

一种多种群混合搜索微分进化算法优化换热网络

段欢欢, 崔国民, 陈家星, 陈 上

(上海理工大学 新能源科学与工程研究所, 上海 200093)

摘 要: 针对基本微分进化算法应用于换热网络优化时易陷入局部极值而出现早熟收敛的问题, 提出了一种多种群混合搜索 DE(微分进化) 算法。首先, 利用对立操作进行种群的多轮再生, 提高了解空间的多样性; 其次, 各个按照不同的局部搜索机制实现种群的进化、更新, 提高算法的局部搜索能力; 最后, 经算例研究表明: 本文所述方法不仅能够有效提高种群多样性, 克服算法易陷入局部极小值的缺点, 且算法的稳定性和全局收敛能力均有显著提升。为启发式算法解决复杂换热网络优化问题提供了进一步的研究基础。

关 键 词: 微分进化算法, 多种群, 混合搜索, 换热网络

中图分类号: TK124 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.12.001

引 言

换热网络综合是实现能量回收和高效利用的重要环节, 广泛存在于钢铁化工等能源消耗产业中。在工艺允许条件下, 通过冷热流体的合理匹配, 尽可能地回收物流能量, 减少公用工程的消耗, 从而降低企业成本。从 20 世纪 80 年代开始换热网络综合问题日益受到重视。

目前, 换热网络的优化方法主要分为夹点法^[1]、数学规划法和启发式方法 3 类^[2~3], 但是夹点法无法获得换热网络优化问题的全局最优解^[4], 且基于梯度的传统优化方法也难以适用于非凸非线性比较严重的换热网络优化^[5]。越来越多的启发式方法如遗传算法、粒子群算法、模拟退火算法等被应用到换热网络优化中^[6~8]。

DE 作为启发式方法的一种^[9~10], 由美国 Berkeley 大学的 Storn 和 Price 提出, 最初应用于解决切比雪夫不等式问题, 后来成为解决复杂优化问题的有效方法, DE 算法具有控制参数少, 操作简

单, 全局搜索能力强等特点, 通用性强, 因此受到越来越多的研究者关注。DE 初始化时, 所有个体随机遍布在解空间内, 通过变异、交叉和选择操作找寻新的个体进入下一代搜索, 以此循环下去, 通过个体的更新来实现种群的更新。

换热网络的非线性、多极值问题比较突出, 解空间内存在大量的局部极值, DE 算法应用于换热网络优化中存在明显的早熟收敛问题, 在种群进化过程中, 一旦个体受到局部极值的吸引则难以继续更新, 对于复杂换热网络优化问题难以搜索到全局最优解。针对这一问题, 本文提出一种多种群混合搜索的 DE 算法, 兼顾种群多样性和局部搜索能力; 通过建立针对当前个体的对立个体, 在原始种群的基础上扩展为多个种群, 从而保持种群良好的多样性, 同时改善 DE 算法的搜索机制, 增强其跳出局部极值的能力。最后通过换热网络经典算例验证本文方法的有效性。

1 换热网络模型简介

换热网络优化中较为通用的模型是 Grossmann 无分流分级超结构模型^[11], 以 2 股热流体和 3 股冷流体为例, 如图 1 所示。图中, H、C 分别代表冷热流体, 圆圈代表冷热流体之间匹配的换热器; 当每股热流体依次与每股冷流体匹配完一个换热器, 记为 1 级, 级数 $N_k = \max(N_C, N_H)$, 则最多换热器数量 $N = N_H \times N_C \times N_k$, 其中 N_H 、 N_C 分别为热、冷流体的股数。

换热网络的经济效益由换热网络能耗、换热单元面积决定, 一般以换热网络的最小年综合费用 F

收稿日期: 2015-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176125); 沪江基金研究基地专项(D14001)

作者简介: 段欢欢(1990-), 女, 河南开封人, 上海理工大学硕士研究生。

通信作者: 崔国民(1969-), 男, 上海理工大学教授, 博士生导师。

为目标函数 包括设备固定投资费用、公用工程费用和换热器面积费用 数学表达式如下:

$$F = F_{FIX} + F_U + F_A \tag{1}$$

$$\text{其中: } F_{FIX} = C_0 \sum_{k \in N} Z_k$$

$$F_U = \sum_{i \in N_H} C_1 \cdot Q_{CU_i} + \sum_{j \in N_C} C_2 \cdot Q_{HU_j}$$

$$F_A = \sum_{k \in N} \sum_{i \in N_H} \sum_{j \in N_C} C_3 \cdot A_{ijk}^\beta + \sum_{i \in N_H} C_3 \cdot A_{CU_i}^\beta + \sum_{j \in N_C} C_3 \cdot A_{HU_j}^\beta$$

式中: F_{FIX} —设备固定投资费用, \$/a; F_U —公用工程费用, 包含热公用工程费用与冷公用工程费用, \$/a; F_A —所有换热器的面积费用, \$/a; C_0 —单个换热器固定投资费用, \$/a; C_1 —冷公用工程费用系数; C_2 —热公用工程费用系数; C_3 —面积费用系数; β —面积费用指数; Q_{CU_i} —第 i 股热流体与冷公用工程换热量 kW; Q_{HU_j} —第 j 股冷流体与热公用工程换热量 kW; A_{ijk} 、 A_{CU_i} 、 A_{HU_j} —换热器、冷却器、加热器的换热面积 m^2 。

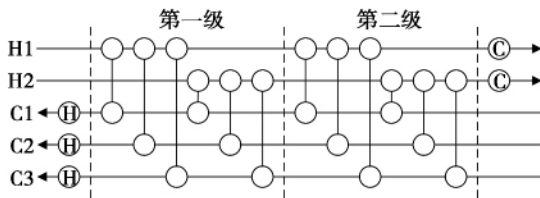


图 1 无分流换热网络分级超结构模型

Fig. 1 Superstructure of heat exchanger networks without stream splits

2 基本微分进化算法

DE 算法作为一种有效求解连续变量全局优化问题的智能算法, 由于对目标函数要求不高、控制参数少、鲁棒性强, 近年来逐渐成为研究热点。DE 算法通过对种群个体执行变异、交叉和选择操作, 选择较优个体进入下一代搜索, 直至输出问题的最优解。

2.1 初始化

假定种群规模为 NP 、交叉概率 CR 、变异因子 CF 和终止进化准则。随机生成 NP 个个体作为初始种群, 每个个体有 D 维变量, 那么第 g 代种群第 i 个个体第 j 个换热器的换热量表示为 Q_{jig} , 其中 $j \in \{1, 2, \dots, D\}$, $i \in \{1, 2, \dots, NP\}$, $g \in \{0, 1, \dots, g_m\}$ 。

根据以下公式为:

$$Q_{jig} = Q_{low} + \text{rand}(0, 1) \times (Q_{bound} - Q_{low}) \tag{2}$$

生成初始种群, $\text{rand}(0, 1)$ 为 $0 \sim 1$ 之间均匀分布的随机数, Q_{bound} 、 Q_{low} —优化变量的上下限值。

2.2 个体评价

计算每个个体 Q_{ig} 的目标函数值 $f(Q_{ig})$;

2.3 对于每个个体执行如下操作

(1) 变异。随机选择种群中 3 个互不相同的个体进行变异操作, 生成中间个体 V_{ig} , 根据以下公式:

$$V_{ig} = Q_{n1g} + CF \times (Q_{n2g} - Q_{n3g}) \tag{3}$$

产生新个体, 其中 $n_1, n_2, n_3 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ 为不等于 i 的互不相等的整数。

(2) 交叉。将当前种群的部分个体用中间个体 V_{ig} 进行替换选择, 执行交叉操作生成新的适应个体 U_{ig} 。具体如下:

$$U_{ig} = \begin{cases} V_{ig} & \text{if } (\text{rand}(0, 1) < CR \text{ or } j = N) \\ Q_{ig} & \text{其它} \end{cases}$$

(4)

式中: $N-1 \sim D$ 之间均匀分布的整数, 用以确保新的适应个体中至少有 1 个变量继承于中间个体。

(3) 选择。将适应个体的目标值 $f(U_{ig})$ 与当前个体 $f(Q_{ig})$ 进行比较, 当且仅当适应个体优于当前个体时, 才会被保留到下一代种群中, 确保下一代种群的个体不差于当前种群个体, 从而提高种群的平均性能, 逐步趋近最优解。

(4) 如满足终止条件, 则输出最优解, 否则返回步骤(3)。

3 多种群混合搜索 DE 算法

基本 DE 算法在优化过程中是单种群进化, 在变异阶段通过选择不同个体进行差分作用产生新的个体, 然而算法的早熟收敛与种群多样性丧失密切相关, 单种群在进化后期个体趋于一致, 极易局部收敛。针对此问题, 文献 [12] 通过结合不同的 DE 变异算子, 形成混合算子, 增强种群多样性和算法的局部搜索能力; 文献 [13] 将种群分成多个子种群, 且各种群之间进行独立寻优, 利用跨种群间的竞争算子实现种群间信息共享; 文献 [14] 将对立策略引入 DE 算法进行种群初始化, 替代随机初始种群, 以此增加种群多样性; 文献 [15] 将基于对立操作产生的

新种群应用于 DE 算法以后,证明了该操作的有效性。本文采用多种群策略,模拟生物界种群的繁殖进化过程,通过同一种群不同个体之间的差分或不同种群不同个体之间的变异,获得大量的新生个体,进而扩大了搜索范围,增强了算法的全局搜索能力。

3.1 种群再生

进化算法中种群的初始化一般采用随机生成的方式,继而通过不断改进初始解,逐步朝着最优个体靠近,本文通过借鉴对立操作中的对立思想进行种群再生,丰富种群的多样性。

对立点的定义如下^[16]:若 $X(x_1, x_2, \dots, x_D)$ 是 D 维空间的一个点,其中 x_1, x_2, \dots, x_D 均是实数且 $x_i \in [x_{i,low}, x_{i,up}]$, $i = 1, 2, \dots, D$, 则 X 的对立点表示为 $\bar{X} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_D)$, 其中 $\bar{x}_i = x_{i,low} + x_{i,up} - x_i$ 。结合换热网络实例,在求解域内产生当前个体的对立个体如下:

$$Q_{onp_{jg}} = Q_{bound_j} + Q_{low_j} - Q_{jig} \quad (5)$$

式中: Q_{jig} —第 g 代种群中第 i 个个体第 j 个换热器的换热量; $Q_{onp_{jg}}$ —当前个体 Q_{jig} 对立个体的换热量; Q_{bound_j} 、 Q_{low_j} —个体优化变量的上下限值。

3.2 多种群 DE 算法

多种群 DE 算法是通过各种群中个体的协作与竞争实现多维空间中对最优解的搜索。以初始种群规模 NP 为例,则初始种群表示为 $Q_{ig} = \{Q_{1ig}, Q_{2ig}, \dots, Q_{jig}, \dots, Q_{Dig}\}$, 此时 $g = 0$; 完成初始进化周期 G_p 后,保留更新后的种群 NP , 同时进行第一轮种群的再生,记为 $NNP(k)$, (初始 $k = 1$, 代表第一次建立再生种群,直至 $k = 7$), 则再生种群表示为 $Q_{onp_{ig}} = \{q_{1ig}, q_{2ig}, \dots, q_{jig}, \dots, q_{Dig}\}$ 。此时种群规模为 $2NP$, 种群再生过程中皆保留已有种群,在此基础上继续扩展新的种群,从本质上扩大个体的搜索空间,呈现树状型种群再生过程。

3.3 混合搜索机制

在 DE 算法的每一代进化中,种群中全部个体都要进行变异、交叉和选择操作,变异操作是 DE 算法区别于其它算法的核心内容,其核心思想是在基点向量的基础上,施加一个差分扰动来产生新的中间个体,在进化中探索更大的搜索空间,但是为了保持良好的种群多样性,需要对各种群的局部搜索能力加以强化,兼顾优化精度和寻优效率。

DE 算法有多种不同的优化策略^[17],为了保持优化过程中变异策略的随机性,充分发挥各优化策

略性能,本文多种群单独进化时各采用两种不同的变异策略,种群 NP 的搜索机制如下式:

$$M_{ig} = Q_{n_1g} + CF \times Z_1 \times (Q_{n_2g} - Q_{n_3g}) \quad (6)$$

$$M_{ig}^* = Q_{best_g} + CF \times (Q_{n_1g} - Q_{onp_{best_g}}) + CF \times (Q_{n_3g} - Q_{n_4g}) \quad (7)$$

再生种群 $NNP(i)$ 的搜索机制为:

$$M_{ig} = Q_{onp_{n_1g}} + CF \times Z_1 \times (Q_{onp_{n_2g}} - Q_{onp_{n_3g}}) \quad (8)$$

$$M_{ig}^* = Q_{onp_{best_g}} + CF \times (Q_{onp_{n_1g}} - Q_{best_g}) + CF \times (Q_{onp_{n_3g}} - Q_{onp_{n_4g}}) \quad (9)$$

新个体的生成公式为:

$$V_{ig} = \begin{cases} M_{ig} & \text{if } (\text{rand}(0, 1) < w) \\ M_{ig}^* & \text{其它} \end{cases} \quad (10)$$

式中: Z_1 —大于 1 的常数,一般取值为 $1 \sim 3$, $n_1, n_2, n_3, n_4 \in \{1, 2, \dots, NP\}$ 为不等于 i 的互不相等的整数; Q_{best_g} —第 g 代种群中的最优个体; $Q_{onp_{best_g}}$ —再生种群中第 g 代中最优个体; w — $0.3 \sim 0.6$ 之间的常数。

种群 NP 与再生种群 NNP 分别采用不同的搜索机制,式(6)、式(8)中变异基点从种群中随机抽取,且采用较大的缩放因子值,该搜索机制着重增强算法探索新空间的能力,但是收敛速度较慢。式(7)、式(9)采用当前种群中最优个体作为基点,注重局部搜索能力的开发,同时在差分项中引入其它种群最优解的信息,加快种群收敛速度。两种搜索机制互为补充,有效平衡算法的全局搜索与局部寻优能力。

4 算例验证

4.1 算例 1

采用文献[18]的典型算例,过程流体由 8 股热流体和 7 股冷流体组成,所有参数均与文献相同,冷、热流体和公用工程的初始温度和目标温度、热容流率、换热系数如表 1 所示。

其中,换热器设备投资费用计算公式为 $8000 + 500 \times A^{0.75}$ $\$/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,热公用工程费用系数为 80 $\$/(\text{kW} \cdot \text{a})$,冷公用工程费用系数为 10 $\$/(\text{kW} \cdot \text{a})$ 。以换热器的换热量 Q 作为优化变量,单位是 kW。采用本文方法优化此算例,其中:种群 NP 为初始种群,种群 $NNP1$ 、 $NNP5$ 分别是进化第一、第五阶段的再生种群。目标费用变化曲线如图 2 所示。

从 3 个种群的费用变化曲线中可以看出,在多种群进化中,种群 *NNP1* 和 *NNP5* 有明显跳出局部极值的现象,种群 *NNP5* 最终收敛到一个较优解。

由此可以得出:(1) 本文将对立思想引入到多种群的再生过程,在求解域内有效增强种群的多样性;(2) 在进化过程中新种群有序生成,且保留原始种群共同进化,充分发挥 DE 算法全局搜索能力强的优势,最大程度确保所有个体遍及求解空间;(3) 为了进一步保证种群的多样性,各种群在固定的进化周期内,均按照不同的个体更新机制实现种群的进化、更新,有效增强 DE 算法的局部寻优效能,跳出局部极小值陷阱。

表 1 算例 15 股流换热网络的物流参数

Tab. 1 Stream data for case 15 SP

流通股编号	$T_{in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	$MCp/\text{kW}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$h/\text{kW}\cdot(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
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	2.0
C4	50	190	30	2.0
C5	50	250	60	2.0
C6	90	190	50	1.0
C7	160	250	60	3.0
热公用工程	325	325	-	1.0
冷公用工程	25	40	-	2.0

由于 DE 算法是基于一对一的贪婪选择机制,

表 2 算例 1 优化结果与文献值的比较

Tab. 2 Comparison of optimal results for case 15 SP

	文献[19]	文献[20]	文献[21]	文献[22]	本文
公用工程费用/ \$	938 715.4	964 554.0	905 223.0	931 510.0	895 532.0
设备投资费用/ \$	651 292.4	623 325.0	664 426.9	614 801.5	628 202.1
年综合费用/ \$·a ⁻¹	1 590 007.8	1 587 879.0	1 569 649.9	1 546 311.5	1 523 734.1

4.2 算例 2

采用文献 [23] 中典型算例,过程流体由 4 股热流

多种群优化中所得个体至少比单种群个体更好或者至少相同。算例 1 最终优化结构如图 3 所示,得到的年综合费用为 1 523 734.1 \$/a,与文献对比结果如表 2 所示。

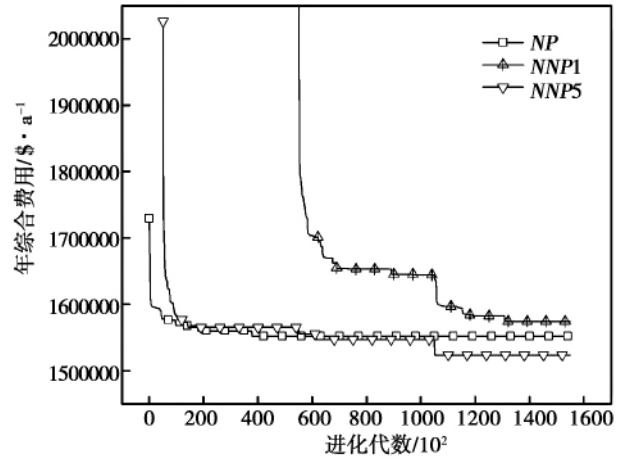


图 2 算例 1 换热网络最优年综合费用变化曲线图

Fig. 2 Minimum total annual cost comparison of HENS for case 15 SP

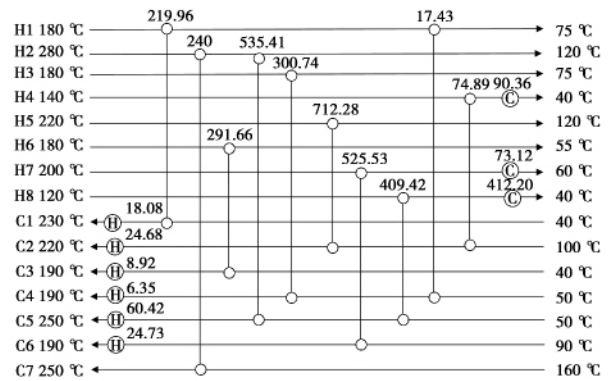


图 3 算例 1 换热网络的优化结果

Fig. 3 Optimal structure of HENS in this study for case 15 SP

体和 5 股冷流体组成,冷、热流体和公用工程的初始温度、目标温度、热容流率和换热系数如表 3 所示。

表 3 9 股流换热网络的物流参数

Tab.3 Stream data for case 9 SP

流股编号	$T_{in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	$MCp/\text{kW}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$	$h/\text{kW}\cdot(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})^{-1}$
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
热公用工程	330	250	-	0.50
冷公用工程	15	30	-	0.50

其中, 换热器面积费用计算公式为 $2\,000 + 70 \times A$ $\$/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 热公用工程费用系数为 $60 \$/(\text{kW} \cdot \text{a})$ 冷公用工程费用系数为 $6 \$/(\text{kW} \cdot \text{a})$ 。以换热量 Q 作为优化变量, 单位是 kW。采用本文方法优化该算例, 目标费用变化曲线如图 4 所示, 种群 NP 为初始种群, 种群 NNP2、NNP5 分别是进化第二阶段、进化第五阶段的再生种群。

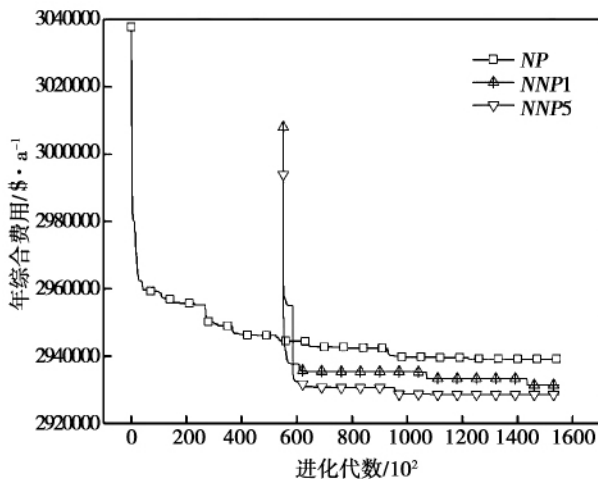


图 4 算例 2 换热网络最优年综合费用变化曲线

Fig. 4 Minimum total annual cost comparison of HENS for case 9 SP

从上图可以得出: (1) 在进化初期年综合费用急速下降, 因为初始种群中个体的差异性很大, 经变异、交叉操作能够快速收敛到一个局部值; (2) 多种群的建立能够实现个体在解空间最大程度的覆盖,

进化期间不同种群的搜索机制有助于种群间信息交流, 增强种群的多样性, 使得算法能够较快识别好的搜索方向, 有效跳出局部极值。算例 2 最终优化结构如图 5 所示, 得到的年综合费用为 $2\,924\,602 \$/\text{a}$, 与文献结果对比如表 4 所示。

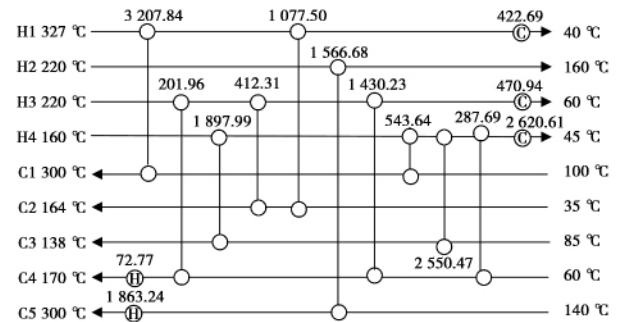


图 5 算例 2 换热网络的优化结果

Fig. 5 Optimal structure of HENS in this study for 9SP

表 4 算例 2 优化结果与文献值的比较

Tab.4 Comparison of optimal results for 9SP

	文献[24]	文献[25]	文献[26]	本文
热公用工程/kW	26 220	25 310	25 880	23 400
冷公用工程/kW	33 940	33 030	33 600	31 120
面积/ m^2	16 630	17 400	16 536	18 626
年综合费用/ $\$/\text{a}^{-1}$	2 970 000	2 960 000	2 942 000	2 924 602

5 结论

本文提出一种多种群混合搜索的微分进化算法, 结合换热网络优化算例, 得出以下结论:

(1) 通过采用对立操作进行种群再生, 增加了可行解的多样性。

(2) 多种群混合搜索机制通过促进原始种群与再生种群交流, 在进化过程中保持个体对新空间探索能力的开发, 也在优化全程中提高算法的局部搜索能力。

(3) 经换热网络算例验证, 计算结果表明本文算法稳定性较好, 有效改善种群多样性, 很好地平衡算法的全局搜索与局部寻优的能力。

参考文献:

[1] LINNHOF B, HINDMARSH E. The pinch design method for heat exchanger networks [J]. Chemical Engineering Science, 1983, 38

- (5):745-763.
- [2] YEE T F ,GROSSMANN I E. Simultaneous optimization models for heat integration (II): heat exchanger network synthesis[J]. *Compute. Chem. Eng.*,1990 ,14(10):1165-1184.
- [3] 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.
- [4] 高维平. 换热网络优化节能技术[M]. 北京:中国石化出版社 2004.
GAO Wei-ping. Technology of optimization and energy saving of heat exchanger networks [M]. Beijing. China Petrochemical Press 2004.
- [5] 魏关锋,姚平经,罗行. 用遗传算法进行多流股换热器网络综合的研究[J]. *高校化学工程学报* 2003 ,17(4):425-430.
WEI Guan-feng ,YAO Ping-jing ,LUO xing. Study on multi-stream heat exchanger networks synthesis with genetic algorithm[J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities*. 2003 ,17(4):425-430.
- [6] LEWIN D R ,WANG H ,SHALEV O. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-I. general framework and MER optimal synthesis [J]. *Computers & Chemical Engineering*,1998 ,22(10):1503-1513.
- [7] 严丽娣,霍兆义,尹洪超. 粒子群算法最优同步综合换热网络[J]. *化工进展* 2009 (S1):439-442.
YAN Li-di ,HUO Zhao-yi ,YIN Hong-chao. Simultaneous synthesis of heat exchanger networks using particle swarm optimization [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* ,2009 ,28(1):439-442.
- [8] CARDOSO M F, SALCEDO R L. A simulated annealing approach to the solution of MINLP problems [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* ,1997 21(12):1349-1364.
- [9] PRICE K ,STORN R M ,LAMPINEN J A. Differential evolution: a practical approach to global optimization [M]. Springer Science & Business Media 2006.
- [10] STORN R ,PRICE K. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. *Journal of Global Optimization* ,1997 ,11(4):341-359.
- [11] GROSSMANN I E ,CABALLERO J A ,YEOMANS H. Mathematical programming approaches to the synthesis of chemical process systems [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering* ,1999 ,16(4):407-426.
- [12] WANG G ,GUO L ,WANG H ,et al. Incorporating mutation scheme into krill herd algorithm for global numerical optimization [J]. *Neural Computing and Applications* 2014 ,24(3-4):853-871.
- [13] DAS S ,MAITY S ,QU B Y ,et al. Real-parameter evolutionary multimodal optimization—a survey of the state-of-the-art [J]. *Swarm and Evolutionary Computation* 2011 ,1(2):71-88.
- [14] RAHNAMAYAN S ,TIZHOOSH H R ,SALAMA M MA. A novel population initialization method for accelerating evolutionary algorithms [J]. *Computers and Mathematics with Applications* 2007 ,53(10):1605-1614.
- [15] RAHNAMAYAN S ,TIZHOOSH H R ,SALAMA M M A. Opposition-based differential evolution [J]. *IEEE Trans. on Evolutionary Computation* 2008 ,12(1):64-79.
- [16] RAHNAMAYAN S ,TIZHOOSH H R ,SALAMA M MA. A Novel population initialization method for accelerating evolutionary algorithms [J]. *Computers and Mathematics with Applications* 2007 ,53(10):1605-1614.
- [17] 王凌,钱斌. 混合差分进化与调度算法 [M]. 北京:清华大学出版社 2012.
WANG Ling ,QIAN Bin. Hybrid differential evolution and scheduling algorithm [M]. Beijing: Tsinghua University Press. 2012.
- [18] BJÖRK KM ,NORDMAN R. Solving large-scale retrofit heat exchanger network synthesis problems with mathematical optimization methods [J]. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification* 2005 ,44:869-876.
- [19] 胡向柏,崔国民. 换热网络填充函数法的全局优化 [J]. *化学工程* 2011 ,39(1):28-31.
HU Xiang-bai ,CUI Guo-min. Global optimization of filled function method for heat exchanger networks [J]. *Chemical Engineering* 2001 ,39(1):28-31.
- [20] 方大俊. 微分进化算法应用于换热网络全局最优化研究 [D]. 上海:上海理工大学硕士学位论文 2014.
FANG Da-jun. Global optimization of heat exchanger networks by differential evolution method [D]. University of Shanghai for Science & Technology 2014.
- [21] 张勤,崔国民,关欣. 基于蒙特卡罗遗传算法的换热网络优化问题 [J]. *石油机械*. 2007 ,35(5):19-22.
ZHANG Qin ,CUI Guo-min ,GUAN Xin. Optimization of heat exchanger network based on Monte Carlo genetic algorithm [J]. *China Petroleum Machinery* 2007 ,35(5):19-22.
- [22] 彭富裕,崔国民,陈家星. 基于模拟退火算法的换热网络双层优化方法 [J]. *石油化* 2014 ,43(5):536-544.
PENG Fu-yu ,CUI Guo-min ,CHEN Jia-xing. Bi-level optimization method for heat exchanger network synthesis based on simulated annealing algorithm [J]. *Petrochemical Technology* ,2014 ,43(5):536-544.
- [23] ZHAO H ,LIANG Z ,HONG Y ,et al. Simultaneous synthesis of structural-constrained heat exchanger networks with and without stream splits [J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering* 2013 ,91(5):830-842.
- [24] ZHU X X ,ONEILL B K ,ROACH J R ,et al. A Method for automated heat-exchanger network synthesis using block decomposition and nonlinear optimization [J]. *Chemical Engineering Research & Design* ,1995 ,73(8):919-930.
- [25] LINNHOFF B ,AHMAD S. Cost optimum heat exchanger networks I: Minimum energy and capital using simple models for capital cost [J]. *Comput. Chem. Eng.* ,1990 ,14(7):729-750.
- [26] 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.

(单丽华 编辑)

一种多种群混合搜索微分进化算法优化换热网络 = A Differential Evolution Algorithm with Hybrid Search Strategy based on Multi-population for Heat Exchanger Network Synthesis [刊, 汉] DUAN Huan-huan, CUI Guo-min, CHEN Jia-Xing, CHEN Shang (Research Institute of New Energy Science and Technology, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(12). - 1~6

The basic differential evolution (DE) algorithm dropped into the local optimum when applied in the synthesis of heat exchanger networks. To solve this phenomenon of premature convergence, a DE algorithm incorporated with a hybrid search strategy based on multi-population was proposed in this paper. Firstly, the opposite population of initial population was repeatedly used to improve the diversity of the population. Accordingly, the population was updated using different optimization strategies to improve the ability of local exploration. The results showed that this novel method could further enrich the population diversity and overcome the flaw of premature convergence. Moreover, the convergent speed and the stability of the algorithm were significantly enhanced. **Key words:** differential evolution algorithm, multi-population, hybrid search, heat exchanger network

垂直管内水蒸气与水接触凝结所诱导的压力波特性实验研究 = An Experimental Investigation on the Pressure Oscillation Induced by the Steam Jet Condensation in Water Flow within a Vertical Pipe [刊, 汉] ZHANG Jia, ZHANG Chao (Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd, Xi'an, Shaanxi Province, China, Post Code: 710054), XU Qiang, GUO Lie-jin (State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi Province, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(12). - 7~11

An experimental investigation on the pressure oscillation induced by the steam jet condensation in water flow in pipes was conducted in this work. The saturation vapor with mass flow rate $0 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ and pressure $0.2 \sim 0.4 \text{ MPa}$ was injected into the water flow in the vertical pipe through a nozzle of diameter 8 mm. The water temperature and pressure ranges of the pipe flow are $30 \sim 70 \text{ }^\circ\text{C}$ and $0.11 \sim 0.15 \text{ MPa}$, respectively. The pressure fluctuation signal was captured by detecting the wall pressure signal. This paper systematically analyzed variations of the pressure wave which had low frequency and high amplitude with time at low steam mass flow rate, and presented the quantitative changes of pressure oscillation amplitude with steam mass flow rate and subcooled water temperature. And also included was the probability density function distribution, the variation of skewness coefficient and kurtosis coefficient of pressure fluctuation signal. **Key words:** steam condensation, pressure wave, the nozzle