

热负荷和超结构级数对多流股换热器网络综合的影响

罗立¹ 姚平经¹ 罗行² ROETZEL Wilfried²

(1.大连理工大学化工学院,辽宁大连 116012;2.汉堡国防大学热力学研究所,德国汉堡 D-22039)

摘要:多流股换热器网络是一种复杂的换热器网络。在优化的双流股换热器网络的基础上进行多流股换热器网络的综合。在考虑工程应用中换热器热负荷受限制的条件下,通过对换热器网络超结构模型中级数进行合理的取值,来减少遗传模拟退火算法程序的计算量和提高计算效率;同时确定了级数的设定方法。最后将级数的设定方法应用于两个例题,效果良好。

关键词:超结构;级数;热负荷;多流股换热器;换热器网络;遗传模拟退火算法

中图分类号:TQ021.8;TQ018

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2004)S2-0116-05

Influence of heat exchanger's heat load and the number of superstructure stages on synthesis of multi-stream heat exchanger networks

LUO Li¹, YAO Ping-jing¹, LUO Xing², ROETZEL Wilfried²

(1. School of Chemical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116012, China;

2. Institute of Thermodynamics, University of the Federal Armed Forces Hamburg, D-22039 Hamburg, Germany)

Abstract: The multi-stream heat exchanger network is one kind of complicated heat exchanger network. The multi-stream heat exchanger networks was synthesized on the basis of optimized two-stream heat exchanger networks. Considering the limit of heat exchanger's heat load in application, the original way to get the number of superstructure stages in literature can't be fit for the need. So a new way to establish the number of superstructure stage was proposed, which improved the calculating efficiency of the genetic and simulated annealing algorithm. Then two examples prove the need to limit the heat exchanger load for heat exchanger networks and the availability of the new way to establish the number of superstructure stages.

Key words: superstructure; the number of stages; heat load; multi-stream heat exchanger; heat exchanger networks; genetic and simulated annealing algorithm

换热器网络是过程系统中的重要组成部分,它主要用于回收过程中的能量,以提高能源利用率。半个世纪以来,已经发展了很多成熟的技术,如数学规划、夹点分析、基于人工智能的综合方法等,其中夹点分析方法已经很好地应用于工程实际。在对综合方法的研究中,有一些比较著名的换热网络综合优化实例,如 10 spl^[1]、8 spl^[2]、4 spl^[3]问题等。但文献中诸如此类的问题多是理论性的结果,尽管有时优化结果很好,但可能得到了一个换热面积很大的换热器,这在实际应用中是不现实的。考虑工程应用中实际换热器热负荷的大小,将其作为综合多流股换热器网络的一个约束条件,笔者根据多流股换热器网络分级形式的超结构模型,应用遗传模拟退火算法,在优化的双流股换热器网络的基础上进行多流股换热器网络的综合。

1 换热器网络综合的数学模型

多流股换热器网络综合问题实质上是有分流的换热器网络综合问题,它可以抽象为一个非线性、非凸、不连续、有多个局部极值的混合整数非线性规划(MINLP)问题。

(1)多流股换热器网络综合问题的表述。多流股换热器网络综合问题的表述为:有 N_H 个热物流(记为集合 $NH = \{i | i = 0, 1, \Lambda, N_H - 1\}$)需要冷却, N_C 个冷物流(记为集合 $NC = \{j | j = 0, 1, \Lambda, N_C - 1\}$)需要加热。它们的初始温度(T_{in})、目标温度(T_{out})、热容流率 F 及传热膜系数 h 给定。本文采用 Yee 等^[1]构造的一个以分流为特征的超结构模拟换热网络中所有热冷流股可能的匹配,最大允许的级数按经验取最大的热流股或者冷流股数目,即: $Nk = \max\{N_H, N_C\}$ 。每一级中,最大可能的换热器数是 $N_H * N_C$ 。二级超结构模型见图 1。

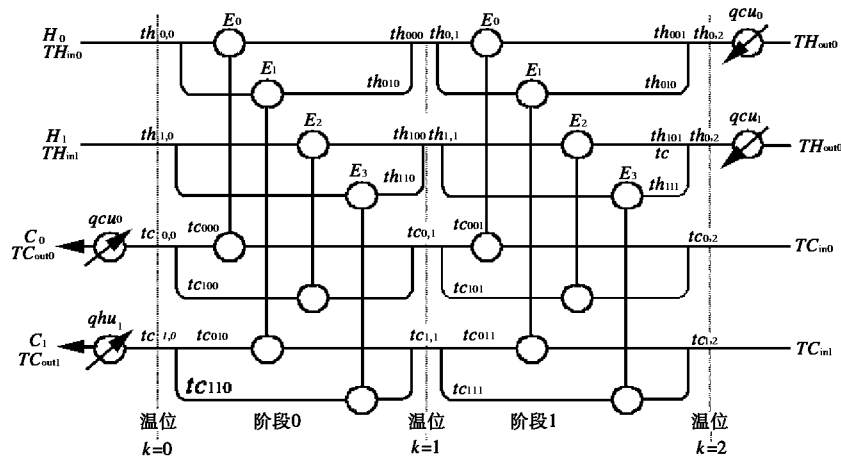


图 1 二级超结构网络模型图

(2) 双流股换热器热负荷的确定^[4]。初始解产生时每个换热器的热负荷是随机确定的。在遗传模拟退火算法程序中,随机给定每条流股的分支流量,如果某一条热流股与某一条冷流股的分支能够进行匹配,那么承担这 2 条流股热量交换的换热器热负荷 q_{max} 由以下公式进行确定。如图 2 所示,假如在初始网络某一级 K 中,存在以下匹配。

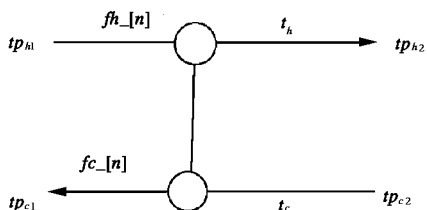


图 2 一个匹配热负荷的确定

那么一定有, $fh_{[n]} > 0, fc_{[n]} > 0$; n 表示某一级 K 中第 n 个换热器, $fh_{[n]}$ 为通过某一级 K 中第 n 个换热器热流股或其分支流股的热容流率, $fc_{[n]}$ 为通过某一级 K 中第 n 个换热器冷流股或其分支流股的热容流率。

这样一个匹配的存在必须满足: $tp_{h1} > tp_{c1}, t_h > t_c$, 并且如果 $fh_{[n]} \geq fc_{[n]}$, 则 $q_{max} = \min\{fh_{[n]} * (tp_{h1} - tp_{h2}), fc_{[n]} * (tp_{c1} - tp_{c2})\}$; 如果 $fh_{[n]} < fc_{[n]}$, 则

$$q_{max} = \min\{fh_{[n]} * (tp_{h1} - tp_{h2}), fc_{[n]} * (tp_{c1} - tp_{c2}), (tp_{h1} - tp_{c1}) / (1/fh_{[n]} - 1/fc_{[n]})\}.$$

(3) 多流股换热器网络综合的目标函数。为了进行换热网络的同步优化和费用权衡,取网络的年度总费用为目标函数,包括公用工程费用、换热器固定费用及面积费用。同步综合的目标函数为:

$$\min \sum_i C_{cu} \cdot q_{cui} + \sum_j C_{hu} \cdot q_{huj} + \sum_i \sum_j \sum_k C_{ij} \cdot y_{ijk} +$$

$$\sum_i C_{cui} \cdot y_{cui} + \sum_j C_{huj} \cdot y_{huj} + \sum_i \sum_j \sum_k C_{ij} \cdot A_{ijk}^{Bij} \cdot y_{ijk} + \sum_i C_{cui} \cdot A_{cui}^{Bcui} \cdot y_{cui} + \sum_j C_{huj} \cdot A_{huj}^{Bhuj} \cdot y_{huj}$$

2 超结构级数的确定

Grossmann 和 Sargent^[2]建立了基于绝对枚举算法的超结构模型,描述了在每一级中任意可能发生传热的冷热流股之间潜在的换热器,但没有对级数进行明确的定义和叙述。Yee 等^[1]在 Grossmann 和 Sargent 的基础上,建立了更明确的超结构模型,并对分级的数目进行了探讨,认为分级的数目不必等于组合曲线焓间隔的数目。Sorak 等^[5]认为级数是直观决定的,级数应该取平衡组合曲线焓间隔的数目。笔者考虑如下影响因素,建立了超结构级数的确定方法。

2.1 超结构级数的影响因素

2.1.1 热负荷的限制

考虑工程实际的特殊性,将单个双流股换热器的热负荷也作为超结构模型中的一个约束条件。这时,热负荷成为影响级数选取的决定性因素。将程序进行改进,例如将换热器的最大热负荷设置为: Q_{max} 则任意双流股换热器的热负荷 q_{max} 应作如下修改:

如果, $fh_{[n]} \geq fc_{[n]}$, 则 $q_{max} = \min\{fh_{[n]} * (tp_{h1} - tp_{h2}), fc_{[n]} * (tp_{c1} - tp_{c2}), Q_{max}\}$;

如果 $fh_{[n]} < fc_{[n]}$, 则 $q_{max} = \min\{fh_{[n]} * (tp_{h1} - tp_{h2}), fc_{[n]} * (tp_{c1} - tp_{c2}), (tp_{h1} - tp_{c1}) / (1/fh_{[n]} - 1/fc_{[n]}), Q_{max}\}$ 。

热负荷的限制使得换热器网络的级数也需要进行修改。因为设定了单个换热器热负荷上限,相当

于削减了原有超结构模型中某一级内超过换热器热负荷上限的那一部分热负荷,它可能在后面的级数中再进一步匹配,从而使公用工程费用降低。当换热网络规模较大时,有可能原有的级数不再符合要求,适当将网络超结构中的级数扩大,使网络中匹配数进一步增加。

另外,对单个换热器热负荷上限 Q_{\max} 的确定,一般参考传热膜系数 h 的值。如果 h 越大,则 Q_{\max} 取值越大,反之越小。

2.1.2 冷热流股数目

由图 1 可知,每一级中可能产生的最大匹配数为 $N_H * N_C$ 。因此 N_H 、 N_C 决定了每一级的匹配复杂程度,在遗传模拟退火算法程序中,称为维数。毫无疑问,维数越大,某一级可能产生的匹配越多,模型显得更复杂。

2.2 换热网络超结构级数的设定方法

按 Hohmann^[6]提出的 $(N-1)$ 定理,在超结构每一级,能近似求出该级中可能最少的换热设备数目是 $(N_H + N_C - 1)$;但是因为超结构有多个级,所以某一级可能没有匹配存在。故每一级最少的换热器个数应该是介于 0 到 $(N_H + N_C - 1)$ 之间的一个值,如果按概率计算,每一级平均最少可能有 $(N_H + N_C - 1)/2$ 个换热器。

按超结构模型本身的规定,每一级最多的换热器数目为 $N_H * N_C$ 。同样因为超结构有多个级,所以并不是每一级中都会存在 $N_H * N_C$ 个换热器,而是介于 0 到 $N_H * N_C$ 之间的一个值。如果按概率计算,每一级平均最多可能有 $(N_H * N_C)/2$ 个换热器。

每一台换热器的热负荷也并不是 Q_{\max} ,而是在大于 Q_{\min} 而小于 Q_{\max} 之间的一个值 (Q_{\min} 是遗传模拟退火算法程序中控制换热网络中最小换热器的热负荷而设置的一个值, $Q_{\min} = 100 \text{ kW}$)。如果按概率计算,取最大和最小的平均值 $(Q_{\max} + Q_{\min})/2$ 。那么级数的设定应该在按如下公式求得的范围:先计算出换热网络所有热流股和所有冷流股需要交换的热量: Q_H, Q_C 。并取二者较小值,即最大可能换热量 $\min(Q_H, Q_C)$;然后除以换热器的平均热负荷约束 $(Q_{\max} + Q_{\min})/2$;便得到冷热流股中某一类流股完全换热大致所需的换热器数(公用工程所需换热设备除外)。再除以每一级中可能存在的最少或最多的换热器个数,便能得到整个换热网络需要的最大级数和最小级数了。

需要的最大级数为:

$$N_{\max} = \frac{\min\left\{\sum_{i=1}^{N_H} q_{hi}, \sum_{j=1}^{N_C} q_{cj}\right\}}{(Q_{\max} + Q_{\min})/2 * (N_H + H_C - 1)/2}$$

$$= \frac{\min\left\{\sum_{i=1}^{N_H} q_{hi}, \sum_{j=1}^{N_C} q_{cj}\right\}}{(Q_{\max} + Q_{\min}) * (N_H + H_C - 1) * 4}$$

需要的最小级数为:

$$N_{\min} = \frac{\min\left\{\sum_{i=1}^{N_H} q_{hi}, \sum_{j=1}^{N_C} q_{cj}\right\}}{(Q_{\max} + Q_{\min})/2 * (N_H * N_C)/2}$$

$$= \frac{\min\left\{\sum_{i=1}^{N_H} q_{hi}, \sum_{j=1}^{N_C} q_{cj}\right\}}{(Q_{\max} + Q_{\min}) * N_H * N_C} * 4$$

这里, $Q_H = \sum_{i=1}^{N_H} q_{hi}$, $Q_C = \sum_{j=1}^{N_C} q_{cj}$

在对换热器热负荷进行限制的前提下,超结构级数可取 N_{\max} 和 N_{\min} 二者的平均值,即 $N_k = (N_{\max} + N_{\min})/2$ 。

3 例题

此例来源于生产实际^[4]。某石化公司现运行中常减压装置原设计规模为 250 万 t/a,要进行改造要求原油预热终温的现场值能够达到 302℃,并使原油的加工能力达到 350 万 t/a。面积费用计算公式为: $C = 1000 \cdot A^{0.6}$,其中 C 为面积费用,美元/a; A 为换热面积, m^2 。流股、公用工程各数据见表 1。

表 1 流股和公用工程数据

流股	$T_{in}/$ ℃	$T_{out}/$ ℃	$F/$ $\text{kW} \cdot \text{℃}^{-1}$	$h/$ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{℃}^{-1}$	公用工程费用/ 美元 $\cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{a}^{-1}$
H ₁	248	50	47.67	0.9	
H ₂	350	70	8.97	0.6	
H ₃	268	70	44.79	0.75	
H ₄	320	70	10.68	0.6	
H ₅	375	95	73.17	0.45	
H ₆	375	95	71.94	0.45	
H ₇	115	40	33.85	1.2	
H ₈	292	70	72.29	0.9	
H ₉	193	60	26.26	0.9	
C ₁	55	248	304.73	0.6	
C ₂	243	360	323.79	0.6	
W	30	50		1.0	40
S	450	450		1.8	440

其中 H₁ ~ H₉ 分别为热流股 1 ~ 热流股 9, C₁、C₂ 分别为冷流股 1 和 2, W 为冷却水, S 为加热炉。

在不对换热器热负荷进行限制的情况下,级数按 Yee 等的取值: $N_k = 9$,用遗传模拟退火算法进行

一次运算。最优换热网络各项数据见表2,超结构匹配矩阵见表3,超结构中换热器面积和热负荷见表4。

表2 $N_k = 9$ 时最优网络费用统计

	总换热面积/ m^2	单元数	费用/美元· a^{-1}			
			固定投资	公用工程	年度总	
双流股换热网络	23278.5	20	0	1087067.1	7173668.6	8260735.7
多流股换热网络	23278.5	11	0	630196.7	7173668.6	7803865.3

表3 $N_k = 9$ 时最优解匹配矩阵结构图

	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
H_1					1					
H_2		1			1					
H_3					1					
H_4	1						1			
H_5		1			1					
H_6		1			1					
H_7										
H_8		1			1					
H_9							1			
级数	1		2		3		4		5~9	

由于没有限制换热器的热负荷,所以出现了大面积的换热器,如表4所示。在操作现场这些大面

表6 $N_k = 13, Q_{max} = 2000$ kW 时最优解匹配矩阵结构

	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2	C_1	C_2
H_1											1		1					
H_2		1			1								1					1
H_3							1						1					
H_4						1												
H_5		1	1	1	1	1		1		1		1		1		1		1
H_6		1		1	1			1		1		1		1		1		1
H_7																		
H_8							1	1	1	1		1		1		1		1
H_9													1					1
级数	1		2		3		4		5		6		7		8		9	10 11 12~13

由表6可知,因为限制了单个换热器的热负荷,超结构中匹配增加。与表3进行比较,从第5级到第11级都出现了大量的匹配。总的双流股换热器年度总费用在限制了单个换热器的热负荷后有所增加,这是因为面积费用增加了(见表2和表5)。值得一提的是,双流股换热器网络面积后者(表5)比前者(表2)要少,但面积费用比前者高,这是因为后者换热器数量多。

积的换热器将被许多定型的面积较小的换热器取代,这将增加固定投资费用和面积费用。参考各条流股 h 的值,本例取 $Q_{max} = 2000$ kW;通过本文提出的级数公式计算得 $N_k = 13$ 。优化得到的网络费用情况,及匹配矩阵情况分别如表5和表6所示。

表4 各换热器面积和热负荷

序号	换热面积/ m^2	热负荷/ kW	序号	换热面积/ m^2	热负荷/ kW
1	173.0	902.3	8	3216.2	8869.0
2	90.0	745.8	9	3048.3	11247.4
3	1710.3	9241.6	10	2967.0	11017.6
4	1742.4	9125.4	11	4848.9	13227.9
5	126.0	2820.1	12	80.3	1850.2
6	3311.3	8486.3	13	30.9	1196.6
7	676.8	1608.7			

表5 $N_k = 13, Q_{max} = 2000$ kW 时最优网络费用统计

	总换热面积/ m^2	单元数	费用/美元· a^{-1}			
			固定投资	公用工程	年度总	
双流股换热器网络	13379.2	56	0	1384299.2	8582686.4	9966985.6
多流股换热器网络	13379.2	25	0	918486.8	8582686.4	9501173.2

4 多流股换热器网络的构造^[7]

由于对换热器热负荷进行限制,网络中换热器的数量很多。如果将双流股换热器合并成多流股换热器,不仅减少了设备台数,节省了设备投资费用,而且一定程度上节省了空间,使得结构更加紧凑^[8]。一般来说,多流股换热器能够处理多个冷流股与多个热流股的换热。在综合过程中,将每一级同一冷

流股或者热流股所有的双流股换热器综合成 1 台多流股换热器。如表 3 所示,超结构第 4 级中,冷流股 C_1 分支与热流股 H_4 、 H_9 换热,可以将 C_1 、 H_4 和 H_9 组合,用 1 台三流股的多流股换热器取代原有的 2 台双流股换热器。将上例综合成多流股换热器网络,换热器数量从 56 减少到 25 台,年度总费用在双流股换热器网络的基础上降低了 4.67% (如表 5 所示)。在表 2 中,多流股换热器网络费用比双流股换热器网络费用减少了 5.53%,换热器数量减少了 9 台。因此使用多流股换热器的优势是明显的。

5 结论

对换热器热负荷进行限制,使超大面积的换热器没有出现在换热网络中,但由于原超结构模型的局限,使网络不能产生更多的匹配来弥补,导致公用工程费用消耗很大。本文提出的级数确定方法,适当增加了级数,给遗传模拟退火算法提供了一个更大的寻优空间,能在更多的级中产生更多的匹配。将双流股换热器网络合并成多流股换热器网络,使得换热网络结构更加紧凑,进一步降低总费用。

致谢: 本研究工作隶属于德国 Forschungsgemeinschaft (DFG) 多流股换热器网络优化设计、柔性分析和动态模拟项目,作者对他们的资助表示最诚挚的谢意。

符号说明

A —换热面积, m^2
 B —面积费用幂指数
 C —面积费用, 美元/ a
 C_f —换热器固定费用, 美元/ a

(上接第 115 页)

的反应器模型进行仿真模拟,结果表明,在增加釜外循环系统后,制约装置提高产量的限制因素是装置内的淤浆循环泵,因此可以通过更换这些泵类设备,进一步提高装置的生产负荷。

2.4 生产负荷对产品质量的影响

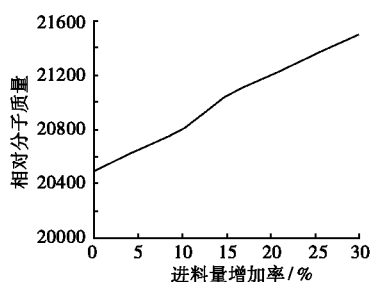


图 5 生产负荷对产品质量的影响

提高进料量后,物料在聚合釜内的停留时间缩

C —单位公用工程费用,美元/($kW \cdot a$)

F —流股热容流率, $kW/^\circ C$

f_h, f_c —热、冷流股的热容流率, $kW/^\circ C$

h —传热膜系数, $kW/(m^2 \cdot ^\circ C)$

Q, q —热负荷, kW

S —加热炉

tp_h, tp_c —热、冷过程流股温度, $^\circ C$

W —冷却水

y —0-1 变量,表示匹配的存在与否

下标说明:

C —冷流股

cu, hu —冷、热公用工程

H —热流股

i —热流股序号

j —冷流股序号

k —级序号

ijk —在第 k 级中热流股 i 与冷流股 j 的匹配

参考文献

- [1] Yee T F, Grossmann I E, Kravanja Z. [J]. Computers and Chemical Engineering, 1990, 14 (10): 1151 - 1164.
- [2] Grossmann I E, Sargent R W H. [J]. Computers and Chemical Engineering, 1978, 2(1): 1 - 7.
- [3] Zamora J M, Grossmann I E. [J]. Computers and Chemical Engineering, 1998, 22(3): 367 - 384.
- [4] 魏关锋. 用遗传/模拟退火算法进行具有多流股换热器的换热网络综合[D]. 大连: 大连理工大学, 2003.
- [5] Sorak A, Kravanja Z. [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28(1-2): 235 - 251.
- [6] Hohmann E C. Optimum networks for heat exchange[D]. Los Angeles: Univ of Southern California, 1971.
- [7] 罗立, 魏关锋, 姚平经. [J]. 计算机与应用化学, 2004, 21(3): 333 - 338.
- [8] Van Reisen Jos L B, Grievink J, Polley G T, et al. [J]. Computers and Chemical Engineering, 1995, 19(Suppl 1): 143 - 148. ■

短,从而影响聚合物产品的质量。图 5 是提高进料负荷的情况下产品的相对分子质量的变化情况。从图 5 可以看出,装置在提高原料的进料量 30% 的条件下,仍可以保证产品质量满足质量指标要求。

2.5 其他应用

使用聚合反应器的数学模型,可以通过模拟不同的操作条件对产品质量的影响,设计满足特殊要求的专用产品,另外,通过对工艺过程的模拟,也可以确定产品的切换方案,缩短装置产品切换时间。

参考文献

- [1] Mattos Neto A G, Pinto J C. [J]. Chem Eng Sci, 2001, 56(13): 4043 - 4057.
- [2] Kim J H, Kim I, Woo S I. [J]. Ind Eng Chem Res, 1991, 30(9): 2074 - 2079.
- [3] Khare N P, Seavy K C, Liu Y A, et al. [J]. Ind Eng Chem Res, 2002, 41(23): 5601 - 5618. ■