热流股 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；th''_i、$th_{out,i}$分别为热流股 i 换热后温度和目标温度；tc''_j、$tc_{out,j}$分别为冷流股 j 换热后温度和目标温度.

冷却器面积 $A_{CU,i}$、加热器面积 $A_{HU,j}$分别为

$$A_{CU,i} = \begin{cases} \dfrac{fh_i(th''_i - th_{out,i})}{U_{CU,i}\Delta t_{m,CU,i}}, & th''_i - t_{out,i} > 0 \\ 0, & th''_i - t_{out,i} \leqslant 0 \end{cases}$$

$$A_{HU,j} = \begin{cases} \dfrac{fc_j(tc_{out,j} - tc''_j)}{U_{HU,j}\Delta t_{m,HU,j}}, & tc_{out,j} - tc'' > 0 \\ 0, & tc_{out,j} - tc'' \leqslant 0 \end{cases}$$

式中：$U_{CU,i}$、$U_{HU,j}$分别为总换热系数，假定为常量；$\Delta t_{m,CU,i}$、$\Delta t_{m,HU,j}$分别表示热冷流股与冷热工程传热对数平均温差.

为了求得换热面积 A_{ijk}、热容流率 fh_{ijk}和 fc_{ijk}，求解出口温度矩阵 $\boldsymbol{T}'' = [t''_1, t''_2, \cdots, t''_{N_h}, t''_{N_h+1}, t''_{N_h+2}, \cdots, t''_{N_h+N_c}]^T$ 可应用 Chen 等[6]提出的换热器网络温度迭代方法. 此处，$t''_1, t''_2, \cdots, t''_{N_h}$分别为 N_h 个热流股的出口温度；$t''_{N_h+1}, t''_{N_h+2}, \cdots, t''_{N_h+N_c}$分别为 N_c 个冷流股的出口温度.

约束条件(3)校正为

$$fh_{ijk} = \frac{fh_{ik}}{\sum_{j=1}^{N_c} fh^*_{ijk}}, \quad fc_{ijk} = \frac{fc_{jk}}{\sum_{i=1}^{N_h} fc^*_{ijk}}$$

式中，上标“*”表示该参数需要校正.

引入 0－1 变量 m_{ijk}表示是否购置新换热设备.

$$m_{ijk} = \begin{cases} 1, A_{ijk} \neq A^e_{ijk} \\ 0, A_{ijk} = A^e_{ijk} \end{cases}$$

式中，A_{ijk}、A^e_{ijk}分别为在节点 ijk 处需要的换热器换热面积和原有的换热器面积.

z_{ijk}也是 0－1 变量，表示流股是否分流.

$$z_{ijk} = \begin{cases} 1, (fh_{ijk} < fh_i) \cup (fc_{ijk} < fc_j) \\ 0, (fh_{ijk} = fh_i) \cup (fc_{ijk} = fc_j) \end{cases}$$

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换热器网络，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以及布管费用. 两类设计的换热器费用 C_E 计算式为

$$C_E = C_f + C \cdot A^B$$

式中：C_f 为换热器的固定费用；等式右边第二项为换热器面积费用，C、A、B 分别为换热器面积费用系数、换热器面积和面积费用指数.

换热网络改造优化目标函数为

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

式中：C_{CU}、C_{HU}分别为单位冷、热公用工程费用；C_p 为重新布置一条单管的费用.

2　算法研究

由于换热网络改造数学模型属于混合整数非线性规划问题(MINLP)，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. 因此，本文采用 Luo 等[7]的研究，应用混合遗传算法优化求解. 为了实现对已有换热网络结构和换热器面积的充分利用，减少改造费用，对原有的混合遗传算法进行了改进. 具体操作步骤为：

(1) 对原有的换热网络进行结构分析，确定冷、热流股数、原有网络的换热器面积及匹配.

(2) 根据分级超结构理论,确定换热网络的分级.换热网络中冷、热流股数中较大者即为换热网络分级数.

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

(4) 引入新个体 A_{ijk},并与原有换热器 A^e_{ijk} 进行比较.当算法寻找新个体 A_{ijk} 等于 A^e_{ijk},购置新换热器的费用置为零,即 $m_{ijk}=0$;否则,$m_{ijk}=1$.

(5) 判断流股是否存在分流.

(6) 费用计算.若满足要求则输出结果,否则重复步骤(4)~(6).

具体改造程序流程图如图 1所示.

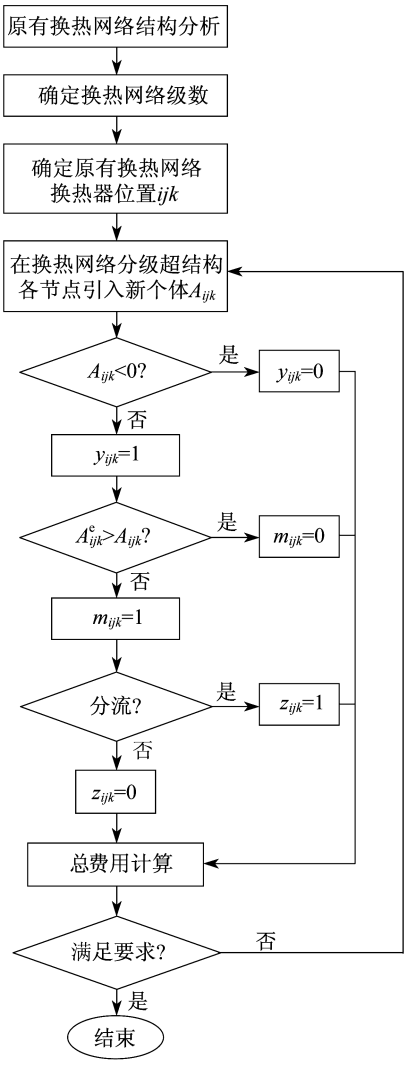

图 1 换热网络改造程序流程图

Fig. 1 Diagram of HEN retrofit program

3 实例研究与分析

本文实例取自文献[8],原油精馏单元原有换热网络包括 7 股热流和 3 股冷流及 1 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以及冷、热公用工程单位费用如表 1 所示.换热网络优化改造相关费用函数如表 2 所示,其中:A 为新增换热器面积;X 为原有换热器面积.

原有的换热网络结构如图 2 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 6.33×10^6 美元·a^{-1}.

表 1 冷、热流股的物性参数及费用

Tab. 1 Cost and properties 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 换热网络优化改造相关费用函数

Tab. 2 Cost function of heat exchanger network retrofit

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

图 3 为换热网络改造优化设计方案.经过改造的换热网络与原有换热网络相比,原有换热网络中的 6 组换热器,包括 H7C2、H6C2、H5C2、H4C2、H2C3、H3C3 的结构及匹配均未发生改变,加热器 HUC1 和冷却器 H1CU、H4CU、H7CU匹配也未发

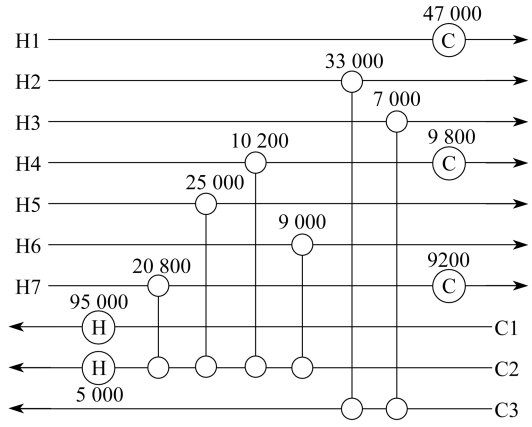

图 2　换热网络结构原图

Fig. 2　Existing heat exchanger network structure

生变化，但热负荷发生了变化. 其中，仅冷却器 H4CU 的换热面积需增加到 360.20 m^2，即新增面积费用 6 120 美元. 而被改造的换热网络(图 3)与原有网络结构(图 2)相比增加了 5 组换热单元，分别位于分级超结构第 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. 即总改造费用为 2.51×10^5 美元. 而经过改造的换热网络所需的冷、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5.87×10^6 美元·a^{-1}，较原有换热网络节省用能约 4.6×10^5 美元·a^{-1}. 投资总费用较原有换热网络节省91.22%，投资回收期约为 0.546 a.

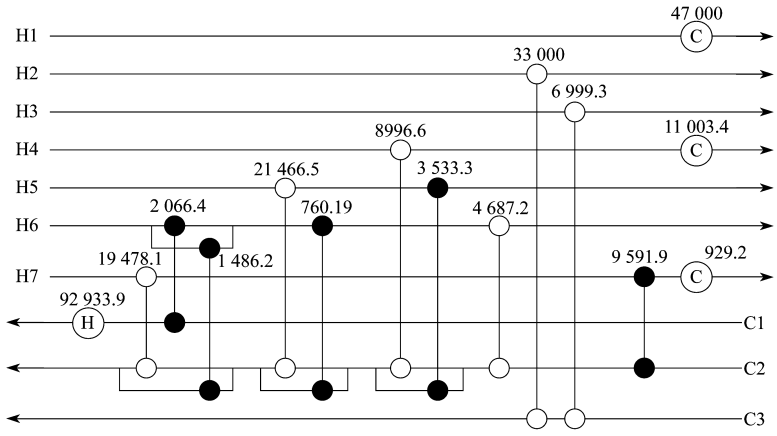

图 3　换热网络改造优化设计方案

Fig. 3　Retrofit scheme of heat exchanger network structure

4　结　论

通过充分利用已有的换热网络拓扑结构和换热器面积，能够较简单地实现对原有换热网络的节能改造. 同时，经过改造的换热网络表现出较大的节能潜力，且投资回收期短. 适用于一般的高耗能企业的节能升级改造.

参考文献：

[1] 许海珠，崔国民，万义群，等. 换热网络全局优化的多维峰谷轮换法[J]. 能源研究与信息，2014，**30**(1)：43－47.

[2] 李宏波. 常减压装置换热网络改造探析[J]. 石油化工设计，2011，**28**(3)：35－37.

[3] 颜如焱，李国庆，李亚军，等. 基于最小工程量和压力降考虑的换热网络改造[J]. 炼油技术与工程，2005，**35**(2)：53－56.

[4] 胡宇湘. 系统优化方法在常减压装置及其换热网络改造中的应用[J]. 上海化工，2002(17)：14－16.

[5] YEE T F, GROSSMANN I E. Simultaneous optimization models for heat integrationII. heat exchanger network synthesis [J]. Computers & Chemical Engineering, 1990, **14**(10): 1165－1184.

[6] CHEN D Z, YANG S S, LUO X. An explicit solution for thermal calculation and synthesis of superstructure heat exchanger networks [J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2007, **15**(2): 296－301.

[7] LUO X, WEN Q Y, FIEG G. A hybrid genetic algorithm for synthesis of heat exchanger networks[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, **33**(6): 1169－1181.

[8] AHMAD S, PETELA E. Supertarget: applications software for oil refinery retrofit [C]. Houston, Texas: AIChE Annual Meeting, 1987.

[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.