

解换热网络同步综合问题的列队竞争算法

鄢烈祥¹⁾ 麻德贤²⁾

(1) 湖北工学院化工系, 武汉 430068; 2) 北京化工大学计算机系, 北京 100029)

摘要: 给出了换热网络同步综合问题的数学模型和拓扑结构的描述, 并确定了产生相邻换热网络的策略。在此基础上, 提出了列队竞争算法解网络综合问题的计算方法。对实例问题的求解得到了优于文献报道的结果。

关键词: 列队竞争算法; 换热网络; 同步综合

中图分类号: TQ 021.8; TP 301.6

近 30 年来, 对换热网络综合问题已提出了许多解决方法, 概括起来可分为基于热力学原理和启发式规则的综合方法以及基于数学规划的综合方法两大类。评价综合方法好坏的一个重要准则是能否协调公用工程、换热面积和设备单元数三者关系, 以使总费用最低。夹点技术和伪夹点技术^[1~3]首先通过给定的 HRA T (heat recovery approach temperature) 或 EMAT (exchanger minimum approach temperature) 确定最小能耗的网络, 然后, 利用能量松弛减少单元数, 降低总费用。该方法的局限性在于不能同时协调公用工程消耗、单元数和换热面积三者的关系, 使总费用最少。通过分步协调的方式所得到的网络完全有可能偏离最低费用的网络。在夹点技术和伪夹点技术上发展起来的分步数学规划法^[4,5]与夹点技术和伪夹点技术一样不能同步考虑换热网络单元数、换热面积和公用工程消耗, 而是将整体问题人为地分解为相对独立的几个子问题, 不能从整体上协调三者的关系, 因而往往得到的是局部最优解。

近年来, 模拟退火法^[6,7]和遗传算法^[8,9]被用于换热网络的同步优化, 取得了较好的结果。列队竞争算法^[10]是作者提出的一种全局优化搜索算法, 本文将此算法用于换热网络同步综合问题求解。

1 换热网络模型

1.1 换热网络拓扑结构描述

换热网络的拓扑结构可用整数子集 $X = \{1,$

$2, \dots, Z\}$ 的排列表示

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_z\}$$

其中 Z 是换热网络中 N_H 个热流股和 N_C 个冷流股最多的匹配数, 在只允许不同流股匹配一次的前提下, $Z = N_H \times N_C$; X 的元素 x_m 表示在第 m 个位置的换热器编号, 换热器编号 (x_z) 为

$$x_z = m + N_H(n - 1) \quad (1)$$

式中, $m = 1, 2, \dots, N_H$; $n = 1, 2, \dots, N_C$ 。

如用 $Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_z\}$ 中的元素表示 X 中相应位置换热器的换热量, 则可用 X, Q 两个集合完全描述所有可能的冷热流股匹配情况。

1.2 换热网络数学模型

1.2.1 目标函数 为使换热网络的能量消耗、换热器数目及换热面积等目标达到同步优化, 取换热网络的年度费用最小为目标函数。其中包括公用工程费用、换热单元设备固定费用及换热面积费用。

$$\begin{aligned} & c_{CU} \times Q_{CUi} + c_{HU} \times Q_{HUj} + \\ & C_F \times z_{ijk} + C_F \times z_{CUi} + C_F \times \\ & z_{HUj} + c_{ij} \times A_{ijk}^B + c_{CUi} \times A_{CUi}^B + \\ & c_{HUj} \times A_{HUj}^B \end{aligned} \quad (2)$$

式中, $A_{ijk} = Q_{ijk} / (U_{ij} t_{ijk})$; $A_{CUi} = Q_{CUi} / (U_{CUi} t_{CUi})$; $A_{HUj} = Q_{HUj} / (U_{HUj} t_{HUj})$

1.2.2 约束方程 每个流股的热平衡

$$Q_{ijk} + Q_{CUi} = F_i (T_{Hi} - T_{Ho_i}) \quad (3)$$

式中, $i = N_H$

$$Q_{ijk} + Q_{CHj} = F_j (T_{Co_j} - T_{Ci_j}) \quad (4)$$

式中, $j = N_C$

每个换热器的热平衡

$$Q_{ijk} = F_i t_{ijk}^H = F_j t_{ijk}^C \quad i = N_H, j = N_C \quad (5)$$

温差约束

$$t_{ijk}^H - t_{min}, t_{ijk}^C - t_{min} \quad (6)$$

温度约束

$$t_i^{HI} - T_{HIi}, t_i^{HO} - T_{HOi}, t_j^{CO} - T_{COj}, t_j^{CI} - T_{CIj} \quad i = N_H, j = N_C \quad (7)$$

0~1 变量约束

$$z_{ijk}, z_{CUi}, z_{HUj} = \{0, 1\} \quad (8)$$

2 相邻换热网络的产生

基于对换热网络的结构描述提出了产生相邻换热网络的策略。

2.1 拓扑结构变异

互换两相邻换热器的位置, 同时, 两换热器的换热量也一同迁移, 如图 1 所示。

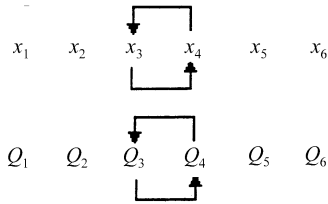


图 1 换热网络拓扑结构变异

Fig. 1 Configuration mutation of heat exchanger network

2.2 换热量变异

(1) 随机选取一个换热器, 增加或减少当前换热量的 5%~20%, 增加或减少的概率各为 50%。

(2) 随机选取一个流股上的两个换热器, 将其中一个换热器的换热量的一部分迁移到另一个换热器上, 迁移的热量不大于两个换热器中较小换热量的 30%。这一操作不改变当前换热网络的公用工程用量, 但改变网络的温度, 引起换热网络的其他费用改变。

上述一次变异操作既包括网络结构的变异又包括换热量的变异, 其中换热量的变异以方式(1)为主, 按照一定的概率(概率取 0.5)实施方式(2)的变异。

3 列队竞争算法

列队竞争算法是模拟生物进化过程所提出的一

种进化算法, 它与遗传算法、进化策略和进化规划等进化算法的主要区别在于: 列队竞争算法在模拟进化过程中, 始终保持着独立并行进化的家族, 并通过家族内部的生存竞争和家族间的地位竞争这两种竞争方式, 使群体快速进化到最优或接近最优的区域; 列队竞争算法根据家族的目标函数值大小排成一个列队, 并赋予各个家族相应的竞争推动力, 使家族在列队中的位置产生动态变化, 使得局部搜索与全局搜索达到均衡和统一, 以此提高搜索效率。竞争推动力是家族变异的动力, 是改变自身状况具有赶上或超过它前面家族的一种潜在力量。对于不同的优化问题, 具有不同的表达形式, 对于解组合优化问题, 竞争推动力的大小可用家族的变异次数或家族在搜索空间中的迁移步长来表示。上述的家族代表解空间中的点, 就换热网络综合问题来说, 家族代表的是换热网络。

解换热网络综合问题的列队竞争算法可作如下描述: (1) 生成 l 个初始换热网络 $\{X_i, Q_i\} (i = 1, 2, \dots, l)$, 其中 X_i 中的元素随机排列, Q_i 中的元素在可行域中随机选取, 计算这 l 个换热网络的目标函数值; (2) 根据目标函数值从小到大将 l 个网络排成一个列队, 并按各个网络在列队中所处的地位决定其变异次数, 首位网络变异一次, 第二位网络变异两次, 以此类推, 第 l 位网络变异 l 次; (3) 对每个换热网络变异后检验是否满足约束条件, 如满足约束条件, 则变异有效, 否则, 根据约束条件修改相应换热器的换热量, 使其等于边界值, 并计算网络的目标函数值; (4) 比较各个网络变异前后的优劣, 将目标函数小的换热网络保留下来, 参加下次列队地位的竞争; (5) 如达到给定的演化代数, 则停止, 否则, 转到第(2)步。

上述第(2)步是整个算法的核心, 其作用是均衡局部的精细搜索与全局的粗略搜索。这是因为列队中处于第一位的网络只进行一次变异, 所迁移的搜索空间较小, 有利于加速局部搜索, 快速找到最优; 处于列队中越靠后的网络, 变异次数逐次增加, 所迁移的搜索空间逐次增加, 起到了全局搜索的作用。

初始换热网络的数目 l 的选取对算法的搜索效率有较大的影响。 l 过小, 此时处于列队后面的换热网络变异次数也小, 因此所迁移的空间也小, 起不到全局搜索的作用; l 过大, 此时处于列队后面的换热网络变异次数也大, 有可能使处于列队后面

的换热网络完全发生改变,变成了随机搜索。根据经验, l 一般在 5~10 之间是较合适的。

4 实例计算

在换热网络综合问题数据^[5,9]中,取初始换热网络 5 个,网络演化到 120 代停止,在 586 计算机上(150 MHz)的运行时间是 23.5 s,计算结果见图 2 和表 1,与文献[9]用遗传算法计算得到的最优换热

表 1 计算结果

Table 1 Calculation results

换热器	Q/kW	A/m^2
1	644.5	17.59
2	1 641.6	88.51
3	526.6	17.95
4	235.4	4.41
5	1 542.3	25.35
6	1 556.8	77.36
7	353.5	8.32
8	821.2	30.67
9	716.5	34.23

$A_{\text{TOTAL}} = 304.15 \text{ m}^2$	$C_A = 82\,271 \text{ \$/a}$
$C_E = 37\,824 \text{ \$/a}$	$C_{\text{TOTAL}} = 197\,490 \text{ \$/a}$
$C_F = 77\,400 \text{ \$/a}$	

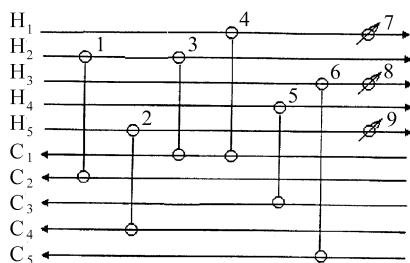


图 2 列队竞争算法求得的最优换热网络(197 490 $\text{\$/a}$)

Fig. 2 Optimal heat exchanger obtained using line-up competition algorithm(197 490 $\text{\$/a}$)

网络计算结果进行对比,列队竞争算法计算的结果比文献[5,9]计算的结果均少一个换热器,总费用 197 490 $\text{\$/a}$ 比文献[5]计算的 207 070 $\text{\$/a}$ 减少了 9 580 $\text{\$/a}$,比文献[9]用遗传算法计算的总费用 206 420 $\text{\$/a}$ (文献报道的结果为 197 728 $\text{\$/a}$,经核算三个冷却器面积比实际几乎减少了一倍,致使计算的总费用比实际少)减少了 8 930 $\text{\$/a}$ 。从计算

还发现,对应于总费用 206 420 $\text{\$/a}$ 的解是一个局部最优解,有多种匹配形式的总费用与此相等或接近。

5 结 论

给出了换热网络同步综合问题的数学模型和拓扑结构的描述,并确定了产生相邻换热网络的策略。在此基础上,提出了列队竞争算法解网络综合问题的计算方法。对文献报道的一个换热网络同步综合问题进行了求解,得到了比用遗传算法计算的总费用更少的网络。

符 号 说 明

- A —— 换热面积, m^2
 B —— 换热面积费用指数
 c —— 面积费用系数
 $c_{\text{CU}}, c_{\text{HU}}$ —— 冷、热公用工程的单位费用系数, $\text{\$/ (kW a)}$
 C_F, C_E —— 换热器的固定费用、能耗费用, $\text{\$/a}$
 F —— 热容流率, kW/
 N_H, N_C —— 为热流股与冷流股的集合和数目
 Q_{ijk} —— 在 k 级中热、冷流股 i, j 的匹配换热量, kW
 $Q_{\text{CU}i}$ —— 热流股 i 与冷公用工程的换热量, kW
 $Q_{\text{HU}j}$ —— 冷流股 j 与热公用工程的换热量, kW
 $T_{\text{HI}}, T_{\text{HO}}$ —— 热物流的初始温度与目标温度, K
 $T_{\text{CI}}, T_{\text{CO}}$ —— 冷物流的初始温度与目标温度, K
 U —— 总传热系数, $\text{kW/(m}^2 \cdot \text{)}$
 z_{ijk} —— k 级中热、冷流股 i, j 是否存在匹配换热的 0~1 变量
 $z_{\text{CU}i}$ —— 冷公用工程与热流股 i 是否存在匹配换热的 0~1 变量
 $z_{\text{HU}j}$ —— 热公用工程与冷流股 j 是否存在匹配换热的 0~1 变量
 t_{ijk} —— k 级中热、冷流股 i, j 的传热温度差,
 $t_{\text{CU}i}$ —— 热流股 i 与冷公用工程的传热温度差,
 $t_{\text{HU}j}$ —— 冷流股 j 与热公用工程的传热温度差,
 t_{ijk}^H —— 热物流 i 在 k 级中与冷物流 j 换热的温降,
 t_{ijk}^C —— 冷物流 j 在 k 级中与热物流 i 换热的温升,
 t_{\min} —— 最小传热温差,
 H, C —— 热流股、冷流股
 k —— 级数

参 考 文 献

- [1] Linnhoff B, Anmad S. Cost optimum heat exchanger network: 1 minimum energy and capital using simple

- models for capital cost. *Comput Chem Engng*, 1990, 14: 729 ~ 750
- [2] Anmad S, Linnhoff B, Smith R. Cost optimum heat exchanger network: 2 target and design for detailed capital cost. *Comput Chem Engng*, 1990, 14: 751 ~ 767
- [3] Challand T B, Colbert R W, Venkatesh C R. Computerized heat exchanger network. *Chem Engng Prog*, 1981, 77: 65 ~ 71
- [4] Floudas C A, Ciric A R, Grossmann I E. Automatic synthesis of heat exchanger network. *AIChE J*, 1986, 32: 276 ~ 290
- [5] Papoulias S A, Grossmann I E. A structural optimization approach in process synthesis (): Heat recovery network. *Computers Chem Engng*, 1983, 7: 707 ~ 721
- [6] Dolan W B, Cumings P T, Levan M D. Algorithm efficiency of simulated annealing for heat exchanger network design. *Comput Chem Engng*, 1990, 14: 1039 ~ 1050
- [7] Dolan W B, Cumings P T, Levan M D. Process optimization via simulated annealing: application to network design. *AIChE J*, 1989, 35: 725 ~ 736
- [8] Androulakis I P, Venkatasubramanian V A. Genetic algorithm framework for process design and optimization. *Computers Chem Engng*, 1991, 15: 217 ~ 228
- [9] 王克峰, 尹洪超, 袁一, 等. 遗传算法最优同步综合换热网络. *大连理工大学学报*, 1997, 37(1): 54 ~ 58
- [10] 鄢烈祥. 过程系统全局优化搜索新算法——列队竞争算法. [学位论文]. 北京: 北京化工大学, 1998

Simultaneous synthesis of heat exchanger networks using line-up competition algorithm

YAN Lie-xiang¹⁾ MA De-xian²⁾

(1) Department of Chemical Engineering, Hubei Polytechnic University, Wuhan 430068, China;

2) Department of Computer, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract : The mathematical model and the description of topologic structure for heat exchanger network are given in this paper. The neighbor heat exchanger networks are defined. The computational method of solving heat exchanger network by using line-up competition algorithm is proposed. The results obtained in solving a typical example are superior to those reported in literature.

Key words : line-up competition algorithm; heat exchanger network; simultaneous synthesis

科 研 动 态

1999 年北京化工大学又一批科研成果获奖或通过鉴定,另有 5 项课题取得专利权。通过鉴定的科研成果涉及三院一所(化学工程学院、材料科学与工程学院、机械工程学院、应用化学系和塑机所),共 19 个项目。获奖科研成果共 10 项,其中:超高分子量聚乙烯原位反应增韧聚丙烯超韧合金的开发(金日光等)获国家科技进步三等奖;发酵法生产透明质酸(谭天伟等)获部级科技进步一等奖;微悬浮法 PVC 专用糊树脂及工艺(王国全等)、FYD 驱动机构特种线圈骨架(顾有伟等)及光成像抗蚀抗电镀油墨及阻焊油墨(任孝修等)获部级科技进步二等奖;激光印字胶印版(张育川等)及非金属材料腐蚀数据库(王光耀等)获部级技术发明及科技进步三等奖;一步法交联管机组(吴大鸣等)及多目标最优化的数学理论与方法(杨丰梅等)获省级科技进步二等奖;北京化工大学学报(自然科学版)获教委优秀科技期刊二等奖。5 项专利:一种四段式反应挤出螺杆(吴大鸣);一种锥形双螺杆(董力群);超高分子量聚合物挤出成型机(林炳鉴);用碳纤维做加热元件的电热毯(杨小平);复合板网(叶永恒)。

(科研处:霍京华)