

大规模复杂换热网络联动进化障碍分析及策略改进

黄晓璜¹, 段欢欢^{1,2}, 徐玥¹, 肖媛¹, 崔国民¹

(1. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 河南牧业经济学院 能源与智能工程学院, 郑州 450000)

摘要: 针对启发式算法在优化大规模换热网络时出现优化精细度不足的问题, 提出一种以小负荷公用工程为导向的换热单元耦合联动强制进化策略。该策略以小负荷公用工程作为导向, 构建具有耦合关系的换热单元环路, 并对环路内的换热单元热负荷进行联动调整, 同时保持环路外换热单元的热负荷和流股匹配不变。该策略旨在最大程度回收流股的能量, 以减少小负荷公用工程使用带来的费用增加。将策略应用于强制进化随机游走算法并对两个算例进行测试, 算例 H8C7 和 H10C10 的优化结果分别为 1495292 \$/a 和 1713637 \$/a。与改进前相比, 分别降低了 7466 \$/a 和 7533 \$/a; 与文献中最优解相比, 分别减少了 2033 \$/a 和 1450 \$/a, 证明了该策略的有效性。

关键词: 换热网络综合; 联动进化障碍; 耦合联动; 启发式算法

中图分类号: TQ 021.8 **文献标志码:** A

Analysis of linkage evolutionary barrier and optimization strategy improvements for large-scale complex heat exchanger networks

HUANG Xiaohuang¹, DUAN Huanhuan^{1,2}, XU Yue¹, XIAO Yuan¹, CUI Guomin¹

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. School of Energy and Intelligence Engineering, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: A heat exchanger unit coupling and linkage forced evolution strategy, guided by low-load hot utility, was proposed to address the issue of insufficient optimization accuracy in heuristic algorithms for optimizing large-scale heat exchanger networks. This strategy focused on constructing a linked heat exchanger unit loops under the guidance of low-load hot utility, adjusting heat exchanger unit loads within the loops while ensuring consistency with units outside the loops. The goal was to maximize stream energy recovery and reduce costs associated with low-load hot utility usage. When applied to the

收稿日期: 2023-02-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (21978171, 51976126); 中国博士后科学基金资助项目 (2020M671171)

第一作者: 黄晓璜 (1988-), 女, 博士研究生。研究方向: 强化传热及系统过程优化。E-mail: huangxiaohuang@126.com

通信作者: 崔国民 (1969-), 男, 教授。研究方向: 强化换热及系统过程优化。E-mail: cgm@usst.edu.cn

引文格式: 黄晓璜, 段欢欢, 徐玥, 等. 大规模复杂换热网络联动进化障碍分析及策略改进[J]. 上海理工大学学报, 2024, 46(3): 271-283. DOI: 10.13255/j.cnki.jusst.20230221006

Citation: HUANG Xiaohuang, DUAN Huanhuan, XU Yue, et al. Analysis of linkage evolutionary barrier and optimization strategy improvements for large-scale complex heat exchanger networks[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2024, 46(3): 271-283.

random walk algorithm with compulsive evolution on two cases, the total annual costs (TACs) for cases H8C7 and H10C10 were 1495292 \$/a and 1713637 \$/a, respectively. Compared to previous results, TACs achieved a savings of 7466 \$/a and 7533 \$/a. In comparison to the best literature solutions, TACs observed reductions of 2033 \$/a and 1450 \$/a, demonstrating the efficacy of this strategy.

Keywords: *heat exchanger network synthesis; linkage evolutionary barrier; coupling linkage; heuristic algorithm*

换热网络是石油化工、能源、钢铁等领域重要的能量回收系统。换热网络优化旨在合理确定物流间匹配换热的结构以及相应的热负荷分配，确保每一过程物流由初始温度达到目标温度，从而实现最小的年综合费用 (total annual cost, TAC) 或最大的热回收量^[1]。这对于节能减排和提高能源的综合利用水平具有重要意义。

换热网络优化是典型的混合整数非线性规划难题^[2]。随着规模的增加，其复杂度急剧上升，局部极值点星罗棋布，寻找全局最优解极为困难。随着计算机技术的快速发展，模拟退火算法^[3]、遗传算法^[4]、微分进化算法^[5]、粒子群算法^[6-7]、布谷鸟算法^[8]以及强制进化随机游走算法(RWCE)^[9]等启发式算法因控制参数少、易实现、随机性，以及对目标函数和约束条件要求不高的特点，已成功应用于换热网络优化。然而，启发式算法在优化后期存在早熟收敛的问题，易陷入局部极值无法跳出。

研究者针对启发式算法的早熟收敛问题提出了多种改进策略。文献 [10] 使用模拟退火算法优化换热网络结构，并用粒子群算法对换热量进行优化，改进的粒子群算法表现出较强的鲁棒性。文献 [11] 为提高遗传算法的效率和搜索能力，引入了局部优化策略、自适应方案、精细策略以及结构识别和结构控制策略，成功降低了固定资产投资费用和公用工程费用。文献 [12-14] 分别基于微分进化算法提出改进措施，包括采用动态更新策略、多种群混合、根据实时种群多样性自适应调整缩放因子等策略来提升算法的全局优化性能。文献 [15] 提出了布谷鸟算法优化换热网络，并引入改进步长控制向量、设置最小热负荷、接受差解等优化策略，改进了鸟巢建立机制，增强了全局搜索能力。文献 [16] 基于 RWCE 算法建立了控制参数的动态协调策略，周期性更新种群个体的优化参数，实现个体优化路径的动态调整，从而寻找最佳的参数匹配，提高了全局优化能力。以

上启发式算法在控制参数设置、进化选择机制、提高种群多样性、多算法混合等方面进行了改进，但在优化后期仍存在进一步提高的空间。

通过对文献中的最优解结构进行分析，发现小负荷公用工程的使用成本相对较高。这些公用工程仅满足流股距离目标温度的小温差，却需要承担固定投资、面积和运行费用。因此，若能消除这些小负荷公用工程而不引入新的换热单元，就有望进一步降低年综合费用，展现出结构的进化潜力。然而，由于启发式算法具有一定的随机性，很难简单地通过调整控制参数来准确地消除小负荷公用工程而不引入新的换热单元。为实现这一目标，应以消除小负荷公用工程为导向，将其承担的热负荷转移到其他换热单元。然而，执行热负荷转移必然会带来其他费用的增加。只有当消除小负荷公用工程所带来的费用减少量大于转移热负荷所带来的费用增加量时，年度综合费用才会进一步降低。

热负荷的转移需要考虑换热单元之间的耦合关系。这种关系是指当同一流股的某个换热单元的热负荷发生变化时，会影响该流股的其他换热单元的热负荷，同时受到该换热单元影响的换热单元又会影响到其他换热单元。已有研究者利用换热单元耦合关系展开了研究，文献 [17] 为解决优化后期费用难以降低的问题，提出通过大概率选择少数几个换热器参与联动进化，小概率选择多个换热器参与联动进化，以提高算法的搜索效率和搜索精度。文献 [18] 提出了一种基于耦合关系的随机消去换热单元的方法，割裂换热单元之间的耦合关系，打破已形成的冷热流股的匹配关系，并重新建立新的匹配关系。文献 [19] 提出了结构识别方法，用于找到存在耦合关系的换热单元，建立具有耦合关系的换热单元间的联系，从而显著减少优化变量的数量以提高优化效率，并运用模拟退火算法优化换热网络，取得了比其他文献更好的结果。可见，利用换热单元之间的耦

合关系对换热网络结构进行局部调整, 效果明显。

考虑到小负荷公用工程仍有进化空间, 提出一种以小负荷公用工程为导向的换热单元耦合联动强制进化策略。该策略的实现包括分析换热单元联动进化过程中可能遇到的障碍, 选取符合条件的公用工程及与之具有耦合关系的换热网络环路, 并强制消去该公用工程。通过该策略消除小负荷公用工程的影响, 打破原有结构的僵局, 进而提高算法的全局和局部搜索能力。

1 换热网络优化问题模型

在一些工业生产过程中, 有些热流需要被冷却, 有些冷流需要被加热。为了充分利用能量, 通常利用热流来加热冷流, 同时利用冷流来冷却热流。换热网络优化旨在充分利用热流和冷流之间的能量交换, 以减少外部能源消耗, 实现最佳的经济效益。以 H2C2 算例为例的有分流换热网络节点非结构模型^[20], 如图 1 所示。

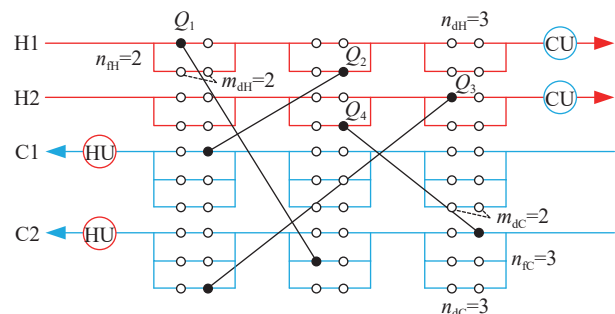


图 1 换热网络有分流节点非结构模型

Fig.1 Node-based non-structural model of heat exchanger network with stream splits

图 1 中: n_{dH} 和 n_{dC} 分别代表热节点组和冷节点组数; n_{dH} 和 n_{dC} 分别表示热分流比和冷分流比; m_{dH} 和 m_{dC} 分别表示热流体分支和冷流体分支上的节点数。热流体用红色箭头表示, 箭头指向右侧, 表示冷却方向, 标注为 H; 冷流体用蓝色箭头表示, 箭头指向左侧, 表示加热方向, 标注为 C。可能的换热器位置通过空心热节点和冷节点进行定位。随机匹配生成换热器后, 由一组黑色实心圆和它们之间的连接线表示一个换热器, 其上的 Q 表示该位置换热器的热负荷。HU 和空心圆圈的组合表示热公用工程, CU 和空心圆圈的组合表示冷公用工程。图 1 展示了两个热流体和两个冷流体, 共有 4 个换热器、2 个热公用工程和 2 个冷公用工程。

1.1 目标函数

换热网络优化数学模型包括目标函数和约束条件, 目标函数为最小年综合费用 f , 包括固定投资费用、面积费用和运行费用。目标函数如下:

$$\begin{aligned} \min f = & \sum_{n_{NH} \in N_{NH}} Z_{n_{NH}} (F_E + C_{AE} A_{n_{NH}}^\beta) + \\ & \sum_{i \in N_H} Z_i (F_C + C_{AC} A_{CU,i}^\beta + C_{CU} Q_{CU,i}) + \\ & \sum_{j \in N_C} Z_j (F_H + C_{AH} A_{HU,j}^\beta + C_{HU} Q_{HU,j}) \quad (1) \end{aligned}$$

等式右边第一项为换热器的固定投资费用和面积费用; 第二项为冷公用工程的固定投资费用、面积费用和运行费用; 第三项为热公用工程的固定投资费用、面积费用和运行费用。式中: i, j, n_{NH} 分别表示热流体、冷流体、热流体节点编号; F_E, F_C 和 F_H 分别是换热器、冷公用工程和热公用工程的固定投资费用; $Z_{n_{NH}}, Z_i$ 和 Z_j 是二元变量, 分别表示换热器、冷公用工程与热流体 i 、热公用工程与冷流体 j 的热交换情况; C_{AE}, C_{AC} 和 C_{AH} 是换热器、冷公用工程和热公用工程的面积费用系数; β 是面积费用指数; C_{CU} 和 C_{HU} 是冷、热公用工程的运行费用系数; $Q_{CU,i}$ 和 $Q_{HU,j}$ 分别表示第 i 股热流体的冷公用工程热负荷和第 j 股冷流体的热公用工程热负荷; $A_{n_{NH}}, A_{CU,i}$ 和 $A_{HU,j}$ 分别是换热器、冷公用工程和热公用工程的面积, 换热器面积 $A_{n_{NH}}$ 由式 (2)~(4) 计算可得。

$$A_{n_{NH}} = \frac{Q_{n_{NH}}}{U_{i,j} L_{n_{NH}}}, i \in N_H, j \in N_C, n_{NH} \in N_{NH} \quad (2)$$

$$U_{i,j} = \frac{h_i h_j}{h_i + h_j}, i \in N_H, j \in N_C \quad (3)$$

$$L_{n_{NH}} = \begin{cases} \frac{(T_{n_{NH}}^{\text{in}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{out}}) - (T_{n_{NH}}^{\text{out}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{in}})}{\ln \left(\frac{T_{n_{NH}}^{\text{in}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{out}}}{T_{n_{NH}}^{\text{out}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{in}}} \right)}, & T_{n_{NH}}^{\text{in}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{out}} \neq T_{n_{NH}}^{\text{out}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{in}} \\ \frac{(T_{n_{NH}}^{\text{in}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{out}}) + (T_{n_{NH}}^{\text{out}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{in}})}{2}, & T_{n_{NH}}^{\text{in}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{out}} = T_{n_{NH}}^{\text{out}} - T_{m_{n_{NH}}}^{\text{in}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $Q_{n_{NH}}$ 为第 n_{NH} 个热节点位置的换热器热负荷; $m_{n_{NH}}$ 为与第 n_{NH} 个热节点相连接的冷节点序号; $U_{i,j}$ 为热流体与冷流体间的传热系数; h_i 为第 i 股热流体的换热系数; $L_{n_{NH}}$ 为对数平均温差, 当换热器两端温差为 0 时, 采用算数平均温差计

算; $T_{n_{NH}}^{\text{in}}$, $T_{n_{NH}}^{\text{out}}$, $T_{m_{n_{NH}}}^{\text{in}}$ 和 $T_{m_{n_{NH}}}^{\text{out}}$ 分别表示第 n_{NH} 个热节点位置的换热器的进口温度、出口温度与第 n_{NH} 个热节点换热器相连接的冷节点 $m_{n_{NH}}$ 位置的进口温度、出口温度。

冷公用工程面积 $A_{CU,i}$ 的计算如式(5)~(8)计算可得。

$$A_{CU,i} = \frac{Q_{CU,i}}{U_{CU,i} L_{CU,i}}, \quad i \in N_H \quad (5)$$

$$U_{CU,i} = \frac{h_i h_{CU}}{h_i + h_{CU}}, \quad i \in N_H \quad (6)$$

$$L_{CU,i} = \begin{cases} \frac{(T_{n_{NH},i}^{\text{out}} - T_{CU,i}^{\text{out}}) - (T_{H,i}^{\text{target}} - T_{CU,i}^{\text{in}})}{\ln\left(\frac{T_{n_{NH},i}^{\text{out}} - T_{CU,i}^{\text{out}}}{T_{H,i}^{\text{target}} - T_{CU,i}^{\text{in}}}\right)}, \\ T_{n_{NH},i}^{\text{out}} - T_{CU,i}^{\text{out}} \neq T_{H,i}^{\text{target}} - T_{CU,i}^{\text{in}} \\ \frac{(T_{n_{NH},i}^{\text{out}} - T_{CU,i}^{\text{out}}) + (T_{H,i}^{\text{target}} - T_{CU,i}^{\text{in}})}{2}, \\ T_{n_{NH},i}^{\text{out}} - T_{CU,i}^{\text{out}} = T_{H,i}^{\text{target}} - T_{CU,i}^{\text{in}} \end{cases} \quad (7)$$

$$T_{n_{dH},i}^{\text{out}} = \sum_{n_{nH}=1}^{N_H} T_{i,n_{dH},n_{nH},M_{dH}}^{\text{out}} S_{i,n_{dH},n_{nH}}^H \quad (8)$$

式中: $U_{CU,i}$ 为热流体与冷公用工程间的传热系数; $L_{CU,i}$ 为热流体与冷公用工程换热对数平均温差; $T_{CU,i}^{\text{in}}$, $T_{CU,i}^{\text{out}}$ 和 $T_{H,i}^{\text{target}}$ 为第 i 股热流体的冷公用工程的入口温度、出口温度和目标温度; h_{CU} 为冷公用工程对流换热系数; $T_{n_{dH},i}^{\text{out}}$ 为第 i 股热流体第 n_{dH} 个节点组的流股非等温混合后的出口温度, 表示各分支流股的出口温度 $T_{i,n_{dH},n_{nH},M_{dH}}^{\text{out}}$ 与分流比 $S_{i,n_{dH},n_{nH}}^H$ 的积的累加值。同理可得冷流体与热公用工程换热面积 $A_{HU,j}$, 冷流体与热公用工程间的传热系数 $U_{HU,j}$, 热流体与冷公用工程对数换热平均温差 $L_{HU,j}$ 相关参数。

1.2 主要约束条件

主要约束条件包括换热网络中流体热平衡、换热单元热平衡、公用工程热平衡和分流比约束等, 具体如式(9)~(20)所示。

a. 流体热平衡。

$$(T_{H,i}^{\text{in}} - T_{H,i}^{\text{target}}) M_i^H = \sum_{n_{dH}=1}^{N_H} \sum_{n_{nH}=1}^{N_H} \sum_{m_{dH}=1}^{M_{dH}} Q_{i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}} + Q_{CU,i}, \quad i \in N_H \quad (9)$$

$$(T_{C,j}^{\text{target}} - T_{C,j}^{\text{in}}) M_j^C = \sum_{n_{dC}=1}^{N_{dC}} \sum_{n_{nC}=1}^{N_{nC}} \sum_{m_{dC}=1}^{M_{dC}} Q_{j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}} + Q_{HU,j}, \quad j \in N_C \quad (10)$$

式中: $T_{H,i}^{\text{in}}$, $T_{C,j}^{\text{target}}$, $T_{C,j}^{\text{in}}$ 分别是第 i 股热流体的入口温度、第 j 股冷流体的目标温度、第 j 股冷流体的入口温度; M_i^H , M_j^C 分别是第 i 股热流体、第 j 股冷流体的热容流率; $Q_{i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}}$ 为第 i 股热流体第 n_{dH} 节点组第 n_{nH} 分支第 m_{dH} 分支节点位置的换热器热负荷; $Q_{j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}}$ 为第 j 股冷流体第 n_{dC} 节点组第 n_{nC} 分支第 m_{dC} 分支节点位置的换热器热负荷。式(9)与式(10)表示一股流体的所有换热器热负荷与公用工程热负荷之和应与该流体的潜在热量相平衡。

b. 换热单元热平衡。

$$Q_{i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}} = (T_{H,i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}}^{\text{in}} - T_{H,i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}}^{\text{out}}) M_i^H S_{i,n_{dH},n_{nH}}^H, \quad i \in N_H \quad (11)$$

$$Q_{j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}} = (T_{C,j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}}^{\text{out}} - T_{C,j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}}^{\text{in}}) M_j^C S_{j,n_{dC},n_{nC}}^C, \quad j \in N_C \quad (12)$$

$$Q_{CU,i} = \left(\left(\sum_{n_{nH}=1}^{N_H} T_{H,i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}}^{\text{out}} S_{i,n_{dH},n_{nH}}^H \right) - T_{H,i}^{\text{target}} \right) M_i^H \quad (13)$$

$$Q_{HU,j} = \left(T_{C,j}^{\text{target}} - \left(\sum_{n_{nC}=1}^{N_{nC}} T_{C,j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}}^{\text{out}} S_{j,n_{dC},n_{nC}}^C \right) \right) M_j^C \quad (14)$$

式中: $T_{H,i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}}^{\text{in}}$, $T_{H,i,n_{dH},n_{nH},m_{dH}}^{\text{out}}$ 分别为第 i 股热流体第 n_{dH} 个节点组第 n_{nH} 个分支的第 m_{dH} 个分支节点上的换热器进口温度、出口温度。 $T_{C,j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}}^{\text{in}}$, $T_{C,j,n_{dC},n_{nC},m_{dC}}^{\text{out}}$ 为第 j 股冷流体第 n_{dC} 个节点组第 n_{nC} 分支的第 m_{dC} 个分支节点上的换热器进口温度、出口温度; $S_{j,n_{dC},n_{nC}}^C$ 为第 j 股冷流体第 n_{dC} 个节点组第 n_{nC} 分支上的分流比。

c. 冷热公用工程热平衡。

$$(T_{H,i}^{\text{out}} - T_{H,i}^{\text{target}}) M_i^H = Q_{CU,i}, \quad i \in N_H \quad (15)$$

$$(T_{C,j}^{\text{target}} - T_{C,j}^{\text{out}}) M_j^C = Q_{HU,j}, \quad j \in N_C \quad (16)$$

冷热公用工程热平衡表示流体出口温度与目标温度不足部分的热负荷由冷、热公用工程进行补充。

d. 分流比约束。

同一节点组上不同分支的分流比应满足式(17)~(20)的约束条件。表示同一节点组上分流比之和为1, 且分流比为0~1之间的数。

$$\sum_{n_{\text{H}}=1}^{N_{\text{H}}} S_{i,n_{\text{dH}},n_{\text{H}}}^{\text{H}} = 1.0, \quad n_{\text{H}} = 1, 2, \dots, N_{\text{H}} \quad (17)$$

$$\sum_{n_{\text{C}}=1}^{N_{\text{C}}} S_{j,n_{\text{dC}},n_{\text{C}}}^{\text{C}} = 1.0, \quad n_{\text{C}} = 1, 2, \dots, N_{\text{C}} \quad (18)$$

$$0.0 \leq S_{i,n_{\text{dH}},n_{\text{H}}}^{\text{H}} \leq 1.0 \quad (19)$$

$$0.0 \leq S_{j,n_{\text{dC}},n_{\text{C}}}^{\text{C}} \leq 1.0 \quad (20)$$

2 换热单元联动进化障碍分析

H22C17 算例是换热网络优化中的经典大规模算例, 包含 22 股热流体和 17 股冷流体, 其流体及费用参数见文献 [21]。由于涉及大量流股和类似的流股参数, 容易导致换热网络中出现许多局部极值点, 且后期的结构变异难度较大。为了分析

在算法优化过程中陷入停滞、无法摆脱局部最优解的现象, 下面以该算例为例, 探讨换热单元之间的耦合关系及可能遇到的进化障碍。

图 2 为使用 RWCE 算法 [9] 获得的换热网络结构。主要参数设置如下: 种群规模为 10, 最大游走步长为 100 kW, 新生成最大换热量为 150 kW, 新生成换热器概率为 0.2, 接受差解概率为 0.01。具有耦合关系的换热单元可以形成独立的环路, 这表示该环路中换热单元参数变化不会影响结构中的其他换热单元。根据是否存在公用工程, 将环路分为 3 类。第 1 类是不存在公用工程的环路, 第 2 类是存在一个公用工程的环路, 第 3 类是存在两个公用工程的环路, 具体分类如图 3 所示。

在图 2 的 C3 流股上有一个热负荷为 59.65 kW 的小负荷热公用工程。为了避免生成新的换热单元增加费用, 对包含该公用工程的环路进行如图 4

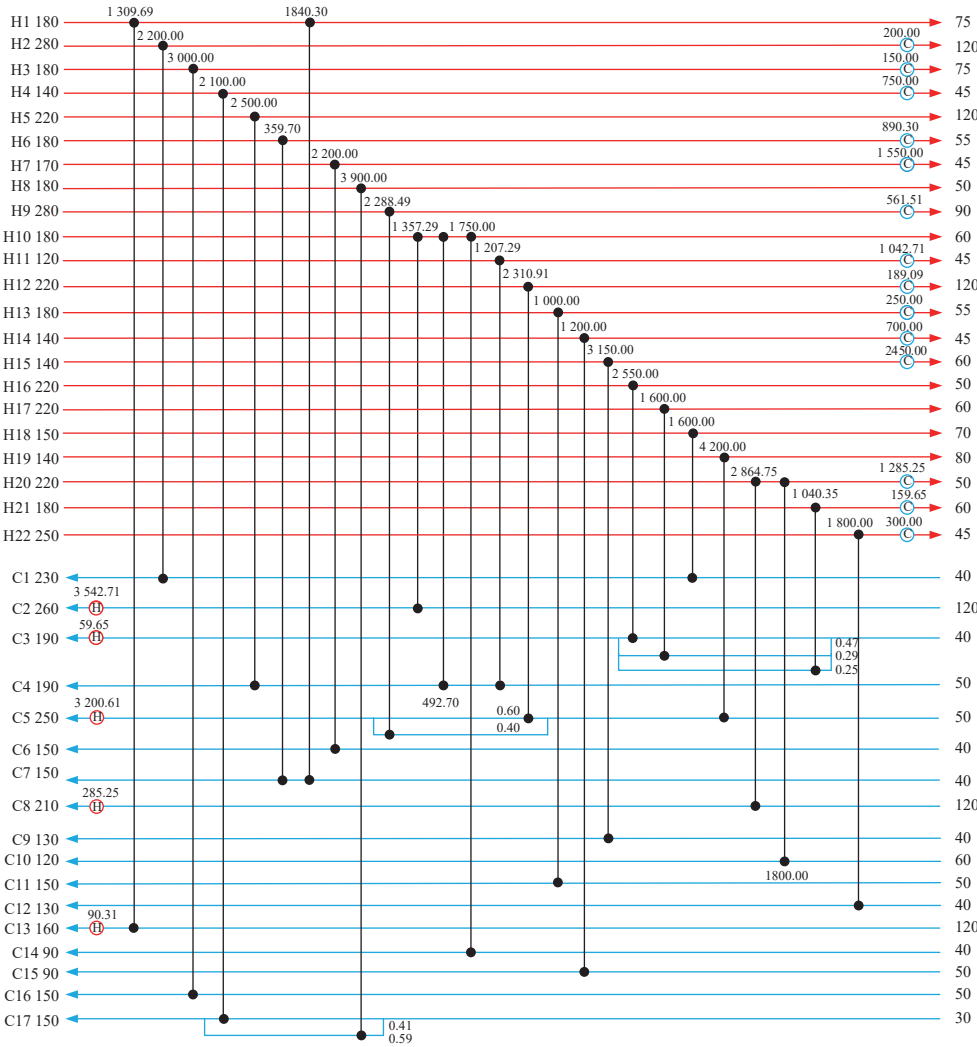


图 2 RWCE 算法获得的 H22C17 算例的配置(TAC 为 1900124 \$/a)

Fig.2 Configuration of the H22C17 case obtained by the RWCE algorithm (TAC 为 1900124 \$/a)

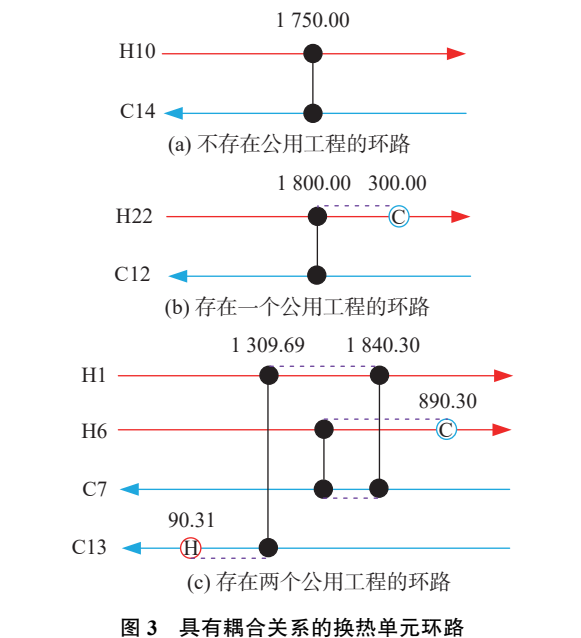


图3 具有耦合关系的换热单元环路

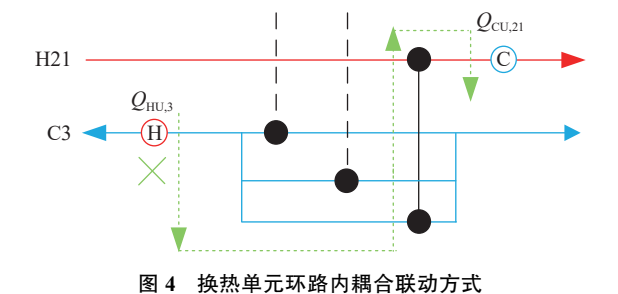


图4 换热单元环路内耦合联动方式

所示的处理，再回代入 RWCE 算法优化后得到如图 5 所示的结构。

从图中可以看出，经过耦合联动后，获得的 TAC(图 5 结构)比基础 RWCE 算法(图 2 结构)下降了 7618 \$/a。费用下降的原因在于减少了 C3 流股上热公用工程的固定投资费用、运行费用和面积费用以及 H21 流股上的冷公用工程的运行费用和面积费用。尽管流股 H21 与 C3 匹配的换热器增

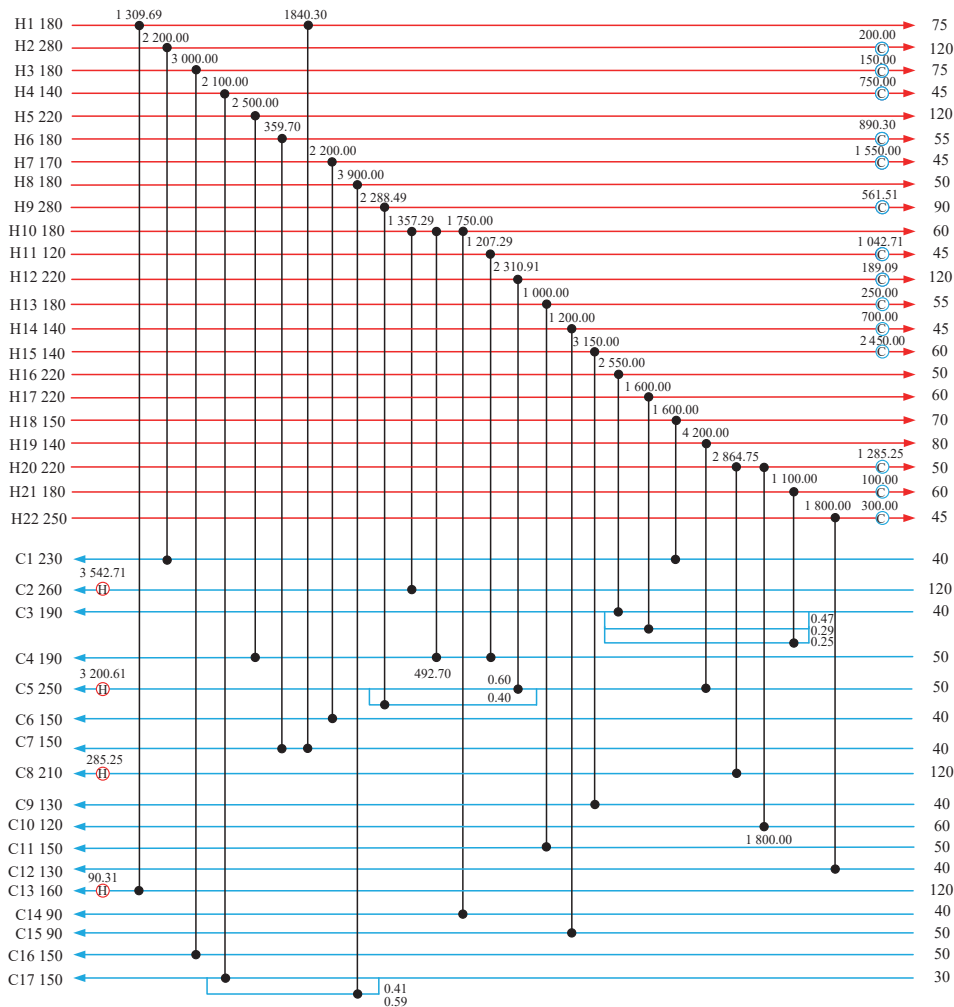


图5 耦合联动后的 H22C17 算例配置(TAC 为 1892506 \$/a)

Fig.5 Configuration of the H22C17 case after coupling linkage (TAC 为 1892506 \$/a)

加了 59.65 kW 的热负荷, 导致面积费用增加, 但在费用权衡后仍实现了 7618 \$/a 的降低。如果没有使用耦合联动方法, 由于算法的随机性, 难以在调整控制参数时刚好找到该结构。通过以上分析, 该方法能够避免陷入局部最优解, 促进结构变异, 获得更具潜力的结构。

3 换热单元耦合联动强制进化策略提出

根据以上分析得出如下结论: 首先, 在优化结果中存在小负荷公用工程, 启发式算法的随机性很难完全消除该公用工程, 因此结构趋于固化; 其次, 随着优化程度的加深, 结构变异变得更加困难, 导致难以产生新的组合方式。基于以上问题, 本研究提出一种以公用工程为导向的换热单元耦合联动的强制进化策略, 旨在打破结构固化现象。该策略的核心思想是充分利用流股的能量回收, 从而减少小负荷公用工程的使用所带来的费用增加。通过以公用工程为导向, 建立换热单元耦合的环路, 对环路内的换热单元联动增减, 同时保持环路外的换热单元负荷大小与匹配关系不变。通过最大限度减少公用工程的使用, 促进结构变异, 从而增强局部搜索能力, 获得更优的能量分布, 最终达到降低年综合费用的目标。

图 6 为以小负荷公用工程为导向的换热单元环路耦合联动示意图, 紫色虚线连接的换热单元构成环路, 绿色带箭头的虚线展示了耦合联动优化路径。图中, 热公用工程热负荷 $Q_{HU,j}$ 代表小负荷公用工程, 所有由绿色虚线连接的换热单元构成一个环路。绿色虚线箭头朝下表示需要减小该位置的热负荷, 箭头朝上表示需要增加该位置的热负荷。为避免使用小负荷公用工程并避免在流股上额外增加换热单元, 需按以下步骤处理: (a) 增加②号换热单元的热负荷, 增加量为 $Q_{HU,j}$; (b) 减少③号换热单元的热负荷, 减少量为 $Q_{HU,j}$; (c) 增加①号换热单元的热负荷, 增加量为 $Q_{HU,j}$ 。通过这些处理, 强制消去小负荷公用工程, 促进结构变异, 以寻找可能的最优解。图 7 为将该策略应用于 RWCE 算法的实施流程图, 其中蓝色部分为换热单元耦合联动强制进化策略的流程, 具体说明如下。

步骤 1 RWCE 算法部分的步骤详见文献 [9]。

步骤 2 策略启动条件判断。为了实时跟踪换

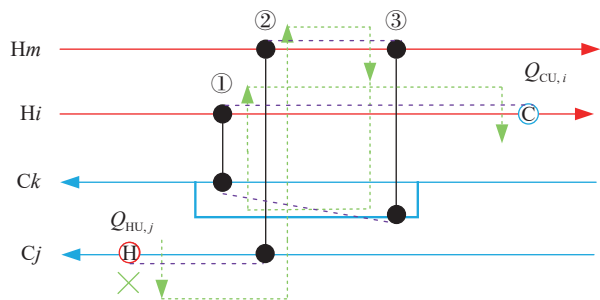


图 6 换热单元环路耦合联动优化示意图

Fig.6 Schematic diagram of coupled linkage in the heat exchanger unit loop

热网络的 TAC 变化情况, 设定一个步数停滞计数器 K 和步数停滞阈值 K_0 。当 TAC 不下降时, 步数停滞计数器 K 开始计数。当 K 值大于步数停滞阈值 K_0 , 启动换热单元耦合联动强制进化策略, 结构强制更新后, 将步数停滞计数器 K 重置为 0。

步骤 3 根据算例设定小负荷公用工程的负荷阈值, 当公用工程的热负荷小于或等于负荷阈值, 符合小负荷条件。依次选取小负荷公用工程所在的流股, 识别与该公用工程相关联的换热网络环路。若环路内不存在两个公用工程, 则返回继续选择下一个小负荷公用工程流股。当存在两个公用工程, 则根据以下 3 种情况对该环路进行耦合联动处理。

(a) 一个换热器耦合联动两个公用工程, 如图 8 所示, 则进行式 (21) 的操作。

$$Q_1' = Q_1 + Q_B, i \in N_H \quad (21)$$

式中: Q_1 为该换热器的热负荷; Q_1' 为联动后该换热器的热负荷; Q_B 为小热负荷公用工程热负荷。

(b) 两个换热器耦合联动两个公用工程, 如图 9 所示。第 1 个联动的换热器按式 (21) 操作, 第 2 个联动的换热器按式 (22) 操作。

$$Q_2' = Q_2 - Q_B, i \in N_H \quad (22)$$

式中: Q_2 为第 2 个耦合的换热器的热负荷; Q_2' 为第 2 个耦合的换热器联动后的热负荷。

(c) 有 n 个换热器耦合, 如图 10 所示, 对第 n 个换热器按式 (23) 操作。

$$Q_\varphi' = Q_\varphi + (-1)^{\varphi+1} Q_B, i \in N_H, \varphi=1, 2, \dots, \varepsilon \quad (23)$$

式中: Q_φ 为第 φ 个耦合的换热器负荷; Q_φ' 为其联动后的热负荷。

步骤 4 强制接受耦合联动后的结构, 判断算法终止条件, 满足条件则结束, 不满足条件则继续优化。

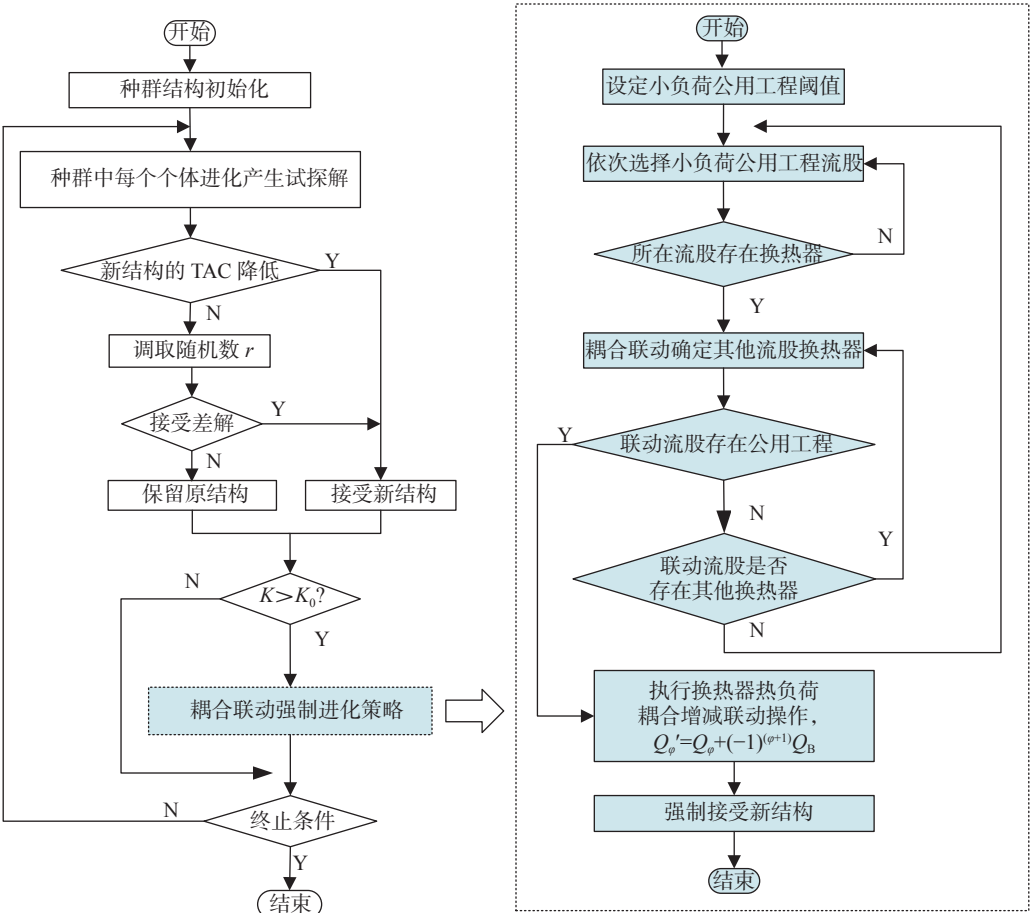


图 7 改进 RWCE 算法流程图

Fig.7 The flowchart of the improved RWCE algorithm

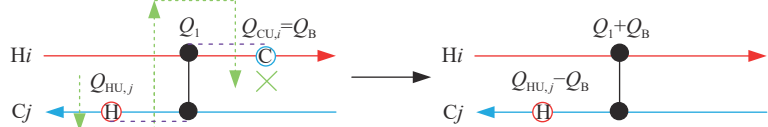


图 8 换热单元环路的耦合联动情况 1

Fig.8 Case one of the coupling linkage in the heat exchanger unit loop

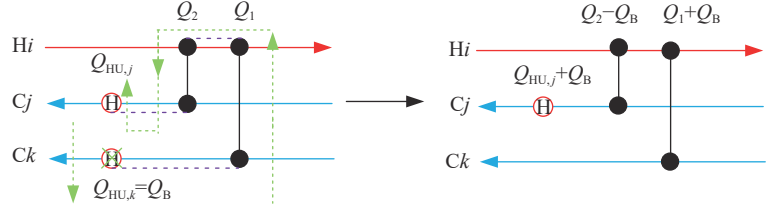


图 9 换热单元环路耦合联动情况 2

Fig.9 Case two of the coupling linkage in the heat exchanger unit loop

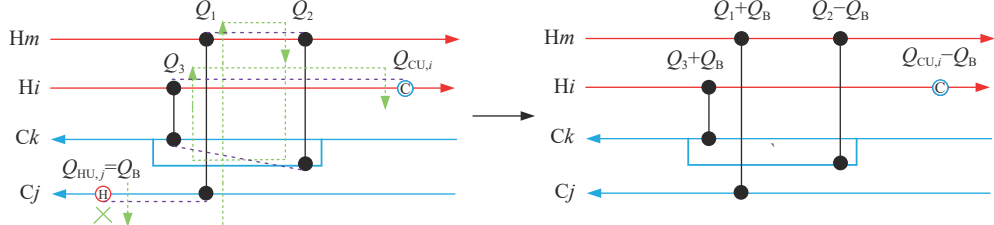


图 10 换热单元环路耦合联动情况 3

Fig.10 Case three of the coupling linkage in the heat exchanger unit loop

4 策略有效性验证

为验证策略的有效性, 以 H22C17 算例为例, 参数设置与上文 RWCE 算法保持一致。使用具有换热单元耦合联动强制进化策略的改进 RWCE 算法优化该算例, 得到如图 11 所示的换热网络结构, 其 TAC 为 1881364 \$/a。与基础 RWCE 算法

结果(图 2 所示)相比, TAC 降低了 18760 \$/a; 与图 5 结果相比, TAC 降低了 11142 \$/a。可见, 该策略促进了结构变异, 实现了更佳的能量分布。费用下降的原因在于 C13 流股上的热公用工程被消除(见图 12), 导致相应的固定投资费用、运行费用和面积费用减少。通过联动调整结构中局部换热单元的热负荷, 最终实现费用减少量大于费用增加量, 整体结果是费用下降。

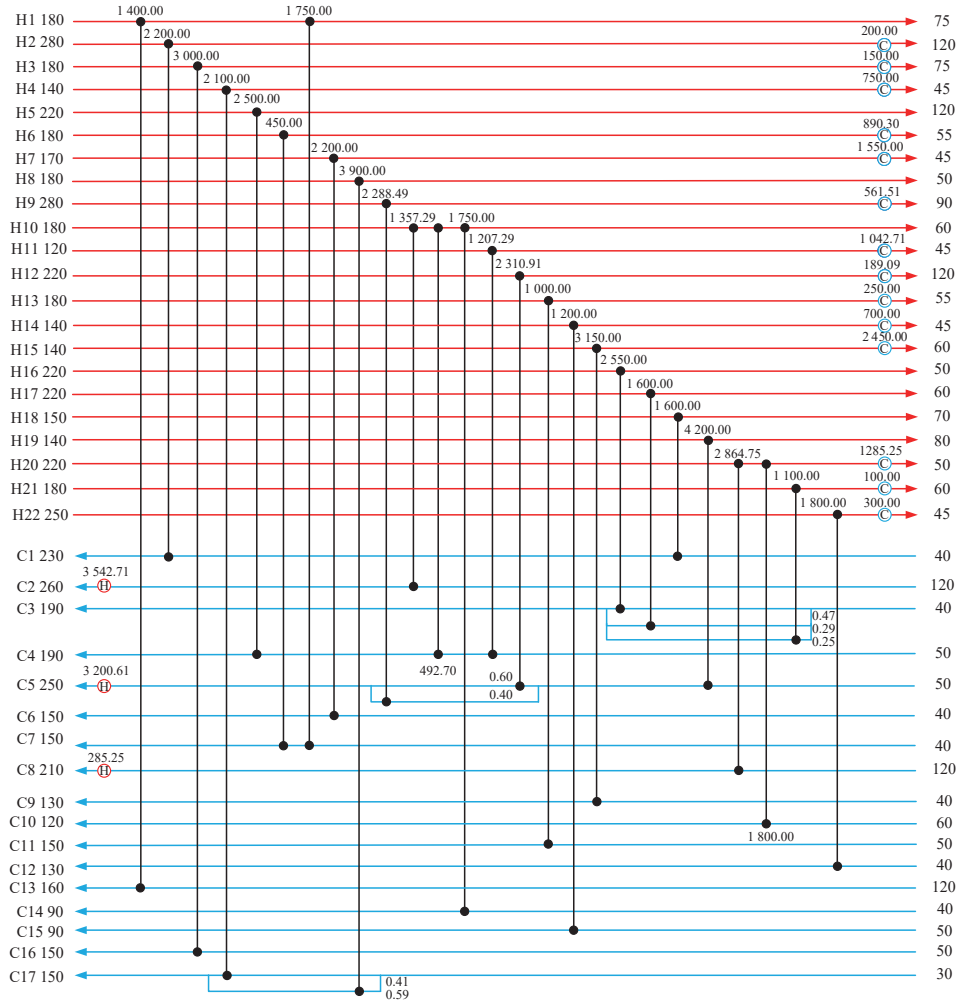


图 11 改进 RWCE 获得的 H22C17 换热网络配置(TAC 为 1881364 \$/a)

Fig.11 Configuration of the H22C17 case obtained by the improved RWCE(TAC 为 1881364 \$/a)

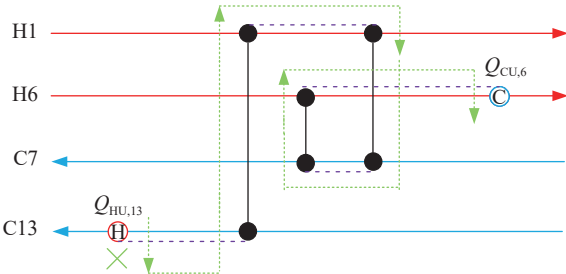


图 12 包含公用工程 $Q_{HU,13}$ 的环路内耦合联动路径

Fig.12 Coupled linkage path in the heat exchanger unit loop containing the utility $Q_{HU,13}$

5 算例验证

大型复杂换热网络由于流股众多, 换热匹配复杂, 需要配置相对较多的公用工程, 存在大量的局部极值点, 陷入局部极值的可能性更大。因此, 从众多算例中选用仅次于 H22C17 算例的两个大规模复杂换热网络 H8C7 和 H10C10 进行计算与讨论。

5.1 算例 1

H8C7 算例源自文献 [22], 包含 8 股热流体和

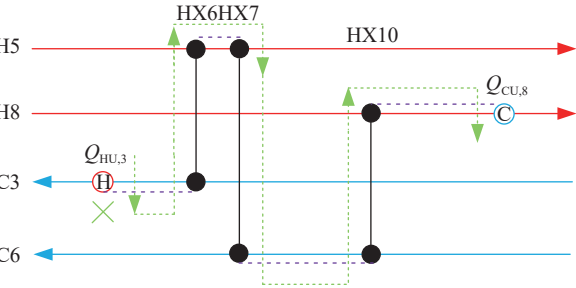


图 15 算例 1 换热单元环路内耦合联动路径

Fig.15 Coupled linkage path in the heat exchanger unit loop for case 1

求被满足, 因此, 不再需要使用冷公用工程。同时, 随着 HX6 热负荷的变化, 与之耦合的换热器 HX7 和 HX10 也发生联动变化。HX7 的热负荷减小了 78.47 kW, 而 HX10 热负荷增加了 78.47 kW, 而环路外换热单元热负荷及匹配保持不变。此外, 由于 HX10 热负荷增加, 导致 H8 流股上热公用工程的热负荷减小, 这意味着换热网络的热回收能力得到增强。

RWCE 算法在优化过程中具有一定的随机性, 这使得在已搜索到的最优结构基础上难以进一步搜索到涉及耦合联动的结构变化。具体来说, 无法准确找到需要改变换热器 HX6、HX7 和 HX10 的热负荷的换热单元环路, 即对他们分别增加 78.47 kW, 减小 78.47 kW 和增加 78.47 kW, 而环路外的优化路径保持不变。策略有效性在于加入策略后, 能够识别小负荷公用工程为导向的环路, 强制进化耦合联动的换热单元热负荷变化, 促进结构的变异, 获得更加合理的热负荷分布,

从而推进优化过程朝着更有利的方向发展。

5.2 H10C10 算例

H10C10 算例源自文献 [25], 包含 10 股热流体和 10 股冷流体, 其流体及费用参数见文献 [25]。基础 RWCE 算法和改进后的 RWCE 算法使用相同的优化参数, 与上文参数相同。经过 RWCE 优化得到的换热网络的 TAC 为 1721170 \$/a, 而经过改进后的 RWCE 算法得到的 TAC 为 1713637 \$/a, 比改进前降低了 7533 \$/a。图 16 和图 17 为改进前后的结构图。

观察图 16 和图 17, 两个换热网络中均包含 13 个换热器, 其中 10 个换热器的流股匹配及相应热负荷保持一致, 其余 3 个换热器 HX10, HX11 和 HX12 的流股匹配相同, 但热负荷各不相同。图 18 为换热单元耦合联动优化路径。在策略作用下, 识别到 C7 流股的热公用工程是小负荷公用工程。以该公用工程为导向, HX12 热负荷增加了 70.25 kW, 导致与 HX12 耦合的 C7 流股上的热公用工程随之消失, 与 HX12 耦合的 H9 流股上的 HX10 热负荷减少了 70.25 kW。与 HX10 耦合的 C1 流股上的 HX11 热负荷增加了 70.25 kW, 与之耦合在 H4 流股上的冷公用工程热负荷减少了 70.25 kW。两个结构对比发现大部分换热单元热负荷保持不变, 只有少数换热单元联动变化。这说明策略推动了结构的变异, 找到了有潜力的结构。表 2 对比了本研究与文献的结果。本研究获得的 TAC 为 1713637 \$/a, 比文献中的 1715088 \$/a 低了 1450 \$/a, 证明了该策略的有效性。

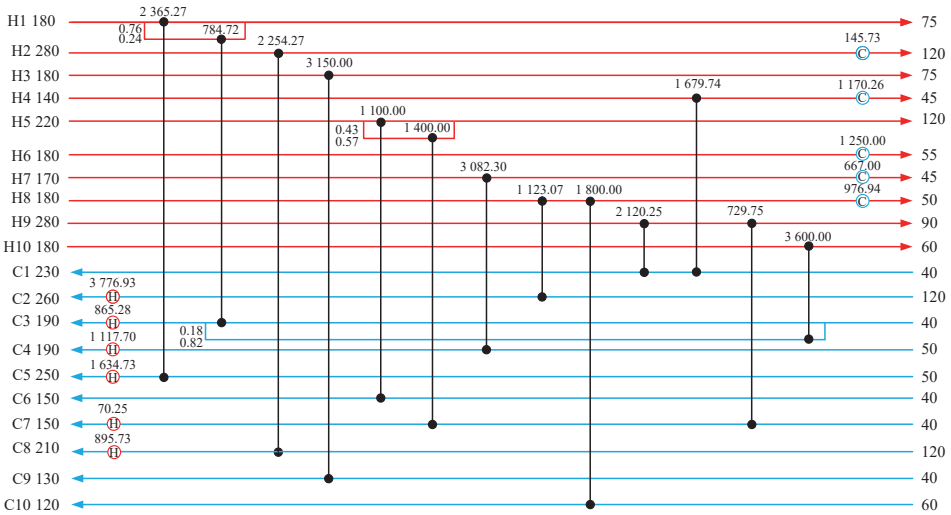


图 16 RWCE 算法获得的 H10C10 算例配置 (TAC=1721170 \$/a)

Fig.16 Configuration of the H10C10 case obtained by the RWCE algorithm (TAC=1721170\$/a)

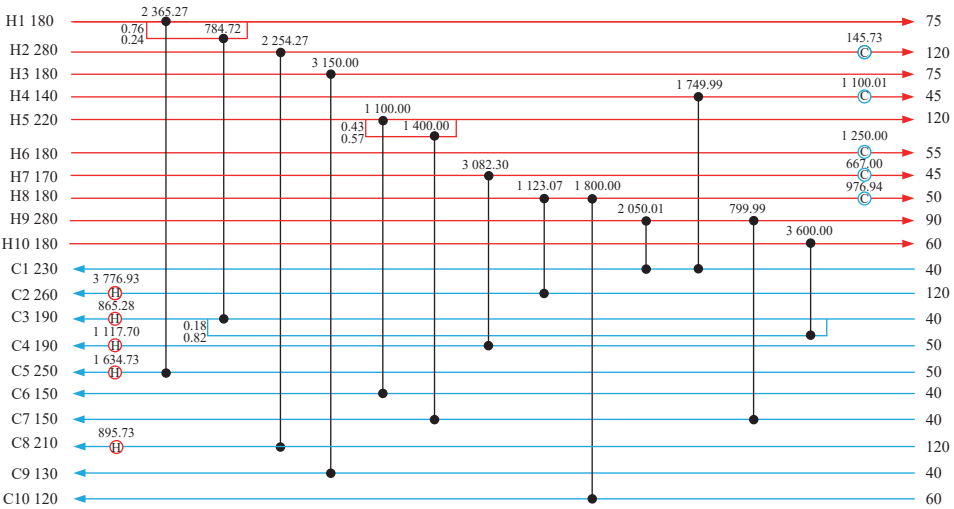


图 17 改进 RWCE 算法获得的 H10C10 算例配置(TAC=1713637 \$/a)

Fig.17 Configuration of the H10C10 case obtained by the improved RWCE(TAC=1713637 \$/a)

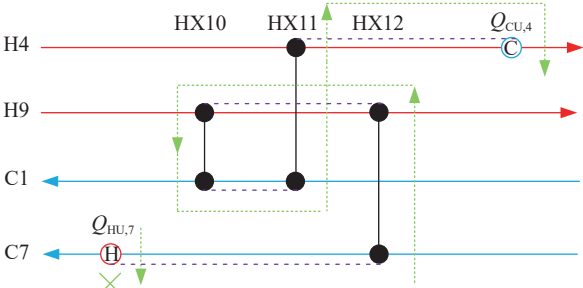


图 18 算例 2 换热单元耦合联动路径

Fig.18 Coupled linkage path in the heat exchanger unit loop for case 2

表 2 H10C10 算例结果对比表

Tab.2 Comparison of results for the H10C10 case

算法来源	算法	单元个数	Q_{HU}/kW	Q_{CU}/kW	TAC / (\$·a ⁻¹)
文献[26]	HGA	26	9 513.00	5 363.00	1 753 271*
文献[24]	SA&RFO	24	8 690.00	4 540.00	1 725 295*
文献[19]	HGA-SIR	24	8 528.18	4 378.18	1 715 088*
本文(图16)	RWCE	24	8 360.62	4 209.93	1 721 170*
本文(图17) 改进RWCE		23	8 290.37	4 139.68	1 713 637*

注: *表示有分流。

6 结 论

本研究提出了一种以小负荷公用工程为导向的换热单元耦合联动强制进化策略。通过以小负荷工程为导向，建立具有耦合关系的换热单元环路，对环路内的换热单元进行耦合联动强制进化，同时保持环路外的换热单元不变，使其跳出局部极值点并持续搜索，以获得更优结构。通过 H8C7 和 H10C10 两个算例的验证，该策略促使换

热网络结构变化，并得到了比历史文献更低的优化结果。H8C7 和 H10C10 算例结果分别为 1495292 \$/a 和 1713637 \$/a。与 RWCE 优化结果相比，分别降低了 7466 \$/a 和 7533 \$/a。同时，与历史文献最优解相比，分别降低了 2033 \$/a 和 1450 \$/a，证明了该策略的有效性。

参考文献:

[1] MASSO A H, RUDD D F. The synthesis of system designs. II. Heuristic structuring[J]. *AIChE Journal*, 1969, 15(1): 10–17.

[2] FURMAN K C, SAHINIDIS N V. Computational complexity of heat exchanger network synthesis[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2001, 25(9/10): 1371–1390.

[3] PENG F Y, CUI G M. Efficient simultaneous synthesis for heat exchanger network with simulated annealing algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 78: 136–149.

[4] FEYLI B, SOLTANI H, HAJIMOHAMMADI R, et al. A reliable approach for heat exchanger networks synthesis with stream splitting by coupling genetic algorithm with modified quasi-linear programming method[J]. *Chemical Engineering Science*, 2022, 248: 117140.

[5] AGUITONI M C, PAVÃO L V, SIQUEIRA P H, et al. Heat exchanger network synthesis using genetic algorithm and differential evolution[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 117: 82–96.

[6] SILVA G P, MIRANDA C B, CARVALHO E P, et al. A simultaneous approach for the synthesis of multiperiod heat exchanger network using particle swarm optimization[J].

- [The Canadian Journal of Chemical Engineering](#), 2018, 96(5): 1142–1155.
- [7] 周静, 崔国民, 彭富裕, 等. 基于改进参数的粒子群算法的换热网络优化 [J]. 能源研究与信息, 2019, 35(2): 106–109, 116.
- [8] ZHANG H L, CUI G M. Optimal heat exchanger network synthesis based on improved cuckoo search via Lévy flights[J]. [Chemical Engineering Research and Design](#), 2018, 134: 62–79.
- [9] XIAO Y, CUI G M. A novel Random Walk algorithm with Compulsive Evolution for heat exchanger network synthesis[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2017, 115: 1118–1127.
- [10] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S. Heat Exchanger Network Synthesis without stream splits using parallelized and simplified simulated Annealing and Particle Swarm Optimization[J]. [Chemical Engineering Science](#), 2017, 158: 96–107.
- [11] LIU Z L, YANG L, YANG S Y, et al. An extended stage-wise superstructure for heat exchanger network synthesis with intermediate placement of multiple utilities[J]. [Energy](#), 2022, 248: 123372.
- [12] 陈上, 崔国民, 彭富裕, 等. 采用动态更新策略的微分进化算法优化换热网络 [J]. 热能动力工程, 2015, 30(4): 509–514, 646.
- [13] 段欢欢, 崔国民, 陈家星, 等. 一种多种群混合搜索微分进化算法优化换热网络 [J]. 热能动力工程, 2016, 31(12): 1–6, 120.
- [14] CHEN J X, CUI G M, DUAN H H. Multipopulation differential evolution algorithm based on the opposition-based learning for heat exchanger network synthesis[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 2017, 72(2): 126–140.
- [15] ZHANG H L, HUANG X H, PENG F Y, et al. A novel two-step synthesis method with weakening strategy for solving large-scale heat exchanger networks[J]. [Journal of Cleaner Production](#), 2020, 275: 123103.
- [16] 陈子禾, 崔国民, 徐玥, 等. 基于控制参数动态协调策略的换热网络优化研究 [J]. 工程热物理学报, 2020, 41(4): 957–965.
- [17] 邓炜栋, 崔国民, 肖媛. 一种适用于复杂换热网络优化的耦合联动进化策略 [J]. 计算物理, 2018, 35(6): 675–684.
- [18] 张丁太, 崔国民, 张冠华, 等. 一种割裂耦合关系的换热网络优化方法 [J]. 热能动力工程, 2021, 36(12): 1–7.
- [19] RATHJENS M, FIEG G. A novel hybrid strategy for cost-optimal heat exchanger network synthesis suited for large-scale problems[J]. [Applied Thermal Engineering](#), 2020, 167: 114771.
- [20] XU Y, HERI A K, XIAO Y, et al. A new nodes-based model for optimization of heat exchanger network synthesis[J]. [Journal of Thermal Science](#), 2021, 30(2): 451–464.
- [21] PETTERSSON F. Synthesis of large-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach[J]. Computers & Chemical Engineering, 2005, 29(5): 993–1007.
- [22] BJÖRK K M, PETTERSSON F. Optimization of large-scale heat exchanger network synthesis problems[C]//IATED International Conference on Modelling and Simulation. Palm Springs, 2003: 313–318.
- [23] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S, et al. Costs and environmental impacts multi-objective heat exchanger networks synthesis using a meta-heuristic approach[J]. [Applied Energy](#), 2017, 203: 304–320.
- [24] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A D S S, et al. Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization[J]. [AIChE Journal](#), 2017, 63(5): 1582–1601.
- [25] XIAO W, DONG H G, LI X Q, 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.
- [26] 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.

(编辑: 丁红艺)