

低灵敏度换热网络的旁路优化设计

沈颖达, 孙琳, 罗雄麟

(中国石油大学自动化研究所, 102249, 北京)

摘要: 针对过程系统中低灵敏度换热网络设计与旁路优化控制的协调问题,提出了一种兼顾控制性能要求的低灵敏度换热网络旁路优化设计的低灵敏度与控制性能集成优化方法。首先通过计算机模拟,对换热网络旁路控制性能和换热网络柔性进行分析,发现系统柔性越好则控制性能越差,两者是竞争关系;然后,通过关系图分析给定换热网络柔性、控制性能与经济特性三者之间的关系,采用混合整数非线性优化方法进行旁路优化设计;进而利用工艺设计与控制的集成优化思想,根据动态仿真的约束破坏量来反馈修正稳态优化的约束,进行稳态优化设计;最后得到同时满足工艺设计要求和控制性能约束的换热网络经济最优方案。仿真实验结果表明:相比于换热网络旁路开度多次优化设计方法,采用低灵敏度与控制性能集成的优化方法,换热网络的柔性虽有降低但控制性能提升了约35%,总费用也显著下降,能够实现在满足系统柔性与控制性能要求的前提下,有效提升换热网络经济性能的目标。

关键词: 过程系统;计算机模拟;换热网络;旁路;优化设计

中图分类号: TQ025 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)04-0142-07

Bypass Optimal Design of Heat Exchanger Networks with Low Sensitivity

SHEN Yingda, SUN Lin, LUO Xionglin

(Research Institute of Automation, China University of Petroleum, Beijing 102249, China)

Abstract: An optimization method considering both low sensitivity and control performance is proposed to balance the design of the flexible heat exchanger network (HEN) and the bypass optimal control performance in the process system. First, the bypass control performance and HEN flexibility are analyzed via simulation, and the conclusion is drawn that better HEN flexibility leads to worse control performance and the relationship between them is competitive. Then, the relationships among flexibility, control performance and economic characteristics are analyzed through graphical analysis. A mixed integer nonlinear optimization method is applied to bypass optimal design. Integrated optimization of process design and optimal control is employed, while the constraint damage amount of dynamic simulation is taken as the feedback to correct steady-state optimization constraints. Finally, the steady-state optimization design is conducted again to obtain the most economical solution that meets the requirements of process design and constraints of control performance at same time. Simulation results show that the control performance of the HEN is improved by about 35% and the total cost decreases dramatically after the optimization. The proposed method achieves the goal of effectively improving the economic characteristic of HEN in the condition of meeting both flexibility and control performance

requirements of the system.

Keywords: process system; computer simulation; heat exchanger network; bypass; optimal design

换热网络普遍存在于大型工业过程能量交换系统中,起到能量回收和节能降耗的作用。自20世纪60年代起,换热网络综合问题的研究逐步引起学者的重视^[1]。换热网络的最优综合一般以技术经济指标为目标,但在实际过程中设备老化和外来扰动等不确定因素众多,当出现操作条件改变或者系统参数偏离设计值等情况时,技术经济指标随之偏离最优值,无法保证持续节能。学者们针对工况变化的情况分别从工艺设计和优化控制两个角度入手,对换热网络进行了大量研究。

低灵敏度换热网络最优综合从工艺设计角度出发,以工艺运行稳定性为研究点。一些研究者提出了低灵敏度换热网络设计方法^[2-10],包括弹性和柔性设计、分析等方法,这些方法能够从设计上适应各种变化工况,克服参数和工况稍偏离设计值带来的影响。但是,这些方法通常侧重研究操作条件改变对换热网络经济性的影响,未考虑具有干扰波动的动态过程以及换热网络的控制性能,不涉及在线优化。旁路优化控制作为实现换热网络在线优化和实时调节的主要有效手段,可以在保持原来的换热网络物流匹配条件下提高系统的控制自由度,切实有效地减少系统的公用工程消耗量,并确保整个网络具有较好的控制性能。众多学者对换热网络旁路优化控制领域进行了深入的探究,并提出了一些旁路优化设计和优化控制方法^[11-12],但这些方法一般针对给定换热网络进行,且不考虑对系统工艺设计的影响。

工艺与控制集成设计的方法在设计之初就对过程的工艺要求和控制性能进行统一的考虑,进行系统工艺设计,同时进行控制系统的设计。目前,工艺与控制集成优化设计的研究以国外为主。Perkins等在化工过程系统工程领域就控制和工艺集成优化设计做了大量研究工作,并提出了求解框架和方案^[13],能够较好协调工艺要求与控制要求。许锋等通过将2个优化目标进行折中处理的方法^[14-16],对催化裂化装置进行了集成设计,使设计既能满足工艺要求,又能满足控制要求。

为解决过程系统中柔性换热网络设计与旁路优化控制的协调问题,本文借鉴化工领域工艺与控制集成优化设计的经验和思路,对换热网络的工艺设

计低灵敏度要求和优化控制高灵敏度要求的关系进行分析和权衡,在设计之初考虑控制的影响,提出一种基于柔性换热网络的旁路优化设计的灵敏度与控制性能集成优化方法。

1 基于旁路优化控制的换热网络柔性分析

1.1 换热网络的工艺设计与优化控制要求

当操作条件及部分参数发生变化时,换热网络的柔性越好(灵敏度越低)越有利于网络持续保持较优的操作性。从优化控制的角度来看,则是控制变量相对于目标物流出口温度的灵敏度越高,其控制效果越好。为保证控制效果,优化控制常以高灵敏度为目标。因此,为提高换热网络的控制效果有必要在低灵敏度换热网络最优综合中兼顾其优化控制的高灵敏度要求。由于换热网络的控制性、经济性以及灵敏度之间存在相互影响,因此为了定量分析,这里换热网络总费用为 C ,柔性指标为 F ,控制性能指标为 I ,具体说明如下。

考虑将技术经济指标 C ,即换热网络的投资费用和操作费用之和作为换热网络经济特性,具体表征如下

$$C = C_r + C_e \quad (1)$$

式中: C_r 表示当前时刻公用工程费用; C_e 表示设备投资费用。假设加热蒸汽费用为 C_H ,冷却水冷却费用为 C_C ,网络运行周期为 T ,则公用工程累积费用 C_r 可用下式计算

$$C_r = \int_0^T (Q_H C_H + Q_C C_C) dt \quad (2)$$

假设网络内有 q 个换热器,第 i 个换热器的换热面积为 A_i ,则设备投资费用 C_e 可用下式计算

$$C_e = \sum_{i=1}^q (aA_i^b + c) \quad (3)$$

式中: a 、 b 、 c 是跟设备材质、市场状况有关的常数,一般情况 $0 \leq b \leq 1$ 。

柔性系数能够很好地反映系统整体的灵敏度,被普遍用于换热网络设计。Grossmann提出的柔性指数 $F^{[7]}$ 可表示过程系统对不确定性影响的承受能力。一个系统往往包含设计变量 d 、状态变量 x 、控制变量 z 和不确定性参数 θ ,则换热网络中的平

衡方和约束条件如下

$$h(d, x, z, \theta) = 0 \quad (4)$$

$$g(d, x, z, \theta) \leq 0 \quad (5)$$

由于 x 可以表示为函数形式, 即 $x = (d, z, \theta)$, 所以式(5)可以由式(6)替代

$$f(d, z, \theta) \leq 0 \quad (6)$$

假设参数 θ 的标称值为 θ^N , 则正负偏差分别用 $\Delta\theta^+$ 和 $\Delta\theta^-$ 表示, 那么参数 θ 的上下限分别表示为 $\theta^N + \Delta\theta^+$ 和 $\theta^N - \Delta\theta^-$, 保持系统稳定可控情况下参数 θ 允许的最大变化范围为 $\theta^N + \delta\Delta\theta^+$ 和 $\theta^N - \delta\Delta\theta^-$, 柔性指数表示为

$$\left. \begin{aligned} F &= \max \delta \\ \text{s. t. } \chi(d) &= \max_{\theta \in T} \min_{z} \max_{j \in J} f_j(d, z, \theta) \leq 0 \\ T(\delta) &= (\theta; \theta^N - \delta\Delta\theta^- \leq \theta \leq \theta^N + \delta\Delta\theta^+) \\ \delta &\geq 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式中: θ^N 为标称值; T 为 θ 的变化范围。 F 的值越大说明灵敏度越小, 系统适应能力越强。

控制性能指标根据文献[14]选取控制器的绝对值偏差 (IAE) 作为目标函数来直观反映输出偏差的大小, 一般情况下 IAE 的值与控制性能关系相反, 即 IAE 值越小控制性能越好。为了更直接地体现操作变量再调控过程中的变化, 目标函数中增加了操作变量变化量, 用 I 表示控制性能指标 IAE, 具体计算公式如下

$$I = \sum_{j=1}^r \alpha_j \sum_{k=1}^N |e_j(k)| + \sum_{i=1}^m \beta_i \sum_{k=1}^N |\Delta u_i(k)| \quad (8)$$

式中: α_j 为第 j 个常规 PID 控制器的被控变量偏差绝对值积分的加权系数; β_i 为第 i 个常规 PID 控制器的控制作用变化量绝对值积分的加权系数; m, r 分别为操作变量和被控变量的维数。为了权衡各被控变量和操作变量对控制性能的影响, α_j 和 β_i 的取值一般与被控变量和操作变量的标称值的大小有关。 I 越小, 对应的控制器性能越高。

1.2 旁路设计与换热网络柔性分析

换热网络的控制性能、经济特性以及灵敏度之间存在着相互影响。以文献[17]中的换热网络为例, 换热网络包含 2 个换热器, 即换热器 E01 和换热器 E02, H1 表示热流, C1、C2 表示冷流, $T_i, T_{20}, t_{1i}, t_{2i}, t_{10}, t_{20}$ 分别表示对应位置的冷热流股温度, F, f_1, f_2 分别表示对应冷热流股流速, h1、h2 表示热公用工程, c1、c2 表示冷公用工程。文献[17]的全逆流换热网络流程如图 1 所示。本文通过改变换热器面积, 对换热网络的柔性、经济特性及控制性能三者的关系进行深入分析。

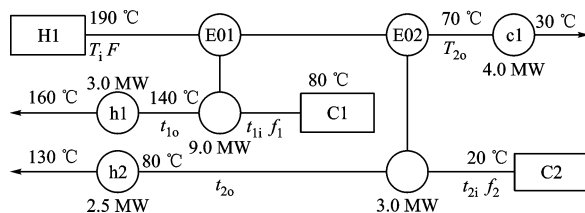


图1 文献[17]的全逆流换热网络流程图

考虑到本例中热公用工程费用远高于冷公用工程费用, 因此借鉴文献[12]提到的旁路设置经验, 本文在换热器热流端设置旁路, 这样设计比在冷流端设置旁路更经济。另外, 考虑到下游通路上的换热器存在耦合影响, 因此对于简单网络, 在通路终端换热器上添加旁路以便于分析。综上, 本文在换热网络的换热器 E02 热流端添加旁路控制, 用常规 PID 进行控制, 其换热网络结构如图 2 所示。图 2 中, 被控变量为换热器 E02 的出口温度 T_{20} , 通过调节阀门开度, 调节热流股 H1 进入换热器 E02 的流量以改变换热量。

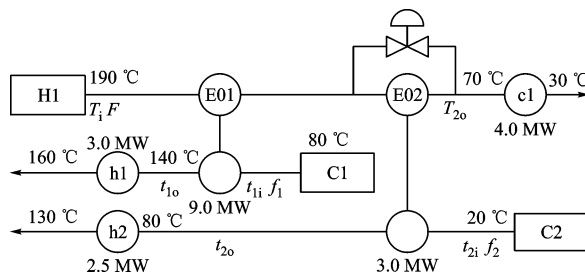


图2 增加旁路的全逆流换热网络

柔性与技术经济指标间的关系在众多热网络文献研究中已有较深入的分析^[2-10], 但往往在对换热网络进行旁路设计时通常忽略其对原有的换热网络的柔性的影响。为观察换热网络添加旁路控制前后系统柔性的差异, 根据上述得到的换热网络, 即在换热器 E02 热流端增设旁路, 以热流 H1 和冷流 C2 经过换热器 E02 后的温度和冷流 C1 经过换热器 E02 后的温度作为检测评估系统柔性的控制变量, 在不考虑冷热公用工程的调节作用的情况下, 分别得到有无旁路的换热网络柔性指数变化情况, 如图 3 所示。由上述研究可以得出以下结果。

(1) 对于无旁路的换热网络, 换热器面积裕量逐步增大, 柔性指数 F 随之增加; 当换热器面积超过 B 点时, 由于换热器面积过大, 导致换热网络的输出超出了操作要求范围, 系统柔性指数 F 反而开始下降。

(2) 在换热器 E02 热流端增设旁路后, 随着换热器 E02 面积裕量增加, 系统柔性指数始终大于无

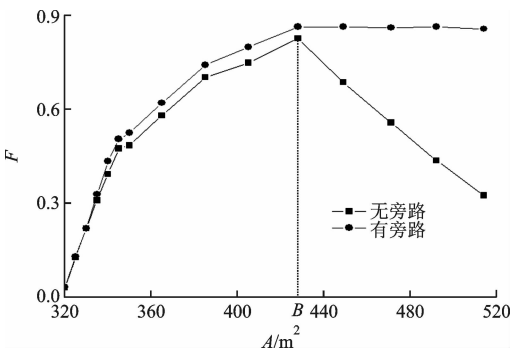


图 3 有旁路和无旁路系统柔性指数对比

旁路情况下的柔性指数值,说明在旁路控制的有效作用范围内,旁路控制能够增加系统操作的自由度,提升系统柔性。

(3)当面积裕量过大时,无旁路换热网络柔性下降,而有旁路换热网络通过旁路调节能够继续保持较好的柔性。在旁路控制的有效作用范围内,面积裕量过大仍然可以通过旁路控制得到柔性较高的系统。

1.3 控制性能、经济特性与柔性的关系

以图 2 为例,通过改变换热器 E02 的面积,得到换热网络控制性能指标与换热器面积的关系如图 4 所示,换热网络控制性能指标 I 约为 39,换热器面积约为 390 m² 时,存在明显的拐点。当换热面积再增大时,控制性能指标 I 快速变大,控制性能大幅下降。

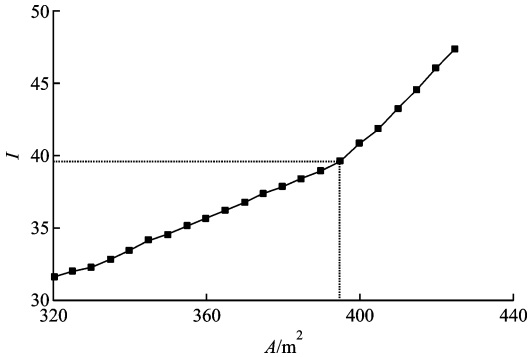


图 4 控制性能指标与换热器面积的关系

换热网络的整体柔性指数 F 越大,则系统的柔性越好,即系统灵敏度越低;控制性能指标 I 越小,则控制性能越好;总费用 C 越小,则表示经济性能越好。 F 与 I 的关系曲线如图 5 所示。从图 5 可以得出,控制性能指标 I 与柔性指数 F 正相关,即控制性能越好控制性能指标 I 越小,其柔性指数 F 越小。

从众多研究者对低灵敏度换热网络和换热网络旁路优化控制的研究中可知,柔性与经济特性之间均存在竞争关系。进一步考虑到换热网络经济特性,本文借鉴文献[3]改变换热器面积的方法,并将

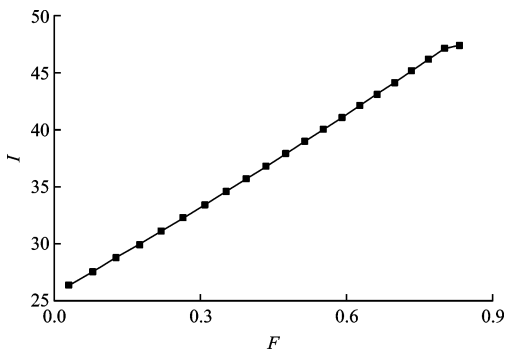


图 5 换热网络的柔性与控制性能的关系

其作为改变柔性等指标的措施,得到柔性指数 F 、控制性能指标 I 及经济性能指标 C 三者的关系,如图 6 所示。

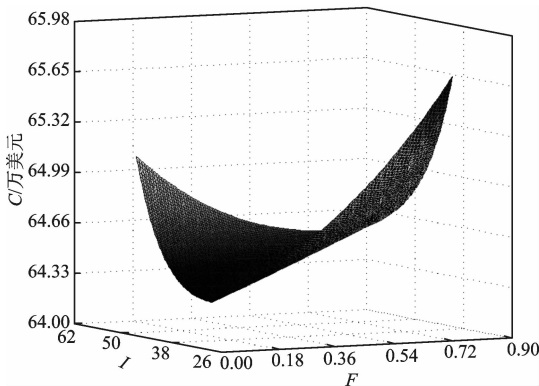


图 6 换热网络柔性、控制性及经济性三者关系图

上述分析结果进一步证明了换热网络柔性、控制性能和经济性能间存在明显的相互影响。对特定换热网络,具体考虑旁路优化设计的影响,分析控制性能对系统柔性的影响趋势,可得到在满足不同控制性能要求的情况下系统工艺设计的柔性可行解区间,从而可进一步分析得到特定网络结构下的同时满足柔性和控制性能要求的可行域,并以此指导换热网络的旁路优化设计,实现换热网络同时满足工艺设计柔性要求(低灵敏度要求)和优化控制对控制性能要求的经济最优方案。然而,对换热网络进行旁路设计时,旁路的数量、位置不同,会造成换热网络最终的柔性区间、总费用产生较大的差异。因此,有必要对换热网络中优化控制与工艺设计进行深入研究。本文基于优化控制与工艺设计集成优化思想,提出一种充分权衡 F 、 I 、 C 三者关系和工艺间关系的旁路优化设计方法。

2 低灵敏度换热网络旁路优化设计

在实际生产中,操作条件和参数尤其是结构热阻随运行时间不断变化,为保证持续节能必须设置

一定的控制回路。旁路优化设计可以用于解决已有网络的运行费用、改造费用和控制性能之间的矛盾。换热网络可以在不改变其原有网络结构的情况下,通过重新设计,增加网络控制的自由度,降低网络的总公用工程。罗雄麟等提出了可降低总费用的旁路优化设计方法^[12],该方法将总费用作为目标函数,并且旁路设计遵循物流经换热器发生相变时不宜设计旁路的原则。通常在换热器的冷、热端均可设置旁路,考虑到冷公用工程通常费用更低,所以在优化结果中若冷、热流端同时存在旁路,并且热端开度较低,则去掉热流端的旁路设计,以降低设备费用和操作费用。但是,该方法未能解决低敏度换热网络设计与旁路优化控制的协调问题。

本文在此基础上,根据化工行业常用工艺与控制集成优化方法,采用 0-1 变量描述旁路设置结构。通过将换热器冷、热流端是否存在旁路的问题固定为 0-1 优化变量,并将柔性和控制性能作为目标,原目标函数变为

$$\min J \quad \left. \begin{array}{l} J = (C, I, F) \end{array} \right\} \quad (9)$$

根据第一部分得到的柔性、控制性能与经济特性间的关系,应用 ϵ -约束法将原问题中控制指标 I 和 F 转化为小于参数 ϵ 的约束

$$I \leq \epsilon_1 \quad (10)$$

$$F \leq \epsilon_2 \quad (11)$$

经济性能作为新优化问题的目标函数,即

$$\min C \quad \left. \begin{array}{l} \text{s. t. } I \leq \epsilon_1 \\ F \leq \epsilon_2 \end{array} \right\} \quad (12)$$

其他约束同式(9)~式(12)。

根据动态仿真的约束破坏量来反馈修正稳态优化的约束,再进行稳态优化,两者迭代进行,直至稳态优化结果满足动态仿真约束。

低灵敏度换热网络旁路优化设计流程如图 7 所示,主要包括以下步骤。

(1)首先基于柔性换热网络,以式(9)为目标函数,进行稳态过程的旁路优化设计。

(2)判别优化得到的换热网络柔性是否满足约束:满足执行步骤(3);不满足,则重新进行优化。

(3)进行动态仿真,判断系统控制性能是否满足约束:满足执行步骤(4);不满足,将换热器面积作为优化变量,调整换热器面积以降低系统 I 值,提高控制性能;对于每次面积调整都要重新进行柔性计算和约束判别,即回到步骤(2)。

(4)得到旁路优化设计方案,输出相关值,结束。

用动态仿真的约束破坏量来反馈修正稳态约束,直至最终换热网络的旁路设计方案满足约束的情况下经济上最优。

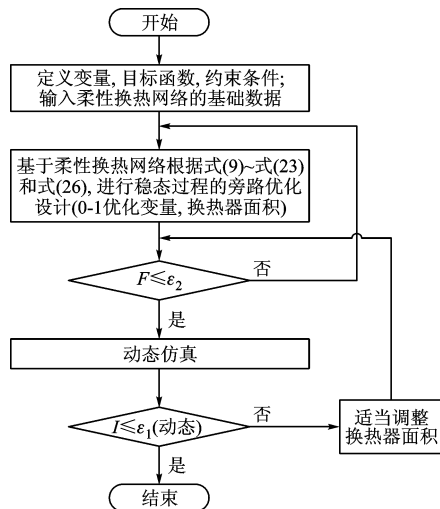


图7 换热网络旁路优化设计流程

3 示例分析

为了验证本文所提优化设计方法的有效性,以文献[17]中的换热网络为例,换热网络初始柔性指数为 0.87。

学者罗雄麟等提出了可降低总费用的旁路优化设计方法^[12],根据旁路设置经验和式(9)~(12)得到的换热网络,如图 8 所示。

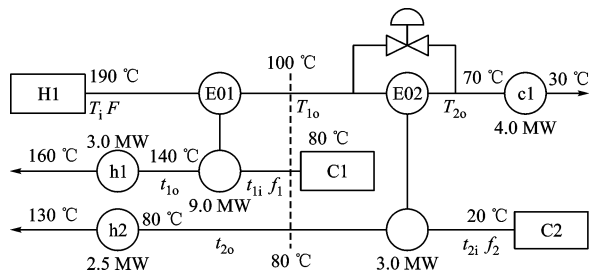


图8 文献[12]换热网络旁路优化设计结构

旁路可能设计的位置固定为 0-1 优化变量,将式(9)作为目标函数,应用 ϵ -约束法将原问题中控制指标 I 和 F 转化为小于参数的约束。前期工作中已经利用 gPROMS 软件搭建了换热网络仿真平台^[18],应用 gPROMS 软件进行动态仿真。将 gPROMS 软件的仿真程序进行封装,利用 Matlab 软件可以直接调用仿真结果,根据结果数据计算柔性指数 F 并进行条件判别,最后在 Matlab 软件中根据判别进行优化计算。

根据文献[3,7],通常换热网络柔性 F 的取值

越大越好,但考虑到经济性能,柔性需要适当退步。同样,旁路控制要求 I 越小越好,即控制性能越大越好,而控制性能和柔性之间存在竞争关系,同样需要权衡柔性和控制性能。本文根据仿真实验情况,为兼顾控制性能系统柔性与经济性能要求,参考图3和图6,取柔性指数 $F > 0.5$ 、控制性能 $I < 39$ 作为新优化问题的目标函数。

根据图7所示优化设计流程,用动态仿真的约束破坏量来反馈修正稳态约束,直至最终的换热网络旁路设计方案在满足约束的情况下经济上最优。本文得到设计方案如图9所示。

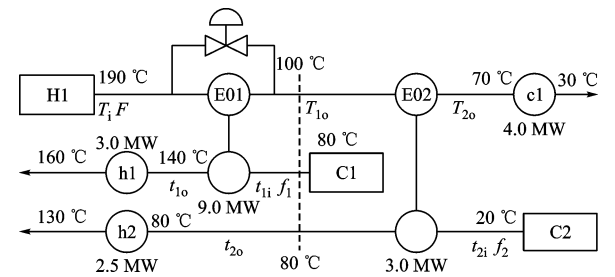


图9 本文换热网络旁路优化设计结构

采用2种旁路设计方法的数据如表1所示。从表1中可以看出,采用本文低灵敏度与控制性能集成优化方法得到的换热网络相比于根据文献[12]的旁路开度多次优化方法得到的换热网络有以下特点。

表1 2种旁路设计方法的数据

设计方法	I	F	C/美元
旁路开度多次优化法 ^[12]	47.35	0.86	650 071.65
本文集成优化方法	30.71	0.51	634 135.78

(1)采用本文方法的总费用下降了15 935.87美元,经济性能明显提高,优化设计效果明显。

(2)本文方法的控制性能 I 比文献[12]方法减少了35.14%。对于换热网络设计来说, I 越小,则控制性能越好,因此本文方法设计的换热网络的控制性能有了明显提升。

(3)换热网络旁路优化控制的在线调节作用,可以一定程度提高原系统柔性。虽然为权衡经济特性和控制性能,本文方法的柔性指数相对文献[12]方法有所降低,但本文方法可以在满足控制性能要求的同时,保证换热网络满足操作要求。

综合比较可知,低灵敏度与控制性能集成优化方法能够较好地权衡工艺设计和优化控制两者的关系,并能在满足柔性和控制性能的前提下,有效降低

换热网络总费用,提高经济性能。

4 结 论

换热网络的工艺设计与优化控制往往在2个完全分离的阶段进行,以往方法难以解决过程系统中低灵敏度换热网络设计与旁路优化控制的协调问题,因此有必要在换热网络旁路设计之初考虑经济特性、控制性能和系统柔性三者的关系,借鉴工艺与控制集成优化的思想进行换热网络的综合设计。

通过对示例分析,得到换热网络中增加旁路会对整个系统的柔性以及经济性能产生影响。进一步分析得到经济特性、控制性能以及柔性三者的三维关系,在此基础上将旁路可能设计的位置固定为0-1优化变量,基于混合整数非线性规划和集成优化设计思想进行旁路优化设计,通过动态仿真和稳态优化迭代优化,最终得到同时满足控制性能要求和工艺设计柔性要求且经济性好的最优旁路设计方案,有效地解决了过程系统中低灵敏度换热网络设计与旁路优化控制的协调问题。

参考文献:

[1] 霍兆义,尹洪超,赵亮,等. 国内换热网络综合方法研究进展与展望 [J]. 化工进展, 2012, 31(4): 726-731.
HUO Zaoyi, YIN Hongchao, ZHAO Liang, et al. Process and prospect for the methodology of heat exchanger network synthesis in China [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012, 31(4): 726-731.
[2] 刘宝兴. 换热器网络灵敏度研究 [J]. 化学工程, 1997, 25(5): 28-32.
LIU Baoxin. Study on sensitivity of heat exchanger network [J]. Chemical Engineering, 1997, 25(5): 28-32.
[3] 陈丙珍,欧阳平凯,何小荣,等. 低灵敏度换热网络最优综合 [J]. 石油炼制, 1982, 2: 18-24.
CHEN Bingzhen, OUYANG Pingkai, HE Xiaorong, et al. Optimal design of heat network with low sensitivity [J]. China Petroleum Processing Petrochemical Technology, 1982, 2: 18-24.
[4] SABOO A K, MORARI M. Design of resilient processing plants: IV Some new results on heat exchanger network synthesis [J]. Chemical Engineering Science, 1984, 39(3): 579-592.
[5] IERAPETRITOU M G. An efficient approach to quantify process feasibility based on convex hull [J].

- Computer Aided Chemical Engineering, 2001, 9(1): 407-412.
- [6] HALEMANE K P, GROSSMANN I E, SWANEY R E. Optimization strategies for flexible chemical processes [J]. Computers and Chemical Engineering, 1983, 7(4): 439-462.
- [7] GROSSMANN I E, FLOUDAS C A. Active constraint strategy for flexibility analysis in chemical processes [J]. Computers and Chemical Engineering, 1987, 11(6): 675-693.
- [8] UZTURK D, AKMAN U. Centralized and decentralized control of retrofit heat-exchanger network [J]. Computers and Chemical Engineering, 1997, 21: 373-378.
- [9] SABOO A K, MORARI M. Design of resilient processing plants: VIII A resilience index for heat exchanger networks [J]. Chemical Engineering Science, 1985, 40(8): 1553-1565.
- [10] JUHA A. Simultaneous synthesis of flexible heat exchanger network [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22(8): 907-918.
- [11] GLEMESTAD B, MATHISEN K W, GUNDERS-EN T. Optimal operation of heat exchanger networks based on structural information [J]. Computers and Chemical Engineering, 1996, 20(2): 823-828.
- [12] 罗雄麟, 孙琳, 张俊峰. 换热网络旁路优化设计 [J]. 化工学报, 2008, 59(3): 646-652.
LUO Xionglin, SUN Lin, ZHANG Junfeng. Optimal design of bypass location on heat exchanger networks [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(3): 646-652.
- [13] SAKIZLIS V, PERKINS J D, PISTIKOPOULOS E N. Recent advances in optimization-based simultaneous process and control design [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28(10): 2069-2086.
- [14] 许锋, 罗雄麟. 催化裂化装置再生器主风裕量的动态分析 [J]. 化工学报, 2008, 59(1): 126-134.
XU Feng, LUO Xionglin. Analysis of air flow rate margin in FCCU regenerator based on dynamic model [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2008, 59(1): 126-134.
- [15] 许锋, 罗雄麟. 基于动态优化的催化裂化装置再生器裕量分析与控制设计: I 动态优化的数学描述 [J]. 化工学报, 2009, 60(3): 675-682.
XU Feng, LUO Xionglin. Margin analysis and control design of FCCU regenerator based on dynamic optimization: I Mathematical description of dynamic optimization [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(3): 675-682.
- [16] 许锋, 罗雄麟. 基于动态优化的催化裂化装置再生器裕量分析与控制设计: II 求解方法与结果分析 [J]. 化工学报, 2009, 60(3): 683-690.
XU Feng, LUO Xionglin. Margin analysis and control design of FCCU regenerator based on dynamic optimization: II Solution and result analysis [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2009, 60(3): 683-690.
- [17] SUN L, LUO X L. Synthesis of multipass heat exchanger networks based on pinch technology [J]. Computers and Chemical Engineering, 2011, 35: 1257-1264.
- [18] 夏车奎, 罗雄麟, 孙琳. 基于全周期节能的有旁路换热网络裕量优化设计 [J]. 化工学报, 2012, 63(5): 1449-1457.
XIA Chekui, LUO Xionglin, SUN Lin. Margin optimal design of heat exchanger network with bypasses based on life cycle energy saving [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2012, 63(5): 1449-1457.

[本刊相关文献链接]

- 齐宝金, 李翔. 微米级余弦槽表面疏水性及冷凝传热实验研究. 2016, 50(5): 32-37. [doi:10.7652/xjtuxb201605005]
- 马源, 曹文瑾, 林梅. 矩形截面螺旋通道内的二次流流场特性. 2014, 48(8): 122-127. [doi:10.7652/xjtuxb201408021]
- 李春曦, 裴建军, 叶学民. 壁面微结构对超薄液膜流动特性的影响. 2013, 47(7): 40-46. [doi:10.7652/xjtuxb201307008]
- 叶学民, 沈雷, 李春曦. 分离压对含活性剂液膜流去湿过程的影响. 2013, 47(3): 96-101. [doi:10.7652/xjtuxb201303018]
- 蒋雪冬, 邱鹏, 张海亮, 等. 碳酸乙烯酯合成过程的反应吸收多场协同分析及数值模拟. 2012, 46(12): 92-97. [doi:10.7652/xjtuxb201212016]
- 慕韩锋, 冯霄. 用于化工系统分流结构的能值代数. 2012, 46(12): 98-102. [doi:10.7652/xjtuxb201212017]
- 王玉珍, 王建友, 吴志强, 等. 工艺参数对电去离子技术浓缩分离含镍离子溶液的影响. 2012, 46(5): 114-119. [doi:10.7652/xjtuxb201205020]
- 王琳琳, 李国君, 田辉, 等. T型微通道内气液两相流数值模拟. 2011, 45(9): 65-69. [doi:10.7652/xjtuxb201109012]
- 薛勇, 刘卫华, 高秀峰, 等. 机载惰化系统中空纤维膜分离性能的实验研究. 2011, 45(3): 107-111. [doi:10.7652/xjtuxb201103020]
- 丁晔, 冯霄. 多杂质氢系统网络设计. 2010, 44(8): 127-131. [doi:10.7652/xjtuxb201008025]

(编辑 刘杨 葛赵青)