

采用动态更新策略的微分进化算法优化换热网络

陈 上, 崔国民, 彭富裕, 段欢欢

(上海理工大学 新能源科学与工程研究所, 上海 200093)

摘 要: 针对优化换热网络存在的严重非凸非线性问题, 提出以动态更新策略改进的微分进化算法优化换热网络, 通过对所建种群中的个体进行动态更新, 而不是在种群所有个体更新完后再替代旧的种群, 在保持原始种群规模不变的情况下, 更充分地利用种群个体的多样性并且使算法具有更好地鲁棒性, 以获得更强的全局搜索能力。辅以算例加以比较验证, 证明改进后的算法在应用于换热网络优化时可以有效跳出优化过程中的局部极值陷阱, 获得比以往更优的换热网络设计结果。

关 键 词: 换热网络优化; 全局优化; 改进微分进化算法;

中图分类号: TP273 文献标识码: A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2015.04.003

引 言

换热网络是重要的节能回收网络系统^[1], 广泛存在于钢铁、化工、炼油等能源消耗产业中, 其主要的作用就是在投资成本合理的情况下, 尽可能多地回收物流有效能量, 减少公用工程消耗, 以降低企业生产成本。随着对能源利用效率的要求不断提高, 换热网络优化问题日益受到重视。

换热网络优化问题本质上是在有约束条件下获得目标函数的全局最优解的一种混合整数非线性规划问题(MINLP)。由于目标函数和约束条件呈现为严重的非线性和非凸特性, 使传统确定性算法优化换热网络严重受制于网络规模大小, 很难获得较好的优化结果。因此, 越来越多的启发式方法被应用到换热网络优化中来^[2-3], 如遗传算法、模拟退火算法、粒子群算法等^[4-7]。

DE 微分进化(Differential Evolution)算法是新近提出的一种智能优化方法, 已被证明在寻优过程中具有高效性、收敛性、鲁棒性等优点^[8-9]。DE 算法采用实数分量合成参数矢量, 其采用的变异操作

具有遗传算法所不具备的微调功能, 加之进化过程控制变量较少等特点, 已在换热网络优化中初步得到了应用^[10]。但是 DE 算法作为一个随机算法, 其搜索效率与精度较确定性方法有一定的不足, 特别是作用在换热网络优化中, 因为其严重的非线性和非凸特性, 导致利用 DE 算法在优化换热网络时, 会受到种群个体多样性的限制, 最终还是会陷入局部最优解。因此, 如何在利用 DE 算法优化换热网络时更好地发挥 DE 算法的功能并且获得更好的局部最优解, 是一个很值得讨论的问题。

本研究基于微分进化算法的种群更新规则, 提出了动态更新策略改进 DE 算法, 原始种群规模不变的情况下, 使种群个体具有更好的多样性与算法鲁棒性, 旨在强化 DE 算法应用于换热网络问题时的全局搜索能力, 即 DDE(动态微分进化算法)。并通过算例加以计算证明, 获得了相较于基本 DE 算法更好的全局搜索能力与更好的优化结果, 并且算法的鲁棒性也有一定的加强。

1 换热网络数学模型

1.1 换热网络问题描述

假设有 N_c 冷流体需要加热, N_h 热流体需要冷却, 利用冷、热物流的匹配, 回收过程流体的能量。已知冷、热物流的进口温度、目标温度、热容流率及各换热器换热系数, 同时, 为未达到目标温度的流体设置热、冷公用工程。公用工程的进、出口温度已知。根据冷、热流体的匹配顺序形成一个换热网络, 在所有网络流体达到目标温度的情况下, 最小化换热网络的投资费用与运行费用。投资费用包括换热器固定投资费用与换热器面积费用, 运行费用为公用工程的消耗量。本研究的换热网络结构的表达方

收稿日期: 2014-07-07; 修订日期: 2014-09-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51176125); 上海市研究生创新基金项目(JWCXSL1301)

作者简介: 陈 上(1991-), 男, 湖北仙桃人, 上海理工大学硕士研究生。

式为 Grossmann 无分流分级结构模型^[11], 其中, 换热网络级数为 N_k , 最大换热器个数为 $N_k \times N_C \times N_H$ 。以 2 股热流体与 3 股冷流体为例, 其分级超结构模型如图 1 所示。

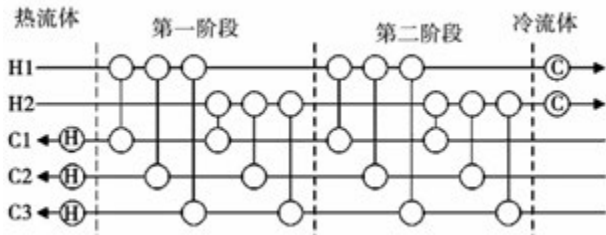


图 1 换热网络无分流的分级超结构

Fig. 1 Superstructure of heat exchanger networks with no stream splits

1.2 换热网络目标函数

换热网络优化问题的目标函数为年综合费用, 包括投资费用与运行费用。其数学表达式为:

$$\begin{aligned}
 F &= F_{EX} + F_{HU} + F_{CU} + F_A \\
 &= C_0 \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_C} Z_{k,i,j} + \sum_{i=1}^{N_H} (C_1 ZQ)_{HU_i} + \\
 &\quad \sum_{i=1}^{N_C} (C_1 ZQ)_{CU_i} + \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_C} (C_2 ZA^b)_{k,i,j} + \\
 &\quad \sum_{i=1}^{N_H} (C_2 ZA^n)_{HU_i} + \sum_{i=1}^{N_C} (C_2 ZA^n)_{CU_i} \quad (1)
 \end{aligned}$$

式中: F_{EX} —固定投资费用, F_{HU} 、 F_{CU} —热、冷公用工程的年运行费用, F_A —所有换热单元的面积费用。 k —超结构第 k 级; i 、 j —第 i 股热流体与第 j 股冷流体; HU —热公用工程; CU —冷公用工程。 C_0 —换热器固定投资费用系数; C_1 —公用工程费用系数; C_2 —换热器面积费用系数; A —换热器面积; Z —换热器是否存在的逻辑变量, 存在时取 1, 不存在时取 0。具体热力学平衡关系及约束条件的描述请参考文献 [10]。

2 DDE 优化换热网络

2.1 DE 算法流程

同所有的进化优化算法一样, DE 算法也是对候选解的种群进行操作, 利用实数值参数向量作为每一代的种群, DE 的中间个体是通过把种群中两个个体之间的加权差向量加到第 3 个个体上产生的, 这称为“变异”; 然后将中间个体的参数与当前

个体的参数按照一定规则混合来产生所谓的候选个体, 通常称为“交叉”; 如果候选个体的目标函数值小于当前个体的目标函数值, 候选个体就在下一代中代替当前个体, 这一操作称为“选择”。种群中所有个体都要被作为当前个体进行一次变异、交叉和选择操作, 其算法流程如图 2 所示。这种利用随机偏差扰动产生新个体的方式可以获得一个具有非常好收敛性质的自适应程序^[12]。DE 基本算法优化换热网络的流程以及变异、交叉、选择算子的详细描述请参考文献 [10], 此处不再赘述。

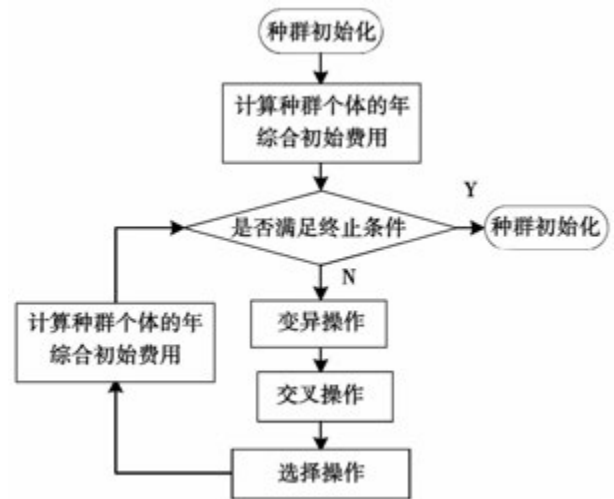


图 2 DE 算法程序流程图

Fig. 2 Flow chart of DE algorithm

然而, DE 算法完全以随机概率选取实验点, 容易导致寻优过程的早熟问题。一般进化算法中, 通常采用增加种群数量的方法来处理搜索过程中的局部最优问题, 这又使优化算法的计算时间过长而降低了算法的搜索性能^[13]。尤其是在应用于换热网络优化问题中此类问题尤其显著, 因此本研究提出了 DDE 算法来解决这一优化问题。

2.2 DDE 算法流程

DDE 算法, 其基本思想是对种群中的个体进行动态更新, 而不是等所有个体都更新完后再以新种群替代旧种群^[14]。本研究则是利用这种基于动态更新策略改进的微分进化算法优化换热网络综合性能。

在优化过程中, 每一个个体在变异后, 都立即进行一次个体交叉和选择后生成新的个体, 然后参与当前进化代数中下一个个体的进化操作。得到如图

3 所示的算法流程图。

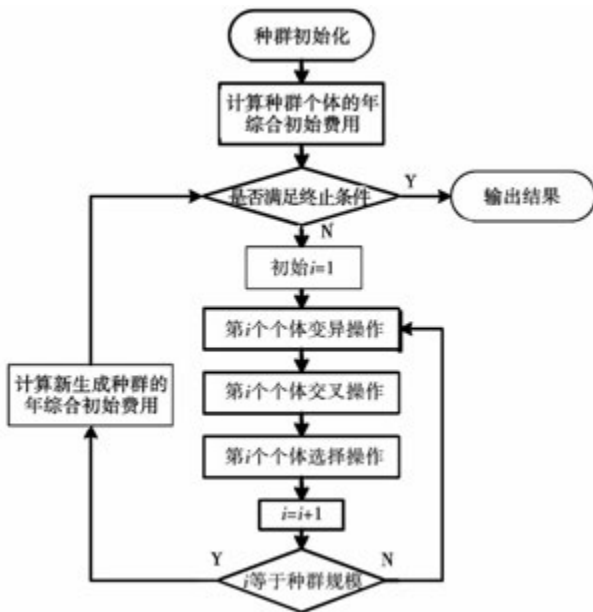


图3 DDE 算法程序流程图

Fig.3 The flow chart of DDE algorithm program

其中,优化算法的主要操作步骤与涉及的优化参数设置为:

(1) 初始化种群:在求解域随机生成初始种群,设置种群规模,本研究中优化算例的种群规模都为 $N = 10 \times D$, D 为最大换热器个数。各个优化变量 Q 在对应的可行域内生成。

(2) 变异:对应第 G 代进化,变异机制为:

$$V_{i,G} = Q_{\text{Best},G} + CF \cdot (Q_{r1,G} - Q_{r2,G}) + CF \cdot (Q_{r3,G} - Q_{r4,G}) \quad (14)$$

式中: $V_{i,G}$ —变异个体; $Q_{\text{Best},G}$ —当前种群中的最佳个体; $Q_{r1,G}$ 、 $Q_{r2,G}$ 、 $Q_{r3,G}$ 和 $Q_{r4,G}$ —种群中随机抽取的 4 个个体,变异因子 $CF = 0.5$ 。

(3) 交叉:令交叉概率 $CR = 0.1$,对应第 G 代进化,按如下方式生成测试个体:

$$u_{i,G}^j = \begin{cases} v_{i,G}^j, & r \leq CR \text{ 或 } j = j_r \\ a_{i,G}^j, & \text{其它} \end{cases} \quad (15)$$

式中: $u_{i,G}^j$ —第 j 个目标个体的第 i 个换热器的试探换热热量; $v_{i,G}^j$ —第 j 个目标个体变异后的第 i 个换热器的换热热量; $a_{i,G}^j$ —当前种群中第 j 个目标个体的第 i 个换热器的换热热量; r —均匀分布的随机数, $r \in [0, 1]$; j_r —在 $[1, N]$ 范围内随机抽取的整数。

(4) 选择:基于 DE 算法的贪婪进化原则,只选择测试个体和当前个体中的费用较小者进入下一代

搜索,即

$$Q_{i,G+1} = \begin{cases} U_{i,G}, & \varphi(U_{i,G}) \leq \varphi(Q_{i,G}) \\ Q_{i,G}, & \text{其它} \end{cases} \quad (16)$$

终止条件为当前进化代数达到最大迭代步数,则迭代结束,算法终止。

这种动态更新策略在种群规模不变的情况下更好地加强了种群个体的多样性,以达到增强 DE 算法的全局搜索能力的目的,同时,由于这种多样性是基于原始种群产生的,所以能较好的保留甚至加强算法本身的鲁棒性。

3 算例分析

3.1 算例 1

采用文献 [10,15-17] 的算例,过程流体由 6 股热流体与 4 股冷流体组成,冷、热流体及公用工程的初始温度和目标温度、热容流率在表 1 中给出。

表 1 算例 1 流股参数

Tab.1 Stream data for case 1

流股	$T_{\text{in}} / ^\circ\text{C}$	$T_{\text{out}} / ^\circ\text{C}$	流股参数 $M_{Cp} / \text{kW} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
H1	85	45	156.3
H2	120	40	50.0
H3	125	35	23.9
H4	56	46	1 250.0
H5	90	86	1 500.0
H6	225	75	50.0
C1	40	55	466.7
C2	55	65	600
C3	65	165	180
C4	10	170	81.3
HU	200	198	—
CU	15	20	—

换热器、冷却器和加热器的传热系数均为 $K = 0.025 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$,费用计算公式均为 $60 \times A \text{ \$}/a$;热公用工程费用为 $100 \text{ \$}/(\text{kW} \cdot a)$;冷公用工程费用为 $15 \text{ \$}/(\text{kW} \cdot a)$ 。

本研究分别用基本 DE 算法与 DDE 算法优化换热网络综合性能,在优化参数设置相同的情况下,最大进化代数都为 10^4 次,每 100 步迭代记录一个费用,得到两者不同的费用变化曲线,如图 4 所示。可以发现,DDE 算法所对应的费用变化曲线逐渐低于

基本 DE 算法,显示出了 DDE 算法优化换热网络时有明显强于 DE 算法的全局搜索能力。而且从曲线的下降趋势可以发现,相较于 DE 算法曲线的平缓,DDE 算法曲线有几个明显的下降阶梯,如进化到 3500 步、8000 步时,这种下降阶梯在整个优化过程中对结果的影响尤其重要,间接表明了 DDE 算法具有比 DE 算法优化换热网络更强的局部最优解跳出能力。

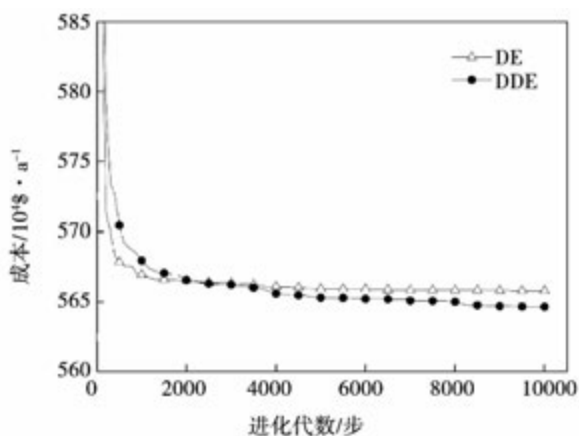


图 4 DE 算法与 DDE 算法的年综合费用变化对比曲线

Fig. 4 Comparison curve of total annual cost of DE and DDE

最终当进化代数到 5×10^4 时得到费用为 5 608 978 \$ / a, 文献 [10] 中的基本 DE 算法优化费用为 5 620 127 \$ / a, 两者相差 11 149 \$ / a, 优化结果有很大的提高。另外与其它文献结果相比如表 2 所示。优化得到的换热网络结构如图 5 所示。

表 2 算例 1 与文献对比结果

Tab. 2 Comparison results of case 1

参考文献	热流体 /kW	冷流体 /kW	面积 /m ²	年度成本总计 / \$ · a ⁻¹
[15]	20529.3	14923.8	56600.56	5672821
[16]	20745.4	15139.9	56085.25	5666756
[17]	19605	14000	58197.77	5662366
[10]	20223	14628.7	56287.5	5620127
本文	20306	14700.5	55964.51	5608978

3.2 算例 2

采用文献 [10, 18 - 19] 的算例, 过程流体由 4 股热流体和 5 股冷流体组成。算例的所有初始参数和费用参数同文献 [10, 18 - 19] 完全相同, 如表 3 所示。换热器费用 $(2000 + 70 \times A)$ \$ / (m² · a), 热公用工程 60 \$ / (kW · a), 冷公用工程 6 \$ / (kW · a)。

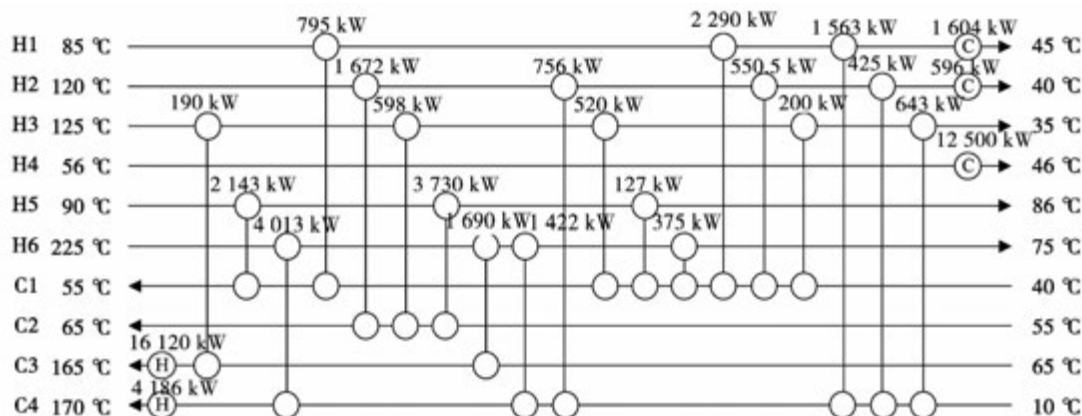


图 5 算例 1 优化结果

Fig. 5 Optimizing Result for case 1

同算例 1, 同样可以得到两者不同的费用变化曲线, 如图 6 所示。可以看出, DDE 算法优化换热网络所对应的费用明显低于基本 DE 算法, 进一步证明了 DDE 算法优化换热网络时有明显强于 DE 算法的全局搜索能力。从曲线下降趋势的比较可以

发现, 在进化代数到 3000 步之后 DE 算法在接近 8500 步的时候才出现一个明显的下降阶梯, 而 DDE 算法在不到 6000 步的时候就出现了一个下降阶梯, 并且在不到 10000 步的时候就再次出现下降阶梯, 进一步证明了 DDE 算法在局部最优解跳出能力上

的优势。并且在优化过程中 DE 算法所对应的费用变化曲线有一个很大的突变,而 DDE 算法则相对较平缓,这也显示出 DDE 算法在优化换热网络综合时有更强的鲁棒性。

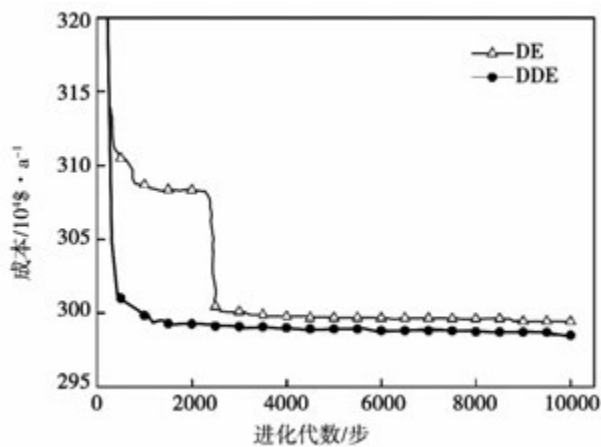


图 6 DE 算法与 DDE 算法的年综合费用变化对比曲线

Fig. 6 Comparison curve of total annual cost of DE and DDE

最终当进化它代数到 5×10^4 时得到费用为 2 931 042 \$ / a ,与其它文献结果相比如表 4 所示,可以看到优化结果有很大的提高。优化得到的换热网络结构如图 7 所示(图中数字为换热器的换

热量) 。

表 3 算例 2 流股参数

Tab. 3 Stream data for case 2

流股	$T_{in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	$MCp/\text{kW} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	$h/\text{kW} \cdot (\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})^{-1}$
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
HU	330	250	—	0.50
CU	15	30	—	0.50

表 4 算例 2 与文献对比结果

Tab. 4 Comparison results of case 2

参考 文献	热流体 /kW	冷流体 /kW	面积 /m ²	年度成本总 计 / \$ · a ⁻¹
[18]	34550	26830	16380	2980000
[19]	33084	25364	17550	2971000
[10]	32199	24474	17815	2944702
本文	23385	31105	18790	2931042

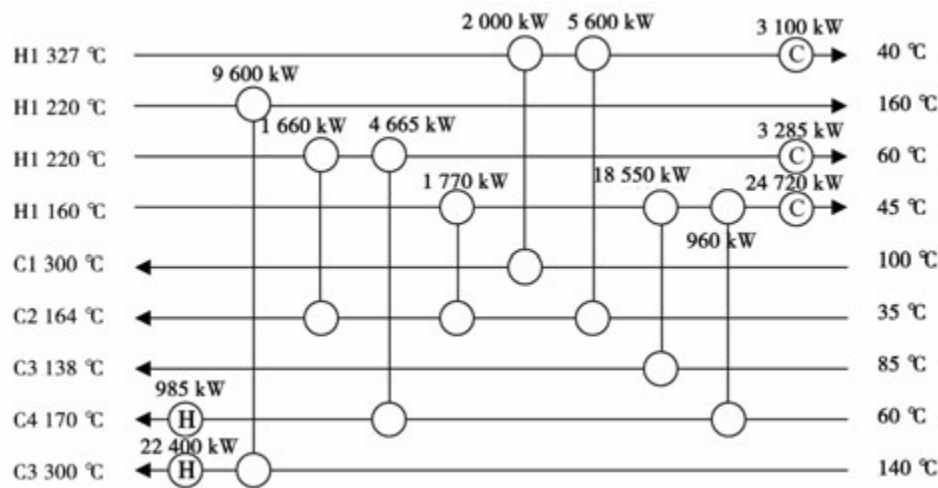


图 7 算例 2 优化结果

Fig. 7 Result for case 2

由于换热网络优化属于混合整数非线性规划、是典型的 NP-Hard 问题、具有非线性强、求解域庞大且不规则和局部最优解众多等特点。因此,DDE 算

法在应用于换热网络优化时相对于基本 DE 算法是有一定优势的,特别是在应用于较大规模换热网络优化问题时其优势特性更加明显:(1) 种群个体多

样性的增强,使得在优化过程中比基本 DE 算法更容易跳出局部最优解,使得其全局搜索能力在换热网络优化问题中显得更加突出。(2) 鲁棒性的增强使优化过程更加稳定高效,在换热网络优化问题的庞大且不规则的求解域中能寻找得到更好的解,特别是在应对上文所表述的数学模型中众多的约束条件时,算法的鲁棒性很好的使优化结果免受由于 DE 算法的随机性带来的数据不确定性的影响,最终得到令人满意的优化结果。

4 结 论

本研究提出以动态更新策略改进的微分进化算法应用于换热网络优化问题。基于动态更新策略,进一步加强对基本 DE 算法的种群多样性的利用,从而加强 DE 算法在优化换热网络时的全局搜索能力。通过两个经典算例进行验证比较,并获得了比以往更好的优化结果,证明了这种改进的 DE 算法在应用于换热网络优化中与基本 DE 算法相比有一定的优势,特别是在全局搜索能力与鲁棒性上都有加强,能进一步提高优化的精度和效率。

参考文献:

- [1] Hwa C S. Mathematical formulation and optimization of heat exchanger networks using separable programming//AIChE-ICHEME Symposium Series 4 [C]. New York: AIChE,1965: 101 - 106.
- [2] Zhou Chonghai, Hang Zhixian, Qiu Ting, et al. Application progress of stochastic searching techniques in the optimization of heat exchanger networks [J]. Chem. Indu. Eng. Pro., 2012, 31: 495 - 501.
- [3] Lewin D R, Wang H, Shalev O. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-I, General framework and MER optimal synthesis [J]. Comput. Chem. Eng., 1998, 22(10): 1503 - 1513.
- [4] Lewin D R. A generalized method for HEN synthesis using stochastic optimization-II, The synthesis of cost-optimal networks [J]. Comput. Chem. Eng., 1998, 20(10): 1387 - 1405.
- [5] Cardoso M F, Salcedo R L. A simulated annealing approach to the solution of MINLP problems [J]. Compute. Chem. Eng., 1997, 21(12): 1349 - 1364.
- [6] Yan Lidi, Huo Zhaoyi, Yin Hongchao. Simultaneous synthesis of heat exchanger networks using particle swarm optimization [J]. Chem. Indu. Eng. Pro., 2009(SI): 439 - 442.
- [7] He Qiaole, Cui Guomin, Xu Haizhu. Application of mimetic particle swarm optimization to continuous variable global optimization of cost-optimal heat exchanger networks [J]. Petrochemical Technology, 2014, 43(1): 37 - 45.
- [8] Price K, Storn R, Lampinen J A. Differential Evolution: A practical approach to global optimization [M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2005.
- [9] Rainer Stron, Kenneth Price. Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces [J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11: 347 - 359.
- [10] FANG Dajun, CUI Guomin. Global optimization of heat exchanger networks using differential evolution algorithm [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2013, 64(9): 3285 - 3290.
- [11] Fraser D M. The use of minimum flux instead of minimum approach temperature as a design specification for heat exchanger networks [J]. Chem. Eng. Sci., 1989, 44(5): 1121 - 1127.
- [12] Li Ying, Xu Guizhi. Application of DE algorithm for brain imaging using EIT [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2005, 24(6): 672 - 675.
- [13] Liu Z, Zhang J. An improved differential evolution algorithm for economic dispatch of power systems [J]. Proceedings Chinese Society of Electrical Engineering, 2008, 28(10): 100.
- [14] ZHAO Guang-quan, PENG X-i yuan, SUN Ning. A modified differential evolution algorithm with hybrid optimization strategy [J]. Chinese Journal of Electronics, 2007, 34(B12): 2402 - 2405.
- [15] Ravagnani M A, Silva A P, Arroyo P A, Constantino A A. Heat exchanger network synthesis and optimization using genetic algorithm [J]. Appl. Therm. Eng., 2005, 25(7): 1003 - 1017.
- [16] Yerram setty K M, Murty C V S. Synthesis of cost—optimal heat exchanger networks using differential evolution [J]. Computers and Chemical Engineering, 2008, 32(8): 1861 - 1876.
- [17] Mohammadhasani Khorasany R, Fesanghary M. A novel approach for synthesis of cost-optimal heat exchanger networks [J]. Computers and Chemical Engineering, 2009, 33(8): 1363 - 1370.
- [18] Zhu Nelll B K. A method for automated heat exchanger synthesis using block decomposition and non-linear optimization [J]. Chemical Engineering Research & Design, 1995, 73(11): 919 - 930.
- [19] Briones V, Kokossis A C. Hypertargets: a conceptual program mine approach for the optimization of industrial heat networks (I): Grassroots design and network complexity [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54: 519 - 539.

(陈 滨 编辑)

交叉缩放管内生物污垢热阻与水质参数的关联分析 = **Correlation Analysis of Microbe Fouling Resistance and Water Quality Parameters in the Alternating Elliptical Axis Tube** [刊, 汉] ZHANG Yi-long ((School of Automation Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012) , XIA Ling-li, XU Zhi-ming (Energy and Power Engineering School, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012) , LIU Zuo-dong (Energy and Power Engineering School, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4) . -503 -508

For researching the effect of the water quality parameters in recycled water on iron bacteria microbe fouling resistance, taking the alternating elliptical axis tube as the experimental subject , the lab analyzes the characteristics of iron bacteria microbe by the way of grey correlation analysis on the water quality parameters effecting on fouling resistance. The results indicate that the maximum weight is COD, and the minimum is ferrous ion content. With the fouling resistance fluctuation, the pH value and electrical conductivity are increased at first and steady later on, but the ferrous ion concentration, COD and DO are declined. **Key words:** iron bacteria, alternating elliptical axis tube, water quality parameters, fouling resistance, grey correlation analysis

采用动态更新策略的微分进化算法优化换热网络 = **Optimization of the Heat Exchanger Network by Differential Evolution Algorithm Based on Dynamic Update Strategy** [刊, 汉] CHEN Shang, CUI Guo-min, PENG Fu-yu, DUAN Huan-huan (Research Institute of New energy Science and Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2015, 30(4) . -509 -514

Aimed at the problem of serious non-convex nonlinear existing in the optimization of heat exchanger network, the dynamic updating strategy is put forward to improve the differential evolution algorithm for the optimization of heat exchanger network. By dynamic updating the individual in population instead of replacing the old population after the renewal of all individuals in population, in the case of keeping the original population unchanged, the diversity of the population individuals is fully used and the better robustness of algorithm is obtained to improve the global searching ability. With cases of comparison, it is proved that when applied to the optimization of heat exchanger network, the improved algorithm can effectively jump out of the local minimum trap in the optimization process and get better design results of heat exchanger network than ever. **Key words:** heat exchanger network synthesis, global optimization, Differential Evolution algorithm