

# 隔代强制进化遗传算法在换热网络优化中应用

张 勤, 崔国民, 张磊磊, 关 欣

(上海理工大学热工程研究所, 上海 200093)

**摘 要:**在对换热网络分级超结构及其数学模型分析的基础上,对网络综合优化问题进行了研究。针对普通遗传算法及其它优化算法无法保证网络优化质量和效率的缺点,对遗传算法进行了改进,提出了换热网络隔代强制进化遗传算法。该方法将换热网络结构信息转化为种群中染色体信息,利用种群的进化实现网络结构的优化,在进化过程中使用隔代强制策略,使种群向更优方向稳步进化,保证各代优化结果的有效性,降低最优群体的生成代数,并利用最优个体保存技术记录优化过程中最佳换热网络结构。采用此方法对具体换热网络实例进行了优化综合,结果表明:隔代强制进化遗传算法能在网络优化过程中避免早熟收敛而陷入局部最小点的现象,使搜索质量和效率得到有效提高。用隔代强制进化遗传算法对有分流和无分流换热网络进行优化综合,均能获得综合性能良好的网络结构。

**关 键 词:** 换热网络; 强制进化; 遗传算法

中图分类号: TK124 文献标识码: A

## 1 引 言

换热网络是过程系统的一个重要子系统,其在石油化工、制药等工业中得到了广泛的使用。换热网络的设计优劣直接影响整个过程系统的能耗、经济回报和控制性能。因此,换热网络综合问题早已得到了广泛的关注和研究。关于换热网络综合问题也有多种有效求解方法。主要有 Linhoff 提出的夹点法,Floudas 和 Crossmann 提出的数学规划法<sup>[1]</sup>。

但由于算法制约,多数换热网络综合问题是建立在线性化模型基础上。此时,虽然问题得到简化,但求解结果的可靠性大幅度降低。换热网络综合其实是混合整数非线性(MINLP)优化问题<sup>[2]</sup>。非线性模型的组合方案和变量太多,求解过程需要计算大量结构,计算速度慢,而且很难搜索到全局最优解。对于非线性换热网络模型,目前为止还没有通用有效的求解方法<sup>[1]</sup>。遗传算法是模拟自然界“物竞天择”的优化方法,适用于求解大规模组合。近年来遗传算法在换热网络问题上也得到了应用<sup>[3]</sup>。由于换热网络问题本身的计算复杂度和求解适应度值速度

慢,有分流结构,即有非线性因素的模式使用较少。

在换热网络非线性模型基础上,通过增加最优个体保存、隔代强制进化等策略对普通遗传算法进行改进,并对无分流和有分流情况换热网络综合问题分别进行了求解,得到了良好的优化结果。

## 2 换热网络模型

### 2.1 换热网络综合问题的描述

假设有  $N_H$  个热物流需要冷却,有  $N_C$  个冷物流需要被加热,利用热物流与冷物流进行匹配,回收热物流的一部分能量,已知每股流体的入口以及目标参数,另有一组冷热公用工程可以被利用,确定各热股的匹配顺序和换热器的参数,使每股流体达到它的目标温度,且换热器的年综合费用最小<sup>[3]</sup>。

换热网络的结构可用整数子集  $X = \{1, 2, 3, \dots, x_Z\}$  的排列来表示,其中  $Z$  是换热网络中  $N_H$  个热物流和  $N_C$  个冷物流的最多匹配数。 $X$  的元素  $x_i$  表示在第  $i$  个位置的换热器编号。

### 2.2 换热网络的超结构

以 2 股热流体,3 股冷流体为例,本文分别应用了无分流和有分流的换热网络超结构,如图 1 和图 2 所示。其中换热网络的级数为  $N_K$ ,  $N_K$  取  $\max(N_H, N_C)$ ,这样不同流股间最多的匹配次数为  $N_K$ ,最大的换热器个数可以达到  $N_H \times N_C \times N_K$ 。

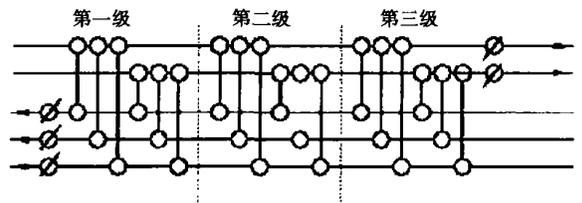


图 1 无分流换热网络超结构

对于图 1 所示的无分流超结构,  $k$  级第  $n$  股热流体与第  $m$  股冷流体匹配对应的换热器序号为  $x_Z$

收稿日期: 2005-12-12; 修订日期: 2006-03-28

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(20406011); 上海市重大科技攻关基金资助项目(051Z12028)

作者简介: 张 勤(1982-),男,上海人,上海理工大学硕士研究生。

$$= m + N_H \times (n - 1) + N_H \times N_C \times (k - 1), m = 1, 2, \dots, N_H; n = 1, 2, \dots, N_C; k = 1, 2, \dots, N_K.$$

对于图 2 所示的有分流换热网络结构<sup>[4~5]</sup>, 每股流体分流时, 还需考虑其分流比例, 用  $r_{i,j,k}$  表示  $k$  级第  $i$  股流体与第  $j$  股流体换热时分流的比例。

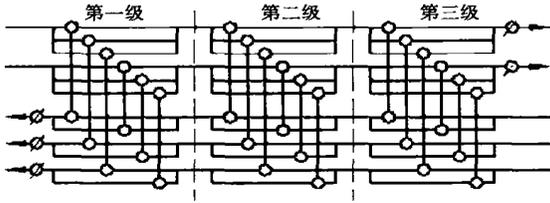


图 2 有分流换热网络超结构

如用  $A = \{A_1, A_2, A_3, \dots, A_Z\}$  中的元素表示  $X$  中相应元素的换热器面积, 并用  $A_U = \{A_{UH}, A_{UH2}, \dots, A_{UHN_H}, A_{UC1}, \dots, A_{UCN_C}\}$  来表示流股与公用工程匹配所需换热器面积, 则换热网络结构由  $X, A, A_U$  表示。换热网络超结构的引入使换热网络的求解不需要利用任何经验规则, 也不需依赖夹点技术, 可以使用完全的数学规划法求解。

### 2.3 目标函数

取年度综合费用  $E$  为换热网络的优化目标, 其包括设备投资年折合费用  $E_C$  与公用工程年成本  $E_U$ 。  $E_U$  又可分为年冷公用工程成本  $E_{UC}$  和年热公用工程成本  $E_{UH}$ 。设备包括换热器, 加热器, 冷却器。其常用费用计算公式取  $CA^b$ ,  $C, A, b$  分别为换热面积费用系数, 换热面积及指数。  $Q_{i,j,k}$  为第  $i$  股热流体与第  $j$  股冷流体在  $k$  级的换热量。  $Q_{UCi}$  表示第  $i$  股热流体所需冷公用工程用量,  $Q_{UHj}$  表示第  $j$  股冷流体所需热公用工程热量;  $z_{jk}, z_{UCi}, z_{UHj}$  分别表示换热器、冷却器和加热器的存在状态。

$$E = E_{UH} + E_C + E_C$$

$$= \sum_{i=1}^{N_H} C_{UCi} Q_{UCi} z_{UCi} + \sum_{i=1}^{N_C} C_{UHj} Q_{UHj} z_{UHj} +$$

$$\left( \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{j=1}^{N_C} \sum_{k=1}^{N_K} C_{i,j,k} A_{i,j,k}^b z_{i,j,k} + \sum_{i=1}^{N_H} C_{UH} A_{UH}^b z_{UH} + \sum_{i=1}^{N_C} C_{UC} A_{UC}^b z_{UC} \right)$$

式中:  $A_{Hi} = Q_{UCi} / K_{UC} \Delta T_{UCi}$ ,

$A_{Ci} = Q_{UHj} / K_{UH} \Delta T_{UHj}$ 。

则换热网络的优化目标即可表述为  $\min E$ 。

### 2.4 约束条件

每个流股的热平衡

热流体:  $\sum_{j \in N_C, k \in N_K} Q_{i,j,k} + Q_{UCi} = W_i (T_{Hini} - T_{Houti})$

冷流体:  $\sum_{i \in N_H, k \in N_K} Q_{i,j,k} + Q_{UHj} = W_j (T_{Coutj} - T_{Cinj})$

每个换热器的热平衡:

$Q_{i,j,k} = K A_{i,j,k} \Delta T_{i,j,k}^H = K A_{i,j,k} \Delta T_{i,j,k}^C \quad i \in N_H, j \in N_C$

温差约束

对换热器:  $\Delta T_{i,j,k}^H \geq \Delta T_{min}$

$\Delta T_{i,j,k}^C \geq \Delta T_{min}$

对公用工程:  $T_{UHj} - T_{Coutj} > \Delta T_{min}$

$T_{Houti} - T_{UCi} > \Delta T_{min}$

0~1 变量约束:

$z_{i,j,k}, z_{UCi}, z_{UHj} \in \{0, 1\}$

变量的非负约束:

$Q_{i,j,k} \geq 0, Q_{UHj} \geq 0, Q_{UCi} \geq 0$

对于有分流的换热网络结构, 优化中增加了分流比例这个变量, 本文采用非等温混合模型来计算流体汇合时的温度, 非等温混合也增加了模型的非凸性, 提高了计算难度<sup>[6]</sup>。其约束条件如下:

热流体:  $\sum_{j=1}^{N_C} r_{i,j,k} T''_{i,j,k} = T'_{i,j,k+1}$

冷流体:  $\sum_{i=1}^{N_H} r_{i,j,k} T''_{i,j,k} = T'_{i,j,k+1}$

$\sum_{j=1}^{N_C} r_{i,j,k} = 1, \sum_{i=1}^{N_H} r_{i,j,k} = 1$

## 3 换热网络的隔代强制遗传算法

换热网络是一个 MINLP 问题, 在优化综合过程中, 即使相同的流股只匹配一次, 最多能达到  $(N_H \times N_C)$  种不同网络结构。由于换热网络数学模型具有非凸性、多峰性, 以及 0、1 变量存在, 数学规划法来综合换热网络面临解空间大, 各种传统优化算法失效, 只能求得局部最优解<sup>[7]</sup>。近年来, 随着计算机技术的发展, 遗传算法等进化算法在人工智能、机器学习、工程计算等方面得到的广泛的应用并获得了良好的效果。目前遗传算法在解决大规模无分流换热网络问题上也得到了较好的效果, 但有分流情况的换热网络综合遗传算法公开文献报道比较少。

遗传算法 (genetic algorithms, 简称 GA) 由 J. Holland 于 1975 年受生物进化论启发提出, GA 属于一类随机优化算法, 但它并非是简单的随机比较搜索, GA 通过对染色体的评价和对染色体基因的作用, 有效地利用已有信息来指导改善状态。GA 有隐含并行性和全局空间搜索的显著特点<sup>[8]</sup>。通过 3 个基本算子选择、交叉、变异, GA 就能找到最优解, 适应度作为个体优劣的唯一评价指标, 表示个体对环境的使用能力。交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  的选择是

影响遗传算法性能的一个关键因素,  $p_c$  或  $p_m$  越大, 新个体产生的速度越快, 但  $p_c$  过大时, 遗传模式被破坏的可能性也越大,  $p_m$  过大时, 遗传算法将变成纯粹的随机搜索算法。

$p_c$  和  $p_m$  一般由经验给定, 或者采用自适应方法调整参数, 如文献[9]中, 其变异率为:

$$p_m = p_{m\min} + (p_{m\max} - p_{m\min}) \cdot e^{-10 \frac{(C_n - C_1)}{C_n}}$$

其中:  $p_{m\min}$ 、 $p_{m\max}$ 、 $C_n$ 、 $C_1$ —最小变异率、最大变异率、种群中最小适应度和最大适应度值。

在遗传进化过程中, 不可避免出现早熟收敛而陷入局部最小点的现象。早熟收敛是遗传算法中常见现象, 指遗传算法不能产生性能超过父代的子代。此时群体中, 非最优个体在最优群体中占的比例过大, 占统治地位个体产生的后代比他们的父代没什么不同或者更差。

为了避免进化过程中的早熟收敛现象, 本文提出了隔代强制进化方法, 强制种群向更优方向进化。其基本思想是, 如果连续几代得不到更优结果, 即不能获得更高的平均适应度值, 则放弃这几代, 从这几代前重新进化, 为了加快进化速度, 采用最佳个体保存方法, 这样父代中具有最高适应值的个体得到保留, 防止在进化过程中被交叉变异损坏。在进化初期, 平均适应度值较小, 采用最小个体保存方法能提升进化速度, 但在进化后期, 适应度值接近最大适应度值, 最佳个体保存一定程度上破坏了群体的多样性, 使走向局部最优解的可能性增加。此时, 经过多代进化, 平均适应度值也无法提升。为了提高算法跳出局部最优值的能力, 配合采用不同于文献[9]的调整变异率方法, 在平均适应度值无法提高时, 其变异率  $p_m$  的大小直接与连续恶化的代数有关, 每次恶化, 变异率  $p_m$  都小幅提高  $\Delta p_m$ , 直接增强算法搜索其它空间的能力, 如达到最大恶化代数,  $p_m$  恢复原值, 重新进化这几代。如平均适应度值提高,  $p_m$  亦恢复原值。

强制进化能提高遗传算法的效率, 在进化过程中, 连续进化几代无法得到更好结果的父代种群被舍弃, 避免了这些父代继续进化占用更多的计算时间, 始终保持各代结果的有效性, 总体上降低了最优群体的生成代数。

采用二进制编程, 主要步骤如下:

(1) 初始种群的产生, 随机产生二进制数列, 其长度即为染色体长度, 它由变量的分辨率和变量的数目决定, 将染色体转化换热网络超结构中结构参数, 根据已知的温度, 各流股的热容流率以及公用工

程参数, 计算综合费用, 排除不可行解, 重复上述步骤, 达到种群数目为止。

(2) 将父代每个个体的综合费用转化为适应度值 ( $M-E$ ,  $M$  为足够大的数值), 按照适应度从小到大进行排列, 统计平均适应度记录最优的个体直接放入子代, 通过对父代采取选择、交叉、变异操作产生子代。

(3) 子代排序, 记录最优个体, 计算平均适应度, 如果子代的平均适应度优于父代, 继续进化,  $l=0$  ( $l$  为进化过程连续恶化的计数器); 否则  $l=l+1$ , 变异率适当提高, 如果  $l$  达到了最大隔代数  $l_{\max}$ , 则回到  $l_{\max}$  代前, 取  $l=0$ , 重新进化。这里体现的就是强制进化的原则, 使用这种进化方式, 平均适应度是稳步上升的, 遗传算法的效率得到提高。

(4) 达到演化代数, 则停止, 将染色体信息转化为换热网络的结构参数, 并输出。否则转第2步骤。上述过程的流程图见图3。

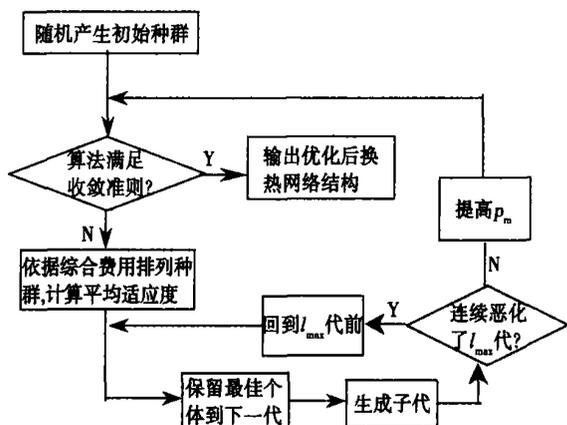


图3 隔代强制遗传算法流程图

表1 算例物流数据和费用数据<sup>[10]</sup>

流股	热容流率/ $W \cdot ^\circ C^{-1}$	入口温度/ $^\circ C$	目标温度/ $^\circ C$
C1	7 623.3	60.0	160.0
C2	6 082.8	115.6	221.7
C3	8 441.0	37.8	221.1
C4	17 283.0	82.2	176.7
C5	13 901.3	93.3	204.4
H1	8 794.5	160.0	93.3
H2	10 551.2	248.9	137.8
H3	14 771.7	226.7	65.6
H4	12 556.6	271.1	148.9
H5	17 226.1	198.9	65.6

蒸汽参数: 压力:  $3.103 \times 10^6$  Pa; 潜热:  $1.785 \times 10^3$  kJ/kg; 温度:  $235.6$   $^\circ C$ 。冷却水: 温度:  $37.8$   $^\circ C$ ; 最大出口温度:  $82.2$   $^\circ C$ 。最小温差: 换热器和冷却器:  $11.1$   $^\circ C$ ; 加热器:  $13.9$   $^\circ C$ 。传热系数: 换热器和冷却器:  $851.75$   $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ; 加热器:  $1 135.66$   $W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ ; 换热器价格计算参数:  $a=1456.3$ ,  $b=0.6$ , 折旧率:  $0.1$ ; 停产时数:  $260$  h/a。公用工程价格: 冷却水:  $1.102 \times 10^{-4}$   $\$/kg$ ; 蒸汽:  $2.205 \times 10^{-3}$   $\$/kg$ 。

## 4 实例计算

采用的算例见表 1, 取自文献[10], 这个换热网络由 5 股热流体、5 股冷流体及一组公用工程组成, 物流和价格参数如表 1 所示。

文中种群大小取 60, 交叉率  $p_c$  取 0.6, 初始变异率  $p_m$  取 0.06,  $\Delta p_m$  取 0.02, 最大允许恶化代数  $l_{\max}$  取 3, 即如果 3 代持续恶化, 则自动进行干预, 放弃这 3 代, 从 3 代前重新开始进化, 强制种群向着进化方向发展, 即强制进化。采用无分流及有分流超结构, 通过隔代强制遗传算法的计算, 得到的优化结果分别见图 4 和图 5。

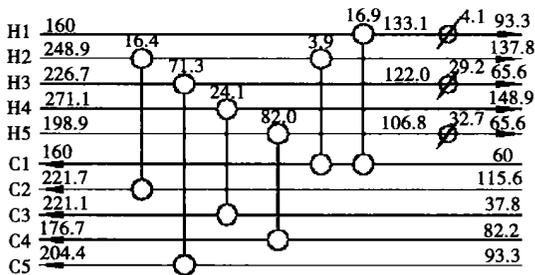


图 4 无分流换热网络优化结果

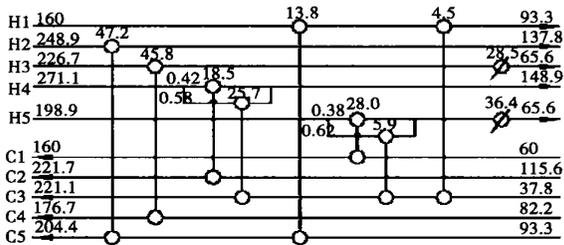


图 5 有分流换热网络优化结果

图 4 中, 换热器上方的数字表示该台换热器的面积, 线上数字表示温度。得到的最优结果为 43 614.6  $\$/a$ , 优于文献[10]的 44 213.88  $\$/a$ , 而且本文中的结果由于流股匹配合理, 计算结果比文献中的少使用一个冷却器, 减少了换热设备的总台数, 系统的结构得到了进一步的简化。

采用有分流结构的换热网络, 本文的计算结果为 44 170.2  $\$/a$ , 也优于文献[10]无分流结果, 但比本文无分流结果差。有分流情况下的网络结构可能性大于无分流情况, 理想情况下, 有分流情况最优解理应优于无分流情况。但由于分流比例的加入, 使换热网络优化问题的变量增加了将近一倍, 搜索空

间急剧增大, 并且换热网络优化问题的非凸、非线性、多峰特性愈加明显, 在演化代数内无法得到更优的解。可行的方法是提高代数, 但这是以计算时间大幅上涨为代价的, 或者使用混合优化算法, 以此来提高换热网络全局搜索能力。

## 5 结 论

在建立了有分流和无分流换热网络模型的基础上, 通过隔代强制进化遗传算法进行换热网络综合, 得到了如下的结论:

(1) 取年综合费用最小为目标, 本文提出的换热网络隔代强制优化算法, 能同时对无分流和有分流的换热网络进行有效的综合。

(2) 如遗传算法在搜索过程中经过若干代再生仍然找不到更优解, 这说明在以前各代中仅以适应度小为依据所选择的父代染色体并不能产生更优子代, 此时采用强制进化, 最佳个体保存, 变异率调整策略能有效提高搜索质量和效率。

总之, 本文在对遗传算法在换热网络综合问题上的应用进行了研究, 为获得更为合理的换热网络结构提供一个新的方法。

## 参考文献:

- [1] 高维平, 杨 莹, 韩方立. 换热网络优化节能技术[M]. 北京: 中国石化出版社, 2004.
- [2] PETERSSON F. Synthesis of larger-scale heat exchanger networks using a sequential match reduction approach[J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2005, 29: 993-1007.
- [3] 王克峰, 尹洪超, 袁 一. 遗传算法最优同步综合换热网络[J]. 大连理工大学学报, 1997, 37(1): 54-28.
- [4] 李志红. 基于专家系统有分流大规模换热网络超结构模型研究[J]. 石油化工设备, 2000, 29(6): 9-12.
- [5] YEE T F, GROSSMANN E I. Simultaneous optimization models for heat integration-II: Heat exchanger network synthesis[J]. *Comp Chem Eng*, 1990, 14(10): 1165-1171.
- [6] 魏关锋, 姚平经, 罗 行, 等. 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.
- [7] KAJ MIKAEL BJORCK, ROGER NORDMAN. Solving large-scale retrofit heat exchanger network synthesis problems with mathematical optimization methods[J]. *Chemical Engineering and Processing*, 2005, 44: 869-876.
- [8] 王小平, 曹立明. 遗传算法[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [9] RAVAGNANI M A S S, SILVA A P, ARROYO P A, et al. Heat exchanger network synthesis and optimization using genetic algorithm[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2005, 25: 1003-1017.
- [10] SAMARJIT CHAKRABORTY, PALLAB GHOSH. Heat exchanger network synthesis: the possibility of randomization[J]. *Chemical Engineering Journal*, 1999, 72: 209-216.

for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 598 ~ 602

To study the change in configuration of oil droplets and their heat exchange with high-temperature wall surfaces when film boiling occurs as a result of spray-mist oil beam impinging on the high-temperature wall surfaces, the authors have improved an impingement model featuring oil droplet impingement on hot wall surfaces. The wall-impingement heat exchange model has been derived from an empirical model of relevant experiments. After Kiva-3V program has been combined with this wall-impingement and heat exchange model, a numerical calculation was conducted of the spray-mist oil beam perpendicularly impinging on the high-temperature wall surfaces. The calculation results show that the above model could successfully simulate the impingement process between the oil mist and the high-temperature wall surfaces. To verify the rationality of a numerical model, a corresponding numerical calculation was performed under the experimental conditions given in relevant literature. The calculation results are in good agreement with the experimental ones. **Key words:** spray mist oil beam, film boiling, fracture, impingement model, heat exchange model

用渐近分析法研究蜂窝蓄热体温度分布 = A Study of Temperature Distribution in a Honeycomb Heat Accumulator by Using an Asymptotic Analysis Method [刊, 汉] / AI Yuan-fang, MEI Chi, HUANG Guo-dong, et al (College of Energy Science and Engineering under the Central South University, Changsha, China, Post Code: 410083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 603 ~ 607

A new perturbation-analysis method is proposed to find a solution to a non-steady heat transfer problem concerning a counter-flow type of honeycomb heat-accumulation based heat exchanger. A gas-solid two-phase heat transfer model has been established based on a thin-wall assumption. A non-dimensional heat-transfer partial differential equation taking into account axial solid heat-conduction along channels has been derived. As the coefficient of the heat conduction term of the heat transfer equation is a small parameter, the perturbation method is adopted to find a solution. After a Laplace transformation, a first-order asymptotic solution to the gas-solid temperature distribution during the weak heat conduction of the heat exchanger was attained by using a multi-dimensional method. The perturbation analysis of the temperature distribution in the heat accumulator coincides with the results of experiments and finite difference calculations. The foregoing has demonstrated that by using the perturbation semi-analytic method it is feasible to enhance the efficiency, cost-effectiveness and accuracy of the heat transfer research for a heat-accumulation type heat exchanger. **Key words:** honeycomb heat accumulator, temperature distribution, asymptotic analytic method

隔代强制进化遗传算法在换热网络优化中应用 = The Application of Atavistic Forced-evolution Genetic Algorithms in the Optimization of Heat Exchange Networks [刊, 汉] / ZHANG Qin, CUI Guo-min, ZHANG Lei-lei, et al (Thermodynamic Engineering Research Institute under the Shanghai University of Science and Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 608 ~ 611

Based on graded superstructures, the authors have studied the synthetic optimization of heat exchange networks. Through an improvement of the genetic algorithm, presented is an atavistic forced-evolution genetic algorithm for a heat exchange network. By using this method, a specific heat-exchange network is subject to a synthetic optimization. The results of the optimization show that the forced-evolution genetic algorithm can avoid a localized minimum point phenomenon caused by a premature convergence, making it possible to effectively enhance the searching quality and efficiency. The use of a forced-evolution genetic algorithm to synthesize the heat exchange network can result in a network structure possessing a good comprehensive performance. **Key words:** heat exchange network, forced evolution, genetic algorithm

常温空气无焰燃烧中 CO 生成的研究 = An Investigation of CO Generation during Flameless Combustion of Normal-temperature Air [刊, 汉] / XING Xian-jun, LIN Qi-zhao (Thermal Sciences and Energy Engineering Department, Chinese National University of Sciences and Technology, Hefei, China, Post Code: 230026) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2006, 21(6). — 612 ~ 617

Investigated is the law governing CO generation during the flameless combustion of normal-temperature air. The above-