

研究论文

基于结构可控性分析的换热网络旁路优化设计

侯本权¹, 孙 琳^{1,2}, 罗雄麟¹

(¹ 中国石油大学自动化研究所, 北京 102249;

² 不列颠哥伦比亚大学化学与生物工程学院, 加拿大 温哥华 V6T 1Z3)

摘要: 在换热网络的运行过程中其操作条件时常发生变化, 旁路优化控制是调节物流出口温度、节能降耗的有效途径。然而, 仅通过逐一对比或优化的方法确定旁路位置不能从理论上论证换热网络的可控性, 也往往难以兼顾可控性与经济性。因此从控制理论的角度, 基于结构可控性理论分析换热网络的结构特性。权衡可控性与经济性两方面因素, 在可控性要求较高时, 为实现设置最少的旁路以满足全部状态的可控性要求, 提出了换热网络全部状态可控的旁路优化设计法。在旁路数目受限时, 根据具体的经济性与可控性要求, 为确定最佳的旁路位置, 提出了准可控的旁路优化设计法。然后, 基于结构可控性分析分别求解提出的两种旁路优化设计方案。最后, 以某常减压蒸馏装置脱盐前换热网络为例分别求解全部状态可控和准可控的换热网络旁路位置, 并与多次优化等其他求解方法得出的结果进行对比分析。

关键词: 换热网络; 结构可控性; 旁路; 优化

DOI: 10.3969/j.issn.0438-1157.2011.05.022

中图分类号: TQ 021.8

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (2011) 05-1326-13

Optimal design of bypass location on heat exchanger networks based on structural controllability

HOU Benquan¹, SUN Lin^{1,2}, LUO Xionglin¹

(¹ Research Institute of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China; ² Department of Chemical and Biological Engineering, University of British Columbia, Vancouver, BC, Canada, V6T 1Z3)

Abstract: During the operation of heat exchanger networks (HEN) with varying operating conditions, bypass optimal control is considered an effective method to adjust outlet fluid temperature and save energy. However, locations of bypasses are derived without the verification by the control theory. And, it is always very difficult to choose the location of bypasses with the trade-off between controllability and capital investments. Therefore, it is necessary to develop a method to design a HEN control structure based on the control theory. Based on structural controllability, in order to maintain all states controllable and minimize the number of bypasses, a bypass optimal design method with all states controllable (method 1) was proposed. On the other hand, when the number of bypasses was limited, to maximize controllable states an alternative bypass optimal design method with sub-controllable states (method 2) was also presented. The results indicated that with these two methods, the optimal bypass design could be derived for any requirement of controllability and capital investments. A case study of HEN before desalting in an atmospheric/vacuum distillation plant demonstrated the effectiveness of these two methods proposed in this paper.

Key words: heat exchanger networks; structural controllability; bypass; optimization

2010-09-23 收到初稿, 2010-12-15 收到修改稿。

联系人: 罗雄麟。第一作者: 侯本权 (1984—), 男, 硕士研究生。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (20976193)。

Received date: 2010-09-23.

Corresponding author: Prof. LUO Xionglin, luoxl@cup.edu.cn

Foundation item: supported by the National Natural Science Foundation of China (20976193).

引言

近年来, 国内外研究者普遍认为设置旁路是增加控制自由度并提高可控性、调节物流出口温度以及公用工程最有效的途径^[1-3]。换热网络的柔性和弹性分析被广泛研究^[4-5], 然而柔性/弹性指数虽然可以在一定程度上体现旁路位置对网络柔性/弹性的影响, 但很少考虑换热网络中各具体状态的可控性。Papalexandri 等^[6-7]提出了一种设计与改进换热网络柔性和结构可控性的系统方法, 在多周期超结构的 MINLP 模型和下游途径法的基础上提出了确切的结构控制标准。但是, 这种方法只能求解简单的问题, 对于复杂的问题则难以求解。Srinophakun 等^[8]和 Glemmestad 等^[9]均应用了“监督”逻辑, 根据工况变化来选择哪些旁路作为操纵变量。这类方法需要设置较多的旁路, 因而经济性较差。近年来, 张俊峰等^[10]指出在操作夹点附近设置旁路, 并提出了一种旁路优化控制方案。然而, 这些研究大多囿于简单的常规单回路分散控制结构, 在此基础上讨论换热网络的柔性/弹性以及旁路优化设计与控制等问题。文献 [11] 指出集中控制结构下优化求解换热网络旁路数目和位置是目前的研究热点。Boyaci 等^[12]提出两种基于动态模型的换热网络开环和闭环集中控制方案, 这也是旁路优化设计中常用的两种集中控制结构。Uztürk 等^[13]研究指出换热网络集中优化控制优于单回路分散控制。但是, 以上研究侧重于集中优化控制方面, 对旁路的选择并没有进行深入的对比和分析, 且上述方法均难以应用于旁路数目未知且网络结构较复杂的情况。罗雄麟等^[14]提出了一种多次优化求解复杂换热网络旁路设计方案, 但这种方法得出的旁路设计方案缺乏理论论证, 因而将可控性理论应用于旁路设计是十分必要的。

另一方面, 控制系统中控制结构的选择至关重要, 应保证系统所关心的状态可控可观, 而结构可控可观性分析法在工程设计和分析上极具实用性。Hopkins 等^[15]通过输出结构可控性分析排除不可控的操作变量与控制变量配对, 同时指出输出结构可控并不意味着状态完全可控。范文雪等^[16]提出一种直接利用系统状态空间矩阵的结构可控性图解分析法, 并应用于精馏塔的可控性分析。Varga 等^[17]通过求解换热网络的状态空间系数矩阵, 得出换热网络拓扑结构图, 从而判断其可控可观性。

但该方法只能判断验证可控可观性, 且计算复杂难以应用于大型换热网络。Boukhobza 等^[18]基于图论的方法研究了一类结构线性系统的输入和状态可观性问题, 理论上证明了基于结构的方法具有较低的计算复杂度。

目前, 对换热网络的控制, 一般是将某些流通股的目标温度作为被控变量, 而较少考虑物流的中间换热温度的可控性, 结合控制理论从可控性角度优化设计换热网络旁路亦未见报道。对已知结构的换热网络, 在旁路优化设计过程中考虑所有状态的结构可控性将能更有效地控制网络的换热状况, 避免中间换热温度“交叉”, 为安全生产和节能降耗奠定基础。此外, 增设旁路会增加投资费用, 因此在换热网络的旁路优化设计中应权衡其可控性与经济性。当设备投资费用有限, 即可增设的旁路数目有限时, 在旁路优化设计中应保持尽可能多的状态可控, 从而实现兼顾可控性与经济性的最优旁路设置, 这里称为准可控的旁路优化设计法。

有旁路换热网络是复杂的非线性系统, 若用矩阵秩讨论其可控性, 只能判断若干平衡点是否可控, 即只能证明其局部可控性而不能证明系统的全局可控性。结构可控性分析法可避免复杂非线性系统的建模、线性化等工作, 显著简化对系统的分析与设计并具有全局性, 是针对复杂换热网络的一条可行之路。

本文拟从控制理论的角度, 在对换热网络结构可控性分析的基础上, 提出一种换热网络旁路优化设计的方法。首先, 分析换热网络中各状态之间的相互关系, 求取换热网络的状态结构图和状态结构阵, 并分析其结构特性。然后, 建立换热网络全部状态可控的旁路优化设计方法及准可控下兼顾可控性与经济性的旁路优化设计方法, 并分别采用分枝定界法和遗传算法求解这两个问题。最后, 以某常减压蒸馏装置脱盐前换热网络为例, 对比并分析求解结果, 证明方法的有效性。

1 换热网络结构分析

从结构上对系统的可控性等特性进行分析, 可超脱与系统参数有关的各种复杂因素, 只取决于系统的结构特性^[19]。对于非线性系统, 根据状态变量 X 和输入变量 U 之间的关联性, 在没有线性化的情况下可以直接得出其相应的状态信息结构阵 A_s 和控制信息结构阵 B_s , 继而应用结构可控性判

据,可分析系统的结构可控性。

信息结构阵是系统结构模型的一种,表示的是系统中元素之间的关系,在换热网络中主要指进出各换热器的流股温度之间的相互关系^[19]。信息结构阵的求取以结构单元图为基础,结构单元图由节点和有向边构成,节点代表系统的元素,有向边代表元素间的相互关系,其中,有向边箭头所指向的元素受有向边连接的另一元素的影响。

因此,为应用结构可控性判据,首先必须明确换热网络中各状态变量之间的关系。首先,增设旁路会相应地增加状态变量,而增加的状态变量是可以通过新增的旁路控制的,所以在分析换热网络所有状态的可控性时,可以不考虑由于增设旁路而增加的状态,但当分析该换热网络所有状态的可观性时,则必须考虑由于增设旁路而增加的状态。其次,根据单个换热器集中参数动态模型^[20],换热器进、出口温度状态变量之间的关系为:冷热流股进口温度均影响出口温度;冷热流股换热目标温度之间相互影响。

据此,可由换热网络工艺流程图直接转化得到换热网络的结构单元图,然后结合潜在的旁路位置可得出其信息结构阵 A_s 、 B_s 。不同于线性系统的状态空间阵 A 、 B ,换热网络信息结构阵仅由 0-1 二元变量构成,其中, A_s 阵的行和列均对应换热网络中的温度状态,每行各元素表示由对应的列元素是否可达这个行元素,可达为 1,否则为 0; B_s 阵中行对应温度状态,列对应旁路,旁路能够到达该状态则对应元素为 1,否则为 0。由于考虑的是状态之间的关系,不计状态自身的影响,因而结构阵 A_s 中的对角元素置 0。

根据结构强度和冗余度的相关概念及换热网络的流程结构,作者另文对换热网络信息结构阵的求取方法及结构特性分析作了详细研究,并得出以下结论:

- (1) 下游旁路可控状态数要少于上游旁路;
- (2) 控制结构强度与旁路位置和数量有关;
- (3) 耦合信道的重数对控制信道冗余度和系统

可控性有重要影响,控制信道冗余度和结构强度越大,也意味着系统的可控性越高,控制可靠性越高。

鉴于此,在换热网络旁路优化设计中将结构强度和冗余度引入优化目标函数,综合可控性与经济性要求,提出换热网络结构可控性旁路优化设

计法。

2 换热网络结构可控性旁路优化设计

对于已知的换热网络,设置的旁路越多越能保证其可控性,但这也导致投资增大,而考虑到经济性因素往往希望设置尽量少的旁路以节省投资费用。因此在换热网络的旁路优化设计中必须兼顾可控性与经济性。当可控性要求较高时,设置的旁路应保证网络的所有状态均可控,相应的旁路设计问题称为可控换热网络旁路优化设计;当经济性要求较高时,需考虑保证尽可能多的状态可控,并减少旁路个数从而节省投资费用,相应的旁路设计问题称为准可控换热网络旁路优化设计。

旁路既可设置在换热器的冷流侧也可设在热流侧,但一般不在两侧同时设置^[21],对原油换热网络则一般设置在对装置平稳运行影响较小的冷流侧^[22],因此本文只考虑单旁路、在换热器冷流侧设旁路的情况。

2.1 可控换热网络旁路优化设计

换热网络中,一般要求设置尽量少的旁路并满足控制要求,即换热网络中各个状态都是可控的。虽然结构强度和冗余度越大网络可控性越高,但是结构强度越大也意味着旁路设置越多,投资费用越高,经济性降低。因此,最优的旁路设计应是综合考虑可控性和经济性的,即设置尽量少的旁路,并追求较大的冗余度。保证全部状态可控的最少旁路优化设计问题可作如下描述。

(1) 目标函数 包含两个目标,一是最少的旁路数目,表征经济性;二是尽量大的控制结构冗余度,表征可控性。

记 0-1 变量 λ_j ($j=1, 2, \dots, r$) 代表换热网络中所有潜在的旁路。若第 j 个旁路存在,则相应的 $\lambda_j=1$,反之则 $\lambda_j=0$ 。则旁路选择阵表示为

$$\Gamma = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_r \end{bmatrix}, \Gamma \in \mathbf{R}^{p \times r} \quad (1)$$

状态结构可控性矩阵

$$\begin{aligned} P_{AB} &= (B_s \Gamma) \oplus [A_s \otimes (B_s \Gamma)] \oplus \cdots \oplus [A_s^{nc} \otimes (B_s \Gamma)] = \\ &= [B_s \oplus (A_s \otimes B_s) \oplus \cdots \oplus (A_s^{nc} \otimes B_s)] \Gamma = Q_s \cdot \Gamma \end{aligned} \quad (2)$$

其中, nc 为耦合信道的重数。

状态控制信息结构冗余阵

$$\bar{\mathbf{P}}_{AB} = (\mathbf{B}_s \mathbf{\Gamma}) + (\mathbf{A}_s \mathbf{B}_s \mathbf{\Gamma}) + \cdots + (\mathbf{A}_s^n \mathbf{B}_s \mathbf{\Gamma}) = (\mathbf{B}_s + \mathbf{A}_s \mathbf{B}_s + \cdots + \mathbf{A}_s^n \mathbf{B}_s) \mathbf{\Gamma} = \bar{\mathbf{Q}}_s \cdot \mathbf{\Gamma} \quad (3)$$

则目标函数可数学表示为

$$J = (\min \sum_{j=1}^r \lambda_j, \max \sum_{i=1}^n r_{ABi}) \quad (4)$$

其中, r_{ABi} 为冗余阵 $\bar{\mathbf{P}}_{AB}$ 中第 i 个状态的冗余度。

(2) 约束条件 换热网络各状态均可控。若要保证换热网络中各个状态均是可控的, 则各个状态的控制信道强度必须大于 0, 即各个状态必须至少可由一个控制源到达。可借助状态可控阵 $\mathbf{P}_{AB}$ 的元素表示

$$\sum_{j=1}^r p_{ABij} \geq 1, \quad i = 1, 2, \cdots, n, \quad j = 1, 2, \cdots, r \quad (5)$$

综上, 换热网络全部状态可控的最少旁路优化设计完整数学描述为

$$J = (\min \sum_{j=1}^r \lambda_j, \max \sum_{i=1}^n r_{ABi}), \quad i = 1, 2, \cdots, n \quad (6)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^r p_{ABij} \geq 1, \quad i = 1, 2, \cdots, n, \quad j = 1, 2, \cdots, r \quad (7)$$

$$\lambda_j \in \{0, 1\} \quad (8)$$

2.2 准可控换热网络旁路优化设计

事实证明, 在保证换热网络所有状态全部可控的条件下, 换热网络所需旁路数目往往较多, 而现实中出于经济性考虑不希望设置较多旁路, 因此需要在经济性与可控性之间折中, 即在保证尽可能多的状态可控的同时, 减少旁路数目, 从而达到经济性要求。这里称为准可控换热网络旁路优化设计问题。

(1) 目标函数 通过多次实验发现, 旁路数目和可控状态数均相同时, 可行的旁路设置并不唯一, 但显然最优的旁路方案应能在此之上具有尽量大的控制结构冗余度, 因此在准可控条件下, 优化问题仍为多目标, 即可控状态数最大且控制结构冗余度最大。该多目标优化可通过加权化为单目标优化, 其中可控状态数应优先考虑, 赋予较大的权值。依据状态结构可控性矩阵 $\mathbf{P}_{AB}$ 及状态控制信息结构冗余阵 $\bar{\mathbf{P}}_{AB}$, 目标函数表示为

$$J = \max[\beta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r p_{ABij} + (1-\beta) \sum_{i=1}^n r_{ABi}], 0.5 < \beta < 1 \quad (9)$$

(2) 约束条件 旁路数应不大于设定的最大旁路数目。通过求解可控换热网络旁路优化问题, 可

得全部状态可控所需的最少旁路数为 λ , 则准可控的旁路数必定小于等于 λ 。假设给定的最大旁路数目为 α , 则旁路数目约束表示为

$$\sum_{j=1}^r \lambda_j \leq \alpha \quad (10)$$

综上所述, 换热网络准可控旁路优化设计问题完整描述为

$$J = \max[\beta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^r p_{ABij} + (1-\beta) \sum_{i=1}^n r_{ABi}] \quad (11)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{j=1}^r \lambda_j \leq \alpha \quad (12)$$

$$\lambda_j \in \{0, 1\}$$

$$0.5 < \beta < 1$$

3 问题求解

3.1 耦合信道重数的确定

前述两类换热网络旁路优化设计问题中均包含结构可控阵和冗余阵, 其求解与耦合信道的重数有关。多次利用耦合信道可以增大系统的冗余度, 提高控制的可靠性。但是, 在换热网络中, 耦合次数越多, 信道的信息传递能力越弱, 也即控制作用随着传播距离的增大会逐渐变弱, 直至消失。靳遵龙等^[23]在换热网络温度传递系数的研究中也证实了这种传递特性。因此在分析现场换热网络的状态可控性时, 某些多次耦合信道是无效的。针对具体换热网络, 需要有一个利用耦合信道次数的考察与权衡。李志红^[24]基于知识工程确定具体换热网络的干扰传递矩阵, 根据经验将干扰传递类型分类, 指出换热网络中干扰的传递经过 3 个换热器后可认为减弱为零。

基于上述先验知识, 针对一个具体的换热网络可通过模拟的方法确定耦合信道的重数。首先利用单个换热器的机理模型在 gPROMS 软件中建立换热网络的仿真模型; 然后在换热网络典型位置施加扰动, 改变不同流股进入换热网络的入口温度, 观察各温度状态的变化以确定扰动的传播情况, 从而分析控制作用和干扰传递的弱化过程, 确定耦合信道的可用重数。确定了耦合信道的重数, 便可由式(2)、式(3)计算结构可控阵 $\mathbf{P}_{AB}$ 及冗余阵 $\bar{\mathbf{P}}_{AB}$, 进而作下面的优化求解。

3.2 可控换热网络旁路优化设计问题求解

式(6)~式(8)是一个包含 0-1 规划的最优化问题, 可采用分枝定界法求解, 借助 MATLAB 优化工具箱的“bintprog ()”函数编程实现。

对于多目标的问题,采取两步优化的方法^[25]。首先考虑目标 1,即最少旁路数目,求出最少的旁路数目之后,将其作为约束条件,求解目标 2,即最大冗余度。

通过上述思路将多目标优化转化为单目标优化后,求解变得较为简单。MATLAB 优化工具箱函数“bintprog ()”的格式为

$$\min_x f x \quad \text{s. t.} \quad A x \leq b \quad (13)$$

结合式(2)、式(3)可知,其与化为单目标后的问题描述相一致,可直接利用该工具箱函数求解。

3.3 准可控换热网络旁路优化设计问题求解

目标函数中包含换热网络可控状态数,需由状态结构可控性矩阵 P_{AB} 求得,由于 P_{AB} 的求取为逻辑运算,因而该优化问题成为非线性优化问题。分枝定界法是基于 LP 问题的优化策略,故不再适用。遗传算法是一种智能搜索算法,适用于非线性问题且具有寻优简单、鲁棒性强的优点,本文根据文献 [26-27] 中改进的遗传算法,通过赋以适当的参数求解准可控换热网络的旁路设置优化问题。

选取合适的适应度函数对遗传算法的性能尤其重要,针对本文具体问题多次实验发现,满足旁路数目限制且可控状态数同样多的旁路设置方案有多种,若直接将可控状态数作为适应度函数,不能保证收敛到最优解,因此增加冗余度的计算,通过加权构成新的适应度函数,即式(9)目标函数所示。

由于遗传算法自身的随机性,需重复求解多次以确保所得为最优解,其中权值 β 在实验中适当调整。调整过程为:首先取 $\beta=1$ 得到旁路数目限制下最大的可控状态数,然后逐步减小 β 值 [$\beta \in (0.5, 1)$],在多次求解中找到同时达到最大可控状态数且冗余度最大的解,即为最优解。

另外,本问题为有约束遗传算法求解问题,这里采用罚函数法处理约束条件,即对破坏约束条件的染色体(旁路设置方案),大幅降低其适应度值,减小其进入下一代的概率,以此实现约束。初始种群大小和进化代数对遗传算法的收敛性和计算耗时具有重要影响,针对具体问题规模大小,本文通过实验选择初始种群大小为 80,进化代数为 150 代,取得较好的效果。

4 实例分析

以锦西石化的一套常减压装置脱盐前换热网络为例求解分析,如图 1 所示。图中标出了所有潜在可选的旁路,其中换热器 E1101、E1102、E1201、E1205 均是由 2 个同型号换热器串联构成的换热器组。

设计工况列于表 1 中,已知网络的设计夹点温度为 85°C ,位置在换热器 E1101 和 E1201 后,如图 1 虚线所示。在 gPROMS 中模拟求解得到网络的操作夹点位置在换热器 E1103 和换热器 E1204 上^[10]。

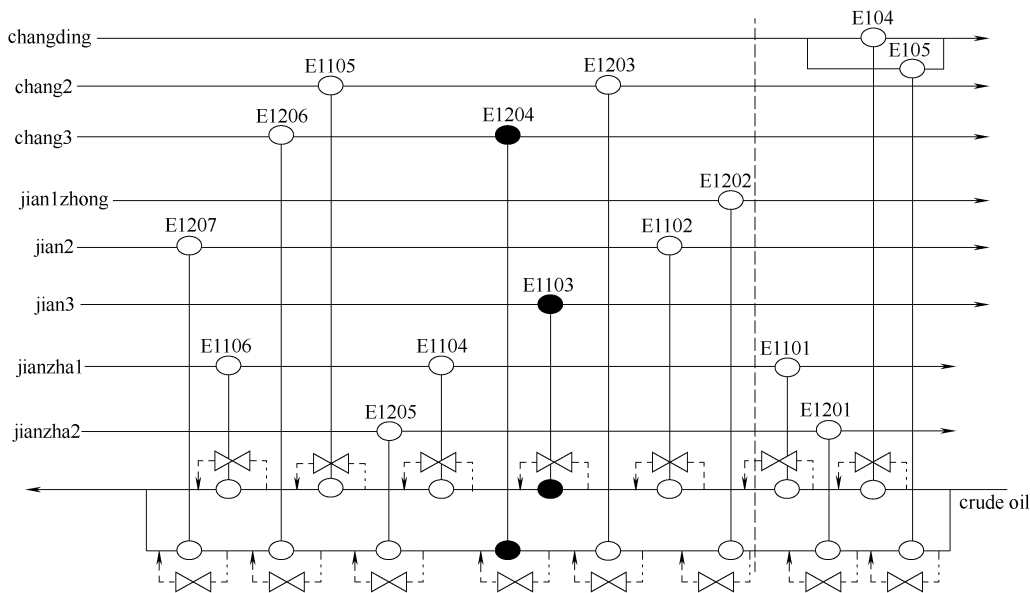


图 1 某脱盐前换热网络流程图及所有潜在旁路

Fig. 1 Crude oil heat exchanger network with all potential bypasses

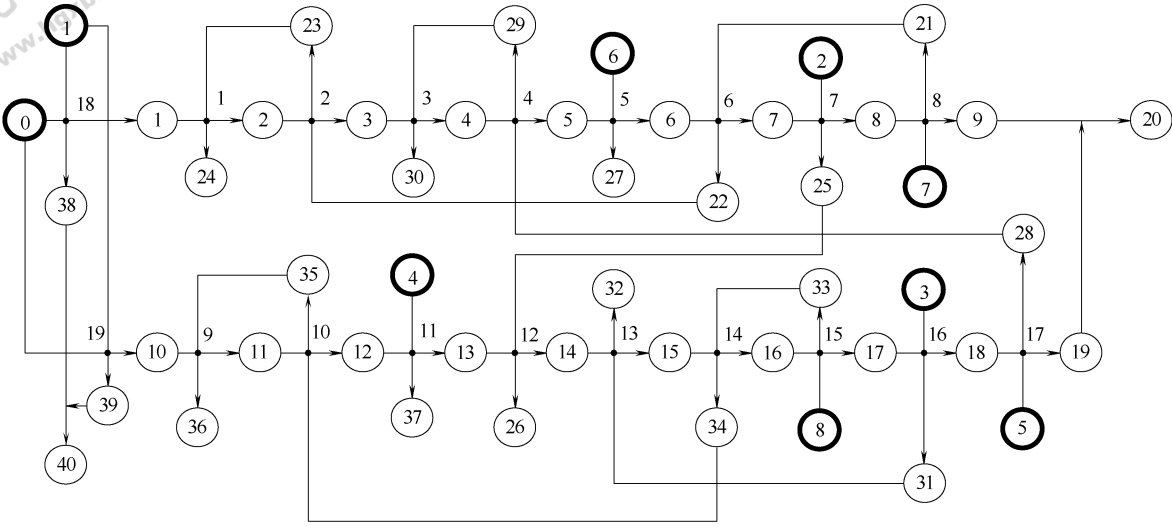


图 2 原油换热网络状态结构图

Fig. 2 States topology of crude oil heat exchanger network

表 1 冷热物流基本参数

Table 1 Basic parameters of streams

Name	Input temperature/℃	Output temperature/℃	Flowrate /kg · s ⁻¹	Enthalpy /kW
crude oil	55	162	60.95	2.78×10 ⁴
changding	114	86	3.93	3613
chang2	200	118	12.74	2670
chang3	230	120	10.16	2701
jian1zhong	174	110	8.31	1261
jian2	222	116	18.34	4338
jian3	218	122.5	4.24	902
jianzha1	227.5	124	27.36	6742
jianzha2	205	120.5	27.36	5622

表 2 图 2 中编号与换热器及物流的对应关系

Table 2 Real heat exchanger and streams corresponding to numbers of Fig. 2

Heat exchanger No.	Real heat exchanger	Stream No.	Real stream
1	E1101a	0	crude oil
2	E1101b	1	changding
3	E1102b	2	chang2
4	E1102a	3	chang3
5	E1103	4	jian1zhong
6	E1104	5	jian2
7	E1105	6	jian3
8	E1106	7	jianzha1
9	E1201a	8	jianzha2
10	E1201b		
11	E1202		
12	E1203		
13	E1204		
14	E1205a		
15	E1205b		
16	E1206		
17	E1207		
18	E104		
19	E105		

4.1 原油换热网络状态结构

控制作用和干扰传递经过一个换热器与经过一个换热器组的衰减情况有显著差别，因此将图 1 中换热器串联构成的换热器组拆开。不考虑设置旁路增加的状态，以圆圈“○”表示换热网络中间的温度状态，黑点“●”表示换热器，带黑边圆圈“○”表示各个流股进入换热网络的温度变量，得出换热网络状态结构如图 2。图中换热器右上角标注数字为换热器编号，换热器编号与实际换热器的对应关系见表 2。

由状态结构图 2 可知，该原油换热网络有 40 个状态变量，单旁路条件下共有潜在旁路 19 个。根据换热器状态间关系及潜在旁路，由状态结构图 2 可得该原油换热网络的信息结构阵 A_s 、 B_s （见附录），其中 B_s 对应的是所有潜在旁路都存在时的情况。

4.2 问题求解

在 gPROMS 软件中模拟该换热网络，分析其控制作用和干扰传递的弱化过程，从而确定在可控性分析中耦合信道的可用重数。

在典型位置施加扰动，改变不同流股进入换热网络的入口温度，考察扰动的传播情况。表 3、表 4 分别为减一中、减二线的入口温度变化 5℃ 时，网络中各换热器流股出口温度的变化情况。表中斜

表 3 E1202 处减一中入口温度降 5℃ 各换热器出口温度弹性

Table 3 Flexibility of each heat exchanger's output temperatures when input temperature dropped 5℃ in E1202							
Heat exchanger	Cold flow	Hot flow	MinΔT	Heat exchanger	Cold flow	Hot flow	MinΔT
E1106	0.001624	0.000398	−0.0015	E1207	0.026846	0.0165	−0.0132
E1105	0.002226	0.00167	−0.00078	E1206	0.033924	0.020456	−0.00656
E1104	0.003022	0.001052	−0.00219	E1205b	0.037854	0.012944	−0.02859
E1103	0.004052	0.003104	−0.00114	E1205a	0.04599	0.02405	−0.02517
E1102a	0.004476	0.007864	0.004792	E1204	0.053146	0.04892	−0.00535
E1102b	0.001384	0.003098	0.002478	E1203	0.055553	0.04364	−0.01785
E1101b	−0.00011	$−2.8\times10^{-5}$	9.72×10^{-5}	E1202	0.066209	0.246938	0.240707
E1101a	−0.00014	−0.00081	−0.00073	E1201b	0.006234	0.018126	0.013417
E104	0	0	0	E1201a	0.002876	0.012977	0.011407
				E105	0	0	0

表 4 E1207 处减二线入口温度降 5℃ 各换热器出口温度弹性

Table 4 Flexibility of each heat exchanger's output temperatures when input temperature dropped 5℃ in E1207							
Heat exchanger	Cold flow	Hot flow	MinΔT	Heat exchanger	Cold flow	Hot flow	MinΔT
E1106	0.099344	0.037784	−0.07111	E1207	0.208086	0.505044	0.379506
E1105	0.12047	0.094038	−0.03972	E1206	0.009644	0.020456	−0.00189
E1104	0.144336	0.085734	−0.06443	E1205b	0.0109	0.00365	−0.00835
E1103	0.171354	0.17182	−0.00176	E1205a	0.013342	0.006698	−0.00765
E1102a	0.175906	0.27123	0.13302	E1204	0.015567	0.014035	−0.00191
E1102b	0.078694	0.13433	0.0777	E1203	0.016375	0.033236	0.025449
E1101b	0.021993	0.062616	0.046094	E1202	0.001417	0.001102	−0.00049
E1101a	0.009949	0.043307	0.037877	E1201b	0.001598	0.004756	0.003565
E104	0	0	0	E1201a	0.000706	0.003117	0.002732
				E105	0	0	0

体加粗的换热器编号为扰动加入的位置，斜体加粗的数字表示距扰动较近，所受影响明显较大的位置。

从表 3、表 4 可以发现，扰动传播经过 3 个换热器后，换热器出口温度的变化率显著降低，因此，相比较而言可以认为扰动传播经过 3 个换热器后对下游已经没有太大影响。这与李志红等基于知识工程给出的经验规则是相一致的。另外可以发现，干扰传递在同一条流股中传播较远，而通过换热器换热对另一侧流股的影响一般经过 3 个换热器便已显著减弱。综上可认为，在换热网络中耦合信道最多只可利用 3 重。

4.3 可控换热网络旁路优化设计问题求解结果

根据换热网络的信息结构阵 A_s 、 B_s ，耦合信道的重数为 3 时求出结构可控阵 P_{AB} ，然后采用分枝定界法分两步优化求解，所得旁路设置结果如图 3 所示，图中虚线标示的旁路设置为第一步优化最少旁路数目所得，实线标示的旁路设置为第二步优化最大冗余度所得，加粗的旁路设置为两步优化重合的旁路。由两步求解结果可见，满足全部状态可控的最少旁路数目为 4，但旁路设置并不唯一，通

过第二步对冗余度的优化，可求得最优的旁路位置，即 E1104、E1206、E104 和 E105。

已知换热网络的操作夹点在 E1103 和 E1204 处，优化所得的旁路位置 E1104 和 E1206 在操作夹点附近，与张俊峰^[10]提出的夹点旁路控制法相符。

4.4 准可控换热网络旁路优化设计问题求解结果

由上述全部状态可控的旁路优化结果可知，其旁路数目至少须为 4。当经济性或现场操作受限时即旁路数目要求小于 4 个，分别求解旁路数为 3、2、1 的旁路优化设置。在问题的求解过程中，须将遗传算法程序中旁路数目的约束分别作相应更改。求得旁路位置如图 4。

图中，虚线标示的旁路为仅 3 个旁路时的旁路优化设置；实线标示的旁路为仅 2 个旁路时的旁路优化设置；当仅有一个旁路时，优化所得旁路设置在 E1205b 上，如加粗的旁路所示。对应以上 3 种情况的换热网络可控状态数以及可控率见表 5 所示。对比结果表明，在旁路数目给定的情况下，准可控换热网络旁路优化设计法，使其可控的状态数最大，从而保证换热网络具有较高的可控性和可操作性。

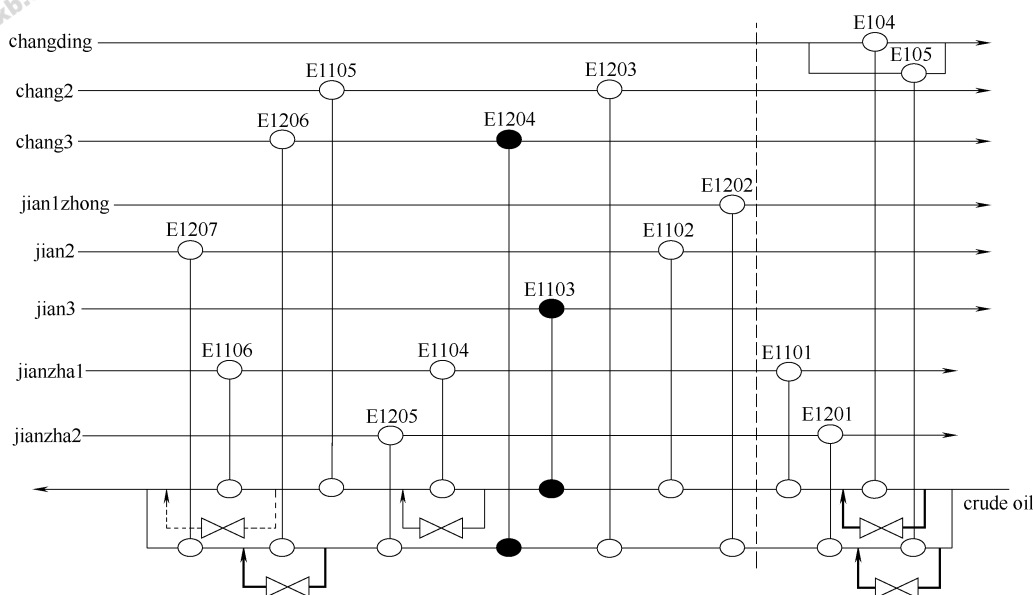


图 3 可控换热网络旁路优化设计

Fig. 3 Optimal bypass design of controllable heat exchanger network

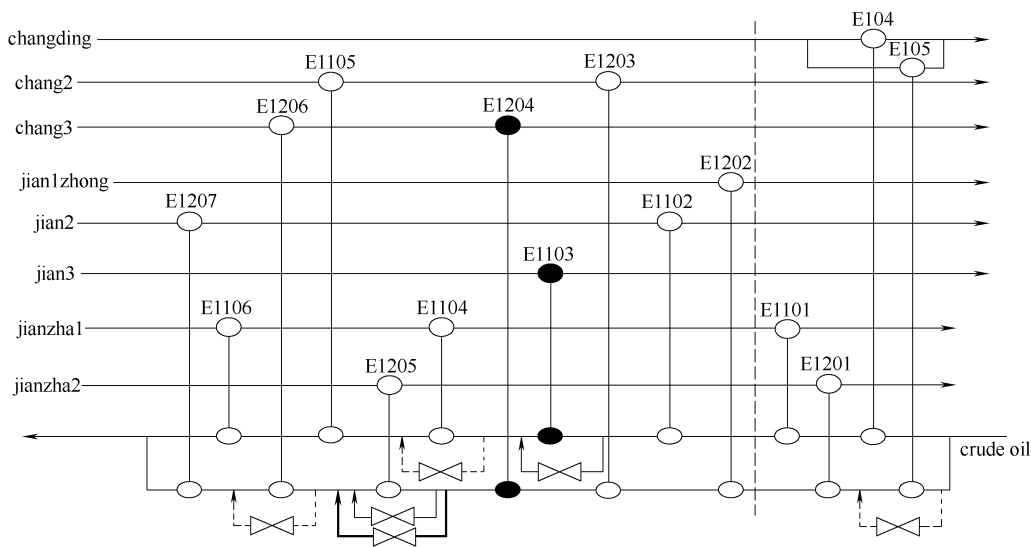


图 4 准可控换热网络旁路优化设计

Fig. 4 Optimal bypass design of sub-controllable heat exchanger network

文献 [22] 提出了一种基于相对增益分析的换热网络旁路设计法, 该法虽然在换热网络旁路设置中考虑了全部状态变量的可控性, 但是需反复求解换热网络的相对增益阵, 难以应用于复杂换热网络。并且, 相对增益阵的求取是基于某一稳态工况, 工况较大变化后不能保证状态变量的可控性。以图 1 中脱盐前原油换热网络的原油支路 2 为例, 当旁路数目限制为 2 个时, 文献 [22] 通过相对增益阵的方法求得旁路位置在 E1205 上与本方法求解结果相同。作者基于换热网络的结构分析, 不依

赖于特定工况, 通用性更强, 且计算相对简便。

罗雄麟等^[14]提出的一种以总费用最小为目标的多次优化旁路设置法, 但其对可控性考虑并不充分且缺乏理论依据。针对同一个换热网络, 该法与本文方法的旁路设置结果对比如表 5 所示。可见, 基于结构可控性的旁路优化设计法能保证换热网络具有更高的可控性, 在相同的设备投资费用下可使换热网络的状态可控率大幅提升。因而, 基于结构可控性的旁路优化设计方法一方面可以从控制理论的角度论证旁路优化设计结果的可控性, 另一方面

表 5 多次优化法与基于结构可控的旁路优化设计对比

Table 5 Contrast of bypass designs between stepwise optimization method and optimal design based on structural controllability

Method	Bypass location	Number of controllable states	Percent of controllable states/%
stepwise optimization method	E1104,E1202	24	60
optimal design based on structural controllability	4 bypasses;E1104,E1206,E104,E105	40	100
	3 bypasses;E1104,E1206,E105	38	95
	2 bypasses;E1103,E1205b	35	87.5

可以将该方法与多次优化等其他旁路优化设计方法相结合，从而得到兼顾经济性与可控性的换热网络旁路优化设计。

5 结 论

从控制理论的角度，结合结构可控性进行换热网络旁路控制结构的设计。在换热网络结构特性分析的基础上，兼顾可控性与经济性提出了从结构可控性角度优化设置换热网络旁路的方法。

(1) 基于结构可控性的换热网络旁路优化设计应以控制结构强度和控制信道冗余度为优化目标。

(2) 从结构上分析换热网络的可控性，避免了复杂的建模计算，并且具有不依赖特定工况的全局性，适用于复杂换热网络的旁路优化设计。

(3) 提出在可控性要求较高时，实现设置最少的旁路满足全部状态的可控性要求；在旁路数目受限时，能够找到最佳的旁路位置，使换热网络中尽可能多的状态可控，从而保证网络具有较高的可控性和可操作性。

(4) 基于结构可控性的换热网络旁路优化设计方法可以从控制理论的角度论证旁路优化设计结果的可控性，并且可以清晰、明确地分析得出换热网络中各状态变量的可控性。

符 号 说 明

- A_S ——状态信息结构阵
- B_S ——控制信息结构阵
- P_{AB} ——状态结构可控性矩阵
- $\bar{P}_{AB}$ ——状态控制信息结构冗余阵
- p_{AB} —— P_{AB} 阵中的元素
- r_{AB} ——状态控制信道冗余度
- β ——加权系数
- Γ ——旁路选择阵
- λ ——旁路设置标志量，0-1 变量

上角标

- n ——状态个数
- r ——潜在旁路个数

下角标

- i ——第 i 个状态
- j ——第 j 个潜在旁路

References

[1] Philipp Ernst, Georg Fieg, Luo Xing. Efficient synthesis of large-scale heat exchanger networks using monogenetic algorithm [J]. *Heat Mass Transfer*, 2010, **46** (10): 1087-1096

[2] Ni Jin (倪锦), Cui Guomin (崔国民), Jiang Hui (姜慧). Flexibility identification and operation optimization based on bypass adjustment of heat exchanger networks [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2010, **29** (1): 17-24

[3] Hernández S, Balcazar-López L, Sánchez-Márquez J A, González-García G. Controllability and operability analysis of heat exchanger networks including bypasses [J]. *Chem. Biochem. Eng. Q*, 2010, **24** (1): 23-28

[4] Saboo A K, Morari M, Woodcock D C. Design of resilient processing plants (Ⅷ): A resilience index for heat exchanger networks [J]. *Chem. Engng. Sci.*, 1985, **40** (8): 1553-1565

[5] Swaney R E, Grossmann I E. An index for operational flexibility in chemical process design (Ⅱ): Computational algorithms [J]. *AIChE J.*, 1985, **31** (4): 631-641

[6] Papalexandri K P, Pistikopoulos E N. Synthesis and retrofit design of operable heat exchanger networks (Ⅰ): Flexibility and structural controllability aspects [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1994, **33** (7): 1718-1737

[7] Papalexandri K P, Pistikopoulos E N. Synthesis and retrofit design of operable heat exchanger networks (Ⅱ): Dynamics and control structure considerations [J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 1994, **33** (7): 1738-1755

[8] Veerayut Lersbamrungsuk, Thongchai Srinophakun. Control structure design for operation of heat exchanger networks [J]. *AIChE J.*, 2008, **54** (1): 150-162

[9] Glemmestad B, Mathisen K W, Gundersen T. Optimal operation of heat exchanger networks based on structural information [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, **20** (2): 823-828

[10] Zhang Junfeng (张俊峰). Study on the HEN bypass design

- and optimization control of operation pinch point [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2006
- [11] Sun Lin (孙琳), Luo Xionglin (罗雄麟). Advances in analysis and design of heat exchanger networks control [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2008, **27** (8): 1143-1148
- [12] Boyaci C, Uztürk D, Konukman A, Akman U. Dynamics and optimal control of flexible heat-exchanger networks [J]. *Computers Chem. Engng.*, 1996, **20**: 775-780
- [13] Uztürk D, Akman U. Centralized and decentralized control of retrofit heat-exchanger network [J]. *Computer Chem. Engineering*, 1997, **21**: 373-378
- [14] Luo Xionglin (罗雄麟), Sun Lin (孙琳), Zhang Junfeng (张俊峰). Optimal design of bypass location on heat exchanger networks [J]. *Journal of Chemical Industry and Engineering (China)* (化工学报), 2008, **59** (3): 646-652
- [15] Lisa Hopkins, Paul Lant, Bob Newell. Output structural controllability—a tool for integrated process design and control [J]. *J. Proc. Cont.*, 1998, **8** (1): 57-68
- [16] Fan Wenxue (范文雪). Application of analytical method of system structure controllability on control of distillation process [J]. *Automation in Petro-Chemical Industry* (石油化工自动化), 2000 (4): 18-20
- [17] Varga E I, Hangos K M, Szigeti F. Controllability and observability of heat exchanger networks in the time-varying parameter case [J]. *Control Eng.*, 1995, **3** (10): 1409-1419
- [18] Boukhobza T, Hamelin F. State and input observability recovering by additional sensor implementation: a graph-theoretic approach [J]. *Automatica*, 2009, **45**: 1737-1742
- [19] Tu Xuyan (涂序彦). Large System Cybernetics [M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunications Press, 1994
- [20] Luo Xionglin (罗雄麟). Chemical Process Dynamics [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004
- [21] Mathisen, Skogestad K W, Wolf E A. Controllability of heat exchanger networks [C]. USA: AIChE Annual Meeting, 1991: 152
- [22] Luo Xionglin (罗雄麟), Bai Yujie (白玉杰), Hou Benquan (侯本权), Sun Lin (孙琳). Optimal design of bypass location on heat exchanger networks based on relative gain array analysis [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2011, **62** (5): 1318-1325
- [23] Jin Zunlong (靳遵龙), Dong Qiwu (董其伍), Liu Minshan (刘敏珊). Synthesis of heat exchanger networks in consideration of fouling effects [J]. *Journal of Zhengzhou University: Engineering Science* (郑州大学学报), 2010, **31** (3): 25-28
- [24] Li Zhihong (李志红). Method for incorporation of controllability in heat exchanger network synthesis by integrating mathematical programming and knowledge engineering [J]. *Chem. Eng.*, 2002, **10** (6): 711-716
- [25] Wu Dan (吴丹), Wu Ziyang (吴子燕), Yang Haifeng (杨海峰), Qin Xiaowen (覃小文). Optimal sensor placement based on effective two step arrangement approaches [J]. *Journal of Xihua University* (西华大学学报), 2008, **27** (2): 48-52
- [26] Yin Jun (尹君), Xue Fuzhen (薛福珍). Research on improved genetic algorithm and its applications in multivariable decoupling control [J]. *Control and Instruments in Chemical Industry* (化工自动化及仪表), 2008, **35** (2): 16-20
- [27] Tang Shaoxian (唐少先), Chen Zhi (陈治). Research on improved genetic algorithm [J]. *Computer and Modernization* (计算机与现代化), 2008, **12**: 12-14

附录

A 实例原油换热网络的信息结构阵 $\mathbf{A}_s$

$$\mathbf{A}_S = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_2 \\ \mathbf{A}_3 & \mathbf{A}_4 \end{bmatrix}, \text{ 其中}$$

[illegible]

[illegible]

[illegible]

