

有分流换热网络同步综合

霍兆义, 尹洪超*, 赵亮

(大连理工大学 能源与动力学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 提出了一种以年综合费用最小为优化目标的有分流换热网络同步综合方法. 该方法以分级超结构模型为基础建立一个不考虑等温混合假设的复杂混合整数非线性同步综合数学模型. 为了合理降低控制学模型的求解难度, 分级超结构中同时引入有分流并联结构和无分流串级结构. 该模型的求解采用双层优化策略, 外层利用遗传算法生成换热网络结构; 内层利用粒子群算法优化物流分流比和换热器热负荷. 采用两个典型算例和一个大规模换热网络综合问题对该方法的有效性进行了验证.

关键词: 有分流; 换热网络; 同步综合; 分级超结构; 混合整数非线性规划

中图分类号: TK124 **文献标志码:** A

0 引言

在过程工业能量系统优化设计领域, 换热网络综合方法一直是最受关注的研究方向之一. 它是过程工业中重要的能量回收子系统, 系统中有热工艺物流需要被冷却到理想温度, 而冷工艺物流则需要被加热到规定温度; 工艺物流通过彼此间的热量传递之后仍无法达到目标温度时可以从热/冷公用工程中获取必要的热量或冷量. 因此, 换热网络的合理设计直接关系到整个过程工业能量的利用水平和企业的运营成本.

换热网络优化设计一般是以网络的年综合费用最小为目标, 年综合费用由设备投资费用与运行费用组成^[1]. 设计方法的研究经过了近半个世纪的发展, 主要可划分为分步综合方法和同步综合方法^[2]. 分步综合方法是在优化算法和计算机技术无法满足复杂模型求解的情况下发展起来的, 利用分解策略将整个优化设计问题分解为几个相对独立的子问题逐步求解. 分解策略大大降低了设计问题的求解难度, 目前仍应用于大型复杂换热网络综合问题, 但该方法并没有权衡各子问题目标之间的关系, 因此无法保证得到的换热网络结构费用最优^[3]. 同步综合方法则是将整个

设计问题不经分解建立一个严格的数学模型进行求解, 该模型通常非常复杂, 为非线性、非凸、不连续的混合整数非线性数学规划问题(MINLP). 为简化模型的复杂度, Yee 等首次提出了分级超结构模型^[4], 在此基础上, 有分流^[5-6]与无分流^[7-8]换热网络同步综合方法相继提出. 无分流换热网络结构简单, 模型鲁棒性好, 可以利用传统的优化算法得到全局最优解; 无分流假设具有局限性, 很多合理结构被排除在可行解区域之外, 无法真正得到费用最优的网络结构. 有分流换热网络综合问题的数学模型较为复杂, 尤其是去除分流非等温混合假设时, 非线性项不仅存在于目标函数, 还存在于等式约束中, 现有优化算法很难得到该模型的全局最优解, 甚至无法找到较好的局部最优解.

本文以综合费用最小为目标, 以分级超结构模型为基础, 建立有分流换热网络同步综合模型. 该模型将有分流并联结构和无分流串级结构同时引入分级超结构中, 使模型在引入分流结构的同时, 可以通过限制存在分流结构的级数和分流数来控制模型的复杂度. 此外, 提出一种新的双层随机优化算法应用于该模型的求解.

收稿日期: 2011-08-20; 修回日期: 2012-11-27.

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(DUT12JN15).

作者简介: 霍兆义(1982-), 男, 博士生; 尹洪超*(1960-), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: hcyin@dlut.edu.cn.

1 问题描述

1.1 分级超结构模型

本文提出的换热网络分级超结构如图1所示. 超结构中包含2个热工艺物流和2个冷工艺物流,并被划分为两级,每一级中有 $N_h \times N_c$ 共4种可能匹配, N_h 为热物流数, N_c 为冷物流数. 在第1级中,工艺物流允许物流分流后再进行匹配换热,工艺物流在级入口分流,在级出口,流入下一级之前重新混合;在第2级中,各条热流股分别与各条冷流股串联匹配换热后,进入下一级. 图中 $H_i (i = 1, 2, \dots, N_h)$ 表示热工艺物流,流向是从左到右; $C_j (j = 1, 2, \dots, N_c)$ 表示冷工艺物流,流向是从右到左;冷热流体之间的连线和“●”表示换热匹配. 换热网络的级数为 N_k ,由设计者设定,一般不会大于冷/热工艺物流数的最大值. 冷/热公用工程换热器被设置在超结构的出口端.

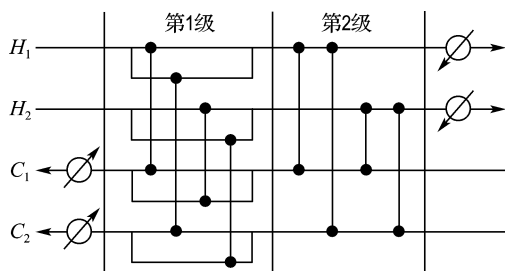


图1 换热网络分级超结构

Fig. 1 Stage-wise superstructure of heat exchanger network (HEN)

1.2 数学模型

基于分级超结构,建立 MINLP 模型,以年综合费用最小为优化目标设计换热网络结构. 年综合费用由设备投资费用和运行费用两部分组成,如下式所示:

$$\min C_a = \sum_{i=1}^{N_h} C_{cu} Q_{cu,i} + \sum_{j=1}^{N_c} C_{hu} Q_{hu,j} + \left[\sum_{m=1}^{N_c} (C_{ef} B_{em} + C_{ea} A_{em}) + \sum_{i=1}^{N_h} (C_{cf} B_{ci} + C_{ca} A_{ci}) + \sum_{j=1}^{N_c} (C_{hf} B_{hj} + C_{ha} A_{hj}) \right] \quad (1)$$

式中: C_{cu} 和 C_{hu} 分别是冷公用工程和热公用工程的单位价格; C_{ef} 、 C_{cf} 和 C_{hf} 分别为换热器、冷却器和加热器的固定投资费用系数; C_{ea} 、 C_{ca} 和 C_{ha} 分别为换热器、冷却器和加热器的面积费用系数;

B_{em} 、 B_{ci} 和 B_{hj} 为 0、1 二元变量,分别表示换热器、冷却器和加热器是否存在,1 表示存在,0 表示不存在; A_{em} 、 A_{ci} 和 A_{hj} 分别表示换热器、冷却器和加热器的换热面积; N_e 表示换热器数目.

模型的约束条件集合由等式约束和不等式约束组成.

(1) 等式约束

① 每条流股的热平衡

$$(T_{i,in} - T_{i,out})W_i = \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{j=1}^{N_c} Q_{ijk} + Q_{cu,i} \quad (2)$$

$$(T_{j,out} - T_{j,in})W_j = \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{N_h} Q_{ijk} + Q_{hu,j} \quad (3)$$

式中: W_i 、 W_j 分别表示热物流和冷物流的热容流量; $T_{i,in}$ 、 $T_{i,out}$ 分别表示热物流的初始和目标温度; $T_{j,in}$ 、 $T_{j,out}$ 分别表示冷物流的初始和目标温度; Q_{ijk} 表示工艺物流间的匹配换热量.

② 每一级间的能量平衡

$$(T_{i,k,in} - T_{i,k,out})W_i = \sum_{j=1}^{N_c} Q_{ijk} \quad (4)$$

$$(T_{j,k,out} - T_{j,k,in})W_j = \sum_{i=1}^{N_h} Q_{ijk} \quad (5)$$

式中: $T_{i,k,in}$ 、 $T_{i,k,out}$ 分别表示热物流每一级的入口和出口温度; $T_{j,k,in}$ 、 $T_{j,k,out}$ 分别表示冷物流每一级的入口和出口温度.

③ 非等温混合能量平衡

$$W_i T_{i,k,out} = \sum_{j=1}^{N_c} W_{phi,j,k} T_{phi,j,k,out} \quad (6)$$

$$W_j T_{j,k,out} = \sum_{i=1}^{N_h} W_{pci,j,k} T_{pci,j,k,out} \quad (7)$$

式中: $W_{phi,j,k}$ 、 $W_{pci,j,k}$ 分别表示热物流和冷物流分支热容流量; $T_{phi,j,k}$ 、 $T_{pci,j,k}$ 分别表示热物流和冷物流分支温度.

④ 分流质量平衡

$$W_i = \sum_{j=1}^{N_c} W_{phi,j,k} \quad (8)$$

$$W_j = \sum_{i=1}^{N_h} W_{pci,j,k} \quad (9)$$

(2) 不等式约束

① 最小换热温差约束

$$dT_{ijk} \geq \Delta T_{min}; dT_{cui} \geq \Delta T_{min}; dT_{hu,j} \geq \Delta T_{min} \quad (10)$$

式中: dT_{ijk} 、 dT_{cui} 、 $dT_{hu,j}$ 分别表示每个换热器、冷却器和加热器的换热温差; ΔT_{min} 为最小允许换热温差.

② 非负性约束

$$Q_{ijk} \geq 0; Q_{cu,i} \geq 0; Q_{hu,j} \geq 0 \quad (11)$$

2 优化算法

优化算法的选择一般依据待解决问题数学模型的性质和复杂度. 本文建立的有分流同步综合模型为严重非凸的 MINLP 问题. 目前应用于此类问题的算法多数为随机算法, 如遗传算法^[9]、模拟退火算法^[10]、禁忌算法^[11]、进化算法^[12]等. 这些算法不受模型的非线性、非凸性和不连续性所限制, 可以用来求解大规模复杂的优化问题. 虽然此类算法无法保证得到全局最优解, 但在合理时间内有能力搜索到较好的局部最优解. 每种优化算法均有其优势和局限性: 遗传算法(GA)更适合离散优化问题的求解, 按照适者生存和优胜劣汰原理, 初始种群借助于遗传算子进行选择、交叉和变异, 重新生成新的更加接近最优适应度值的新种群, 循环迭代直到满足优化准则为止; 而粒子群算法(PSO)是近些年来发展起来的解决连续优化问题最有效的方法之一. PSO 源于对鸟群觅食行为的研究, 采用最优解信息共享机制, 每个个体追随自身当前的最好位置和整个种群当前的最好位置在解空间内搜索, 直到找到满足要求的近似最优解^[13].

本文基于 GA 和 PSO, 提出一种有效的双层随机优化策略. 双层随机优化策略是将模型的离散变量与连续变量分别进行优化操作: 在外层, 换热网络的结构变量随机生成, 并利用遗传算法对离散结构变量进行操作和进化; 在每次迭代中, 外层得到的结构变量被传递到算法内层, 在结构参数确定的情况下, 换热器的换热负荷和分流比等连续优化变量则利用粒子群算法在解空间内进行搜索, 确定每个网络结构下的最小年综合费用. 双层随机优化算法的步骤如下:

步骤 1 输入初始物流数据, 设定优化算法固定参数;

步骤 2 随机生成换热网络结构初始种群;

步骤 3 对每个网络结构个体, 利用 PSO 对换热器换热负荷和分流比进行优化, 确定不同结构下的最小年综合费用;

步骤 4 依据优化目标——最小年综合费用, 利用 GA 进化网络结构种群;

步骤 5 评价收敛条件, 如果满足收敛条件, 输出最优结果, 停止计算; 如果不满足, 返回步骤 3, 继续迭代计算.

3 算例分析

算例 1 取自文献[7,14-16], 由 2 个热物流和 2 个冷物流及冷、热公用工程流股各 1 条组成, 物流参数如表 1 所示. 换热器、冷却器和加热器的传热膜系数均为 $0.2 \text{ kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$, 换热器费用为 $300 A^{0.5} \$ \cdot \text{a}^{-1}$, 热公用工程单位价格为 $C_{\text{hu}} = 110.0 \$ \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$, 冷公用工程单位价格为 $C_{\text{cu}} = 12.2 \$ \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

表 1 算例 1 物流数据

Tab. 1 Logistics data for Case 1

物流	初始温度/K	目标温度/K	热容流量/($\text{kW} \cdot \text{K}^{-1}$)
H_1	533	433	3.0
H_2	523	403	1.5
C_1	393	508	2.0
C_2	453	513	4.0
热公用工程	553	552	—
冷公用工程	303	353	—

模型求解采用 Matlab7. 7. 0 在 Window XP 系统下编程实现. 得到的最优年综合总费用为 11 632 \$, 与其他文献的最佳结果对比情况如表 2 所示, 对比结果表明本文得到的年综合费用最低. 最优换热网络结构如图 2 所示, 图中括号中数字代表热容流量, 其余数字为物流温度(单位 K). 对于本例, 无论是否在分级超结构模型中考虑分流结构, 最终得到的最优换热网络结构不存在分流. 值得注意的是, 不考虑分流的同步综合模型的复杂度和求解时间比有分流同步综合模型的会有显著降低.

表 2 算例 1 优化结果

Tab. 2 Optimal results for Case 1

方法	换热单元数	热公用工程消耗量/kW	冷公用工程消耗量/kW	年综合费用/\$
文献[14]	7	50.0	60.0	12 870
文献[15]	8	36.0	45.0	12 306
文献[16]	7	18.1	28.1	11 895
文献[7]	6	18.0	38.0	11 755
本文	7	17.8	27.8	11 632

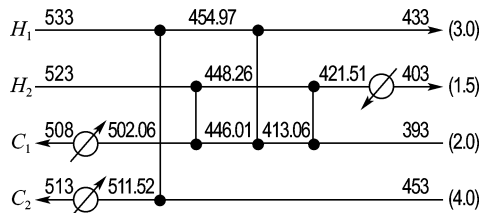


图 2 算例 1 的最优换热网络结构

Fig. 2 Optimal HEN structure for Case 1

算例 2 取自文献[12, 17-19],由 4 个热物流和 5 个冷物流及冷、热公用工程流股各 1 条组成,物流参数如表 3 所示. 换热器费用为 $2\,000 + 70A\ \$ \cdot \text{a}^{-1}$,热公用工程单位价格为 $C_{\text{hu}} = 110\ \$ \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,冷公用工程单位价格为 $C_{\text{cu}} = 12.2\ \$ \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$.

表 3 算例 2 物流数据
Tab. 3 Logistics data for Case 2

物流	初始 温度/K	目标 温度/K	热容流量/ ($\text{kW} \cdot \text{K}^{-1}$)	传热膜系数/ ($\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$)
H_1	600	313	100	0.50
H_2	493	433	160	0.40
H_3	493	333	60	0.14
H_4	433	318	400	0.30
C_1	373	573	100	0.35
C_2	308	437	70	0.70
C_3	358	411	350	0.50
C_4	333	443	60	0.14
C_5	413	573	200	0.60
热公用工程	603	523	—	0.50
冷公用工程	288	303	—	0.50

该例基于无分流分级超结构和有分流分级超结构分别进行建模求解. 无分流最优网络结构如图 3 所示,其年综合费用为 2 935 831 \$;有分流最优网络结构如图 4 所示,其年综合费用为 2 922 585 \$. 对于本例,有分流同步综合方法相比无分流可以得到费用更优的网络结构. 与其他文献的最优解对比情况如表 4 所示,对比结果显示本文得到的年综合费用最低.

算例 3 的研究是为了说明用本文提出的方法求解大规模实际换热网络的能力,其包含 10 条热

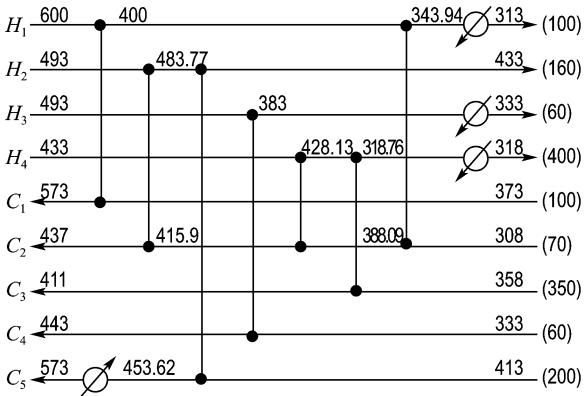


图 3 算例 2 的无分流最优换热网络结构
Fig. 3 Optimal HEN structure without stream splits for Case 2

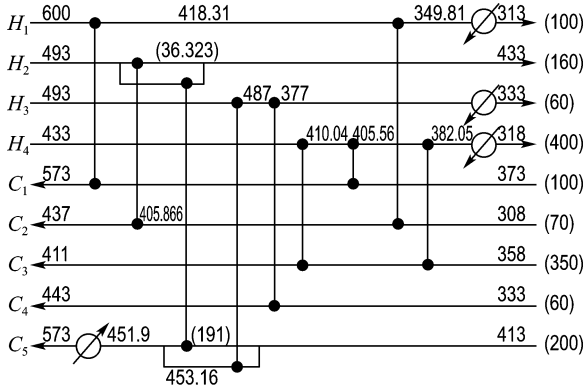


图 4 算例 2 的有分流最优换热网络结构
Fig. 4 Optimal HEN structure with stream splits for Case 2

表 4 算例 2 的优化结果

Tab. 4 Optimal results for Case 2

方法	换热 单元数	总换热 面积/ m^2	热公用 工程消耗 量/ kW	冷公用 工程消耗 量/ kW	年综合 费用/\$
文献[17]	10	16 380	26.83	34.55	2 980 000
文献[18]	14	17 724	25.09	32.81	2 970 836
文献[19]	12	17 050	25.09	32.81	2 936 000
文献[12]	15	16 536	25.88	33.60	2 942 000
本文(无分流)	11	18 452	23.88	31.60	2 935 831
本文(有分流)	13	17 882	24.22	31.94	2 922 585

流股和 10 条冷流股及冷、热公用工程流股各 1 条. 该算例取自文献[20],所有换热器的费用为 $8\,000 + 800A^{0.8}\ \$ \cdot \text{a}^{-1}$,冷、热公用工程单位价格分别为 10 和 70 $\$ \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$,其他物流参数如表 5 所示,算例 3 的最优网络结构见图 5.

此问题如果利用分级超结构模型考虑所有分流情况,将会包含大量的连续和离散优化变量,求解起来非常困难. Xiao 等^[20]利用多流股换热器网络综合非线性规划(NLP)模型和并行遗传/模拟退火算法求解该问题,获得的最优网络结构由 29 个单元设备组成,年综合费用为 1 827 772 \$. 本文提出的方法是将分流并联结构和无分流串联结构同时引入分级超结构中,同时通过限制流股分支数目,大大降低大规模换热网络综合问题的求解规模. 从求解效果看,本文得到的最优网络结构包含设备单元 22 个,年度总费用 1 765 307 \$,无论在结构复杂性还是在经济性方面均比文献[20]中有所改进. 由此可见,本文提出的方法对于实际大规模换热网络综合问题是有效的.

表 5 算例 3 物流数据
Tab. 5 Logistics data for Case 3

物流	初始 温度/K	目标 温度/K	热容流量/ (kW · K ⁻¹)	传热膜系数/ (kW · m ⁻² · K ⁻¹)
H ₁	453.2	348.2	30	2.00
H ₂	553.2	393.2	15	0.60
H ₃	453.2	348.2	30	0.30
H ₄	413.2	318.2	30	2.00
H ₅	493.2	393.2	25	0.08
H ₆	453.2	328.2	10	0.02
H ₇	443.2	318.2	30	2.00
H ₈	453.2	323.2	30	1.50
H ₉	553.2	363.2	15	1.00
H ₁₀	453.2	333.2	30	2.00
C ₁	313.2	503.2	20	1.50
C ₂	393.2	533.2	35	2.00
C ₃	313.2	463.2	35	1.50
C ₄	323.2	463.2	30	2.00
C ₅	323.2	523.2	20	2.00
C ₆	313.2	423.2	10	0.06
C ₇	313.2	423.2	20	0.40
C ₈	393.2	483.2	35	1.50
C ₉	313.2	403.2	35	1.00
C ₁₀	333.2	393.2	30	0.70
热公用工程	598.2	598.2	—	1.00
冷公用工程	298.2	313.2	—	2.00

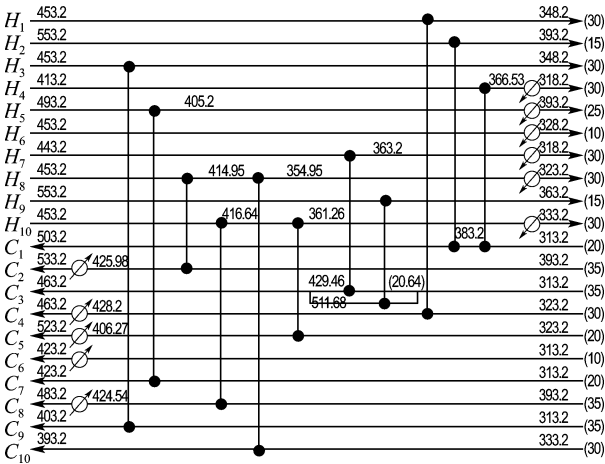


图 5 算例 3 的最优换热网络结构

Fig. 5 Optimal HEN structure for Case 3

4 结 论

(1)本文提出一种基于分级超结构的有分流换热网络同步综合模型,模型中同时引入了有分流并联结构和无分流串级结构.该方法在考虑分流结构的同时,可以通过限制存在分流结构的级数和流股分支数很好地控制模型复杂度.

(2)由于考虑物流分流及非等温混合,该模型为具有严重非线性、非凸、多峰的 MINLP 模型,

属于最难求解的 NP-hard 问题.本文采用由遗传算法和粒子群算法相结合的双层随机优化策略对模型进行求解,虽然无法保证得到问题的全局最优解,但可以在合理的求解时间内寻找到较好的局部最优解.

(3)本文采用两个经典算例和一个大规模换热网络综合问题验证所提出方法的有效性.算例 1 与算例 2 的研究结果表明:相比无分流模型,本文提出的有分流换热网络同步综合模型可以找到费用更优的网络结构;算例 3 则说明了该方法对求解大规模换热网络综合问题是有效的,在工程应用方面具有一定的实用价值.

参考文献:

[1] Masso A H, Rudd D F. Synthesis of system designs. 2. Heuristic structuring [J]. **AIChE Journal**, 1969, **15**(1):10-17.

[2] Furman K C, Sahinidis N V. A critical review and annotated bibliography for heat exchanger network synthesis in the 20th century [J]. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, 2002, **41** (10): 2335-2370.

[3] Pettersson F. Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 2005, **29**(5):993-1007.

[4] Yee T F, Grossmann I E, Kravanja Z. Simultaneous-optimization models for heat integration. 1. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 1990, **14**(10): 1151-1164.

[5] Bjork K M, Westerlund T. Global optimization of heat exchanger network synthesis problems with and without the isothermal mixing assumption [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 2002, **26**(11): 1581-1593.

[6] Yee T F, Grossmann I E. Simultaneous-optimization models for heat integration. 2. Heat-exchanger network synthesis [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 1990, **14**(10):1165-1184.

[7] 涂惟民,崔国民,李 瑜,等.以综合费用最小为目标的分流换热网络综合[J]. **化学工程**, 2011, **39**(5):90-93.

TU Wei-min, CUI Guo-min, LI Yu, et al. Synthesis of comprehensive cost-minimum heat exchanger networks with no stream splits [J]. **Chemical Engineering (China)**, 2011, **39**(5):90-93. (in Chinese)

- [8] Zamora J M, Grossmann I E. A global MINLP optimization algorithm for the synthesis of heat exchanger networks with no stream splits [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 1998, **22**(3): 367-384.
- [9] 王克峰,尹洪超,袁 一. 遗传算法最优同步综合换热网络[J]. 大连理工大学学报, 1997, **37**(1):54-58.
WANG Ke-feng, YIN Hong-chao, YUAN Yi. Synthesis of heat exchanger networks using genetic algorithm [J]. **Journal of Dalian University of Technology**, 1997, **37**(1):54-58. (in Chinese)
- [10] MA Xiang-kun, YAO Ping-jing, LUO Xing, *et al.* Synthesis of multi-stream heat exchanger network for multi-period operation with genetic/simulated annealing algorithms [J]. **Applied Thermal Engineering**, 2008, **28**(8-9):809-823.
- [11] LIN B, Miller D C. Solving heat exchanger network synthesis problems with Tabu search [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 2004, **28**(8): 1451-1464.
- [12] Yerramsetty K M, Murty C V S. Synthesis of cost-optimal heat exchanger networks using differential evolution [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 2008, **32**(8):1861-1876.
- [13] Kennedy J, Eberhart R. Particle swarm optimization [C] // **Proceedings of 1993 IEEE International Conference on Neural Networks**. Piscataway:IEEE, 1995.
- [14] Nielsen J S, Hansen M W, Joergensen S B. Heat exchanger network modelling framework for optimal design and retrofitting [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 1996, **20**(S1):S249-S254.
- [15] Khorasany R M, Fesanghary M. A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 2009, **33**(8):1363-1370.
- [16] Ahmad S. Heat exchanger networks:cost trade-offs in energy and capital [D]. Manchester:UMIST, 1985.
- [17] ZHU X X, O' Neill B K, Roach J R, *et al.* A method for automated heat exchanger network synthesis using block decomposition and non-linear optimization [J]. **Chemical Engineering Research & Design**, 1995, **73**(A8):919-930.
- [18] Lewin D R. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization - II. The synthesis of cost-optimal networks [J]. **Computers & Chemical Engineering**, 1998, **22**(10):1387-1405.
- [19] 涂惟民,崔国民,胡向柏,等. 填充打洞函数法优化换热网络[J]. 工程热物理学报, 2011, **32**(7): 1225-1227.
TU Wei-min, CUI Guo-min, HU Xiang-bai, *et al.* Heat exchanger network optimized with filling and tunneling function [J]. **Journal of Engineering Thermophysics**, 2011, **32**(7): 1225-1227. (in Chinese)
- [20] XIAO Wu, DONG Hong-guang, LI Xin-qiang, *et al.* Synthesis of large-scale multistream heat exchanger networks based on stream pseudo temperature [J]. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, 2006, **14**(5):574-583.

Simultaneous synthesis of heat exchanger network with stream splits

HUO Zhao-yi, YIN Hong-chao*, ZHAO Liang

(School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: A novel simultaneous synthesis approach is proposed for annual general cost-optimal heat exchanger network with stream splits. The presented method formulates a simultaneous synthesis mathematical model without the assumption of isothermal mixing, which is a complex mixed integer nonlinear mathematical programming model based on stage-wise superstructure model. In order to control the solution complexity of cybernetic model efficiently, the parallel structure with stream splits and series structures with no stream splits are considered simultaneously in the stage-wise superstructure. An efficient two-level optimization algorithm is used for solving the presented model. At the upper level, the network structures are optimized using genetic algorithm. At the lower level, heat load of units and stream-split heat flows are optimized through particle swarm optimization algorithm. Two benchmark problems and one large-scale synthesis problem of heat exchanger network are presented to show the applicability of the proposed methodology.

Key words: stream splits; heat exchanger network; simultaneous synthesis; stage-wise superstructure; mixed integer nonlinear programming