

换热器网络优化研究进展

(上海理工大学 动力学院, 上海 200093) 张俊华 应启夏 黄为民

摘要: 本文阐述了国内外换热器网络研究的最新进展, 详细比较了研究换热器网络的两种不同的方法, 还对换热器网络的动态特性研究做了简要介绍。作者认为: 把窄点理论和混合整数非线性优化应用在其它动力系统如: 制冷、空调、热泵、热电联产等, 并对这些系统的节能也有一定的帮助。最后指出了换热器网络研究的发展方向。

关键词: 换热器网络; 窄点理论; 混合整数非线性优化

中图分类号: TK17

文献标识码: A

1 前言

换热器作为能量传递设备被广泛地应用于化学、电力、制药等行业中, 其换热性能好坏直接关系到生产企业的能源利用效率。在生产实践中人们发现了这样一个问题: 虽然单个换热器的效率较高, 但将它并入一个大型的换热器网络之后, 其换热效率有时并不理想。针对这一现象, 1965 年 Hwa 在美国化学工程师协会上首次提出了换热器网络最优化的问题^[1]。

2 问题描述

2.1 单体换热器的数学描述

$$Q = f(t_1, t_2, t_3, t_4, m_1, m_2) \quad (1)$$

式中:

Q — 换热器的换热量(J/s)

$t_i (i = 1, 3)$ — 冷工质的进、出口温度($^{\circ}\text{C}$)

$t_i (i = 2, 4)$ — 热工质的进、出口温度($^{\circ}\text{C}$)

$m_i (i = 1, 2)$ — 冷、热工质的质量流量(kg/s)

图 1 清楚地反映了换热器的出口参数对入口参数的依赖关系。图中参数 $t_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 和 $m_i (i = 1, 2)$ 的含义与式 1 中相同, $G13$ 、 $G24$ 表示换热器出口参数与入口参数之间的传递函数。从图 1 所示可以看出: 冷、热股流之间存在着较强的耦合作用, 冷、热两种工质的出口温度与它们的入口温度及质量密切相关。因为换热器内流体具有湍流脉动特性, 该研究对象具有非线性、大时延的特点, 所以研究由单体换热器组成的大型系统具有一定的难度。

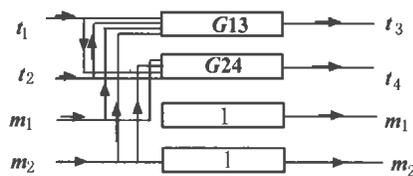


图 1 换热器输入参数—输出参数关系图

2.2 换热器网络优化的数学描述

$$\text{目标函数: } \min \Sigma X \quad (2)$$

$$\text{约束条件: } s. t. \leq 0$$

$$e. t. = 0$$

在式 2 中, X 表示换热器网络优化的目标函数 $s. t$ 和 $e. t$ 表示目标函数的不等式约束条件和等式约束条件。

3 换热器网络研究现状

目前, 换热器网络的研究主要集中在两个方面(a)换热系统的设计(b)换热系统的改造。世界上许多研究人员正在开展这方面的研究。其中以曼彻斯特理工大学 Linhoff^[2] 为代表的课题组提出的窄点理论和以卡耐基-梅隆大学的 Grossman 和普林斯顿大学的 Floudas^[3] 共同提出的 MINLP (混合整数非线性规划)模型对这项研究的贡献最大。下面对国内外在换热器网络方面的研究成果进行回顾。

3.1 窄点理论

1969 年 Masso 和 Rudd^[4] 开始探索求解换热器网络问题。设计方法主要采用启发式寻优法, 用一些规则限制换热器匹配的自由度, 然后优化换热器网络。虽然这种方法并不能给出最优解, 但它至少可以给出一个可行的解, 对于换热器的网络设计起到了一定的作用。1971 年南加州大学 Hohmann 在他的博士论文中

指出:如果给定了冷、热工艺物流数据,那么就可以确定最小公用工程的(水、电、汽等的供应)用量和最少的设备单元数^[2]。以热力学原理为基础,1978年 Umeda^[5]提出在有效能图上分区优化法,并在温-焓图实现换热器网络优化,说明了窄点的存在性(见图2)。1978年 Linnhoff 和 Flower^[2]首先将换热器网络分解为两个子问题来研究:(a)决定最大的能源回收或最小的公用工程(b)已知最大的能源回收,通过换热器的匹配,使换热器的个数最少。1983年 Linnhoff 和 Hindmarsh^[6]把这一概念表达为窄点理论。最大能源回收和窄点温度通过最小温差 ΔT_{\min} 联系起来。窄点理论使换热器网络优化在理论和工程设计中取得了突破性的进展,对这项研究具有十分重要的意义。

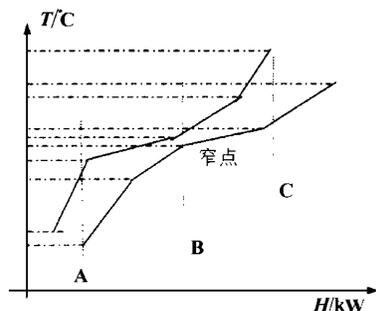


图2 在温-焓图上确定窄点

3.1.1 窄点的合成方法

采用窄点理论合成窄点的方法主要有两种:曲线合成法和问题表合成法,下面以热物流合成为例来介绍这两种方法。

3.1.1.1 曲线合成法

首先在坐标上绘制温-焓图(如图2),把冷、热物流的入口温度和出口目标温度按照大小顺序排列,得到 N 个小的温度区间。在每个温度区间 ΔT 内,如果有 N 个热物流(物流的热容流率

为 S_i) 存在,则这个温度间隔内的热量增量为 $\Delta T \times \sum S_i$ ($i = 1, N$),从最低温度所在区间开始,依次连接各个区间的直线,即可得出热物流合成曲线。类似地,可画出冷物流合成曲线,图3上方的折线为热物流合成曲线,下方的折线为冷物流合成曲线,左移或右移冷物流曲线(冷、热物流合成曲线可左右移动,对合成曲线没有任何影响),找到两者之间最小垂直距离即为窄点。

3.1.1.2 问题表法确定窄点

把初始温度和目标温度按照大小顺序排列,得到 N 个小的温度区间,在每个小区间内计算焓差 $(\sum S_{\text{热}} - \sum S_{\text{冷}}) \Delta T$,并将热物流、冷物流进出的焓值填入表1。从问题表物流进出栏可以看到:在区间2中输出了负的焓流(-0.5kW)即要求从低温区向高温区传递热量,根据热力学定律这是不可行的。为了补充热量的余额,在第二栏处出现了零输出热量,第二栏所对应的温度正是我们要求的窄点温度。

在本例中随区间序号递增,温度逐渐降低,区间7表示热物流与最后一段冷物流发生热交换,因此区间8中,热物流没有参与热交换,所对应的值为0。

表1 问题表计算窄点

区间	冷流焓值 kW		热流焓值 kW	
	输入	输出	输入	输出
1	0	3.0	0.5	3.5
2	3.0	-0.5	3.5	0
3	-0.5	11.5	0	12
4	11.5	13.75	12	14.25
5	13.75	10	14.25	10.5
6	10	7.5	10.5	8
7	7.5	3.5	8	4
8				4

3.1.2 窄点的物理意义

从热力学定律出发得到的窄

点温度,能够保证换热器网络设计具有最低的能源消耗量或最大能量回收。这一热力学限制是由网络中窄点处的最小传热温差所决定的,通过网络优化设计能够逐步接近这个热力学限制。借助于窄点算法,设计人员能够在设计之前就预测出整个过程的能量转换水平。

3.1.3 窄点理论设计应遵守的原则

应用窄点技术进行设计时,Linnhoff 以热力学原理为基础,提出三条原则:如图3所示,窄点处(线B与折线相交处)不能有热量通过;在窄点上方只能有公用工程加热(线C的右侧);在窄点的下方只能有公用工程冷却(线A的左侧)。如果违反了这三条原则,将造成能量的不必要的浪费。

3.1.4 窄点算法的变形

有时,为了减少系统中换热器的个数,人为允许有热流通过窄点。为反映这一情况,1990年 Trivedi^[7]提出了伪窄点的概念和双温差法。双温差法用热回收的最小温差和换热器内最小温差两个参数来优化网络,它有利于提高换热器的匹配自由度,能够减少网络的分支和混合,使优化出的换热器网络更加接近实际条件。

3.2 混合整数非线性规划(MINLP)模型

在80年代,出现了基于数学理论求解换热器网络的方法。1983年 Cerda^[8]把换热器网络表示成目标函数和约束条件形式,1983年 Parpoulias 和 Grossman^[9]等人将最大能源回收问题归结为一个线性规划(LP)问题,求解最少的换热器的数目。这一方法在

自动产生换热器的网络结构方面进行了尝试。1986年 Floudas、Ciric 和 Grossman^[3] 合作采用数学规划法生成最优的网络结构, 1989年, Floudas 和 Ciric^[10] 把 MILP 算法与 Floudas 的超结构相结合得到混合整数非线性规划 (MINLP) 模型, 并用这个模型确定换热器网络的最小投资费用。1991年 Floudas 和 Ciric^[11] 改进了 MINLP 模型使它能够在同时求解公用消耗、冷热股流匹配、网络拓扑。他们做了如下假设: 在最小费用网络中没有热量通过窄点, 最小单元数应该满足最大能源回收。

3.2.1 MINLP 模型的通用形式:

$$\begin{aligned} \min Z &= c^T y + f(x) \\ \text{e.t. } &Ay + h(x) = 0 \\ \text{s.t. } &By + g(x) \leq 0 \\ &Cy + Dx \leq d \\ x &\in X = \{x \in R^n \mid x^L \leq x \leq x^U\} \\ y &\in Y = \{0, 1\}^m \\ &Ey \leq e \end{aligned} \quad (3)$$

式3 各参数含义如下:

Z —目标函数

C^T —系数矩阵

y —系统连接方式的 0—1 变量

n, m —空间的维数

R^n — n 维变量的解空间

X^L, X^U —连续变量 x 的上下限

$f(x), g(x), h(x)$ —约束条件相关函数

d, e —常数

s.t. —表示不等式约束条件

e.t. —表示等式约束条件

A, B, C, D, E —等式约束和不等式约束的系数。

在上述问题中, 最小化目标函数是 0—1 变量的线性函数, 是连续变量的非线性函数。连续变量如质量流率、温度、焓、熵的约束条件是非线性约束, 0—1 变量的约束条件是线性约束。这些约

束条件由工艺过程的质量平衡、能量平衡、换热器的结构参数决定。近年来, 许多学者致力于使优化的换热器网络更加趋近实际情况。考虑了: 物流匹配换热具有不同的传热温差, 不同的对流传热系统(多窄点, 匹配受限制)。

3.2.2 求解 MINLP 的方法

过去, 由于 MINLP 问题比较复杂, 难于求解, 常常采用线性规划或非线性规划问题来近似求解。MINLP 模型的解法比较常用的有三种: 分支定界法^[3]、广义 Benders 法^[10]、外逼近算法^[12]。分支定界法采用树枚举的方法搜索方程的最优解, 它先将整数条件进行松弛, 求解经过松弛后的非线性规划问题。如果得到的解满足整数条件, 则为最优解; 如果不满足条件, 则用这个解作为一端的边界继续求解。广义 Benders 法把 MINLP 问题分解为非线性规划(NLP)子问题和混合整数线性规划(MINLP)主问题来交替求解, 当取 0—1 变量为常数时, MINLP 问题化为非线性规划问题, 非线性规划的解作为原问题的上限。主问题为非线性规划问题提供新的一组整数值, 经过迭代可得到 MINLP 的最优解。外逼近算法实质上为改进广义 Benders 法, 但可以得到较快的收敛效果。

3.3 两种理论比较

窄点理论的主要优点: 以热力学原理为依据, 物理概念明确; 可以预先估计结果; 计算工作量较小; 窄点设计的三个准则对于换热器网络的设计具有很好的指导作用。但其也有不足之处: 进行旧系统改造时, 可能会出现因未考虑辅助设备的影响(辅助设备费用可能太大), 使改造方案难

以实现; 而且在设计的时候必须预先给定最小传热温差 Δt_{\min} , 实际工作中往往需要依赖于设计人员的经验; 做了等温混合的假设。

MINLP 模型的主要优点在于: 将窄点算法的规则作为自己的约束条件, 采用纯数学的方法, 因而适用的情况较广。但其物理概念不如窄点算法那么清晰; 为实现数学模型化需要做一些假设, 如: 相同的对流传热系数等, 目前的解法实质上属于分步优化; 计算工作量较大; 只适合于凸函数; 且对于多峰问题易于出现局部最优解。

由图 1 可知换热器的传热效果与流经换热器的工质温度和质量流率有关。在上述的方法中, 常将对流传热系数作为一个常量来考虑, 当换热器网络处于额定点时, 上述方法可以满足要求, 如果操作条件发生变化, 上述两种理论的一些假设与实际情况存在一些差距。

4 换热器动态特性研究

换热器网络的研究目前取得了很大的进展。按照优化结果得到换热器网络, 投入实际运行之后, 研究人员发现: 当操作条件由于扰动发生了变化, 换热系统的实际运行参数偏离了设计参数, 原有的节能方案不能完全实现。1983年 Marselle^[13] 首次提出: 当入口温度或质量流率发生扰动, 其他研究者得出的最优方案可能难以满足工艺过程的设计要求, 因此提出采用温度和热容流率的变化范围代替给定设计值的方法。他重新定义了换热器网络, 即结构上必须具有灵活性, 确保实现设计要求。Parisa 和 Bahr^[14] 等人也指出一个好的过

程设计不仅要能够实现投资费用和操作费用的优化,同时也应该具有好的可操作性,即在不同的操作条件下即能达到理想的经济性,又有适当的可控性。

5 换热器网络研究的发展方向

5.1 换热器网络的优化方法的研究

前面讨论了求解 MINLP 模型的三种解法存在一定的缺点,采用这些方法难以得到最优解。如果系统规模较大,即使求非常简单的问题,计算工作量也相当大。近年来各国学者一直在寻找一种适合求解 MINLP 问题的方法。Dolan^[15]提出了采用模拟退火算法来求解离散和连续问题,但模拟退火算法有一些局限性。对这一问题的研究仍有待进一步的研究。

5.2 换热器网络的动态特性研究

换热系统运行过程中,因于外界条件的扰动影响,换热网络不能精确地工作在额定工况,运行参数会偏离设计运行参数,造成换热器网络的经济性下降。1983 年 Cerda 和 Westerberg^[16]指出在系统合成中最主要的障碍是过程的模块化。一些学者^[17]分别建立了换热器网络动态特性分析表达式,但这些表达式的实用性较差。因此,进行换热器网络的动态特性研究,具有十分重要的意义。

5.3 换热过程的智能控制

由于换热系统容易受到各种干扰,因此在模块化系统动态特性的基础上,研究适应变工况的智能控制系统,具有极大的现实意义。智能控制系统应确保换热系统在变工况下仍具有良好的经济性、稳定性、可操作性及系统故障自动诊断。

5.4 换热器网络应用领域

目前,我国对换热器网络的应用和研究主要集中在化工行业。在国外, Linnhoff^[18]等人已将上述方法应用于与换热相关领域以改进动力系统的性能。将窄点理论应用于相关领域如制冷、空调系统、热泵技术、热电联产中,对于系统节能具有重要意义。

参考文献

[1] 詹世平,姚平经,袁一. 换热器网络的最优合成. 化工学报, 1989, 17(2): 8~17.

[2] Linnhoff B, Flower J R. Synthesis of heat exchanger networks; I Systematic generation of energy optimal networks. *AIChE J*, 1978, 24: 633~642.

[3] Floudas C A, A R Ciric, Grossman I E. Automatic synthesis of optimum heat exchanger networks configuration. *AIChE J*, 1986, 32: 276~290.

[4] Masso S H, Rudd R F. The synthesis of system design. *AIChE J*, 1969, 23: 1~8.

[5] Umeda T F, Itoh J, Shiroko K. Heat exchanger system synthesis. *Chem Engng Prog*, 1978, 74: 70~76.

[6] Linnhoff B, Hindmarsh E. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chem Engng Sci*, 1983, 38: 745~763.

[7] Trivedi K K, O'Neil B K, Roach J R, Wood R M. Systematic energy relaxation in MER heat exchanger networks. *Comput*

Chem Engng, 1990, 14: 601~611.

[8] Cerda J, Westerberg A W, Mason D, Linnhoff B. Minimum utility usage in heat exchanger network synthesis. *Chem Engng Sci*, 1983, 38: 373~387.

[9] Papoulias S A, Grossman I E. Structural optimization approach in process synthesis. *Comput Chem Engng* 1983, 7: 707~731.

[10] Floudas C A, Ciric A R. Strategies for overcoming uncertainties in heat exchanger network synthesis. *Comput Chem Engng*, 1989, 13: 1133~1152.

[11] Ciric A R, Floudas C A. Heat exchanger network synthesis without decomposition. *Comput Chem Engng* 1991, 15: 385~396.

[12] Yee T F, grossman I E. Simultaneous optimisation models for heat integration. *Comput Chem Engng* 1991, 14: 1151~1164.

[13] Marselle D F, M Morari, Rudd D F. Design of resilient processing plant. *Chem Engng Sci*, 1983, 37: 259~264.

[14] Parisa A, Bahri, Bandoni J A, Romagnoli J A. Integrated flexibility and controllability analysis in design of chemical processes. *AIChE J*, 1997, 43: 997~1003.

[15] Dolan W B, Cumming P T, Le Van M D. Algorithmic efficiency of simulated annealing for heat exchanger network Design. *Comput Chem Engng* 1990, 14: 1039~1050.

[16] Cerda J, Westerberg A W. Synthesizing heat exchanger networks having restricted stream/ stream matches using transportation problem formulations. *Chem Engng Sci*, 1983, 38: 1723~1740.

[17] Galli M R, Cerda J. Synthesis of structural-constrained heat exchanger networks. *Comput Chem Engng*, 1998, 22: 819~839.

[18] Townsend D W, Linnhoff B. Heat and power networks in process design. *AIChE J*, 1983, 29: 742~771.

(渠 源 编 辑)

欢 迎 刊 登 广 告

换热器网络优化研究进展= **Recent Developments Concerning the Optimization Study of Heat Exchanger Networks** [刊, 汉] / Zhang Junhua, Ying Qijia, Huang Weimin (Power Engineering College under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code 200093) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —201~204

This paper presents the most recent developments both at home and abroad in the study of heat exchanger networks (HEN). Two different methods for the study of heat exchanger networks are compared in detail and a brief description is given of the study of HEN dynamic characteristics. The authors hold that the use of a pinch theory and a mixed integer nonlinear optimization program to other power systems, such as refrigerating and air conditioning systems, can also be conducive to the energy-savings of these systems. In conclusion, the proper orientation of research and development of the HEN has been indicated. **Key words:** heat exchanger networks, pinch theory, mixed integer nonlinear optimization

燃气轮机叶片轮盘振动特性分析= **An Analysis of the Vibration Characteristics of a Gas Turbine Bladed Disc** [刊, 汉] / Zhou Chuanyue, Zou Jingxiang (Department of Aerospace Engineering and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001), Wen Xueyou, *et al* (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —205~209

A brief survey is given of the current status concerning the research at home and abroad of the vibration characteristics of a bladed disc, the key component of a gas turbine. The vibration characteristics studied in this paper pertain to the following elements and components: a single blade, a turbine disc, a blade-disc coupled system and shrouded blades. Also studied are the resonance and flutter occurring in the above-cited elements. In the meantime, a specific example for the calculation and analysis of the relevant vibration characteristics has been presented of the blade and blade-disc coupled system. **Key words:** gas turbine, blade, disc, vibration characteristics, resonance, flutter

垂直浓淡煤粉燃烧方式下炉内拟序结构研究= **A Study of the In-furnace Coherent Structure under a Vertical Bias Pulverized-coal Combustion Mode** [刊, 汉] / Wang Chungang, Zhu Qinyi, Yin Xiangmei, *et al* (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —210~215, 225

With the help of a particle dynamic analyzer (PDA) system an experimental and analytical study of the turbulent flow characteristics has been conducted of the in-furnace coherent structure in a tangentially fired furnace under a vertical bias pulverized-coal combustion mode. The in-furnace coherent structure can have an effect on the mixing of the primary air with a main flow field. The results of the above study show that the interaction of the primary air jet flow and the transverse jet flow at the upper stream results in the formation of a wake eddy and a shear eddy respectively at the back-of-flame side and at the flame-facing side. In this regard, there exists in the wake eddy and shear eddy a relatively high turbulent kinetic energy and shear stress, which may play a major role in controlling the diffusion of particles in the furnace. Based on a theoretical analysis the authors conclude that the vertical bias pulverized-coal combustion mode can give rise to certain conditions, unfavorable for the burn-up of pulverized coal particles, thus triggering the formation of slags on boiler water walls. **Key words:** coherent structure, particle dynamic analyzer, vertical bias combustion

增压流化床燃烧煤水混合物管内输送阻力特性研究= **A Study on the Characteristics of In-tube Transmission Resistance of Coal-water Mixture Burned in a Supercharged Fluidized Bed Furnace** [刊, 汉] / Meng Lingjie, Zhang Mingyao (Thermal Energy Engineering Institute under the Southeastern University, Nanjing, Jiangsu, China, Post Code 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —213~214, 242

Coal-water mixture can be assumed as pertaining to a generalized non-Newton fluid of two-phase solid-liquid flow and its in-tube flow is characterized by a slip (negative slip) flow phenomenon. On this basis deduced in this paper is a similitude criterion, featuring the flow state of the above-cited coal-water mixture in pipes. Furthermore, a new and simple method has been proposed for determining the in-tube resistance properties of such a coal-water mixture from an engineering perspective. **Key words:** supercharged fluidized bed, coal-water mixture, generalized Reynolds number

GT25000 燃机试验工艺基架动态特性研究= **A Study of the Dynamic Characteristics of a Technological Base-frame for GT25000 Gas Turbine Test** [刊, 汉] / You Guoying (Wuxi Division of Harbin No. 703 Research Institute, Wuxi, Jiangsu, China, Post Code 214151) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3).