

进化概率差异化策略优化有分流换热网络

杨智华^{1,2}, 崔国民^{1,2}, 徐玥^{1,2}, 肖媛^{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: 强制进化随机游走算法优化换热网络时具有程序简单、全局搜索能力强等特点,但在优化过程中不同的进化阶段对进化概率需求不同,算法中设置单一的进化概率难以满足实际进化需求。因此,提出一种进化概率差异化策略,该策略的核心思想是智能识别流股的换热程度,动态调整进化概率,对存在公用工程的流股强制参与进化,使算法在前期具有较强的结构搜索能力;完全换热的流股通过降低进化概率,提升算法全局的精细搜索能力。采用15SP和39SP算例进行验证,所获年综合费用分别为1 494 690和1 894 477 \$/a,验证了该策略能够提升算法的优化效率与质量。

关键词: 换热网络优化;有分流节点非结构模型;差异化进化

中图分类号:TK124

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.04.001

[引用本文格式] 杨智华,崔国民,徐玥,等. 进化概率差异化策略优化有分流换热网络[J]. 热能动力工程,2022,37(4):1-8.
YANG Zhi-hua, CUI Guo-min, XU Yue, et al. Optimization of heat exchanger networks with shunt by evolutionary probability differentiation strategy[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(4): 1-8.

Optimization of Heat Exchanger Networks with Shunt by Evolutionary Probability Differentiation Strategy

YANG Zhi-hua^{1,2}, CUI Guo-min^{1,2}, XU Yue^{1,2}, XIAO Yuan^{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: The optimization of heat exchanger network by the random walk algorithm with compulsive evolution has the advantages of simple procedure and strong global searching ability. However, the different evolutionary probabilities are required in different evolutionary stages during the optimization, and a single evolutionary probability is difficult to meet the actual needs of different stages. Therefore, an evolutionary probability differentiation strategy is proposed, and its core ideas are the heat exchange level of streams identified by intelligence, the evolutionary probability adjusted by dynamic condition and the evolution participated compulsively by streams with utility, which makes the algorithm have strong structure searching ability in the early stage. For the streams with full heat exchange, the global fine searching ability of the algorithm is enhanced by reducing evolutionary probability. The 15SP and 39SP examples are used to verify the results, and the annual comprehensive costs are 1 494 690 \$/a and 1 894 477 \$/a, respectively. The results show that the strategy can improve the optimization efficiency and quality of the algorithm.

Key words: heat exchanger network optimization, nodes-based nonstructural model with stream splits, differential evolution

收稿日期:2021-07-11; 修订日期:2021-08-04

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); China Postdoctoral Science Foundation(2020M671171)

作者简介:杨智华(1995-),男,江西宜春人,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。

引言

换热网络是过程系统中的重要环节^[1-3],其研究的意义主要体现在两个方面:一方面在实际应用上,通过流股之间的合理匹配减少能源的消耗,提升过程工业系统的能源利用率;另外一方面,换热网络综合包含流股匹配关系的整型变量、流股之间的换热负荷匹配的连续变量、求解过程的面积指数和对数平均温差等非线性项,属于混合整数非线性规划问题,通过建立优化模型与算法可以促进最优化理论发展。

换热网络优化方法分为同步优化^[4]和分步优化方法^[5]。分步优化将原问题分解为多个子问题,并没有考虑子问题之间的制约性;同步优化方法通过建立同步综合模型来实现公用工程量、换热单元数、换热面积的同步优化,优化效果较好。同步优化方法分为确定性方法和启发式方法。启发式方法因受模型非线性、非凸性的影响较小广泛应用于换热网络综合问题的求解,如粒子群算法^[6]、遗传算法^[7]和模拟退火算法^[8]等。传统的启发式算法依靠粒子之间的信息交流,虽然能够提升算法的优化速度,但其在优化后期极易出现过早收敛,导致全局搜索能力下降。肖媛等人^[9]提出强制进化随机游走算法(Random Walk algorithm with Compulsive Evolution, RWCE),该算法不依靠个体间信息交流,保持独立进化,通过接受差解机制使个体保持较强的结构变异能力,增强了算法的全局搜索能力,是较为高效的优化算法。但算法在整个优化过程设定固定的进化概率,难以兼顾不同进化阶段的实际需求,还存有一定的改进空间。曹美等人^[10]采用每股流体必进化策略来提高流股上参与进化概率,提升算法质量。朱玉双等人^[11]通过控制每次迭代过程中参与进化的换热单元数,来增强进化后期精细搜索能力,使算法具有良好的快速性和持续性。

上述改进方法均是从进化概率的角度出发,但采用流股进化策略会导致算法在中、后期有大量的换热单元参与进化,结构变化幅度过大,局部搜索精度下降。采用控制换热单元进化数策略虽能满足不同阶段的进化需求,却没有考虑网络的具体结构,无法准确识别判断进化阶段。同时,后期进化概率过

小,会直接导致网络上公用工程难以消去,优化质量依旧有待进一步提高。因此,本文提出进化概率差异化策略,根据流股上是否有公用工程来判断优化进程。优化初期流股上存在大量的公用工程,强化存在公用工程的流股上的进化概率,使算法在前期具有较强的结构搜索能力。随着优化的进行,整个网络中公用工程用量下降,部分流股上形成完全换热,通过降低形成完全换热的流股上的进化概率,提升算法的局部搜索能力。

1 换热网络数学模型

1.1 有分流节点非结构模型

有分流节点非结构模型^[12]相比于其他模型具有自由度高、随机性强的特点。图1中H代表热流体,C代表冷流体,NGD_H、NGD_C表示热、冷流体上分组数,每一组包含有若干个分支,NF_H、NF_C表示热冷流上分支数,Mb_H、Mb_C、Mb_H和Mb_C表示热冷流股上分支上串节点数目。则每股热冷流体上一共存在NGD_H × NF_H × Mb_H,NGD_C × NF_C × Mb_C个节点。图中设置NGD_H = NGD_C = 3,NF_H = 3,NF_C = 2,Mb_H = Mb_C = 1,换热单元可以在节点上随机生成,如图中连线所示。

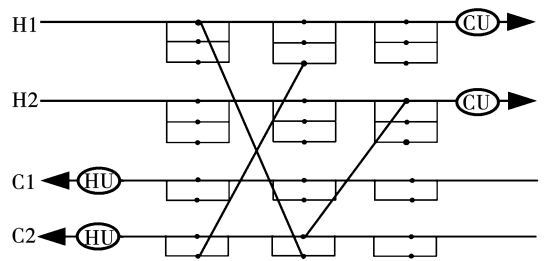


图1 有分流节点非结构模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of nodes-based nonstructural model with steam splits

1.2 目标函数

优化目标函数为最低年综合费用(total annual cost, TAC),包含换热单元和公用工程的固定投资、面积费用及运行费用。

$$\min TAC = \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{nd_H=1}^{SUM_H} (C_{FE} \times E_{i,NUM_H} + C_{AE} \times A_{i,NUM_H}^{\delta}) + \sum_{i=1}^{N_H} (F_{FE} \times E_{CU,i} + C_{AE} \times A_{CU,i}^{\delta} + C_{CU} \times$$

$$Q_{CU,i} + \sum_{j=1}^{N_C} (F_{FE} \times E_{HU,j} + C_{AE} \times A_{HU,j}^{\delta} + C_{HU} \times Q_{HU,j}) \quad (1)$$

式中; N_H 、 N_C —热冷流股数;SUM_H—热流股总节点数;NUM_H—热流股上的节点编号; C_{FE} 、 F_{FE} —换热器固定投资费用、公用工程固定投资费用; E —0-1变量; C_{AE} —面积费用系数; A —面积; δ —面积费用指数; C_{CU} 、 C_{HU} —冷、热公用工程的运行费用系数; Q —换热量;下标*i*、*j*—热流股、冷流股; nd_H —节点编号。

1.3 RWCE 算法步骤

步骤1:初始化阶段

设置生成个体规模为 n ($n=1,2,\dots,N$) 的初始种群,个体内所有的冷热流体之间没有换热单元的连接,流体依靠公用工程来达到目标温度。

步骤2:个体进化

根据已存在的换热单元,设定进化概率 δ ,选取换热单元对其上的换热量和分流比进行更新,更新公式为:

$$(Q_n)_{it+1} = (Q_n)_{it} + (1 - 2\alpha) \times \Delta L \times \beta \times a \quad (2)$$

$$(\overrightarrow{SPH}_n)_{it+1} = (\overrightarrow{SPH}_n)_{it} + (1 - 2\alpha) \cdot \Delta L_{SP}, n = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

$$(\overrightarrow{SPC}_n)_{it+1} = (\overrightarrow{SPC}_n)_{it} + (1 - 2\alpha) \cdot \Delta L_{SP}, n = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

式中: Q_{it} —换热单元在第 it 次迭代的换热量; Q_{it+1} —换热单元随机游走后的换热量; $\overrightarrow{SPH}_{n,it}$ 、 $\overrightarrow{SPH}_{n,it+1}$ —游走前后热流股上的分流比; $\overrightarrow{SPC}_{n,it}$ 、 $\overrightarrow{SPC}_{n,it+1}$ —游走前后冷流股上的分流比; α 、 β —(0,1)之间的随机数; ΔL —游走过程中最大步长; ΔL_{SP} —进化中的分流比; $(1 - 2\alpha)$ —控制个体进化过程中某一维度的行走方向。

步骤3:新换热单元生成

以一定的生成概率 ϕ ,在冷、热流股上随机选取空节点进行匹配,并按式(5)赋予换热量。

$$Q_{n,it+1} = \begin{cases} Q_{\max} \times \text{rand}(0,1), r_2 \geq \phi \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

式中: Q_{\max} —赋予该换热单元最大换热量; r_2 —(0,1)之间的随机数。

步骤4:个体选择

如果进化后的个体 TAC 费用下降,则接受该个体并且将其作为下一次迭代的初始结构。反之,以

一定的接受差解概率 ε 更新该个体。

步骤5:终止条件

达到最大迭代步数则终止以上操作,否则返回步骤2。

2 RWCE 算法进化概率分析

为了研究进化概率对算法的影响,选择 15SP 算例^[13]进行分析,其包含 8 股热流股、7 股冷流股。设置参数为 $N=1$, $NGD_H = NGD_C = 5$, $NF_H = NF_C = 3$, $Mb_H = Mb_C = 1$, $\Delta L = 100$ 和 $\phi = 0.2$, $\varepsilon = 0.01$ 。采用控制变量法,改变单一变量进化概率 δ ,设置为 0.05, 0.1, 0.3 和 1。图 2 和图 3 为不同进化概率下年综合费用和公用工程数量变化曲线。

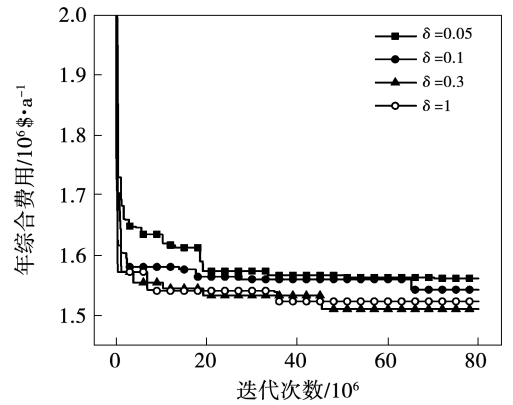


图 2 不同进化概率下的年综合费用变化曲线

Fig. 2 Variation curves of annual comprehensive cost under different evolutionary probabilities

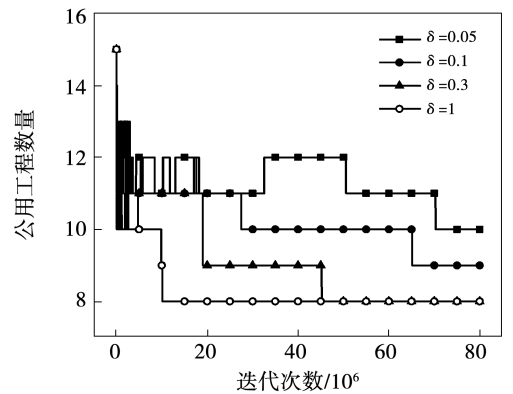


图 3 不同进化概率下公用工程数量变化曲线

Fig. 3 Variation curves of utility quantity under different evolutionary probabilities

当进化概率为 1 时,个体内的换热单元全部参与进化,优化初期网络上的公用工程数量在前期变

化幅度大,年综合费用下降速度较快;但在优化的中后期,网络上公用工程的数量基本不变,目标费用也处于“停滞”状态。由于初期流股上存在大量的公用工程,此时优化空间大,换热单元参与进化多,能够快速寻找更多的结构,个体内流股之间的匹配关系处于较优的状态,换热单元参与进化比例大,导致结构大幅度变化,网络中结构稳定性差。所以,呈现出前期费用和公用工程数量下降明显、后期基本停滞的现象;当进化概率为 0.05 时,每次参与进化的换热单元个数较少,对结构的搜索速度下降。网络上公用工程的数量和年综合费用在进化初期下降速度较为缓慢,但在优化的中后期出现明显下降。因在优化的中后期在结构处于较优状态时,较小的进化概率能对当前的结构进行较为精细的搜索,合理分配当前结构的换热量,使公用工程数量进一步下降。但因进化概率过小,结构过于稳定,费用下降的幅度有限。当进化概率为 0.3 和 0.1 时年综合费用较低,但相比进化概率为 1 时在优化前期个体不能快速的搜索结构,公用工程数量下降缓慢,降低优化效率;与进化概率为 0.05 比较,在优化后期保持结构的稳定性较差,不能够对固有的结构进行更为精细的搜索,导致后期费用基本停滞。

优化进程中,前期网络结构中未形成匹配关系,依靠公用工程使流股达到目标温度,可优化空间大。优化的后期,网络结构处于较优状态,部分流股实现完全换热,当选中该流股上的换热单元进化时,将重新产生公用工程,影响算法优化效率。由此可见,算法中单一的进化概率很难满足优化进程中的实际需求,合理的进化概率应根据算法的进化阶段来设定,以提升算法的优化质量与效率。

3 进化概率差异化策略

3.1 进化概率差异化策略

根据网络结构上的公用工程数量来调整进化概率,满足算法在不同进化阶段对进化概率的实际需求。进化概率差异化策略实现流程如图 4 所示。

3.1.1 换热单元的智能识别与划分

首先,在选取换热单元进行随机游走进化阶段,识别出换热单元的匹配关系,并将其两端相连接的冷/热流股编号数据输出。同时,对网络上的所有

冷/热流股上的换热程度进行判断。如果冷/热流股上的公用工程用量为零,则该股为完全换热流股,并将完全换热的冷/热流股编号分别存储记录,再将换热单元两端的流股编号与之比较:如果换热单元上的冷/热流股编号均不能在完全换热流股存储的数组里面映射,即冷/热流股上的公用工程用量大于零,则这类换热单元为第 1 类(换热单元两端连接的流股都存在公用工程);如果换热单元连接的冷流股或者热流股上可在数组上映射,则这类换热单元为第 2 类(一端连接公用工程的换热单元);如果换热单元连接的冷/热流股上均可在存储的数组内映射,即冷/热流股上形成完全换热,则这类换热单元为第 3 类(完全换热流股上的换热单元)。

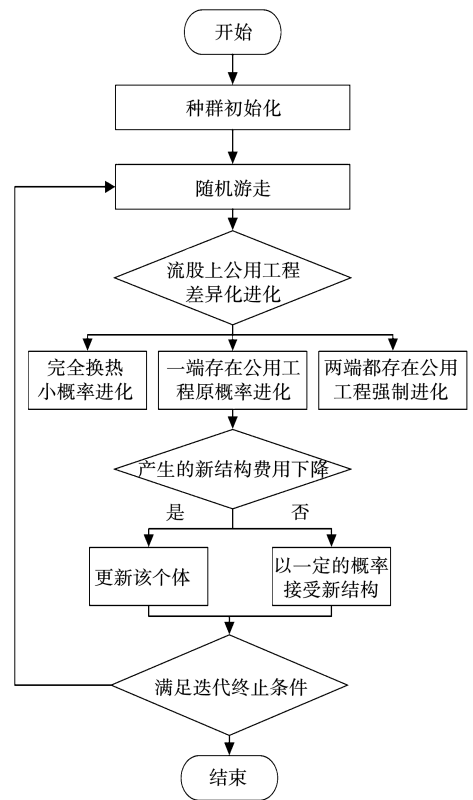


图 4 差异化进化策略流程图

Fig. 4 Flow chart of evolution probability differentiation strategy

3.1.2 进化概率差异化

(1) 第 1 类换热单元强制参与进化

公用工程与换热单元相比,除了固定投资和面积费用,还有运行费用。若网络结构中存在的换热单元两端所连接的流股上均存在公用工程,则使其参与进化,概率 $\delta = 1$,强制其参与每一次进化,降低

网络上公用工程用量。进化表达式为:

$$\begin{cases} (Q_n)_{it+1}' = (Q_n)_{it} + (1 - 2\alpha) \cdot \beta \cdot L_{\max} \cdot AC \\ AC = 1, |Q_{CU}| > 0 \text{ 且 } |Q_{HU}| > 0 \end{cases} \quad (6)$$

(2) 第2类换热单元原进化概率

第2类换热单元在整个换热单元中占比较高,并且这类换热单元公用工程的下降空间有限,如果这类换热单元采用较高或较低的进化概率,直接影响网络的稳定性,因此这类换热单元在进化时,按照原进化方式:

$$\begin{cases} (Q_n)_{it+1}' = (Q_n)_{it} + (1 - 2\alpha) \cdot \beta \cdot L_{\max} \cdot \delta \\ |Q_{CU}| > 0 \text{ 或 } |Q_{HU}| > 0 \end{cases} \quad (7)$$

(3) 第3类换热单元小概率进化

在优化的后期,部分达到完全换热状态的流股上的换热单元参与进化将会导致流股上重新产生公用工程,造成网络结构的费用提高。如果此时被差解接受,算法需要大量的迭代步数才能够回到接受差解前的结构,导致优化效率降低。具体操作为:

$$\begin{cases} (Q_n)_{it+1}' = (Q_n)_{it} + (1 - 2\alpha) \cdot \beta \cdot L_{\max} \cdot \delta \cdot \lambda \\ |Q_{CU}| = 0 \text{ 且 } |Q_{HU}| = 0 \end{cases} \quad (8)$$

3.2 策略可行性分析

图5为15SP算例在8000万步迭代过程中个体换热单元参与进化概率变化曲线。RWCE算法在迭代过程中,参与进化概率约为0.2。采用进化概率差异化策略后,前期流股上存在公用工程多,换热单元参与进化概率高,对结构的搜索速度快,进化概率可以达到0.8。随着优化的进行,流股上公用工程快速下降,参与进化概率下降约0.45。随后在迭代中,流股上的公用工程逐渐减少,流股进化概率也缓慢下降,2000万步后冷热流股上都存在公用工程的换热单元减少,冷热流股上形成完全换热的换热单元变多,参与进化概率下降,随后维持在0.18的水平。

图6为RWCE算法和改进后算法分别优化15SP算例时其TAC变化情况。改进后的算法其收敛速度快,并且收敛时费用比RWCE算法低。分析其原因:通过对流股上的换热单元进行个性化的游走,强制进化存在公用工程流股上的换热单元,加速

流股上公用工程的消去,提高收敛速度;优化后期通过减小完全换热流股上换热单元的进化概率来保护其形成的匹配结构,增强算法后期精细搜索能力,提高算法的求解质量与效率。

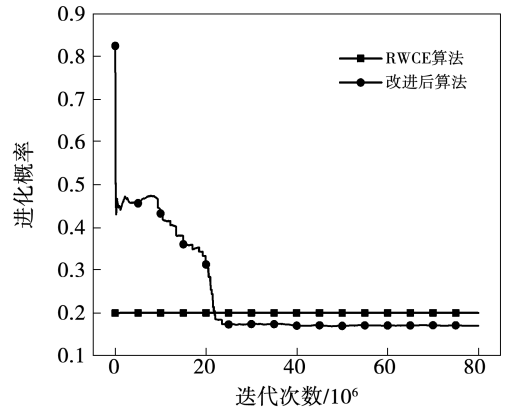


图5 RWCE算法和改进后算法进化概率
Fig.5 Evolution probability by RWCE algorithm and improved algorithm

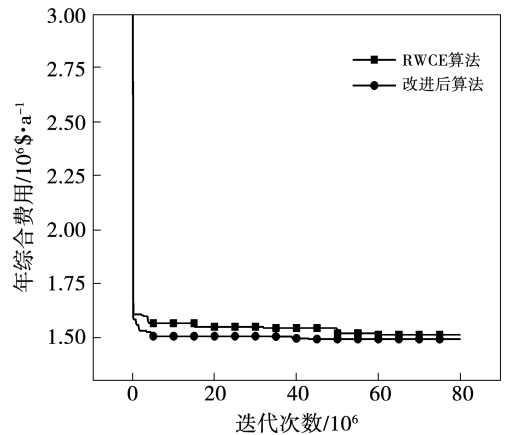


图6 RWCE和改进算法优化15SP算例结果对比
Fig.6 Comparison of optimized 15SP results by RWCE algorithm and improved algorithm

4 算例验证

4.1 算例1

算例1^[13]为15SP算例,采用RWCE算法优化该算例,最终结果为1514341 \$/a,采用进化概率差异化策略优化后的结果为1494690 \$/a。费用下降19651 \$/a,其结构对比如图7和图8所示,与已有文献的结果对比如表1所示。

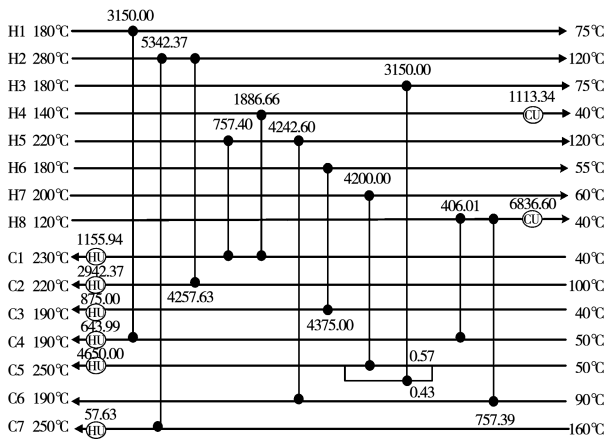


图7 RWCE 算法优化 15SP 算例网络结构

(1 514 341 \$/a)

Fig. 7 Network structure of optimized 15SP results by RWCE algorithm(1 514 341 \$/a)

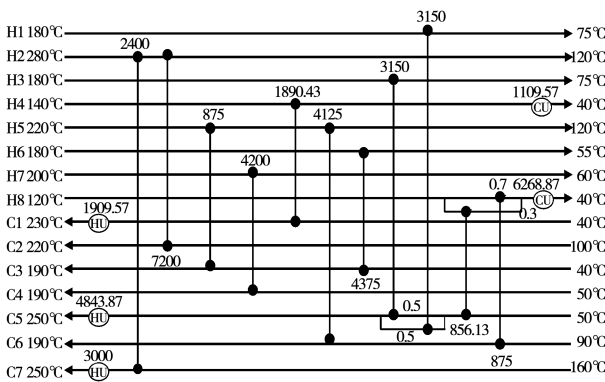


图8 概率差异化策略优化 15SP 算例网络结构

(1 494 690 \$/a)

Fig. 8 Network structure of optimized 15SP results by evolutionary probability differentiation strategy(1 494 690 \$/a)

表1 算例1 优化结果对比

Tab. 1 Comparison of optimized 15SP results

文献	热公用 工程/MW	冷公用 工程/MW	换热 单元数	TAC/ \$ · a ⁻¹
BJÖRK K M ^[13]	-	-	-	1 513 854
PAVÃO L V ^[14]	10. 11	7. 73	19	1 525 394
Li ^[15]	10. 22	7. 85	18	1 513 253
CAO mei ^[16]	10. 41	8. 04	18	1 511 549
FIEG G ^[17]	10. 61	8. 24	15	1 510 891 *
MATTHIAS ^[18]	10. 28	7. 9	18	1 501 070 *
PAVÃO L V ^[19]	9. 76	7. 38	17	1 497 325 *
XU Yue ^[20]	9. 74	7. 37	16	1 494 913 *
本文	9. 75	7. 38	16	1 494 690

* 有分流优化结果

分析加入进化概率差异化策略前后得到的网络结构可以发现,RWCE 算法中公用工程数量为 8 个,其中冷公用工程用量为 7. 95 MW,热公用工程用量为 10. 32 MW;改进后的算法公用工程数量为 5 个;热公用工程用量为 9. 75 MW,下降了 5. 5%,冷公用工程用量为 7. 38 MW,下降了 7. 2%。改进前 C2、C3、C4 流股上存在公用工程,固有的进化概率不能保证其换热单元参与进化,导致其公用工程难以消除。通过对两端流股都存在公用工程的换热单元强制进化,使原 H1 - C4 的换热单元变成 H7 - C4,并影响网络上其他的匹配关系,消除了 C4、C2、C3 上的热公用工程,从而降低了 TAC。

4. 2 算例 2

算例 2^[13] 具有 22 股热流股和 17 股冷流股,该算例是一个大规模算例,连续变量与整型变量耦合度高。Zhang 等人^[23] 将确定性与随机性结合,降低计算复杂度,得到的结果为 1 939 149 \$/a;孙涛等人^[24] 采用一种大步长激励策略,通过步长组合生成方式来激励结构进化,优化结果为 1 933 752 \$/a。改进后参数设置 $N = 1$, $NGD_H = NGD_C = 10$, $NFH = NFC = 2$, $Mb_H = Mb_C = 1$, $\Delta L = 100$, $\phi = 0. 2$ 和 $\varepsilon = 0. 01$,得到的结果为 1 894 477 \$/a,对应的换热网络结构如图 9 所示,与已有文献结果对比如表 2 所示。优化后冷热公用工程分别为 11. 23 和 7. 88 MW,冷热公用工程比文献最优结果分别下降 0. 31 和 0. 3 MW,并且费用相比文献最优结果下降 6 137 \$/a,表明根据流股上的换热程度采用进化概率差异化策略可以减少网络中的公用工程使用量,能够提升算法的效率和质量。

表2 算例2 优化结果对比

Tab. 2 Comparison of optimized 39SP results

文献	热公用 工程/MW	冷公用 工程/MW	换热 单元数	TAC/ \$ · a ⁻¹
Bjork and Pettersson ^[13]	10. 55	13. 85	48	2 073 251 *
Luo et al ^[21]	8. 07	11. 30	44	1 965 478 *
Ernst et al ^[22]	8. 10	11. 40	46	1 943 536
Zhang et al ^[23]	8. 14	11. 45	47	1 939 149
Sun Tao ^[24]	8. 57	11. 64	44	1 933 752 *
Huang Karimi ^[25]	8. 22	11. 53	43	1 937 377 *
Xiao et al ^[26]	8. 34	11. 64	45	1 925 783
Lean Vitor Pavão et al ^[27]	8. 19	11. 53	42	1 900 614 *
本文	7. 88	11. 23	44	1 894 477

* 有分流优化结果

- ZHOU Cong-hai, HUANG Zhi-xian, QIU Ting, et al. Application progress of random search algorithm in heat exchanger network optimization [J]. *Progress in Chemical Industry*, 2012, 3 (1): 495 – 501.
- [8] DOLAN W B, CUMMINGS P T, LEVAN M D. Process optimization via simulated annealing: application to network design [J]. *AIChE Journal*, 1989, 35 (5): 725 – 736.
- [9] 肖 媛, 崔国民. 强制进化随机游走算法 (RWCE) 应用于换热网络优化 [J]. *化工学报*, 2016, 67 (12): 5140 – 5147.
- XIAO Yuan, CUI Guo-min. Application of forced evolutionary random walking algorithm (RWCE) to heat exchanger networks [J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2016, 67 (12): 5140 – 5147.
- [10] 曹 美, 崔国民, 陈家星, 等. 采用每股流体必进化策略的换热网络优化方法 [J]. *高校化学工程学报*, 2020, 34 (3): 776 – 785.
- CAO Mei, CUI Guo-min, CHEN Jia-xing, et al. Optimization method of heat exchanger network based on evolutionary strategy [J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2020, 34 (3): 776 – 785.
- [11] 朱玉双, 崔国民, 肖 媛, 等. 采用单元进化限制策略的 RWCE 算法优化换热网络 [J]. *计算物理*, 2017, 34 (5): 593 – 602.
- ZHU Yu-shuang, CUI Guo-min, XIAO Yuan, et al. A random walk algorithm with compulsive evolution combined with restrictive-evolution strategy for heat unit in heat exchanger network synthesis [J]. *Hinese Journal of Computational Physics*, 2017, 34 (5): 593 – 602.
- [12] 徐 玥, 崔国民. 基于节点配置策略的有分流换热网络优化性能探析 [J]. *化工进展*, 2021, 40 (7): 3608 – 3616.
- XU Yue, CUI Guo-min. Analyzing the optimization performance of heat exchanger network synthesis based on the nodes' adjustment strategy [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2021, 40 (7): 3608 – 3616.
- [13] BJÖRK K M, PETTERSSON F. Optimization of large-scale heat exchanger network synthesis problems [C]//USA, Palm Springs. *Proceeding of the ISATED International Conference on Modelling and Simulation*, 2003.
- [14] PAVÃO L V, COSTA C B B, RAVAGNANI M A S S. Heat exchanger network synthesis without stream splits using parallel and simplified simulated annealing and particle swarm optimization [J]. *Chemical Engineering Science*, 2017 (158): 96 – 107.
- [15] 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 – 25.
- 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 – 25.
- [16] 曹 美, 崔国民, 肖 媛, 等. 换热网络优化中换热单元均布处理的周期性影响分析 [J]. *热能动力工程*, 2020, 35 (6): 15 – 21, 142.
- CAO Mei, CUI Guo-min, XIAO Yuan et al. Periodic analysis on even distribution of heat exchanger units in heat exchanger network optimization [J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2020, 35 (6): 15 – 21, 142.
- [17] FIEG G, LUO X, JEZOWSKI J. A monogenetic algorithm for optimal design of large-scale heat exchanger networks [J]. *Chemical Engineering and Process*, 2009 (48): 1506 – 1516.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 徐 玥, 崔国民. 应用结构摄动策略的有分流换热网络优化 [J]. *计算物理*, 2020 (1): 1 – 12.
- XU Yue, CUI Guo-min. The heat exchanger network optimization using structural perturbation strategy [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2020 (1): 1 – 12.
- [21] LUO X, FIEG G, CAI K, et al. Synthesis of large-scale heat exchanger networks by a monogenetic algorithm [J]. *Computer Aided Chemical Engineering*, 2009, 27: 729 – 734.
- [22] ERNST P, FIEG G, LUO X. Efficient synthesis of large-scale heat exchanger networks using monogenetic algorithm [J]. *Heat & Mass Transfer*, 2010, 46 (10): 1087 – 1096.
- [23] ZHANG C, CUI G, PENG F. A novel hybrid chaotic ant swarm algorithm for heat exchanger networks synthesis [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 104 (5): 707 – 719.
- [24] 孙 涛, 崔国民, 陈家星. 一种大步长激励的结构进化策略应用于换热网络优化 [J]. *化工学报*, 2018, 69 (7): 3135 – 3148.
- SUN Tao, CUI Guo-min, CHEN Jia-xing. A large step length excitation structure evolution strategy applied to heat exchange network optimization [J]. *Journal of Chemical Engineering*, 2018, 69 (7): 3135 – 3148.
- [25] HUANG K F, KARIMI I A. Efficient algorithm for simultaneous synthesis of heat exchanger networks [J]. *Chemical Engineering Science*, 2014, 105 (8): 53 – 68.
- [26] XIAO Yuan, KAYANGE H A, CUI Guo-min, et al. Non-structural model of heat exchanger network: modeling and optimization [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 140: 752 – 766.
- [27] PAVÃO L V, COSTA B, BASTOS C, 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.