

一种割裂耦合关系的换热网络优化方法

张丁太^{1,2}, 崔国民^{1,2}, 张冠华^{1,2}, 杨其国^{1,2}

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘要:在用强制进化随机游走算法优化换热网络时,优化后期由于换热单元之间存在耦合关系,换热网络结构已基本稳定,难以新增加或者消除换热单元,因此结构变异较为缓慢。为了促进结构变异,提出了一种割裂结构耦合关系的高效优化方法。该方法基于耦合关系随机消除换热单元,使得匹配已稳定的冷热流股重新获得一定的换热潜能,从而具有匹配新换热单元的潜力,快速寻找到更多匹配方式。通过20SP和15SP算例进行有效性验证,分别取得1 395 461 \$和5 115 557 \$的年综合费用,表明割裂结构耦合关系的方法能进一步促进结构进化,增强算法的全局搜索能力。

关键词:换热网络;节点非结构模型;耦合关系;结构变异

中图分类号:TK124 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.12.001

[引用本文格式]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.
ZHANG Ding-tai, CUI Guo-min, ZHANG Guan-hua, et al. Optimization method of heat exchanger network based on splitting coupling relationship[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(12):1-7.

Optimization Method of Heat Exchanger Network based on Splitting Coupling Relationship

ZHANG Ding-tai^{1,2}, CUI Guo-min^{1,2}, ZHANG Guan-hua^{1,2}, YANG Qi-guo^{1,2}

(1. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code:200093;
2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai, China, Post Code:200093)

Abstract: When random walk algorithm with compulsive evolution is used to optimize the heat exchanger network, in the later stage of optimization, due to the coupling relationship between heat exchange units, the heat exchange network structure is basically stable, and it is difficult to add or eliminate heat exchange units, so the structure variation is relatively slow. Therefore, in order to promote the structural variation, an efficient optimization method is proposed to split the structural coupling relationship. Based on the coupling relationship, the heat exchange units are randomly eliminated by using this method, so that the matching stable cold and hot streams can regain a certain heat transfer potential again, which has the potential to match new heat exchange units and quickly finds more matching methods. Through 20SP and 15SP examples, the effectiveness verification is carried out, the annual comprehensive costs of 1 395 461 \$ and 5 115 557 \$ are obtained respectively. It shows that the method of splitting the structural coupling relationship can further promote the structural evolution and enhance the global search ability of the algorithm.

收稿日期:2021-03-05; 修订日期:2021-05-03

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

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (21978171, 51976126); Postdoctoral Science Foundation of China (2020M671171)

作者简介:张丁太(1996-),男,山东淄博人,上海理工大学硕士研究生。

通讯作者:崔国民(1969-),男,吉林双辽人,上海理工大学教授。

Key words: heat exchanger network, node non-structural model, coupling relationship, structural variation variation

引 言

传统能源的消耗主要集中于煤电、石油化工以及金属冶炼等行业,其能源消耗伴随着各种热、冷流体之间的热量传递,通过加热或者冷却使两种流体达到目标温度。

换热网络优化问题需要同时兼顾连续变量与整型变量的优化以及最优解的质量,属于典型的混合整数非线性规划问题(MINLP)^[1]。目前,优化方法主要分为启发式方法^[2]和确定性方法^[3]两种,虽然前者比后者具有更强的全局搜索能力^[4],但是经过长时间的迭代优化后,换热网络结构基本稳定,结构变异能力降低。对此,Lewin 等人^[5]以最大能量回收为目标,利用遗传算法优化特定的网络结构,再反馈给遗传算法的适应函数促进结构进化,增强全局搜索能力。Huo^[6]提出双层算法,外层采用遗传算法进行整型变量优化,内层对外层传递的结构采用粒子群算法进行连续变量优化。陈帅等人^[7]基于自适应竞争群优化算法对换热网络结构进行优化,通过粒子平均位置的递减学习,自适应调节速度权重来增强换热网络结构的全局搜索能力。依大科等人^[8]根据系统可靠性分析的柔性换热网络,通过提高换热网络的可靠性,增强结构变异能力。

强制进化随机游走算法(RWCE)^[9]在优化过程中割裂了种群之间的信息交流,增强种群多样性。但是在优化中后期,依然存在陷入局部极值的情况,结构难以发生有效进化。

本文通过分析年综合费用长时间陷入停滞状态时最优费用再次下降前后的结构差异性,找到换热网络结构难以发生变异的原因。采用一种割裂结构耦合关系的高效优化方法,进一步促进结构进化,增强全局搜索能力,通过实例进行有效性验证。

1 数学模型及算法

节点非结构模型^[10]不存在级数的概念且初始时空结构,具有更多的换热匹配连接方式。以2股热流体和3股冷流体为例,其节点布置如图1所

示。图中有4个换热单元,Ⓜ、ⓐ分别为热冷公用工程。

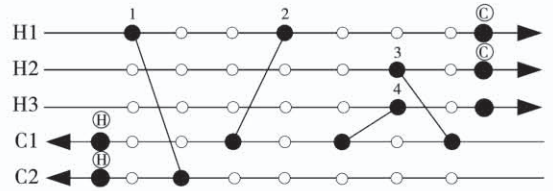


图 1 节点非结构模型

Fig. 1 Node non-structural model

换热网络优化以最小年综合费用(total annual cost, TAC)为目标函数,主要包括换热单元的面积费用和固定投资费用,冷热公用工程的面积费用、固定投资费用和运行费用:

$$\min TAC = \sum_{h=1}^{P_H} \sum_{i=1}^{P_{HNW}} (C_F \cdot Z_{i,h} + C_A \cdot A_{i,h}^B) + \sum_{h=1}^{P_H} (C_F \cdot Z_{CU,h} + C_A \cdot A_{CU,h}^B + C_{CU} \cdot Q_{CU,h}) + \sum_{c=1}^{P_C} (C_F \cdot Z_{HU,c} + C_A \cdot A_{HU,c}^B + C_{HU} \cdot Q_{HU,c})$$

式中: P_H 、 P_C —热冷流体的股数; P_{HNW} 、 P_{CNW} —热冷流体上设置的节点数; C_F —固定投资费用, \$/a; Z —该节点处是否存在换热单元; C_A —面积费用系数; A —面积, m^2 ; Q —热负荷, kW; C_{CU} 、 C_{HU} —冷热公用工程的费用系数;下标 h 、 c —第 h 股热流股和第 c 股冷流股; i —热节点数。

采用文献[9]中的 RWCE 算法,该算法可实现换热单元连续/整型变量同步优化,同时,以一定概率 φ 进行接受差解操作,提高算法的全局搜索能力。

2 耦合关系对结构变异的影响

以 20SP 算例为例,利用文献[11]中的流股参数,算法参数设置为:种群规模 $N=1$,接受差解概率 $\varphi=0.01$,最大游走步长 $\Delta L=100$ kW,最大换热量 $Q_{max}=200$ kW。

图 2 为基础 RWCE 算法的费用变化曲线,当迭代步数达到 6×10^7 步时, TAC 在之后的 4×10^7 步内始终保持不变,此时 TAC 的值为 1 410 974 \$/a。图 3 为该结果的换热网络结构。最终迭代到 1×10^8

步后费用才再次下降,TAC 下降到 1 405 834 \$/a。

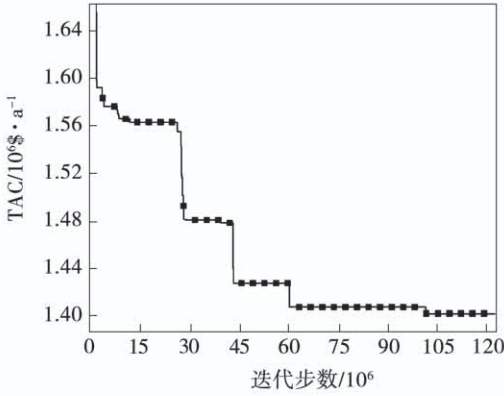


图 2 基础 RWCE 算法的费用变化曲线

Fig. 2 Cost variation curve of basic RWCE algorithm

消去 H5 - C4、H6 - C2、H11 - C4、H12 - C2 4 个换热单元的同时,新生成 H5 - C2、H8 - C4、H11 - C2、H12 - C4 4 个换热单元,其他换热单元的冷热流股连接关系没有发生变化。图 4 为两个结构的局部对比图,冷节点下面括号内的数字代表换热单元编号。

根据图 4(a)中的结构可知,2 号换热单元与 3, 4, 6 号 3 个换热单元为强耦合关系;3 号与 1, 5 号两个换热单元为强耦合关系。因此,6 个换热单元均存在一定的耦合关系,使换热网络结构达到稳定状态。若要打破该稳定状态,需要不断接受差解结构。由于大部分新生成换热单元的竞争能力不如最优结构中已存在的换热单元,因此在优化过程中通常被消去,直至再次迭代 4×10^7 步才构造出另一种使 TAC 下降的耦合关系,如图 4(b)所示。

通过对比图 4 中两个换热网络结构图可知,

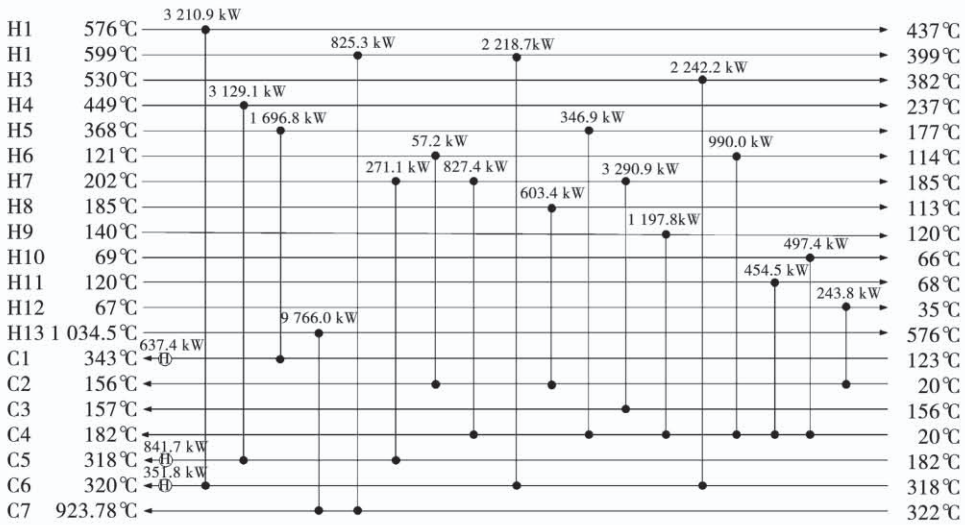


图 3 TAC 为 1 410 974 \$/a 时的换热网络结构

Fig. 3 Heat exchanger network structure with TAC of 1 410 974 \$/a

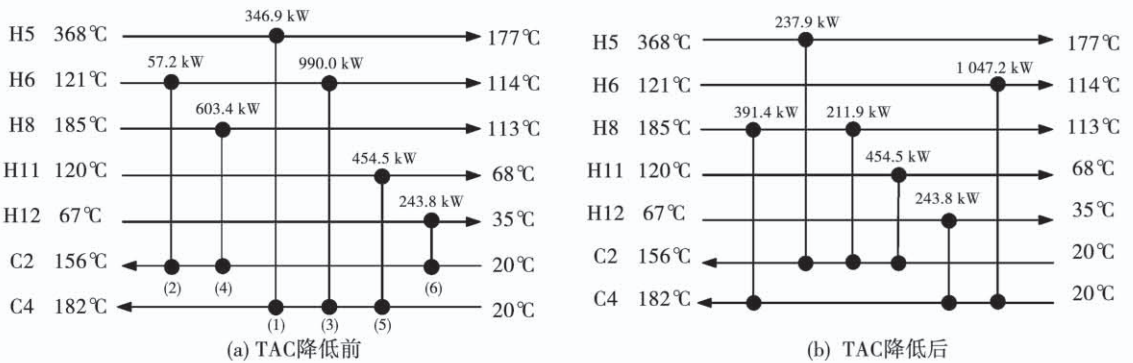


图 4 两个结构的局部对比图

Fig. 4 Local comparison diagrams of two structures

3 CRS-RWCE 算法优化换热网络

3.1 CRS-RWCE 算法的提出

通过上述探讨分析发现,当换热网络结构基本稳定时,存在且长期存在多个耦合关系,导致个体进化缓慢。而再次找到使 TAC 下降的耦合关系需要更长时间的不断试探,因此陷入停滞状态。通过 TAC 下降前后的最优结构对比,大部分换热单元的冷热流股连接关系并未发生改变发现,仅在小范围内进行调整。对此,在原 RWCE 算法的基础上,提出一种割裂结构耦合关系的高效优化方法(CRS-RWCE),在保证整体结构不发生过大调整的基础上,使多股流体重新具有新生成换热单元的潜力,从而促进结构变异,提高算法的优化效率和全局搜索能力。图 5 为 CRS-RWCE 算法的过程示意图。

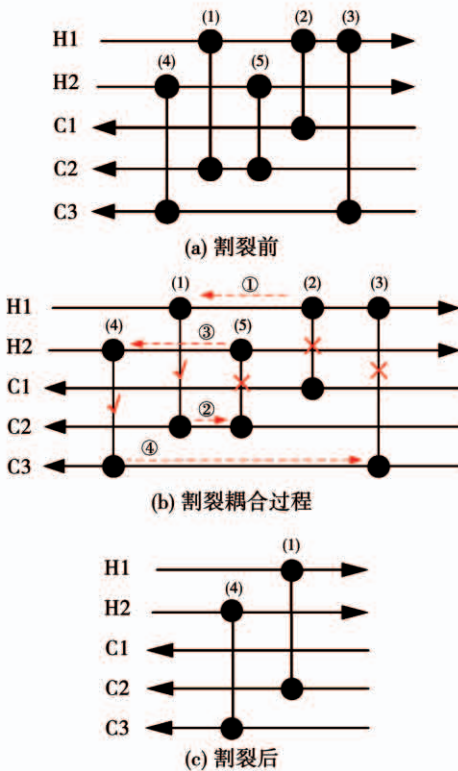


图 5 CRS-RWCE 方法过程示意图

Fig. 5 Process diagram of CRS-RWCE method

割裂耦合关系示意图以 2 股热流体和 3 股冷流体为例,图 5(b)中 \checkmark 和 \times 分别表示换热单元被保留或消去,带箭头的虚线及圈内数字表示实现 CRS-RWCE 算法的具体过程及顺序。从图 5(a)中可以看出,5 个换热单元构成一定的耦合关系。图 5(b)为割裂耦合关系的具体过程。若初始割裂时随机选择 2 号换热单元并消去,因其热节点所在流股上存

在两个换热单元未被操作,随机选取一个进行保留。以保留 1 号为例,根据该换热单元的冷节点所对应的冷流股,消去 5 号换热单元。以此类推,最终消去的换热单元为 2,3 和 5 号,而保留下来的 1 号与 4 号换热单元无耦合关系(如图 5(c)所示)。因此,采取 CRS-RWCE 算法可以破坏最优结构中的耦合关系。具体操作流程如图 6 所示,其中, T_{max} 为 TAC 未降低时连续迭代的最大步数。

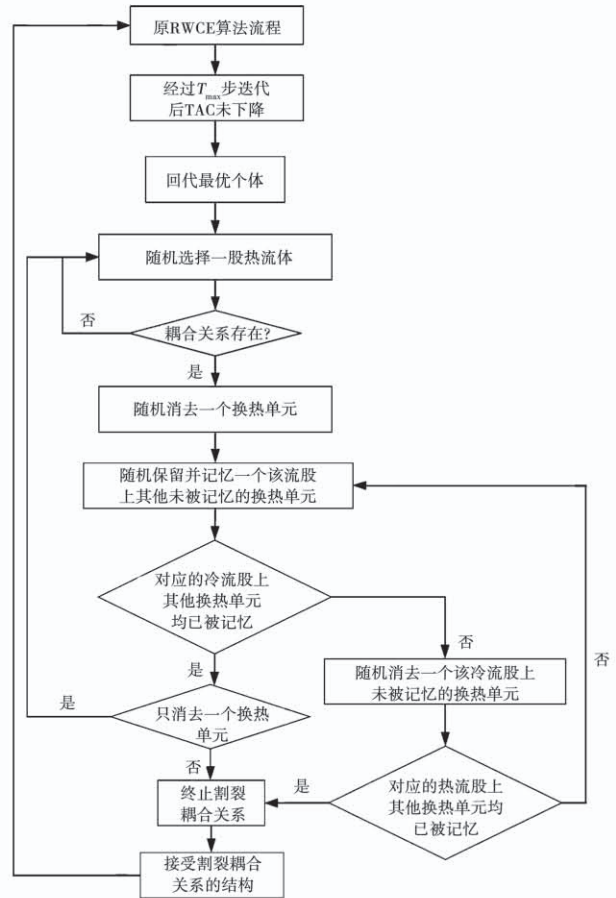


图 6 CRS-RWCE 算法流程

Fig. 6 Flow chart of CRS-RWCE algorithm

3.2 T_{max} 取值效果分析

在本算例中,其他参数保持不变,只改变 T_{max} 的取值,探究其对整个优化进程的影响。设置 T_{max} 的取值分别为 5×10^6 , 2×10^7 和 3×10^7 进行讨论分析。图 7 为 T_{max} 取值不同时所对应的 TAC 变化曲线。

由图 7 可知,当 T_{max} 取值为 5×10^6 时,迭代到 2.2×10^7 后便出现第一次使用 CRS-RWCE 算法的情况,而基础 RWCE 算法所产生的结构还未充分发挥其进化潜力,直至第二次使用 CRS-RWCE 时, TAC 依然高于基础 RWCE 算法。由于经过较短迭

代步割裂耦合关系,导致结构并未充分发挥其进化潜力就再次被新结构所代替,TAC 难以有效下降,局部搜索能力降低。当 T_{max} 取值为 3×10^7 时,由于取值过大,直至迭代到 1.1×10^8 步时才第一次出现使用 CSS-RWCE 算法的情况,TAC 长时间未下降,换热网络结构早已达到稳定状态,浪费过多的迭代步数。而此时 T_{max} 取值为 2×10^7 的优化过程已完成了两次割裂耦合关系,并找到了优于其他 T_{max} 取值曲线的耦合关系。因此, T_{max} 取值过大或者过小都不利于换热网络的优化。

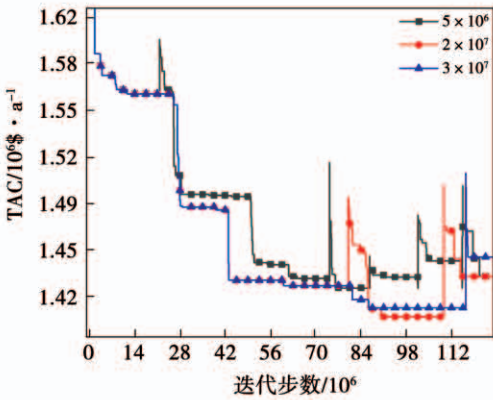


图 7 不同 T_{max} 下最优费用变化曲线

Fig.7 Variation curves of optimal costs under different T_{max}

4 算例分析

4.1 算例 1

算例 1 采用 3.1 节中给出的 20SP 算例。第一次采用 CRS-RWCE 方法后产生的换热网络结构,待 TAC 保持不变时,已经下降到 1 404 537 \$/a,且已接近于大部分文献中的最优费用。最终所优化的结果为 1 395 461 \$/a,结构如图 8 所示,与已有文献的年综合费用对比如表 1 所示。

表 1 算例 1 优化结果对比

Tab.1 Comparison of optimization results of example 1

文献	换热单元数	热公用工程/kW	冷公用工程/kW	年综合费用/ \$·a ⁻¹
[11]	19	1 938.0	106.9	1 516 482
[12]	17	1 824.8	0.00	1 431 665
[13]	18	1 831.1	0.00	1 395 587
算例 1	18	1 831.0	0.00	1 395 461

4.2 算例 2

算例 2 的流股参数取自文献[14],包括 10 股热流和 5 股冷流,设定参数: $N = 1, \varphi = 0.01, T_{max} = 1 \times 10^7$ 。

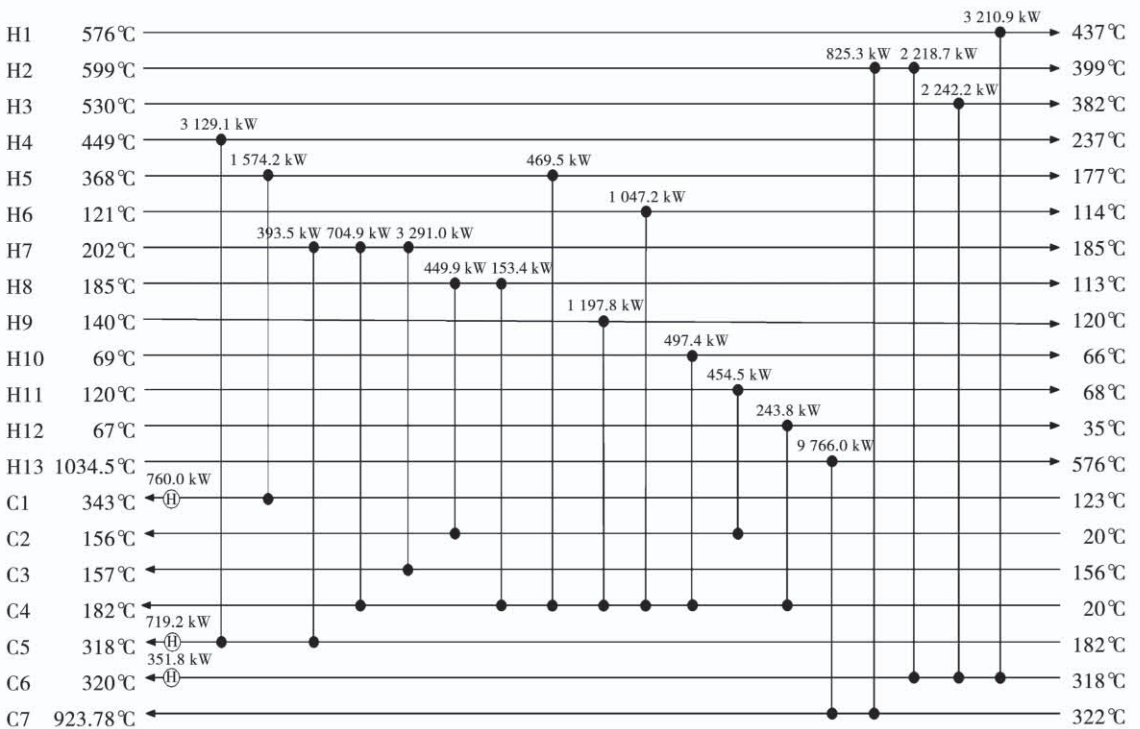


图 8 算例 1 对应的换热网络结构

Fig.8 Heat exchange network structure (HENS) corresponding with example 1

图 9 为基础 RWCE 算法与 CRS-RWCE 算法 TAC 变化曲线对比。从中可以看出,基础 RWCE 算法在迭代至 4.5×10^7 步时费用下降,再次迭代 4×10^7 步才进一步下降。可见,之前的结构已经基本稳定,很难发生变异,通过迭代较多步数才得以发生结构变异,找到一个使费用下降的耦合关系。而 CRS-RWCE 算法在 4.4×10^7 步时割裂耦合关系,待结构稳定后略低于之前的 TAC。虽然此时高于 RWCE 算法产生的 TAC,但是在下一次割裂耦合关系且结构稳定后所产生的费用低于同时期基础算法产生的 TAC。

当迭代优化至 8.5×10^7 步后, RWCE 算法所产生的费用始终未下降,而 CRS-RWCE 算法经过两次割裂耦合关系后便已低于 RWCE 算法产生的费用,并且再次经过两次割裂耦合关系, TAC 进一步下降。最终得到的 TAC 的值为 5 115 557 \$/a,其结

构图如图 10 所示,与已有文献的年综合费用对比如表 2 所示。

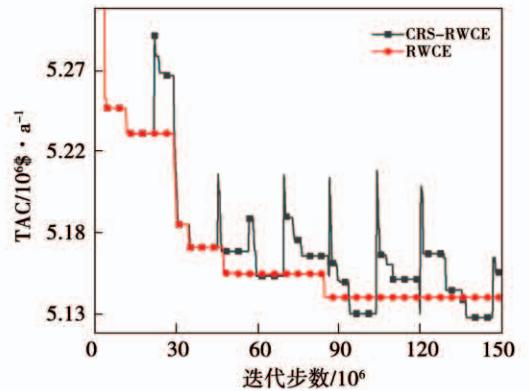


图 9 算例 2 基础 RWCE 算法与 CRS-RWCE 算法 TAC 变化曲线对比

Fig. 9 Comparison of TAC variation curves between basic RWCE algorithm and CRS - RWCE algorithm in example II

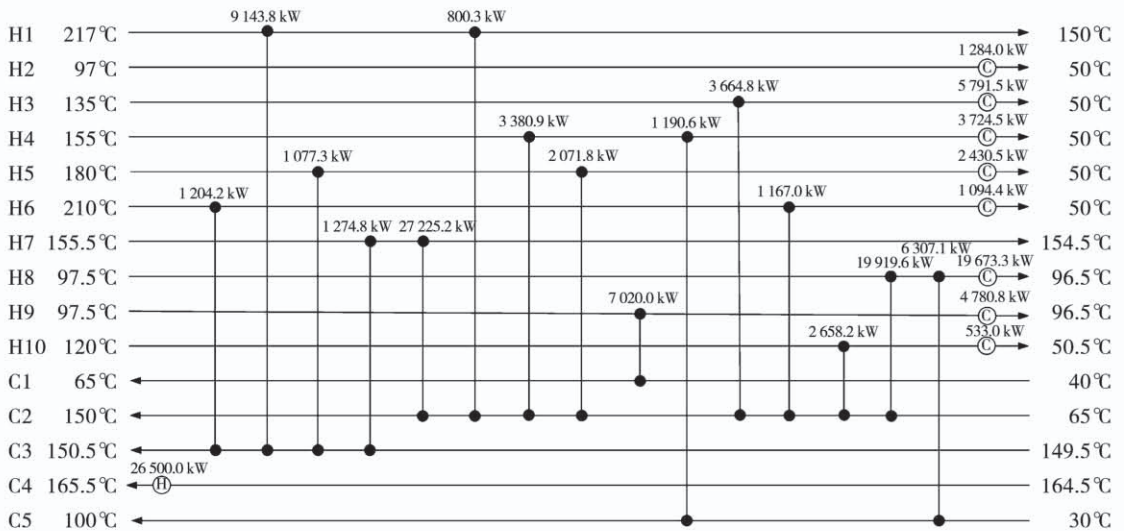


图 10 算例 2 对应的换热网络结构

Fig. 10 Heat exchange network structure (HENS) corresponding with example II

表 2 算例 2 的优化结果对比

Tab. 2 Comparison of optimization results of example II

文献	换热单元数	热公用工程/kW	冷公用工程/kW	年综合费用/ \$·a ⁻¹
[14]	24	41 349	59 219	6 019 310
[15]	15	27 163	44 974	5 177 785
[16]	16	26 500	44 311	5 117 348
算例 2	15	26 500	44 312	5 115 557

5 结 论

(1) RWCE 算法在优化换热网络后期,结构已基本稳定,因为各换热单元之间耦合关系的存在,结构变异缓慢,不仅使优化效率降低,而且导致种群多样性下降。

(2) 通过比较基础 RWCE 算法优化过程中的两个最优结构,换热单元数目并未发生改变,仅有

几个具有耦合关系的换热单元的冷热流股连接方式变化,而这种变化需要经过较长时间的优化才能得以完成。

(3) 采用 CRS-RWCE 方法,通过消去一组具有耦合关系的多个换热单元,使该组耦合关系中被保留下来的换热单元之间不存在耦合关系,从而形成新的换热匹配,促进结构变异,增强算法全局搜索能力。

参考文献:

- [1] 张慧平. 过程系统工程综合方法及其求解策略的研究[D]. 北京:北京化工大学,2000.
ZHANG Hui-ping. The study on the synthesis and solution strategy of the process system engineering[D]. Beijing: University of Beijing for Chemical Technology, 2000.
- [2] BERGAMINI M L, BERGAMINI N J S, AGUIRRE P A. Global optimal structures of heat exchanger networks by piecewise relaxation [J]. Ind. Eng. Chem. Res., 2007, 46(6): 1752 - 1763.
- [3] GHANIZADEH S, FAZLI M S. Application of genetic algorithm on heat exchanger network optimization [J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering & Technology, 2013, 6 (18): 3378 - 3383.
- [4] 涂惟民. 换热网络全局最优化研究[D]. 上海:上海理工大学,2011.
TU Wei-min. The global optimization of heat exchanger network [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2011.
- [5] DANIEL R, LEWIN. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-II [J]. Computers and Chemical Engineering, 1998, 22(10): 1387 - 1405.
- [6] HUO Zhao-yi, ZHAO Liang, YIN Hong-chao, et al. A hybrid optimization strategy for simultaneous synthesis of heat exchanger network [J]. Korean Journal of Chemical Engineering, 2012, 29(10): 1298 - 1309.
- [7] 陈 帅, 罗 娜. 基于自适应竞争群优化算法的无分流换热网络综合[J]. 化工学报, 2016, 67(11): 4716 - 4723.
CHEN Shuai, LUO Na. Adaptive competitive swarm optimization for heat exchanger networks without split streams [J]. CIESC Journal, 2016, 67(11): 4716 - 4723.
- [8] 依大科, 韩志忠, 王克峰, 等. 考虑系统可靠性分析的柔性换热网络综合[J]. 化工进展, 2012, 31(12): 2632 - 2642.
YI Da-ke, HAN Zhi-zhong, WANG Ke-feng, et al. Optimization of flexible heat exchanger network embedded with system level reliability analysis [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(12): 2632 - 2642.
- [9] 肖 媛, 崔国民, 李帅龙. 一种新的用于换热网络全局优化的强制进化随机游走算法 [J]. 化工学报, 2016, 67 (12): 5140 - 5147.
XIAO Yuan, CUI Guo-min, LI Shuai-long. A novel random walk algorithm with compulsive evolution for global optimization of heat exchanger networks [J]. CIESC Journal, 2016, 67 (12): 5140 - 5147.
- [10] 陈家星. 换热网络同步综合的超结构模型及全局最优化 [D]. 上海:上海理工大学,2018.
CHEN Jia-xing. Superstructure model and global optimization for simultaneous synthesis of heat exchanger networks [D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2018.
- [11] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S. Automated heat exchanger network synthesis by using hybrid natural algorithms and parallel processing [J]. Computers & Chemical Engineering, 2016, 94: 370 - 386.
- [12] 孙 涛, 崔国民, 肖 媛. 采用结构进化增强策略的 RWCE 算法优化换热网络 [J]. 热能动力工程, 2019, 34(8): 16 - 24.
SUN Tao, CUI Guo-min, XIAO Yuan. Optimization of heat exchanger network by RWCE algorithm with enhanced structure evolution strategy [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(8): 16 - 24.
- [13] XIAO Y, KAYANGE H A, CUI G M. Heat integration of energy system using an integrated node-wise non-structural model with uniform distribution strategy [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 152(5): 119497. 1 - 119497. 15.
- [14] TRIVEDI B K, O'NEILL J R, ROACH R M. A new dual-temperature design method for the synthesis of heat exchanger networks [J]. Computers & Chemical Engineering, 1989, 13 (6): 667 - 685.
- [15] 赵倩倩, 崔国民, 苏戈曼, 等. 采用新单元换热量生成与分布概率协调策略优化换热网络 [J]. 热能动力工程, 2020, 35 (5): 17 - 23, 63.
ZHAO Qian-qian, CUI Guo-min, SU Ge-man, et al. Heat exchange network optimization by coordination strategy of heat transfer and distribution probability of new unit [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(5): 17 - 23, 63.
- [16] 韩正恒, 崔国民, 章伟杰, 等. 基于节点非结构模型的换热网络结构多样性分析及改进优化策略 [J]. 计算物理, 2021, 38 (4): 479 - 488.
HAN Zheng-heng, CUI Guo-min, ZHANG Wei-jie, et al. Structural diversity analysis and improved optimization strategy of heat exchanger networks based on NW-NSS model [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2021, 38(4): 479 - 488.