

# 基于局部搜索增强策略的微分进化算法 应用于换热网络优化

段欢欢 崔国民 彭富裕 陈 上

(上海理工大学 新能源科学与工程研究所, 上海 200093)

**摘要:** 针对微分进化算法应用于换热网络优化时,局部搜索能力不强及易出现“早熟收敛”的现象,提出了一种兼顾局部搜索和全局寻优能力的改进策略。首先,对算法出现早熟的主要原因进行了机理分析;在此基础上,从动态更新角度引入局部增强算子,以当前解为中心进行邻域精细搜索,保证了局部搜索精度;最后,结合强制跳出机制,解决了算法易陷入局部极值的缺陷,对于非凸非线性问题较为严重的换热网络问题,实现了换热网络优化全局寻优能力和局部搜索精度的兼顾。算例结果表明,新的局部搜索增强策略能够进一步改善种群多样性和提高寻优效率及精度,获得比文献中结果更好的解,有效提高微分进化算法应用于与换热网络优化的能力。

**关键词:** 微分进化算法;局部搜索;动态更新;换热网络

中图分类号: TK124 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2016.06.008

## 引言

换热网络的优化设计直接关系到网络的投资费用和运行效率<sup>[1]</sup>,对能量的综合利用及节省投资具有重要的意义。目前其研究方法主要分为夹点法、数学规划法及启发式方法三类<sup>[2~4]</sup>;随着计算机计算能力的增强,为GA(遗传算法)、DE(微分进化算法)为代表的启发式方法的发展及应用提供了广阔空间<sup>[5~6]</sup>。

DE算法通过差分变异操作以及一对一的竞争生存策略进行搜索,具有强大的全局搜索能力,特别适用于求解非线性比较严重的换热网络问题。但是算法的搜索性能在很大程度上依赖于算法参数的设置,许多研究者为此进行了大量的研究尝试,在不同程度上提高了搜索效率,但是仍存在搜索后期随着

进化代数的增加以及种群多样性的急剧下降,个体“聚集”现象严重,使算法陷入某个极值点而出现种群更新停滞的问题。

鉴于此,本研究通过比较DE算法进化中不同变异策略对换热网络优化中目标费用稳定性的影响<sup>[7]</sup>,对早熟收敛现象进行机理分析;引入动态局部搜索增强与强制跳出新策略相结合的方法,增强种群的多样性,进一步精细化搜索空间,在算法的全局搜索与局部搜索、收敛速度与求解精度之间进行兼顾。

## 1 微分进化算法应用于换热网络

换热网络常用模型以2股热流体和3股冷流体为例。Grossmann无分流分级超结构模型如图1所示<sup>[8]</sup>。

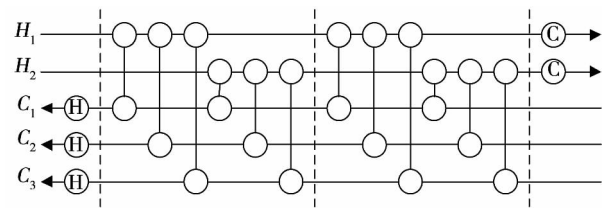


图1 无分流换热网络分级超结构

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

图中:H—热流体;C—冷流体;每个圆圈“○”代表冷热流体之间匹配的一个换热器。已知冷、热流体的进出口温度、热容流率和换热系数,对于没有达

收稿日期: 2015-06-11; 修订日期: 2015-07-30

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基金资助项目(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。

通讯作者: 崔国民,上海理工大学教授,博士生导师。

到目标温度的流体补充公用工程,以此形成换热网络,利用冷热物流的最佳匹配,最大限度回收过程流体的能量。

### 1.1 目标函数

确定换热网络模型后,以最小综合经济费用  $\min f(x)$  为目标函数,包括公用工程费用和设备投资费用。其数学表达为:

$$\min f(x) = f_1 + f_2 \quad (1)$$

式中:

$$f_1 = \sum_{i \in N_H} C_{CU} \cdot Q_{CU_i} + \sum_{j \in N_C} C_{HU} \cdot Q_{HU_j}$$

$$f_2 = \sum_{k \in N} (F_{fix} + C_0 \cdot A_k^\beta) + \sum_{i \in N_H} (F_{fix} + C_1 \cdot A_{CU_i}^\beta)$$

$$+ \sum_{j \in N_C} (F_{fix} + C_2 \cdot A_{HU_j}^\beta)$$

式中:  $f_1$ —公用工程费用;  $f_2$ —设备投资费用,一般包括固定投资费用与换热器面积费用;  $N_H$ 、 $N_C$ 、 $N$ —热流体流股数、冷流体流股数、换热器的数目;  $C_{CU}$ 、 $C_{HU}$ —冷却器、加热器公用工程费用系数;  $F_{fix}$ —固定投资费用;  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ —换热器、冷却器、加热器面积费用系数;  $\beta$ —面积费用指数;  $A_k$ 、 $A_{CU_i}$ 、 $A_{HU_j}$ —换热器、冷却器、加热器的换热面积;  $Q_{CU_i}$ —第  $v_{i_g}$  股热流体与冷公用工程换热量;  $Q_{HU_j}$ —第  $j$  股冷流体与热公用工程换热量。

### 1.2 微分进化算法

DE 算法从一个均匀分布的种群开始进化,通过变异、交叉和选择操作产生试验向量,选择较优个体进入下一代群体,直至输出问题的最优解。基本原理如下:

(1) 初始种群,假定 DE 算法的种群规模为  $NP$ ,每个个体有  $D$  维变量,则第  $G$  代个体可表示为  $x_{j_i_g}$ ,根据以下公式随机生成  $NP$  个个体构成初始种群:

$$x_{j_i_g} = x_{low} + rand(0, 1) \times (x_{up} - x_{low}) \quad (2)$$

式中:  $x_{j_i_g}$ —第  $g$  代第  $i$  个个体种群的第  $j$  维分量,  $g \in \{0, 1, \dots, g_m\}$  种群初始化时,  $g = 0$ ,  $i \in \{1, 2, \dots, NP\}$ ,  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$ ,  $rand(0, 1)$  为  $0 \sim 1$  之间均匀分布的随机数;  $x_{up}$ 、 $x_{low}$ —优化变量的上下限值。

(2) 个体评价,计算每个个体  $x_{i_g}$  的目标函数值  $f(x_{i_g})$ ;

(3) 对于每个个体  $x_{i_g}$  执行如下操作:

a: 变异,通过变异操作作为当前种群个体生成一个新的临时目标个体  $v_{i_g}$ ,随机选择另外三个互不相同的个体进行此操作生成临时个体  $v_{i_g}$ ,根据以下公式:

$$v_{i_g} = x_{n_1_g} + CF \times (x_{n_2_g} - x_{n_3_g}) \quad (3)$$

产生临时个体,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,  $CF$  值直接影响差分变异步长的大小。

b: 交叉,将当前种群的部分个体用临时目标个体  $v_{i_g}$  进行替换选择,执行交叉操作生成新的适应个体  $u_{i_g}$ 。具体如下:

$$u_{i_g} = \begin{cases} v_{i_g} & \text{if } rand(0, 1) < CR \text{ or } j = nk \\ x_{i_g} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $CR$ —交叉概率,  $nk-1 \sim D$  之间均匀分布的整数,用以确保至少有一个个体分量  $j$  继承上一代的个体。

c: 选择,将适应个体的目标值  $f(u_{i_g})$  与当前个体  $f(x_{i_g})$  进行比较,选择较优个体进入下一代搜索。

(4) 如满足终止条件,则输出最优解,否则返回步骤(3)。

DE 算法的三个核心控制参数分别是种群规模  $NP$ ,缩放因子  $CF$  和交叉因子  $CR$ 。 $NP$  一般取变量维度  $D$  的  $8 \sim 15$  倍,  $CF$  和  $CR$  一般取  $0 \sim 1$  之间的常数。

## 2 不同变异操作早熟现象分析

### 2.1 不同变异操作

DE 算法中变异操作是算法的核心工作,通过差分向量产生中间个体的方式扩展了种群的多样性,由此产生的差分方式增强了算法的全局寻优能力。常用的几种变异机制<sup>[7]</sup>如下:

$$x_{i_{g+1}} = x_{best_g} + CF \times (x_{n_1_g} - x_{n_2_g}) \quad (5)$$

$$x_{i_{g+1}} = x_{n_1_g} + CF \times (x_{n_2_g} - x_{n_3_g}) \quad (6)$$

$$x_{i_{g+1}} = x_{i_g} + CF \times (x_{best_g} - x_{i_g}) + CF \times (x_{n_1_g} - x_{n_2_g}) \quad (7)$$

式中:  $x_{best_g}$ —第  $g$  代种群的最优个体;  $x_{n_1_g}$ —第  $g$  代种群中随机选择的第  $n_1$  个个体;  $x_{i_g}$ —第  $g$  代种

群第  $i$  个个体,以上常用的三种变异操作中分别采用不同的基点向量  $r_o$

2.2 不同变异操作对早熟收敛的影响

采用文献 [9] 的 10 股流算例,对式 (5) ~ 式 (7) 三种常用的变异机制进行对比分析,考察不同变异操作对算法的收敛速度及目标费用的影响,算例流体参数如表 1 所示。

表 1 10 股流换热网络的流体参数  
Tab. 1 Stream data for case 10SP

流通股编号	$T_{in}/^{\circ}\text{C}$	$T_{out}/^{\circ}\text{C}$	$MCp/\text{kW} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
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	600.0
C3	65	165	180.0
C4	10	170	81.3
HU	200	198	-
CU	15	20	-

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

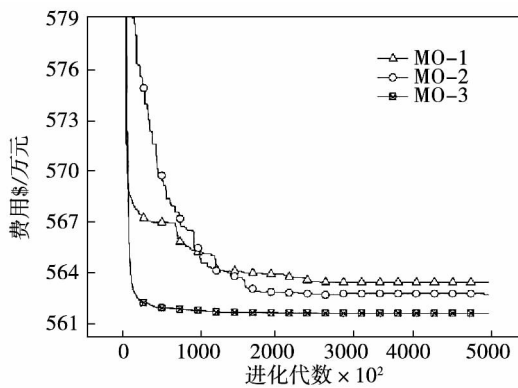


图 2 不同变异机制下的最小年综合费用曲线 (10SP)

Fig. 2 The total annual cost variation with different mutationoperator (10SP)

三种变异机制下的年综合费用曲线如图 2 所

示。图中,MO - 1、MO - 2 和 MO - 3 分别对应式 (5) ~ 式 (7) 表示的变异操作,年综合费用值分别为  $5\ 627\ 615 \$ / \text{a}$ ,  $5\ 621\ 764 \$ / \text{a}$  和  $5\ 614\ 888 \$ / \text{a}$ 。

从图 2 可以看出:(1) 三种变异机制均能收敛到一个局部最优解,但收敛速度不同,式 (7) 对应的变异机制收敛速度最快;(2) 在进化初期,种群个体差异性较大,随着变异交叉操作的进行,种群多样性快速下降。对于大规模换热网络优化问题来说,算法可能在进化初期陷入某个局部极值而丧失全局搜索能力;(3) 在进化后期,个体集中聚集在基点附近,变异差分向量  $(x_{r_1g} - x_{r_2g})$  过快减小。此时,交叉和选择操作不能有效地增强种群多样性,种群无法在当前求解区域内重新搜索到新的邻域,个体难以继续更新,陷入“停滞”状态,此时很难保证能够有效搜索到全局最优解,即所谓的早熟收敛现象。

3 局部搜索增强策略

基本 DE 算法中,缩放因子  $CF$  为静态参量,在搜索后期不能实时的进行局部精细探索,难以避免算法陷入“局部极值”。为了克服这一缺陷,本研究在分析各个变异操作的基础上,结合基本 DE 算法,提出一种新的局部搜索增强策略。主要思想如下:

3.1 实时因子  $\eta$  的引入

$$\eta = \exp\left(\frac{1 - G_m}{G + 1 - G_m}\right) \tag{8}$$

该因子随着进化代数  $G_m$  的增加而呈现指数式下降趋势,新的缩放因子  $CF^* = \xi \times CF \times \eta + \theta$ ,其中  $\xi$  为协调系数,该系数在进化过程中能够有效调整实时因子下降的舒缓程度,使得种群个体达到快速收敛; $\theta$  为保底系数,确保缩放因子不会无限制下降趋近于零。当  $G_m$  值为 1 时,实时因子也等于 1,第一代初始进化时新的缩放因子与初始因子值相同,能够确保算法在运行初期的静态参量值是经验较优值。初始因子  $CF$  初值取 0.6,协调系数  $\xi$  取 0.7, $\theta$  保底系数取 0.2,随着进化代数的增加, $CF^*$  值逐渐减小,变化区间为  $[0.2, 0.62]$ 。

3.2 局部增强变异操作

$$t_{i\ g+1} = x_{i\ g} + CF^* \times (x_{best\ g} - x_{i\ g}) + CF^* \times (x_{n_1\ g} - x_{n_2\ g}) \tag{9}$$

新变异机制以当前种群个体为基点向量, 当算法进化到一定阶段时, 能够在当前个体附近继续进行精细搜索, 有效弥补算法优化后期局部搜索能力不强的缺点。

### 3.3 强制跳出策略

算法在搜索后期经过局部精细化搜索以后, 虽然在精度和速度上得到一定的提高, 但是从整体强化角度考虑, 仍然停留在局部搜索环节, 很有可能再一次陷入下一个局部极值点。当种群个体精细化搜索到一定阶段时, 引入强制跳出策略如式(10), 以此避免个体直接陷入“伪最优解”区域, 采用迂回逼近的方式步步靠拢最优解区域, 其中  $\mu$  代表飞跃尺度, 一般取值为 [8, 15], 具体如下:

$$x_{i, g+1} = x_{best, g} + \mu \times (x_{n_2, g} - x_{n_3, g}) \quad (10)$$

动态因子  $CF^*$  结合强制跳出策略的引入, 正是为了有效保证种群的多样性, 实现算法的局部精细的同时避免陷入局部最优解, 更好的平衡算法全局搜索与局部搜索能力之间的关系。

## 4 算例验证分析

为了检验上述改进方法的有效性, 采用以下两个算例进行验证分析。

### 4.1 算例 1

采用文献 [10] 的 9 股流算例进行分析, 冷、热流体及公用工程的初始温度、目标温度和热容流率在表 2 中均已给出。

表 2 9 股流换热网络的流体参数

Tab. 2 Stream data for case 9SP

流股编号	$T_{in}/^{\circ}C$	$T_{out}/^{\circ}C$	$MCp/kW \cdot ^{\circ}C^{-1}$	$h/kW \cdot (m^2 \cdot ^{\circ}C)^{-1}$
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

换热器费用为  $2000 + 70 \times A$  [ \$ / (  $m^2 \cdot a$  ) ], 热公用工程费用为  $60$  \$ / (  $kW \cdot a$  ), 冷公用工程费用为  $6$  \$ / (  $kW \cdot a$  )。分别采用基本 DE 算法和本文提出的基于局部搜索增强策略的改进 DE 算法 ( ADE ) 优化该算例, 对比结果如图 3 所示。

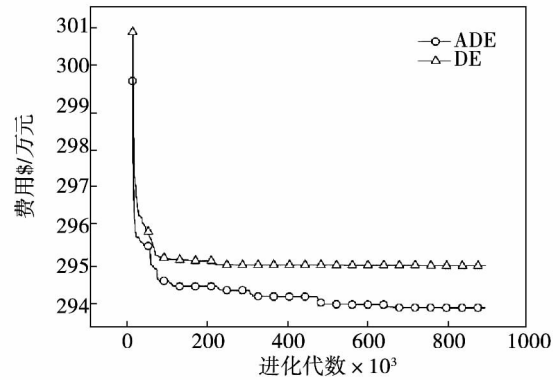


图 3 改进前后对应的换热网络最小年综合费用变化曲线图

Fig. 3 The minimum total annual cost comparison of HENS before and after modification.

对于换热网络结构来说, 评价一个结构的好坏是通过其年综合目标费用来体现的, 由图 3 可以看出: (1) 搜索前期, 改进后算法费用下降较为明显, 搜索速度和优化精度均优于原始微分进化算法; (2) 随着进化过程的进行, 改进后的 ADE 算法的费用曲线呈现“锯齿”形下降趋势。

由此可以得出: 基本 DE 算法优化换热网络, 在进化过程中能够快速收敛到一个局部解, 但是易出现早熟问题。改进后的 ADE 算法虽然也有陷入局部极值的可能性, 但是却能够多次跳出当前极值点, 继续优化。本文通过实时因子灵活调整差分步长的大小, 避免了固定步长时有可能漏掉最优解的情况, 在保证搜索精度和搜索效率的前提下, 在每一个进化周期的搜索后期加入强制跳出机制, 有效扩展当前空间搜索域, 循环操作, 跳出当前极值点, 继续搜索下一个较优解。

采用 9 股流算例进行验证分析, 最终优化结果为  $2\ 931\ 677.43$  \$ / a, 结构如图 4 所示, 图中换热器上方数字表示换热器面积值, 单位为  $m^2$  (下同)。

9 股流算例优化结果与其他文献比较见表 3。

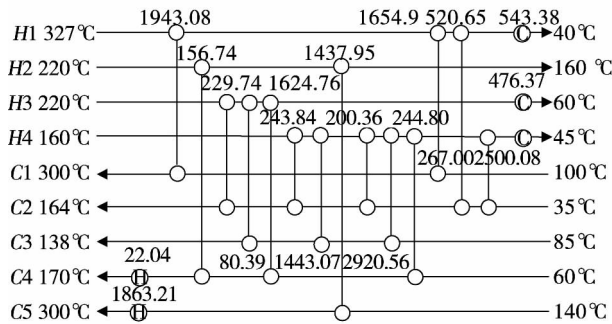


图4 本文优化后获得的最优换热网络结构

Fig. 4 Optimal structure of HENs in this study

表3 算例1 结果比较

Tab. 3 Comparison of optimal results for case 1

文献	热流体/kW	冷流体/kW	面积/m <sup>2</sup>	年综合费用 / \$·a <sup>-1</sup>
Zhu <sup>[11]</sup>	26 830	34 550	16 380	2 980 000
Briones <sup>[12]</sup>	25 364	33 084	17 550	2 971 000
方大俊 <sup>[13]</sup>	24 474	32 199	17 815	2 944 702
本文	23 655.36	31 375.48	18 372.9	2 931 677.43

4.2 算例2

采用上述10股流算例进行验证分析,冷、热流体及公用工程的初始温度、目标温度和热容流率在表1中均已给出。

本文10股流算例优化结果与其他文献比较见表4,采用变异操作式(7)费用结果为5 614 888 \$/a,基于式(7),采用新的局部搜索增强策略改进算法后的结果为5 611 788 \$/a。优化结构如图5所示。

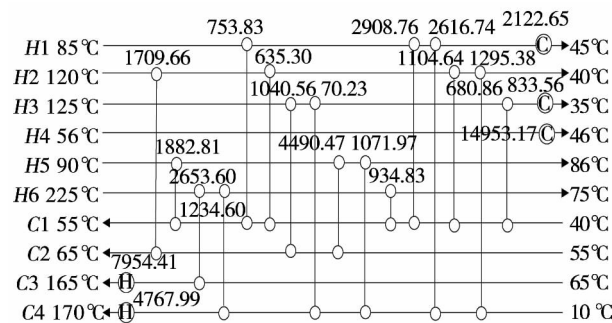


图5 本文优化后获得的最优换热网络结构

Fig. 5 Optimal structure of HENS in this study

表4 算例2 结果比较

Tab. 4 Comparison of optimal results for case 2

文献	热流体/kW	冷流体/kW	面积/m <sup>2</sup>	年综合费用 / \$·a <sup>-1</sup>
Ravagnani M A <sup>[14]</sup>	20 529.3	12 923.8	56 600.56	5 672 821
Yerramsetty K M <sup>[15]</sup>	20 745.4	15 139.9	56 085.25	5 666 756
赵亮等 <sup>[16]</sup>	20 000	14 400	57 147	5 646 000
本文	20 460.28	14 854.83	55 715.62	5 611 788

5 结论

针对DE算法应用于换热网络优化,存在搜索后期种群个体陷入局部解难以跳出的问题,提出了一种新的局部搜索增强策略改进算法,从表3和表4中数据可以看出,本文改进方法优于基本DE算法结果,也优于文献算例结果。

(1) 通过对不同变异操作对早熟收敛问题影响对比研究得出:随着进化代数的增加,种群多样性下降,是出现早熟收敛问题的主要原因;

(2) 通过局部精细搜索,结合强制跳出机制,在一个进化周期内对变异因子实时更新,能够增强局部个体的跳出能力,保持种群个体的实时动态更新,有效避免算法的早熟收敛问题,增强算法的搜索性能及收敛速度;

(3) 将ADE(改进算法)分别运用于9股流和10股流算例,计算结果验证了方法的可行性及有效性,为DE算法应用于大规模换热网络优化问题提供一种新的思路。

参考文献:

[1] Masso A. H. and D. F. Rudd, The synthesis of system designs. II. Heuristic structuring [J]. AIChE Journal, 1969, 15(1): 10-17.

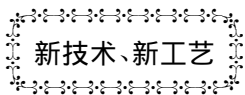
[2] Linnhoff B. and E. Hindmarsh, The pinch design method for heat exchanger networks [J]. Chemical Engineering Science, 1983, 38(5): 745-763.

[3] Kesler M G, Parker R O. Optimal networks of heat exchange [C]// Chem. Eng. Prog. Symp. Ser. 1969, 65(92): 111-120.

[4] Lewin J. 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.
- [5] Price K, Storn R M, Lampinen J A. Differential evolution: a practical approach to global optimization [M]. Springer Science & Business Media, 2006.
- [6] 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.
- [7] 王 凌, 钱斌编. 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]. Bei Jing: Tsinghua University Press, 2012.
- [8] Yee, T. F. and I. E. Grossmann, Simultaneous optimization models for heat integration—II. Heat exchanger network synthesis [J]. Computers & Chemical Engineering, 1990, 14(10): 1165–1184.
- [9] Ahmad S, Heat exchanger networks: Cost tradeoffs in energy and capital [D]. UMIST Manchester, 1985.
- [10] Briones V, Kokossis A C. Hypertargets: a conceptual programming approach for the optimization of industrial heat networks—I. grassroots design and network complexity [J]. Chemical Engineering Science, 1999(54): 519–539.
- [11] Zhu X, O'Neill B K, Roach J, Wood R. A Method for Automated Heat-Exchanger Network Synthesis Using Block Decomposition and Nonlinear Optimization [J]. Chemical engineering research & design, 1995, 73: 919–930.
- [12] Briones V, Kokossis A. Hypertargets: a Conceptual Programming approach for the optimisation of industrial heat exchanger networks—I. Grassroots design and network complexity [J]. Chemical engineering science, 1999, 54: 519–539.
- [13] 方大俊, 崔国民. 微分进化算法应用于换热网络全局最优化 [J]. 化工学报, 2013, 64: 3285–3290.  
FANG Da-jun, CUI Guo-min. Global optimization of heat exchanger networks using differential evolution algorithm [J]. CIESC Journal, 2013, 64: 3285–3290.
- [14] Ravagnani M, Silva A P, Arroyo P A, et al. Heat exchanger network synthesis and optimisation using genetic algorithm [J]. Applied Thermal Engineering, 2005, 25(7): 1003–1017.
- [15] 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.
- [16] 赵 亮, 霍兆义, 李栋斌, 等. 无分流换热网络同步优化综合 [J]. 热科学与技术, 2013, 12(01): 68–73.  
ZHAO Liang, HUO Zhao-yi, LI Dong-bin, et al. Simultaneous synthesis of heat exchanger network with no split streams [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2013, 12(01): 68–73.

( 陈 滨 编辑 )



## 燃压机组控制系统的改进

据《Gas Turbine World》2015年7~8月刊报道,由于石油价格波动,石油和天然气企业主管将注意力转向技术投资,以便提高效率。燃气轮机世界更加关注工业互联网时代技术的进展以提升燃气轮机和压气机运行效率并推进和预测检修计划的安排时机。

先进的软件有能力根据单一的防喘振和过程控制转到控制包括所有辅机的多涡轮、压气机机组和所有过程控制的性能。

对于较新的压气机控制系统,许多机构愿意使寿命周期管理成为它们与标准运行过程的不可分部分。预订的程序确保日常维修和安全性升级改进。

燃驱压缩机组的控制技术在石油和天然气作业中是必不可少的。

确定最关键的技术途径是从寿命周期管理开始并以选择最好的技术来保持组织运转效率为结束。

( 徐立民 提供, 吉桂明 译 )

chanical Engineering ,Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China ,Post Code: 200090) ,CHEN Chao-jie ,WEI Jia-jia ( School of Aircraft Engineering ,Nanchang Hangkong University ,Nanchang ,China ,Post Code: 330063) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31( 6) . -42 ~47

The vortex controlled diffuser ( VCD) has been expected to be widely used in the engine combustion chamber in the future ,due to its high pressure recovery and low pressure loss. To obtain satisfactory vortex controlled diffuser performance ,numerical simulations of flow in different structures were performed with finite rate model and suction slot bleed condition. Comparison was made between VCD and normal expansion structure without suction slot. It is revealed that this structure with suction slot can reduce the length of the recirculation zone in combustion chamber ,expand the combustion area ,make the distribution of the outlet temperature along the radial direction more uniform , and improve the combustion efficiency greatly. **Key words:** vortex controlled diffuser ,numerical simulation ,combustion performance

基于局部搜索增强策略的微分进化算法应用于换热网络优化 = **A Differential Evolution Algorithm with Enhanced Local Search for Heat Exchanger Network Synthesis** [刊 ,汉] DUAN Huan-huan ,CUI Guo-min ,PENG Fu-yu ,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( 6) . -48 ~53

An improvement strategy for differential evolution algorithm considering capabilities of local and global searches for heat exchanger network synthesis was proposed to avoid the problems of weak search ability and premature convergence. The mechanism of premature convergence for differential evolution algorithm was analyzed ,and a local enhancement factor based on dynamic updating was introduced into the numerical model to improve local search precision. Furthermore ,global search capability was also enhanced by the break mechanism. For the non-linear and non-convex characteristics of the heat exchanger networks ,this improved model now has the capabilities of local and global searches with great accuracy. Simulation cases indicate that the precision ,efficiency and diversity of the differential evolution algorithm have been improved ,and better solutions can be obtained compared to literature. **Key words:** differential evolution algorithm ,local search ,dynamic updating ,heat exchanger network

含 SO<sub>2</sub> 气流对 20 碳钢冲蚀磨损性能影响的试验研究 = **Experimental Study on the Effect of Air-flow Containing SO<sub>2</sub> on Fly-ash Erosion of 20 Carbon Steel** [刊 ,汉] ZHAO Xian-ping ,ZHU Chong-wu ,YE Gui-lin ,PAN Wei-guo ( College of Energy and Mechanical Engineering ,Shanghai University of Electric Power ,Shanghai ,China , Post Code: 200090) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. . -2016 31( 6) . -54 ~58