

研究论文

# 有旁路换热网络全周期节能的动态优化 控制实现方法

罗雄麟<sup>1</sup>, 夏车奎<sup>1</sup>, 孙 琳<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国石油大学自动化研究所, 北京 102249; <sup>2</sup> 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:** 为了实现换热网络的全周期持续节能, 在网络上设置旁路从而增加其控制自由度, 同时设计一定的裕量来提供优化控制的操作空间。为了较好地利用旁路调节和裕量空间, 提出一种基于换热网络动态模型的在线优化控制方法, 巧妙地结合原有常规控制回路, 不但扩大了优化控制的可行域, 并且满足原常规控制回路的精度要求。该方法以换热网络一定周期内的累积费用最小为目标函数, 同时考虑扰动对换热网络的影响, 在满足工艺条件的基础上, 求解最佳旁路开度, 以实现换热网络的持续节能。由于采用闭环校正、迭代计算和滚动优化的实施方法, 始终把优化建立在实际的基础上, 尽管它每次不一定能得到全局最优解, 然而使得实际控制结果达到最优。最后, 以某炼油厂的常减压脱盐前换热网络为具体的研究对象, 说明所提方法的有效性和使用前景。

**关键词:** 换热网络; 优化控制; 节能; 全周期; 旁路

**DOI:** 10.3969/j.issn.0438-1157.2013.04.030

**中图分类号:** TQ 021.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0438-1157 (2013) 04-1340-11

## A dynamic optimization control approach of life cycle energy saving for heat exchanger network with bypasses

LUO Xionglin<sup>1</sup>, XIA Chekui<sup>1</sup>, SUN Lin<sup>1,2</sup>

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

**Abstract:** In order to achieve sustainable energy saving of heat exchanger network in the life cycle, bypasses were set in the network to increase its control degree of freedom, while a certain margin was designed to provide operating space of optimal control. To better use bypass adjustment and margin of operating space, an optimal control approach method based on dynamic model of heat exchanger network was presented and combined with existing conventional control loop, not only expanding the feasible region of optimal control, but also meeting the accuracy requirements of the original conventional control loop. The cumulative cost minimization of heat exchanger network within a certain period was considered as the objective function, while considering the impact of disturbances on heat exchanger network. To meet the process conditions, the best bypass opening in the life cycle was solved in order to achieve sustained energy saving of heat exchanger network. Closed-loop correction, iterative and rolling implementation were adopted, and optimization was based on actual conditions. A global sub-optimal solution could only be arrived at every turn. However, the actual control result could achieve the optimum. Finally, a refinery's crude oil heat exchanger network was treated as the specific study object, illustrating the

2012-05-30 收到初稿, 2012-12-03 收到修改稿。

**联系人及第一作者:** 罗雄麟 (1963—), 男, 教授。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (20976193); 国家重点基础研究发展计划项目 (2012CB720500)。

**Received date:** 2012-05-30.

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

**Foundation item:** supported by the National Natural Science Foundation of China (20976193) and the National Basic Research Program of China (2012CB720500).

effectiveness and application prospect of the presented method.

**Key words:** heat exchanger network; optimization control; energy saving; life cycle; bypass

## 引 言

近十年来,随着炼油行业加工规模和产量的增大,新建炼油装置增加,加工深度也在增加,通过优化生产、开展能耗达标以及采用先进节能技术等措施来减少能耗就显得尤为重要。作为炼油装置能耗主要组成部分的常减压和催化裂化装置,其能耗之和约占炼油装置能耗的45%~50%。抓好这两套装置节能措施的落实,对整个炼厂节能降耗将起到主要作用<sup>[1-2]</sup>。而其中的换热网络是节能降耗的关键单元。

换热网络设计中,考虑过程不确定参数(包括工艺条件、设备条件、外来扰动)发生变化时为满足生产和操作要求需要在正常操作的标称设计值上增加一定的裕量。同时,为了增加换热网络的自由度可以在换热网络上增设旁路。裕量为换热网络的优化控制留下了操作空间,而旁路则作为优化控制的调节手段。

工业换热网络的运行周期大多为3年甚至更长时间<sup>[3]</sup>,把换热网络的整个运行周期称为全周期。由于换热器结垢老化是一个慢时变过程,换热网络在较长操作周期内,难以确定其换热过程的稳态工作点,从而使得基于稳态模型的优化方法不能对其进行有效地优化。对结构已定或正在运行的换热网络,如何利用裕量空间与旁路调节来改善换热设备在全周期内由结垢老化引起的性能下降,或换热网络中某些物流的流量、温度等发生变化时,要求其性能仍能满足工艺要求,并能在最优或接近最优的状态下运行,换言之,使得换热网络公用工程能量消耗在现有的换热设备的基础上接近最小,这就涉及到换热网络的优化控制问题。

对于换热网络的设计方法主要集中在夹点技术上,如今它已经发展成为换热网络设计的一个通用工具。因此,国内外的专家学者提出了很多基于夹点技术的换热网络优化控制方法。樊希山等<sup>[4]</sup>用传热温差贡献值和虚拟温度的方法计算操作夹点;Calandranis等<sup>[5]</sup>指出对于操作夹点,有其分界值,当变量在其限定范围内波动时,夹点不发生变化,如果超过这个分界值,夹点将发生“跳跃”现象;

Jezowski等<sup>[6]</sup>针对最小公用工程的换热网络受到物流热容流率干扰的情况,提出基于混合整数线性规划模型的计算换热网络所有可能夹点的方法;然而这些基于夹点技术的方法大多基于稳态模型,无法描述换热网络的动态操作过程。

对于现有换热网络的优化操作和控制主要包括控制结构的选择和在线优化算法的确定两方面内容。Westphalen等<sup>[7]</sup>指出最普通的换热网络控制系统结构包括:公用工程物流流量控制、分流比控制以及旁路控制。并采用启发式规则得出分流比不应作为过程控制的操作变量,而旁路控制的问题之一是如何权衡网络的经济效益和控制性能,选择合适的旁路位置。因而,目前对于换热网络的优化控制策略研究主要包括两种思路:控制性能指数分析法和旁路优化控制。控制性能指数分析的方法虽然考虑了过程的控制性能,但其可调变量只有冷、热公用工程,自由度小,不能用于换热网络的实时在线优化控制。而增设旁路可以增加网络控制的自由度,所以旁路优化控制成为研究者解决换热网络控制问题的重要方案。倪锦等<sup>[8]</sup>针对频繁扰动或运行性能影响严重的流体设置旁路,抑制了流体扰动作用的传递,在公用工程费用不变的基础上显著减少了公用工程的数目。Boyaci等<sup>[9]</sup>在此基础上,又提出了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通用的两种集中控制结构。

总之,换热网络优化问题是一个综合性的问题,针对这个问题罗雄麟等<sup>[10-14]</sup>提出一种换热网络在全周期内持续节能优化的新思路,指出对于现有换热网络的优化大致需要3个步骤:①旁路设置,基于夹点技术或结构可控原理,通过优化在换热网络上设置合理的旁路,增加控制自由度,为换热网络的持续节能提供操作手段;②裕量设计,基于有旁路换热网络的动态数学模型,在步骤①的基础上优化网络中各个设备的裕量,为换热网络的节能优化控制提供操作空间;③优化控制,在上两步的基础上,通过选择合理的在线优化控制结构和算法,有效地利用换热网络的裕量空间,通过旁路调节,最终实现换热网络在全周期内的持续节能优化,这也是本次研究的主要工作。

## 1 优化控制结构

换热网络的旁路可分为两类：一类是根据工艺条件用来精确地控制物流的出口温度，称为工艺控制，当某些换热器出口处并没有设置公用工程而此物流温度又需要被精确控制，则只能在换热器上设置旁路对其进行调节，一般这类旁路往往已存在常规控制回路，这里称为调节旁路；另一类是为增加换热网络控制自由度而设置的，这类旁路的主要作用是对换热网络进行优化调节，同时也是优化控制的主要调节手段，这里称为优化旁路。

在化工工艺过程中，优化器与常规控制通常互不影响，相对独立。这是因为常规控制与优化器不一定存在耦合关系，没有关联。即使存在耦合关系，如果优化器输出基本保持在稳态点附近，这样对常规控制的影响也非常有限。所以，以往在设计优化控制系统的过程中，通常只考虑富余的调节变量，而不考虑现有的常规调节回路。然而在换热网络优化控制过程中，由于结垢老化是慢时变过程，优化器输出在全周期范围内并不在一个固定的稳态点附近，而是随着结垢老化的程度而变化，且范围较大。同时，常规调节旁路和优化旁路又往往存在较强的耦合关系，因此有必要考虑常规控制回路与优化器之间的影响。

在优化过程中考虑对常规控制回路的影响，假设已知常规控制器的输出，一种简单的方法是在每个优化时刻，把当前常规控制的输出反馈给优化控制器。这种方法虽然简单易行，然而优化只是在常规回路的基础上优化，只能得到次优解。当前时刻输出也并不能精确表征下一个优化周期内的输出。另一种方法是把常规控制回路去掉，一并考虑到优化器中，但由于优化控制的周期一般较长，因此不能很好地抵御高频干扰。同时，一旦优化器失效，

原常规控制回路就失效了，导致系统不能满足基本工艺要求。为了改进以上问题，提出如图 1 所示的有旁路换热网络的在线优化控制结构。把常规控制输出一并考虑到优化器中，同时为了保证原常规控制回路的控制精度和可靠性，每步优化控制输出时保持原常规控制器输出值不变，同时与优化器的输出值相加一并送于调节旁路。这样，优化控制器的调节变量数增加了，扩大了可行域，可得更优解。常规控制器在优化器输出的基础上进行微调，以保证其控制精度，抵抗干扰。为了避免优化器输出对常规控制回路造成冲击，可在优化器输出减去常规控制器输出后再串入一个一阶惯性环节送给调节旁路，相当于一个滤波缓冲作用。优化器与常规回路控制器的周期不同，为了保持同步，如图 1 所示串入一个采样器和零阶保持器，采样周期与优化器的周期相同。考虑到模型的失配问题，把通过观测器测得的实际过程模型的参数等状态变量反馈给优化器，来校正优化模型。

常规控制的温度设定值是由工艺要求决定的常数，而优化器的约束往往是不等式约束，如果把常规控制的设定值转化为等式约束，优化器得到可行解会比较困难。所以把原常规控制回路的设定值送到优化器时改为围绕这个值附近的邻域，相当于转化为不等式约束的形式。同时还需要在已有约束的条件下，在优化器输出给调节旁路的值上额外增加输出约束，以保证常规控制回路在任何情况下都有可供调节的空间。

## 2 优化控制算法

以往对换热网络进行优化，往往基于稳态优化，而换热网络的设备老化是一个慢时变的过程，主要原因是结垢热阻逐渐变大。此时的换热网络数学模型是非线性的，其模型系数随着时间的变化而

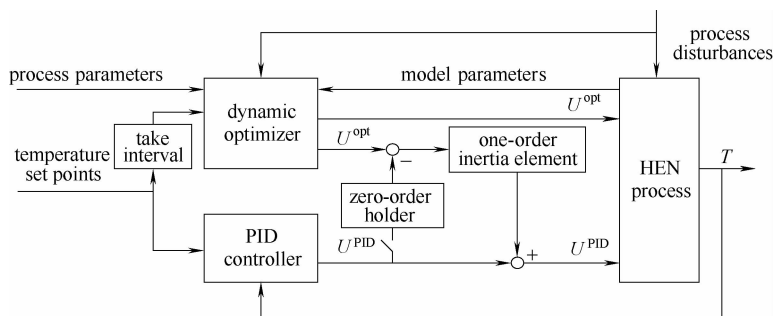


图 1 有旁路换热网络的优化控制结构

Fig. 1 Optimal control structure of heat exchanger networks with bypasses

变化。对于这种非线性系统，如果采用稳态优化，优化结果只是对当前时刻有效，并不能保证在整个优化控制时域内有效。所以，换热网络的持续节能优化问题是一个动态优化问题。

所谓动态优化问题（DOPs）是指适应度函数值函数、问题实例或者限制条件发生变化的优化问题<sup>[15]</sup>。动态优化问题定义如下

$$\text{DOPs} = \begin{cases} \min f(x, t) \\ \text{s. t. } x \in X(t) \subseteq S, t \in T \end{cases} \quad (1)$$

式中  $S$  是搜索空间， $S \in R^n$ ； $t$  是时间； $f(\cdot)$  是目标函数； $x$  是可行解； $X(t)$  是在  $t$  时间可行解集合。动态优化的目标就是寻找一系列随时间变化的最优个体的集合  $X^* = \{x_i^*\}$ ， $t \in T$ ，同时满足  $f(x_i^*, t) \leq f(x, t)$ ， $\forall x \in X(t)$ 。当满足  $f(x, t) - f(x_i^*, t) \leq \epsilon$  时，可认为其为最优解，其中  $\epsilon$  为给定的收敛判据。

## 2.1 优化问题描述

2.1.1 目标函数 换热网络的目标函数为公用工程费用或操作费用的函数。假设换热网络由  $m$  种冷流和  $n$  种热流参与换热；加热蒸汽费用为  $C_H$ ，冷却水冷却费用为  $C_C$ ；网络优化周期为  $P$ ；初始公用工程总费用为  $\bar{C}_r$ 。则公用工程费用增量  $\Delta C_r$  为

$$\Delta C_r = \int_0^P (Q_H C_H + Q_C C_C) dt - \bar{C}_r \quad (2)$$

目标函数

$$J = \min \Delta C_r \quad (3)$$

2.1.2 状态方程 换热网络的动态数学模型由换热器的数学模型贯序连接而成。换热器数学模型采用分布式建模，根据能量守恒，分别可得到管壳式换热器的壳程、管外壁、管内壁和管程的动态数学模型

$$\frac{\partial T_1(x, t)}{\partial t} = -\frac{m_1}{M_1} \frac{\partial T_1(x, t)}{\partial x} + \frac{n\pi d_o K_o}{M_1 c_{p_1}} [T_{wo}(x, t) - T_1(x, t)] \quad (4)$$

$$\frac{\partial T_{wo}(x, t)}{\partial t} = \frac{2n\pi\lambda(T_{wi} - T_{wo})}{M_w c_p \ln(r_2/r_1)} + \frac{n\pi d_o K_o}{M_w c_p} [T_1(x, t) - T_{wo}(x, t)] \quad (5)$$

$$\frac{\partial T_{wi}(x, t)}{\partial t} = \frac{2n\pi\lambda(T_{wo} - T_{wi})}{M_w c_p \ln(r_2/r_1)} + \frac{n\pi d_i K_i}{M_w c_p} [T_2(x, t) - T_{wi}(x, t)] \quad (6)$$

$$\frac{\partial T_2(x, t)}{\partial t} = \frac{m_2}{M_2} \frac{\partial T_2(x, t)}{\partial x} + \frac{n\pi d_i K_i}{M_2 c_{p_2}} [T_{wi}(x, t) - T_2(x, t)] \quad (7)$$

根据文献 [16-17] 中现场换热网络各油品的结垢热阻值，总结归纳得到结垢热阻随时间变化的经验公式为

$$R = at^b e^{ct} \quad (8)$$

式中  $R$  为结垢热阻， $\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ ； $t$  为时间， $\text{h}$ ； $a$ 、 $b$ 、 $c$  是与油品性质有关的常数。考虑管壁结垢热阻值的换热器总传热系数为

$$K(t) = \frac{1}{\left(\frac{1}{K_i} + R_i\right) \frac{d_o}{d_i} + \frac{\delta d_o}{\lambda d_m} + \frac{1}{K_o} + R_o} \quad (9)$$

根据换热网络流程图贯序连接以上换热器模型，见式(4)~式(7)。加上结垢、传热系数等方程，见式(8)和式(9)，可得整个换热网络的动态数学模型，由于其模型巨大，方程数众多且多为相似方程，为了更好地说明问题，把换热网络的过程状态方程统一为一般形式

$$f(x(t), \dot{x}(t), y(t), K(t), u(t), v) = 0, \quad t \in [0, t_f] \quad (10)$$

式中  $x(t)$  为微分变量，如换热器内部温度等； $y(t)$  为代数变量，如换热器出口温度、结垢参数、传热系数等； $K(t)$  为总传热系数； $u(t)$  为时变控制优化变量，如旁路开度； $v$  为常数量，如换热器面积、尺寸等； $t_f$  为整个换热网络过程的时域，称为全周期。

状态初始条件

$$I(x(0), \dot{x}(0), y(0), K(t), u(0), v) = 0 \quad (11)$$

2.1.3 约束条件

(1) 每个流股的热平衡 对于每个流股，进出换热网络的热量之差等于流股途经换热器的热量和流股所需公用工程之和，表示为

$$m_i c_{p_i} T_{\text{out}, i} - m_i c_{p_i} T_{\text{in}, i} = \sum_{j=1}^{N_C} Q_{i, j} + Q_i \quad (12)$$

$$m_j c_{p_j} T_{\text{in}, j} - m_j c_{p_j} T_{\text{out}, j} = \sum_{i=1}^{N_H} Q_{j, i} + Q_j \quad (13)$$

式中  $m$ 、 $c_p$ 、 $T$  分别表示物流的流量、比热容、温度； $N_C$  表示第  $i$  个冷物流上的换热器个数， $Q_{i, j}$  表示第  $j$  个热流向第  $i$  个冷流的传热量， $Q_i$  表示第  $i$  个冷流所需的公用工程； $N_H$  表示第  $j$  个热物流上的换热器个数， $Q_{j, i}$  表示第  $i$  个冷流向第  $j$  个热流的取热量， $Q_j$  表示第  $j$  个热流所需的公用工程；下角标 in、out 分别表示进、出口。

(2) 工艺条件约束 换热网络的出口温度根据工艺条件设定上下限，部分需要工艺控制的物流出口温度设定值也转化为不等式约束形式，约束方

程为

$$T_{\min,i} < T_{\text{out},i} < T_{\max,i} \quad (14)$$

$$T_{\min,j} < T_{\text{out},j} < T_{\max,j} \quad (15)$$

式中  $T_{\max,i}$ 、 $T_{\min,i}$ 、 $T_{\max,j}$ 、 $T_{\min,j}$  分别为冷、热物流出口温度的上下限。

(3) 旁路开度约束 考虑到旁路阀的尺寸, 同时为了保持合理的压降以及考虑到低流速会增加结垢速度, 使换热器加快老化, 因此去换热器的物流流量不能过低, 旁路开度存在一个上限<sup>[18]</sup>。这里, 取最大旁路开度  $u_{\max}=0.5$ 。旁路约束为

$$0 \leq u_k \leq u_{\max}, \quad k=1, 2, \dots, p \quad (16)$$

式中  $u_k$  为第  $k$  个旁开度, 共有  $p$  个旁路。

另外, 为了给常规控制回路留有适当的操作空间, 当优化控制器输出给原常规控制回路时, 其旁路开度增加一个额外的开度约束

$$\gamma \leq u_q^* \leq u_{\max} - \gamma \quad (17)$$

式中  $\gamma$  跟工艺条件、控制精度、旁路的可控能力有关, 一般取  $0 < \gamma < u_{\max}$ 。

## 2.2 在线优化算法

换热网络的优化控制目标是使换热网络在操作周期内满足工艺条件的基础上实现累积公用工程费用最小。由于换热网络的结垢、扰动以及工艺条件的变化, 单位时间内的公用工程费用也是变化的, 理论上存在一条理想的公用工程费率曲线, 使得换热网络在操作周期内累积费用最小, 把这条曲线称为优化轨迹  $z_r$ 。在优化控制操作前, 这条曲线是未知的。

在线优化算法就是求解出控制量  $u(t)$  使得系统所选目标函数最优。如图 2 所示, 在系统控制量作用到实际对象时, 由于存在模型失配和扰动, 实际对象的操作费率曲线  $z(t) \neq z_r(t)$ 。为了不使这种误差累积从而影响到优化控制效果, 每当优化控制开始前, 用当前系统的测量值和估计值之差来反馈校正优化模型。每步优化以当前系统状态作为初始状态, 假设  $t_0=0$ , 根据对象模型优化计算将来  $P$  时刻内系统的最优值, 分别得到控制变量和优化轨迹为  $u^1(t)$ ,  $z_r^1(t)$ ,  $t \in [t_0, P)$ , 其中  $P$  为优化时域。控制时域  $L \leq P$ , 令系统控制变量  $u(t) = u^1(t)$ ,  $t \in [t_0, L)$ 。在  $t_1 = t_0 + L$  时刻, 同上进行下一步优化。

在实际对象和优化模型之间建立反馈通道, 来修正动态优化模型。因为换热器的结垢参数是根据实验数据得来, 物流流量、性质、换热器材质等的变化都会对结垢参数产生影响, 所以换热网络的模

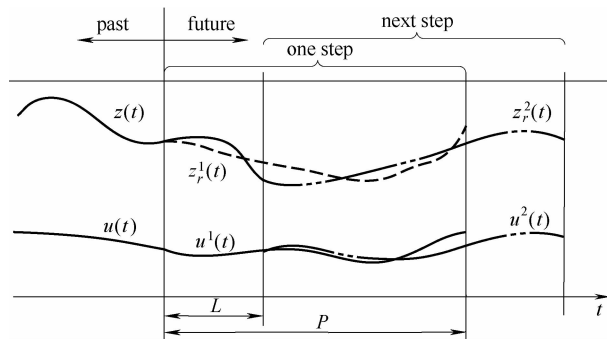


图 2 优化轨迹与优化控制过程

Fig. 2 Optimal track and optimal control process

型误差主要来源于结垢参数。结垢参数的变化最终会通过换热器的总传热系数来体现。换言之, 换热器模型的结垢参数也可以通过总传热系数来校正。

控制时域为  $L$ , 则可以将整个过程时域  $t_f$  分段为时间网格, 相当于差值为  $L$  的等差数列, 可表示为  $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_{N-1} < t_N = t_f$ 。

第  $k$  步优化, 初始时刻为  $t_k$ ,  $k=1, 2, \dots, N$ 。在优化模型内, 第  $k$  步总传热系数和第  $k-1$  步总传热系数分别为  $K_k(t)$ 、 $K_{k-1}(t)$ 。模型估计值和实际测量值之间的误差为

$$\Delta K_{k-1} = K_m(t_k) - K_{k-1}(t_k) \quad (18)$$

式中  $K_m(t_k)$  为  $t_k$  时刻的测量值。

则新的总传热系数

$$K_k(t) = K_{k-1}(t) + \alpha \Delta K_{k-1} \quad (19)$$

式中  $\alpha$  为柔化因子, 可取  $0 < \alpha < 1$ 。

模型状态方程

$$f(x(t), \dot{x}(t), y(t), K_k(t), u(t), v) = 0, \quad t \in [t_k, t_k + P] \quad (20)$$

初始状态

$$I(x(t_k), \dot{x}(t_k), y(t_k), K_k(t_k), u(t_k), v) = 0 \quad (21)$$

约束条件, 包括工艺条件约束、流股的热平衡约束、换热温差约束和输出约束等, 表示为

$$w_{\min} \leq w(x(t), \dot{x}(t), y(t), K_k(t), u(t), v) \leq w_{\max}, \quad t \in [t_k, t_k + P]$$

目标函数是换热网络的公用工程累积费用, 为公用工程费率的积分, 表示为

$$\min_{u(t), t \in [t_k, t_k + P]} J = \int_{t_k}^{t_k + P} \psi(x(t), \dot{x}(t), y(t), K_k(t), u(t), v) dt \quad (22)$$

同理, 第  $k+1$  步优化问题可表示为

$$\min_{u(t), t \in [t_{k+1}, t_{k+1} + P]} J = \int_{t_{k+1}}^{t_{k+1} + P} \psi(x(t), \dot{x}(t), y(t), K_{k+1}(t), u(t), v) dt \quad (23)$$

$$\text{s. t. } f(x(t), \dot{x}(t), y(t), K_{k+1}(t), u(t), v) = 0 \quad (24)$$

$$I(x(t_{k+1}),\dot{x}(t_{k+1}),y(t_{k+1}),K_{k+1}(t_{k+1}),u(t_{k+1}),v)=0 \tag{25}$$

$$w_{\min} \leq w(x(t),\dot{x}(t),y(t),K_{k+1}(t),u(t),v) \leq w_{\max} \tag{26}$$

第  $k+2, k+3, \cdots$  步优化如上依次求解。

优化控制算法采用滚动优化策略，在线反复进行优化计算，滚动实施，使模型失配、畸变、干扰等引起的不确定性得到及时的弥补，从而得到较好的动态控制性能。它不是采取一个不变的全局优化目标，而是采取滚动优化式的有限时域优化策略。其优化过程不是一次离线进行，而是反复在线进行的。尽管它只能得到全局的次优解，但由于采用闭环校正、迭代计算和滚动实施，始终把优化建立在实际的基础上，使控制结果达到实际上的最优。

2.3 优化求解

求解以上动态优化问题有很多种方法，这里采用 PSE 公司的 gPROMS 流程模拟软件求解。该软件中的优化器基于控制向量参数化方法，采用了打靶策略，可求解混合整数非线性动态规划问题。通过把动态优化问题的控制向量参数化，从而消除了控制向量，把动态问题转化成带有微分代数方程 (DAE) 约束的高维非线性规划 (NLP) 问题或混合整数非线性规划 (MINLP) 问题。

对 NLP 问题采用了 SRQPD 方法，该方法基于 SQP 算法，而面向整数线性规划 (MILP) 问题采用了基于外逼近的 OAERAP 方法，该方法基于 GNU 线性编程工具包 (GLPK)。

3 实例分析

以某炼油厂的常减压蒸馏装置脱盐前原油换热网络作为典型示例，其冷热物流基本参数如表 1 所示。

换热网络流程图如图 3 所示，图中“○”表示换热器，“□”表示物流源，“→”表示各物流以及流动方向，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。已知网络的设计夹点温差 20℃，夹点位置处冷流温度 85℃，热流温度 105℃，位置为换热器 E1101 和 E1201 后。在 gPROMS 软件中将换热器模型封装为通用模块，采用序贯模块法实现换热网络的流程模拟。通过仿真输出温度和实际输出温度的对比可得模型综合误差小于 2%，可见此模型的精度较高，能够说明实际问题。

旁路设置采用换热网络全状态可控的旁路优化设计方法<sup>[14]</sup>，以最少旁路数目和尽量大的控制结构冗余度为目标函数，运用分枝定界法优化求解，可得换热网络可控的最优旁路位置为换热器 E104、E105、E1104 和 E1206 处，并且都在冷流侧，分别用  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_4$  和  $K_5$  表示。其中换热器 E1202 的旁路  $K_3$  为换热网络自带。换热网络中各换热器的初始面积和裕量优化设计<sup>[19]</sup>后的面积增量如表 2 所示。

LAGO 和 LVCO 物流的出口温度需要旁路工艺调节，选定旁路  $K_2$ 、 $K_3$  为调节旁路，分别控制 LAGO 和 LVCO 的出口温度。其余  $K_1$ 、 $K_4$ 、 $K_5$  为优化旁路。采用上文提出的优化控制结构，现场换热网络控制结构图如图 4 所示。

由于结垢是一个慢时变过程，优化周期可取较长时间，这里取  $L=P=8\text{ d}$ ， $N=137$ 。把每个换热网络的分布参数模型分为 20 段集中参数模型，在本例中模型的代数变量 424 个，微分变量 3532 个，方程数 3956 个，初始变量 3532 个。连续优化变量 5 个，优化控制步长 8 d，离散为  $5\times 137=685$  个离散优化变量。换热网络 3a 的仿真优化时间约 3 d，

表 1 物流基本参数  
Table 1 Basic parameters of streams

| Material flow              | Title | Input temperature/℃ | Output temperature/℃ | Simulation output temperature/℃ | Flowrate /kg·s <sup>-1</sup> | Enthalpy /kW        |
|----------------------------|-------|---------------------|----------------------|---------------------------------|------------------------------|---------------------|
| crude oil                  | CRUDE | 55                  | 162                  | 162.85                          | 60.95                        | 2.8×10 <sup>4</sup> |
| light atmospheric gas oil  | LAGO  | 114                 | 86                   | 88.38                           | 3.93                         | 3613                |
| medium atmospheric gas oil | MAGO  | 200                 | 118                  | 118.16                          | 12.74                        | 2670                |
| heavy atmospheric gas oil  | HAGO  | 230                 | 120                  | 118.31                          | 10.16                        | 2701                |
| light vacuum circle oil    | LVCO  | 174                 | 110                  | 110.62                          | 8.31                         | 1261                |
| medium vacuum gas oil      | MVGO  | 222                 | 116                  | 114.77                          | 18.34                        | 4338                |
| heavy vacuum gas oil       | HVGO  | 218                 | 122.5                | 124.11                          | 4.24                         | 902                 |
| vacuum residual(1)         | VR(1) | 227.5               | 124                  | 122.03                          | 27.36                        | 6742                |
| vacuum residual(2)         | VR(2) | 205                 | 120.5                | 119.41                          | 27.36                        | 5622                |

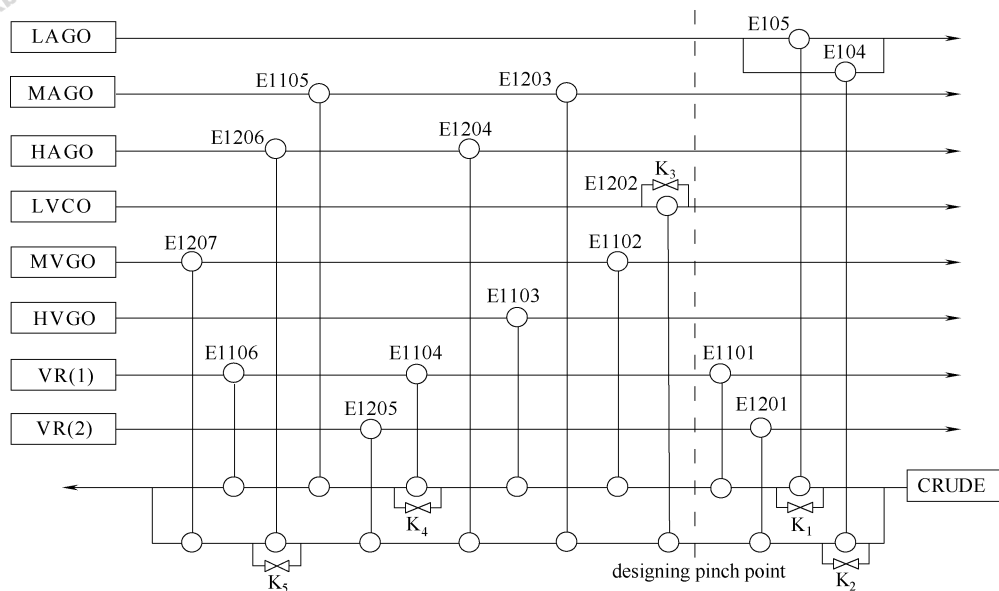


图 3 现场换热网络流程

Fig. 3 Flow chart of practical heat exchanger network

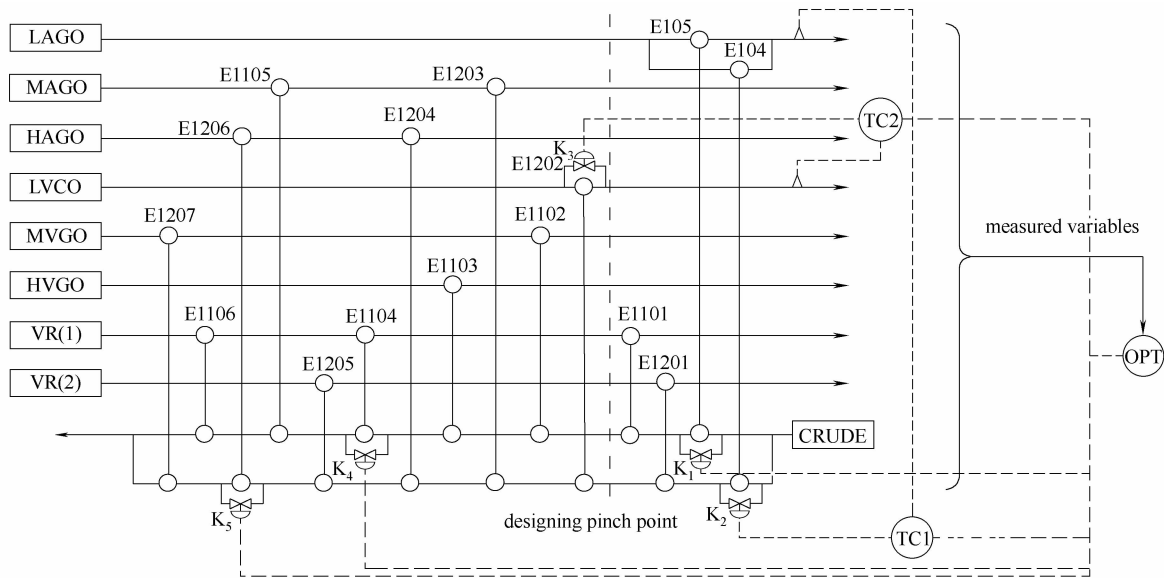


图 4 现场换热网络控制结构

Fig. 4 Practical heat exchanger network control structure

其中每步计算时间约 1860 s, 占优化控制时域 0.27% (实验计算机: CPU Intel E8500 3.16 GHz; 2G RAM)。依据上文所提的在线优化及控制实现方法, 可得换热网络全周期内的操作费率曲线, 如图 5 所示。本例中, 优化控制前 3 年公用工程费用增量为 1477.5 kCNY, 优化控制后 3 年公用工程增量为 584.0 kCNY, 共节省公用工程费用 893.5 kCNY。可见换热网络通过在线优化控制减少了操作费用, 尤其是在前中期, 旁路优化调节作

用非常明显。而到了后期, 由于结垢使得调节空间变小, 裕量被逐渐耗尽, 操作费用也越来越接近无优化控制时的情况。为了更加清楚地对比不同优化控制结构的控制效果, 选取换热网络全周期内的一小段时域来做详细的研究分析。如图所示, 在全周期 3 a 的时域内选择 100 d, 所选时间的初始点和终止点分别为 1.38 a 和 1.65 a。

换热网络的旁路开度变化如图 6 所示。可以看到, 旁路开度随着网络运行而逐渐变小。说明面积

表2 换热网络的优化设计裕量

Table 2 Optimal design margin of heat exchanger network

| Item  | Heat exchanger     | Initial area/m <sup>2</sup> | Margin increment/% |
|-------|--------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1     | E104 <sup>①</sup>  | 230                         | 93.20              |
| 2     | E105 <sup>①</sup>  | 230                         | 29.95              |
| 3     | E1101A             | 170                         | 30.66              |
| 4     | E1101B             | 170                         | 30.67              |
| 5     | E1102A             | 210                         | 42.10              |
| 6     | E1102B             | 210                         | 42.09              |
| 7     | E1103              | 170                         | -7.44              |
| 8     | E1104 <sup>①</sup> | 210                         | 97.65              |
| 9     | E1105              | 120                         | 87.63              |
| 10    | E1106              | 210                         | -48.53             |
| 11    | E1201A             | 170                         | 54.77              |
| 12    | E1201B             | 170                         | 54.79              |
| 13    | E1202 <sup>①</sup> | 125                         | 61.93              |
| 14    | E1203              | 120                         | 78.63              |
| 15    | E1204              | 90                          | 83.64              |
| 16    | E1205A             | 170                         | -22.32             |
| 17    | E1205B             | 170                         | -22.31             |
| 18    | E1206 <sup>①</sup> | 120                         | 98.32              |
| 19    | E1207              | 120                         | 23.42              |
| total | HEN                | 3180                        | 39.73              |

① stand for the heat exchangers with bypass.

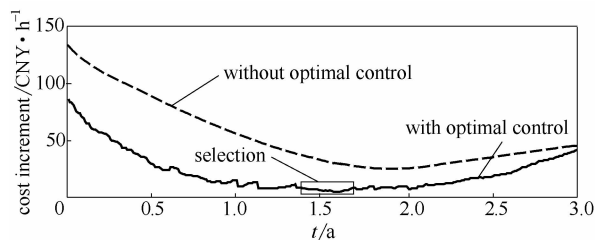


图5 全周期内换热网络费用

Fig. 5 Cost of heat exchanger network in life cycle

裕量随着结垢情况被间接地利用和释放。到了网络运行末期，由于裕量几乎被完全耗尽，其中优化旁路  $K_2$ 、 $K_4$ 、 $K_5$  完全关闭，从而失去其调节能力，而调节旁路  $K_1$ 、 $K_3$  在整个全周期内都留有可控调节的空间。通过此例，说明了所提出的基于换热网络全周期持续节能的在线动态优化控制方法是切实可行且有效的。

#### 4 控制结构分析

优化控制器与原有常规控制回路的结合方式对控制效果也有较大影响，包括对换热网络操作费用的影响和对原有常规控制回路控制精度的影响。因此，如图5截取换热网络全周期中的100 d对比以下3种优化控制结构的控制效果来分析说明。

(1) CASE0 有常规控制回路，采用图1所

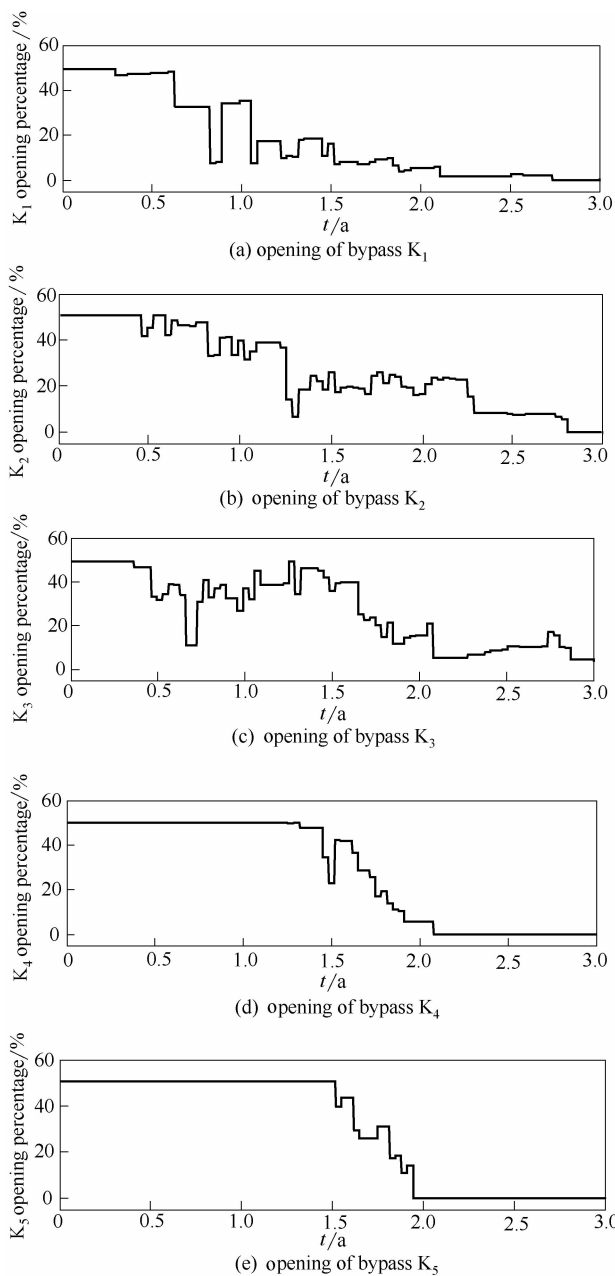


图6 全周期优化控制旁路开度

Fig. 6 Opening of bypasses with optimal control in life cycle

示优化控制结构。

(2) CASE1 无常规控制回路，5个旁路开度直接由优化器输出决定，如图7(a)所示。

(3) CASE2 3个优化旁路开度由优化器输出决定，不考虑常规控制回路对优化的影响，常规旁路调节处于随波逐流的状态，如图7(b)所示。

如图8所示，采用优化器与常规控制回路相结合的优化控制算法的换热网络，其操作费用最低。3种情况的优化控制效果排序为 CASE0 >

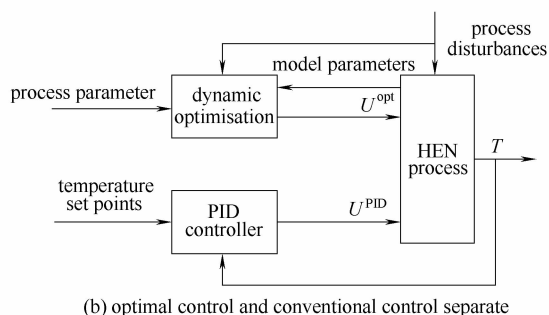
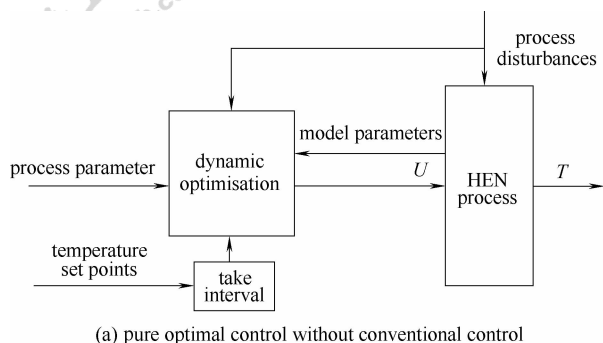


图 7 两种优化控制结构

Fig. 7 Two kinds of optimal control structures

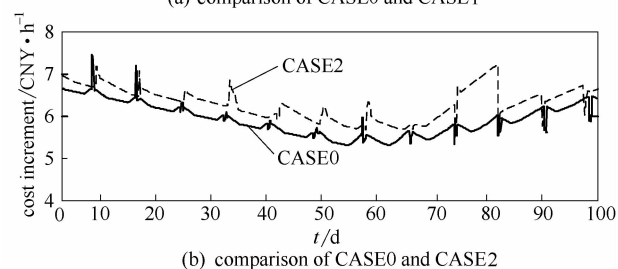
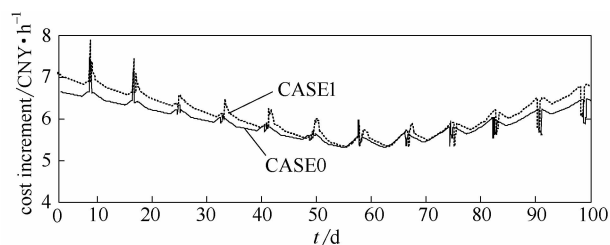


图 8 三种优化控制结构操作费用对比

Fig. 8 Cost comparison of three kinds of optimal control structures

CASE1>CASE2, 其 100 d 公用工程费用增量分别为 14.4 kCNY、14.6 kCNY 和 15.1 kCNY。可见, CASE0 和 CASE1 要远远好于 CASE2。这是因为 CASE0 和 CASE1 把常规控制旁路纳入到优化器中, 操作自由度大于 CASE2, 从而拥有更大的可行域, 可得更优解。CASE1 由于并没有底层的常规控制回路, 一方面使得换热网络部分出口温度的控制精度不能保证, 另一方面对操作费用也有

一定的影响, 相比 CASE0 情况下其曲线波动也相对较大。

实例中需要工艺控制的物流有两路, 分别为 LAGO 和 LVCO。物流 LVCO 的出口温度曲线如图 9 所示。LVCO 出口温度的设定值为 110.6℃, 由图可知, 3 种情况下该物流的出口温度均能满足控制要求, 这是由于除旁路  $K_2$  外其他 4 个旁路的开度大小对该物流的出口温度影响较小。为了方便优化计算, CASE0 和 CASE1 中对于常规控制回路的物流出口温度设定值取其附近邻域, 以不等式约束的形式送给优化器。所以如果没有底层常规控制回路, 其温度达不到设定值, 如图 9 中 CASE1 曲线所示。而 CASE0 和 CASE2 均有底层常规控制回路, 所以物流出口温度均能达到设定值。又因为 CASE2 中的常规控制器输入受到优化器输出的影响, 相比 CASE0 会有比较大的波动, 但从波动的绝对值上来看, 仍然能满足工艺条件要求。

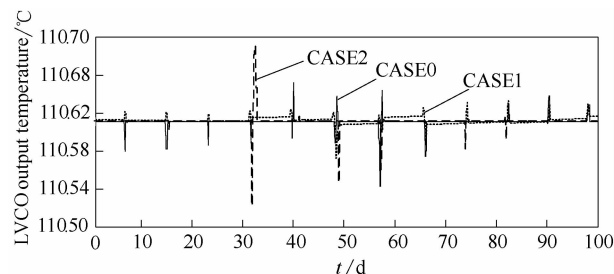


图 9 三种优化控制结构 LVCO 出口温度对比

Fig. 9 LVCO output temperature comparison of three kinds of optimal control structures

物流 LAGO 的出口温度曲线如图 10 所示。LAGO 出口温度的设定值为 88.4℃, 由图可知 CASE1 由于没有底层控制回路, 温度不能达到设定值, 只是在设定值附近波动。CASE0 和 CASE2 的温度均能到达设定值, 只是 CASE2 的波动比 CASE0 的波动要大。

通过 3 种不同优化控制结构的对比, 说明所提出的优化控制结构不但能进一步减少操作费用, 而且能满足原有常规控制回路的工艺精度要求, 达到较好的优化及控制效果。

## 5 结 论

为了较好地利用旁路和裕量, 提出一种基于换热网络动态模型的在线优化控制方法, 结合原有常规控制回路, 扩大优化控制可行域的同时满足原常

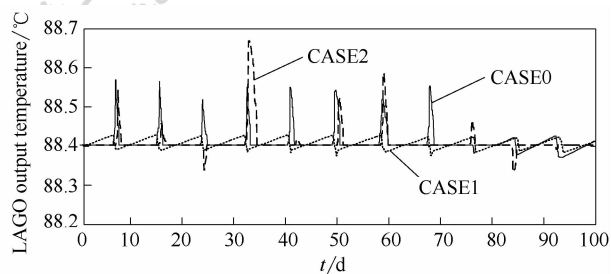


图10 三种优化控制结构LAGO出口温度对比

Fig. 10 LAGO output temperature comparison of three kinds of optimal control structures

规控制回路的精度要求。在满足工艺条件的基础上求解最佳旁路开度，实现换热网络的持续节能，并通过实例证明其有效性。主要有以下结论。

(1) 在换热网络上设置旁路，优化设计各个换热器的裕量，是换热网络进行在线优化控制的前提。在优化控制中考虑原有常规控制回路，可以增加优化控制的操作手段，从而扩大可行域，为求得更优解提供可能。

(2) 通过对比，表明工艺的精确控制离不开底层的常规控制回路，而为了更好地优化控制又需要考虑到常规控制与优化器之间的影响。所以，提出一种优化器和常规控制器相结合的方法，一定程度上兼顾两者，得到更好的优化控制效果。

(3) 提出一种旁路换热网络的在线优化算法，采用闭环校正、迭代计算和滚动优化的实施方法，始终把优化建立在实际的基础上，尽管它每次不一定能得到全局的最优解，然而可使实际优化效果达到最优。

### 符号说明

- $A$ ——换热器换热面积， $\text{m}^2$   
 $c_p$ ——比热容， $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $d_i$ ——管内径， $\text{m}$   
 $d_m$ ——当量直径， $\text{m}$   
 $d_o$ ——管外径， $\text{m}$   
 $K_i$ ——管内壁传热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $K_o$ ——管外壁传热系数， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$   
 $M$ ——物流的单位质量， $\text{kg}$   
 $n$ ——换热器内换热管数  
 $T$ ——温度， $^{\circ}\text{C}$   
 $t$ ——时间， $\text{s}$   
 $x$ ——管长， $\text{m}$   
 $\delta$ ——管壁的厚度， $\text{m}$   
 $\lambda$ ——管壁的热导率， $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

### 下角标

- $i$ ——管内  
 $o$ ——管外  
 $wi$ ——管壁内侧  
 $wo$ ——管壁外侧  
 $1$ ——冷流  
 $2$ ——热流

### References

- [1] Zheng Shigui (郑世桂). Further decreasing the energy consumption of petroleum refining enterprises [J]. *Petroleum Refinery Engineering* (炼油技术与工程), 2003, **33** (8): 50-54
- [2] Meng Xianling (孟宪玲). A review of energy saving in China's refining industry [J]. *Petrochemical Industry Trends* (当代石油石化), 2005, **13** (3): 31-35
- [3] Jiang Liben (蒋立本), Feng Xiao (冯霄), Ding Shenghua (丁生华). Analysis of retrofitting the process controlled by network pinch [J]. *Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities* (高校化学工程学报), 2001, **15** (2): 161-166
- [4] Fan Xishan (樊希山), Wang Shiguang (王世广), Kuang Guozhu (匡国柱), et al. Energy analysis in process system [J]. *Chemical Fertilizer Design* (化肥设计), 1998, **136** (60): 11-16
- [5] Calandranis J, Stephanopoulos G. Structural operability analysis of heat exchanger networks [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1986, **6** (9): 347-364
- [6] Jezowski J, Bochenek R, Jezowski A. Pinch locations at heat capacity flow-rate disturbance of streams for minimum utility cost heat exchanger networks [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2000, **20** (15): 1481-1494
- [7] Westphalen D L, Young B R, Svrcek W Y. Strategies for the operation of heat exchanger networks based on structural information [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, **20**: 823-829
- [8] Ni Jin (倪锦), Cui Guomin (崔国民), Jiang Hui (姜慧), Hu Xiangbai (胡向柏). Flexibility identification and operation optimization based on by-pass adjustment of heat exchanger networks [J]. *Chemical Industry and Engineering Progress* (化工进展), 2010, **29** (1): 17-24
- [9] Boyaci C, Uztürk D, Konukman A E S, et al. Dynamics and optimal control of flexible heat-exchanger networks [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1996, **20**: 775-780
- [10] 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
- [11] 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
- [12] 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
- [13] Sun Lin (孙琳), Chi Jinhao (迟进浩), Luo Xionglin (罗雄麟). The analysis of the overdesign and the bypass design for the heat exchanger [J]. *Computers and Applied Chemistry* (计算机与应用化学), 2008, **25** (11): 1369-1373
- [14] Hou Benquan (侯本权), Sun Lin (孙琳), Luo Xionglin (罗雄麟). Optimal design of bypass location on heat exchanger networks based on structural controllability [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2011, **62** (5): 1326-1338
- [15] Branke J. Evolutionary Optimization in Dynamic Environments [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 2002
- [16] Crittenden B D, Kolaczowski S T, Downey I L. Fouling of crude oil preheat exchangers [J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 1992, **70** (6): 547-557
- [17] Ministry of Petrochemical Industry Petroleum, Chemical Planning and Design Institute. The Heat Exchanger Calculation [M]. Beijing: Petrol Industry Press, 1979: 21-25
- [18] Uztürk D, Akman U. Centralized and decentralized control of retrofit heat exchanger network [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 1997, **21**: 373-378
- [19] Xia Chekui (夏车奎), Luo Xionglin (罗雄麟), Sun Lin (孙琳). Margin optimal design of heat exchanger network with bypasses based on life cycle energy saving [J]. *CIESC Journal* (化工学报), 2012, **63** (5): 1449-1458