

采用关联进化策略的 RWCE 算法应用于换热网络优化

李万总, 崔国民, 孙涛, 赵兵涛

(上海理工大学 新能源科学与工程研究所, 上海 200093)

摘要: 换热单元之间的耦合关系导致其在优化过程中相互制约, 造成强制进化随机游走算法应用于换热网络时后期优化停滞。因此, 提出一种关联进化策略实现换热单元间的联动进化。首先对换热网络中换热单元的关联关系进行了分析, 评估了这种关联关系对进化算法的制约及效率的影响; 在此基础上, 建立了关联换热单元的联动进化机制, 克服了优化过程中的关联制约, 提升了进化的效率。最后, 将采用单元关联进化策略的算法应用于 15SP、16SP2 算例, 分别得到了年综合费用(TAC)为 1 513 253 和 6 849 252 \$/a 的结果, 其中 15SP 算例的 TAC 较文献最优结果下降了 5715 \$/a, 验证了改进后的算法能有效地提高搜索质量。

关键词: 换热网络优化; 耦合; 关联进化

中图分类号: TK124 文献标识码: A DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2020.02.003

[引用本文格式] 李万总, 崔国民, 孙涛, 等. 采用关联进化策略的 RWCE 算法应用于换热网络优化[J]. 热能动力工程, 2020, 35(2): 18-26. Li Wan-zong, CUI Guo-min, SUN Tao, et al. An improved RWCE combined with correlated evolutionary strategy for heat exchanger networks[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(2): 18-26.

An improved RWCE combined with correlated evolutionary strategy for heat exchanger networks

Li Wan-zong, CUI Guo-min, SUN Tao, ZHAO Bing-tao

(Institute of New Energy Science and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093)

Abstract: The coupling relationship among heat units in heat exchanger network causes to the restriction of units and the stagnation of optimization using random walk algorithm with compulsive evolution. Therefore, a correlated evolutionary strategy is proposed to realize the linked evolution for heat units. Firstly, the correlated relationship among heat units is analyzed with respect to the effects on the efficiency of evolutionary algorithm. On this basis, a linked evolutionary mechanism for correlated heat units is established to overcome the correlated restriction and enhance the evolution efficiency. Finally, the strategy is integrated with RWCE and applied to two cases, 15 SP and 16SP2. Two optimal structures with TAC of 1 513 253 \$/a and 6 849 252 \$/a were achieved, where the one in 15SP decreased by 5715 \$/a compared with the best result in literatures, which demonstrating the efficiency in improving the search quality of algorithm.

Key words: heat exchanger network optimization, coupling, correlated evolution

收稿日期: 2019-03-20; 修订日期: 2019-04-28

基金项目: 国家自然科学基金(51176125)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(51176125)

作者简介: 李万总(1994-), 男, 河南洛阳人, 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, E-mail: cgm1226@163.com

符号说明

- A —换热器面积, m^2
 C —冷流体
 H —热流体
 ΔL —游走最大步长, kW
 N —种群个数
 Q —换热器热负荷, kW
 Q' —换热器游走之后热负荷, kW
 Q_{max} —新生成换热器最大热负荷, kW
 $Q_{i,g}$ —游走之前公用工程热负荷, kW
 $Q'_{i,g}$ —游走之后公用工程热负荷, kW
 $(Q_{i,n})$ —第 i 股流线上第 n 个换热器, kW
 $(Q_{i,n})_{sum}$ —第 i 股流线上全部换热器热负荷的总和
 $rand$ —取值介于 $(0,1)$ 的随机数
 δ —接受差解概率
 θ —随机抽取换热器概率

引言

换热网络是过程工业的重要组成部分,其优化设计问题自 1969 年由 Masso^[1] 提出后,经过近 50 年的研究,形成了热力学方法和数学规划法两大类方法^[2]。数学规划法又可分为确定性方法^[3-4]和启发式方法^[5]2 类。由于启发式方法具有原理简单和对函数形态要求较低等优点,在换热网络优化研究中得到了广泛应用^[6-7]。强制进化随机游走算法^[8] (Random Walk Algorithm with Compulsive Evolution, RWCE) 是一种新的高效启发式方法,其引入接受差解机制,克服了启发式算法的贪婪性,提升了解的多样性。

换热网络优化中换热器间耦合关系的存在对优化造成的影响,尤其是分级超结构中固定的匹配框架使得这种耦合关系更为强烈。之前有许多学者对换热网络中换热器间的关联关系也做过相关研究。Pavão 等人^[9]采用平行进化的无分流换热网络综合优化找出相互存在制约关系的换热单元,利用模拟退火算法优化换热网络获得了较好的结果。邓炜栋等人^[10]通过随机抽取 2 个或多个换热器参与进化,以期找到耦合换热器同时进化使得目标函数下降。依大科等人^[11]采用考虑系统可靠性分析的柔性换热网络综合,通过断开某个环路的换热器,提高了系统的运行可靠性,但并未建立关联换热器间的联动进化以增强算法在后期的寻优能力。

针对换热网络优化中关联换热器间相互耦合导致算法陷入局部最优值的问题,通过对关联换热器

间相互影响的研究,建立了一种关联进化策略 RWCE 算法 (Correlated evolutionary random Walk Algorithm with Compulsive Evolution, CE-RWCE) 应用于换热网络优化。首先,在优化过程中以一定机率从已存在的换热器中随机抽取 1 台换热器,按照该换热器所在流股上是否存在公用工程,采取不同的进化方式,保证了算法的优化效率及寻优能力。通过对 CE-RWCE 优化过程及结果的分析,发现 CE-RWCE 不仅能够提高算法优化的效率,并且能够提高算法搜索质量。

1 换热网络优化过程中的关联关系

1.1 分级超结构模型

采用经典的无分流分级超结构模型 (Stage-wise Superstructure, SWS)^[12],以 5SP 为例,设置级数 $N_k = 2$,如图 1 所示。

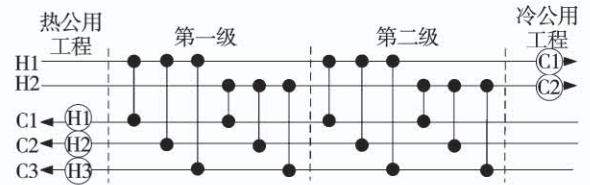


图 1 无分流分级超结构模型

Fig. 1 Stage-wise superstructure with no splits

1.2 关联关系

换热网络中某个换热器热负荷发生变化时,势必会对某些换热器造成影响,称其和受影响的换热器为具有关联关系的换热器。换热网络中具有关联的换热器之间相互影响、相互制约,这一现象造成了其系统的强耦合性。

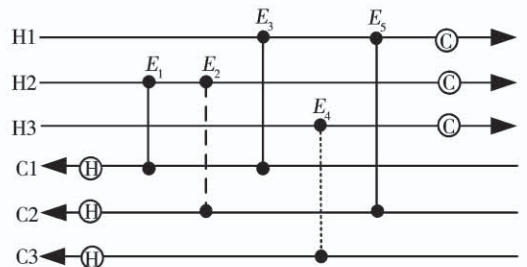


图 2 换热器间的关联关系

Fig. 2 Association between heat exchangers

如图 2 所示,换热器的关联关系从紧密程度上可以分为 3 种情况:

(1) 直接关联:若换热器 E_3 热负荷变化,其出口温度将发生改变,直接会对 E_1 、 E_5 造成影响,称 E_1 、 E_5 是和 E_3 具有直接关联的换热器。

(2) 间接关联:换热器 E_1 受 E_3 冷流股出口温度影响,当 E_3 的热负荷变化时,引起 E_1 工况的改变,进而对 E_2 造成影响。因此,称 E_2 和 E_3 是具有间接关联的换热器。

(3) 无关联:换热器 E_1 与 E_4 既不处于同热流股也不处于同一冷流股,同时又不通过其他换热器能够联系起来。因此, E_1 的改变对 E_4 不会造成影响,即称 E_1 和 E_4 为不存在关联关系的换热器。

2 关联换热单元对优化过程的影响

2.1 单个换热器进化对优化过程的影响

采用 9SP^[13] 算例研究换热器的进化方式对 TAC 的影响。详细物流参数如表 1 所示。TAC 计算式为: $2\ 000 + 70A$ \$/a。采用 RWCE 算法优化至

2 千万步时,得到 TAC 为 2 927 311 \$/a 换热网络结构,如图 3 所示。

表 1 算例 9SP 的物流参数

Tab. 1 Stream data for case 9sp2

流股	进口温度/°C	出口温度/°C	热容流率/ $\text{kW} \cdot \text{°C}^{-1}$	换热系数/ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$
H1	327	40	100	0.50
H2	220	160	160	0.40
H3	220	60	60	0.14
H4	160	45	400	0.30
C1	100	300	100	0.35
C2	35	164	70	0.70
C3	85	138	350	0.50
C4	60	170	60	0.14
C5	140	300	200	0.60
HU	330	250	-	0.50
CU	15	30	-	0.50

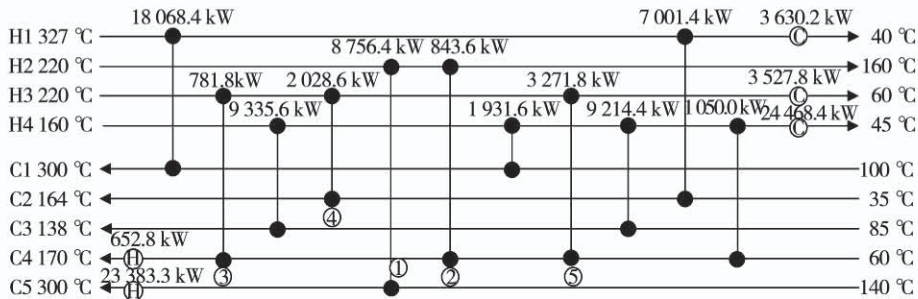


图 3 9SP 优化结果

Fig. 3 Optimization results of HEN structure of 9SP

换热网络中绝大多数换热器之间存在着某种关联关系,若单一换热器的热负荷发生改变,对 TAC 造成的影响可能有以下 3 种。

(1) 结构不发生改变。如图 4 所示,当 5 号换热器热负荷从 3 271.8 kW 降低至 2 991.8 kW, TAC 从 2 927 331 \$/a 上升至 2 929 640 \$/a; 其热负荷从 3 271.8 kW 升高至 3 511.8 kW, TAC 则上升至 2 929 827 \$/a。此时,换热网络的结构没有发生改变,只是引起了 TAC 的升高。这是因为 1 号换热器热负荷的增加导致 3、4 号换热器的对数平均换热温差减小,3 个换热器面积费用同时增加量高于公用工程费用的减少量,反之亦是。

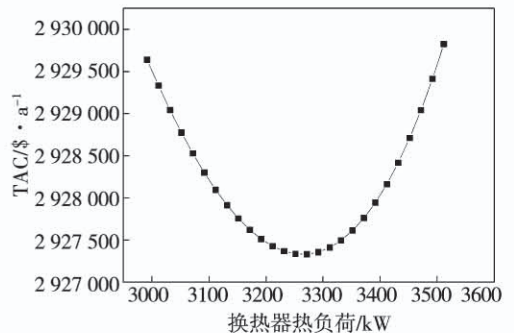


图 4 结构未发生改变时 TAC 变化

Fig. 4 TAC variation curve without structure change

(2) 流股末端产生公用工程。如图 5 所示,当 2 号换热器热负荷从 843.6 kW 降低至 664.6 kW

时, TAC 从 2 927 331 \$/a 上升至 2 935 038 \$/a; 热负荷从 843.6 kW 升高至 1 023.6 kW, TAC 则从 2 927 331 \$/a 上升至 2 937 901 \$/a。热负荷变化两侧 TAC 出现急升的原因是刚生成公用工程时, 直接增加了一个换热器的固定投资费用, 在之后公用工程量增加时, 只是增加了换热器的面积费用。

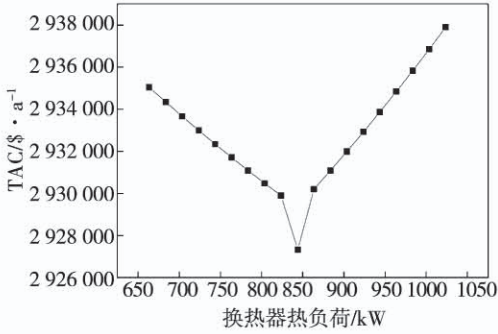


图 5 产生公用工程时的 TAC 变化

Fig.5 TAC variation curve in generating public works

(3) 换热器间出现温度交叉。当某一换热器热负荷变化很大时, 可能导致冷流体出口温度高于其位于同一冷流体上换热器的热流体进口温度。在图 3 中, 当 5 号换热器由 3 251.8 kW 增大至 5 251.8 kW, 则其冷流股的出口温度上升至 165 °C, 比 2 号换热器所在热流股的进口温度还高, 此时便无法达到冷却热流体的目的。若要使 2 号换热器的出口达到 160 °C 的目标温度, 则需要在 5 号换热器出口处增加内部冷公用工程, 换热网络 TAC 变化曲线和图 5 类似。

2.2 直接关联的影响

图 3 中, 与 1 号换热器具有直接关联关系的换热器只有 2 号。将 1 号换热器热负荷由 8 756.4 kW 升高至 8 926.4 kW, 2 号换热器热负荷由 860.6 kW 降低至 676.6 kW, 费用变化如图 6 所示。

虽然结构中总的公用工程用量没有改变, 但由于重新分配了 1、2、3 号及 C4、C5 流股末端处公用工程换热器的换热面积, 使得 5 个换热器总换热面积由 3 640.99 m² 减少至 3 629.89 m², 面积费用下降 967 \$/a, 得到 TAC 为 2 926 343 \$/a。可见通过直接关联的换热器间的联动调整也可以找到使 TAC 下降的方向, 得到 TAC 更低的换热网络结构。

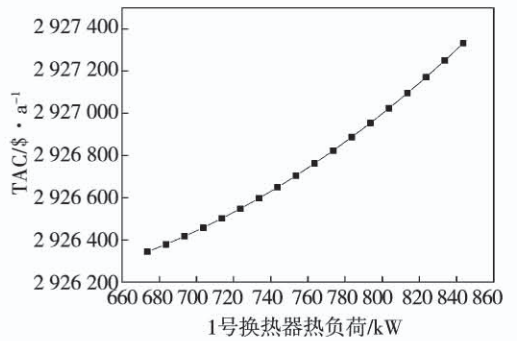


图 6 直接关联换热器联动调整时的 TAC 变化
Fig.6 TAC variation curve with direct correlation heat exchanger adjustment

2.3 间接关联的影响

图 3 中, 5 号和 3 号换热器之间属于间接关联的换热器。通过将 3 号换热器热负荷由 781.8 kW 升高至 851.8 kW, 5 号换热器热负荷降低至 3 201.8 kW, 不改变公用工程用量, 重新分配 3、4、5 号及 H3、C4 流股末端公用工程处换热器的换热面积, 费用变化如图 7 所示。可见通过间接关联的换热器间的联动调整也可得到 TAC 更低的换热网络结构。

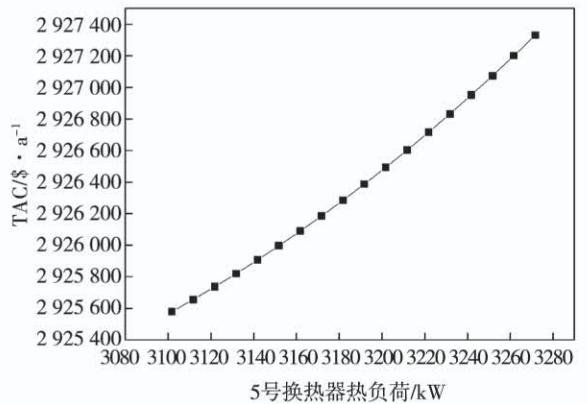


图 7 间接关联换热器联动调整时的 TAC 变化
Fig.7 TAC variation curve with indirect correlation heat exchanger linkage adjustment

3 引入关联进化策略的 RWCE 算法

在换热网络优化中, 相关联的换热器间存在的某种制约作用往往会造成 TAC 难以进一步下降, 而通过单一换热器或全部换热器的随机游走找到这种制约作用的概率很低。在优化过程中通过识别相关匹配关系, 仅优化与其具有关联的换热器, 而其他换

热器热负荷保持不变,通过关联换热器的联动调整,则有很大概率寻找到更低 TAC 的换热网络结构。在考察了关联换热器对算法优化影响的基础之上,提出一种采用关联进化策略的 RWCE 算法(CE-RWCE)。其主要步骤如下。

Step1:种群初始化

对换热网络中换热器热负荷随机初始化:

$$Q = Q_{\max} \cdot \text{rand}(0,1) \quad (1)$$

式中: Q_{\max} —产生的换热器最大换热热量; $\text{rand}(0,1)$ — $(0,1)$ 均匀分布的随机数; Q —换热网络中的换热器热负荷。

Step2:个体进化阶段

以一定概率 θ 选择一台换热器 $Q_{i,n}$ 进行关联进化策略操作。

$$a = \begin{cases} 1, & \text{rand}(0,1) < \theta \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} Q'_{i,n} = Q_{i,n} - Q_{i,n}/(Q_{i,n})_{\text{sum}} \cdot Q'_{i,g} \\ Q_{i,g} = 0, Q'_{i,g} \neq 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$Q'_{i,n} = Q_{i,n} + (1 - 2\text{rand}(0,1)) \cdot \text{rand}(0,1) \cdot \Delta L \quad (4)$$

式中:若 $a=0$,则换热器热负荷按式(4)进行随机游走;若 $a=1$,则选择和换热器 $Q_{i,n}$ 关联的换热器按式(4)进行随机游走,然后计算游走之后换热器 $Q_{i,n}$ 所在第 i 流股上公用工程热负荷 $Q'_{i,g}$ 。若 $Q_{i,g}=0, Q'_{i,g} \neq 0$,则采用式(3)将公用工程负荷按换热器所占流股总换热负荷比例分配给该股流体上的其他换热器。操作的目的是为了保证进化过程中不产生额外公用工程热负荷,从而引起 TAC 的升高,以提升算法优化效率。 $Q'_{i,n}$ —换热器游走之后热负荷; Q' —换热器游走之后的热负荷; ΔL —随机游走的最大步长。

Step3:选择操作

计算个体游走进化后的换热网络新结构的 TAC。若得到更小的 TAC 值,则接受这个新的换热网络结构作为下一次迭代的初始结构。若大于上一次迭代的 TAC 值,则引入随机数 $\text{rand}(0,1)$ 。判断随机数小于接受差解概率 δ ,则接受此结构作为下一次迭代的初始结构,否则保留上一次迭代后的换热网络结构。

Step4:终止条件

当算法迭代步数满足最大迭代步数时,算法终止。其算法流程图如图 8 所示。

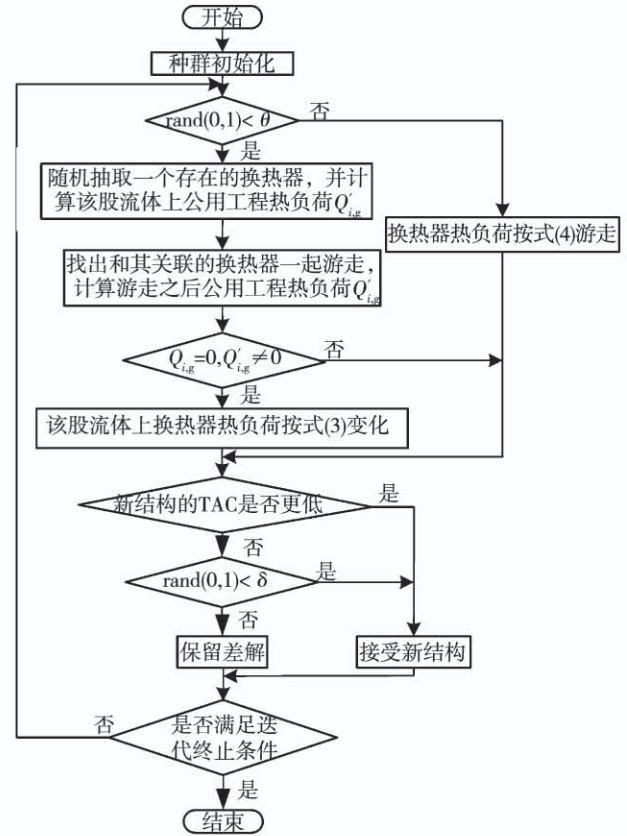


图 8 引入耦合进化策略的算法流程

Fig. 8 Flow chart of the algorithm with the coupled evolutionary strategy

4 算例验证

4.1 算例一

算例一^[14]包含 8 股热流体和 7 股冷流体,详细物流参数如表 2 所示。冷、热公用工程费用分别为: 10 \$/(kW·a)、80 \$/(kW·a)。TAC 计算式为: 8 000 + 500 · A^{0.75} \$/a。参数设置: $N=10$, $Q_{\max}=100$ kW, $\Delta L=100$ kW, $\theta=0.3$, $\delta=0.01$ 。

算例优化结果如图 9 所示。文献[17]采用 RWCE 得到 TAC 为 1 518 968 \$/a 的换热网络结构,是目前文献查到最低的 TAC。采用 CE-RWCE 优化该算例,得到的 TAC 为 1 513 253 \$/a,比文献最优结果降低 5 715 \$/a。可以看出,采用 CE-RWCE 优化换热网络比 RWCE 具有更强的全局搜索能力,证明了该策略的有效性。由于换热网络非凸非线性的特性,局部最优解遍布求解域,在优化后

期由于换热器间强烈的耦合关系极易陷入局部最优,使得 TAC 很难进一步下降。而采用关联进化的策略,使相互耦合的换热器同时联动匹配调整,可能造成某个换热器恰好消去或生成,增强了换热网络中个体在优化后期的结构进化能力,进一步避免了启发式方法在优化后期易早熟收敛的缺点,找到更低的 TAC 结构。

表 2 算例 15SP 的物流参数

Tab.2 Stream data for case 15SP

流股	进口温度/℃	出口温度/℃	热容流率/ kW·℃ ⁻¹	换热系数/ kW·m ⁻² ·℃ ⁻¹
H1	180	75	30	2.0
H2	280	120	60	1.0
H3	180	75	30	2.0
H4	140	40	30	1.0
H5	220	120	50	1.0
H6	180	55	35	2.0
H7	200	60	30	0.4
H8	120	40	100	0.5
C1	40	230	20	1.0
C2	100	220	60	1.0
C3	40	190	35	1.0
C4	50	190	30	2.0
C5	50	250	60	2.0
C6	90	190	50	2.0
C7	160	250	60	1.0
HU	325	325	-	3.0
CU	25	40	-	2.0

表 3 算例一最优结果比较

Tab.3 Comparison results of case 1

文献	热公用工程/MW	冷公用工程/MW	换热单元个数	年综合费用/(\$·a ⁻¹)
[15]	10.11	7.73	16	1 527 240
[16]	10.12	7.74	20	1 524 149
[17]	10.31	7.93	19	1 518 968
本文	10.22	7.85	18	1 513 253

4.2 算例二

算例二取自文献[18]。具体物流参数如表 4 所示。冷、热公用工程费用分别为:2.1 \$/(kW·a)、35 \$/(kW·a)。换热网络 TAC 计算式:26 600 + 4 147.5A^{0.6} \$/a。参数设置:N = 10, Q_{max} = 100 kW, ΔL = 120 kW, θ = 0.4, δ = 0.01。

表 4 算例 16sp2 流股参数

Tab.4 Stream data for case 16sp2

流股	进口温度/℃	出口温度/℃	热容流率/ kW·℃ ⁻¹	换热系数/ kW·m ⁻² ·℃ ⁻¹
H1	385	159	131.51	1.238
H2	516	43	1 198.96	0.546
H3	132	82	378.52	0.771
H4	91	60	589.545	0.859
H5	217	43	186.216	1.000
H6	649	43	116.00	1.000
C1	385	30	119.10	1.850
C2	471	99	191.05	1.129
C3	521	437	377.91	0.815
C4	418.6	78	160.43	1.000
C5	234	217	1 297.70	0.443
C6	266	256	2 753.00	2.085
C7	149	49	197.39	1.000
C8	163.4	59	123.156	1.063
C9	649	163	95.98	1.810
C10	221.3	219	1 997.50	1.377
HU	1 800	800	-	1.2
CU	38	82	-	1.0

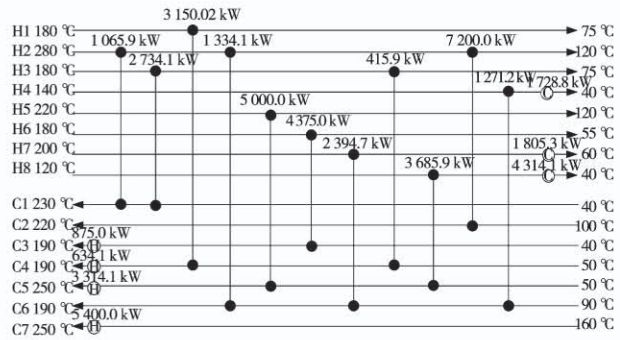


图 9 CE-RWCE 优化 15SP 结果

Fig.9 Optimization results of CE-RWCE algorithm for 15SP

表 5 算例二最优结果比较

Tab.5 Comparison results of case 2

文献	热公用工程/MW	冷公用工程/MW	换热单元个数	年综合费用/(\$·a ⁻¹)
[9]	-	-	17	7 301 437
[19]	38.80	442.37	16	7 361 190
[20]	10.05	413.61	19	6 869 610
本文	9.77	413.33	19	6 849 252

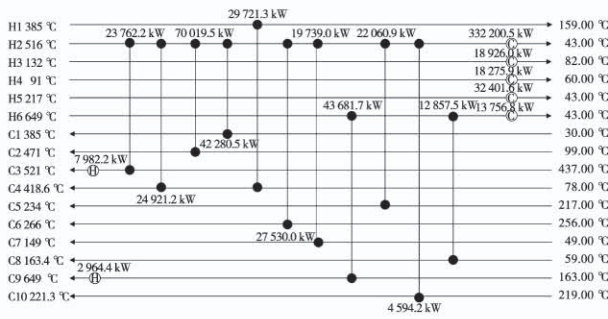


图 10 RWCE 优化 16SP2 结果

Fig. 10 Optimization results of RWCE for 16SP2

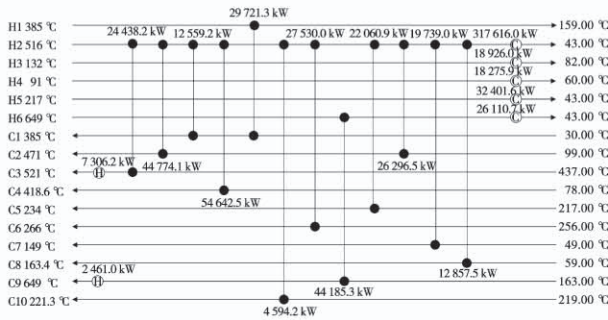


图 11 CE-RWCE 优化 16SP2 结果

Fig. 11 Optimization results of CE-RWCE for 16SP2

本文采用 CE-RWCE 优化该算例,得到 TAC 为 6 849 252 \$/a。采用 CE-RWCE,不仅减少了优化变量的数量,进一步提高 RWCE 的优化效率,而且发现当换热网络个体结构发生改变时,采用关联进化机制能快速高效地重新分配关联换热器上的换热负荷,短时间内尽可能多的发挥新结构的优化潜力,从而找到 TAC 更低的换热网络结构。

5 结论

(1) 采用 CE-RWCE 优化换热网络能够增强连续变量优化能力,通过关联换热器间联动调整,增强了换热网络的结构进化和变异能力,从而找到使目标函数下降的方向。

(2) 在当个体结构发生改变时,采用 CE-RWCE 能够快速高效重新分配各换热器的换热负荷,在短时间内尽可能多地发挥新结构的优化潜力,提高算法优化效率。

(3) 算例验证表明,与加入该策略之前算法相比,该策略能够提高算法的搜索质量,使目标函数足

够接近甚至更低,并取得 TAC 较低的换热网络结构。其中 15SP 算例的 TAC 较文献最优结果下降了 5 715 \$/a。

参考文献:

- [1] Masso A H, Rudd D F. The synthesis of system designs 2: Heuristic structuring[J]. *AIChE Journal*, 1969, 15(1), 10 - 17.
- [2] Mihaela Morar. Review: Important contributions in development and improvement of the heat integration techniques[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2010, 34(8): 1171 - 1179.
- [3] Linnhoff B, Flower J R. Synthesis of HENs: I. Systematic generation of energy optimal networks[J]. *AIChE Journal*, 1978, 24(4): 633 - 642.
- [4] Samarjit Chakraborty. Heat exchanger network synthesis: the possibility of randomization [J]. *Chemical Engineering Journal*, 1999, 72(3): 209 - 216.
- [5] ZHOU Conghai, HUANG Zhixian, QIU Ting, WU Yanxiang. Application progress of stochastic searching techniques in the optimization of heat exchanger networks[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2012, 31(3): 495 - 501.
- [6] B. Lin. Solving heat exchanger network synthesis problems with Tabu Search [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(8): 1451 - 1464.
- [7] Aline P. Silva, Mauro A. S. S. Ravagnani, Evaristo C. Biacaia Jr. Particle swarm optimization applied in retrofit of heat exchanger networks [J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2009, 27(9): 1035 - 1040.
- [8] 肖媛. 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. A novel random walk algorithm with compulsive evolution for heat exchanger networks[J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering*, 2016, 67(12): 5140 - 5147
- [9] Leandro Vitor Pavão. Heat Exchanger Network Synthesis without stream splits using parallelized and simplified simulated annealing and Particle Swarm Optimization [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017, 158(2): 96 - 107.
- [10] 依大科, 韩志忠, 王克峰, 姚平经. 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, YAO Ping-jing. Optimization of flexible heat exchanger network embedded with system level reliability analysis [J]. *Chemical Industry Engineering Progress*, 2012, 31(12): 2632 - 2642.
- [11] 邓炜栋, 崔国民, 等. 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.
- DENG Wei-dong, CUI Guo-min, XIAO Yuan. A coupled evolutionary strategy for complex heat exchanger network optimization [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2018, 35(6): 675-684.
- [12] 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.
- [13] B. Linnhoff, S. Ahmad. Cost optimum heat exchanger networks—1. Minimum energy and capital using simple models for capital cost[J]. Computers & Chemical Engineering, 1990, 14(7): 729-750.
- [14] 段欢欢, 崔国民, 陈家星, 陈 上. 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.
DUAN Huan-huan, CUI Guo-min, CHEN Jia-Xing, CHEN Shang. A differential evolution algorithm with hybrid search strategy based on multi-population for heat exchanger network synthesis. [J]. Chemical Industry Engineering Progress, 2016, 31(12): 1-6.
- [15] Peng Fuyu, Cui Guomin. Efficient simultaneous synthesis for heat exchanger network with simulated annealing algorithm[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78(5): 136-149.
- [16] 李帅龙, 崔国民, 肖 媛. 一种多子群协进化的粒子群算法同步综合换热网络[J]. 热能动力工程, 2017, 32(4): 20-28.
LI Shuai-long, CUI Guo-min, XIAO Yuan. A Multi-subpopulation Co-evolutionary Particle Swarm Optimization Algorithm for Simultaneous Synthesis of Heat Exchanger Networks[J]. Chemical Industry Engineering Progress, 2017, 32(4): 20-28.
- [17] XIAO Yuan, CUI Guomin, LI Shuailong. A novel random walk algorithm with compulsive evolution for global optimization of heat exchanger networks [J]. CIESC Journal, 2016, 67(12): 5140-5147.
- [18] R. Mohammadhasani Khorasany. A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks[J]. Computers & Chemical Engineering, 2009, 33(8): 1363-1370.
- [19] Huo Zhaoyi. Simultaneous synthesis of structural-constrained heat exchanger networks with and without stream splits[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2013, 91(5): 830-842.
- [20] Zhongkai Bao. A novel random walk algorithm with compulsive evolution combined with an optimum-protection strategy for heat exchanger network synthesis[J]. Energy, 152(2018): 694-708.

(单楚舒 编辑)

(上接第 8 页)

- [39] FENG Yu-heng, MA Kun-yu, YU Tian-chi, et al. Phosphorus transformation in hydrothermal pretreatment and steam gasification of sewage sludge[J]. Energy & Fuels, 2018, 32: 8545-8551.
- [40] CHEN Hong-mei, ZHAI Yun-bo, XU Bi-bo, et al. Fate and risk assessment of heavy metals in residue from co-liquefaction of Camellia oleifera cake and sewage sludge in supercritical ethanol [J]. Bioresource Technology, 2014, 167: 578-581.
- [41] HUANG Hua-jun, YUAN Xing-zhong. The migration and transformation behaviors of heavy metals during the hydrothermal treatment of sewage sludge [J]. Bioresource Technology, 2016, 200: 991-998.
- [42] SHAO Jian-guan, YUAN Xing-zhong, LENG Li-jian, et al. The comparison of the migration and transformation behavior of heavy metals during pyrolysis and liquefaction of municipal sewage sludge, paper mill sludge, and slaughterhouse sludge [J]. Bioresource Technology, 2015, 198: 16-22.
- [43] SHI Wan-sheng, LIU Cun-guang, DING Da-hu, et al. Immobilization of heavy metals in sewage sludge by using subcritical water technology[J]. Bioresource Technology, 2013, 137: 18-24.
- [44] SHI Wan-sheng, LIU Cun-guang, SHU You-ju, et al. Synergistic effect of rice husk addition on hydrothermal treatment of sewage sludge: fate and environmental risk of heavy metals [J]. Bioresource Technology, 2013, 149: 496-502.
- [45] PAN Hui. Effects of liquefaction time and temperature on heavy metal removal and distribution in liquefied CCA-treated wood sludge [J]. Chemosphere, 2010, 80(4): 438-444.
- [46] ZHAO Pei-tao, SHEN Ya-fei, GE Shi-fu, et al. Energy recycling from sewage sludge by producing solid biofuel with hydrothermal carbonization [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 78: 815-821.
- [47] DANSO-BOATENG E, HOLDICH R G, MARTIN S J, et al. Process energetics for the hydrothermal carbonization of human faecal wastes [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105: 1115-1124.

(丛 敏 编辑)