

换热器设计裕量与旁路设计分析

孙琳, 迟进浩, 罗雄麟

(中国石油大学自动化研究所, 北京, 昌平, 102249)

摘要: 在换热器的冷端或者热端增设旁路, 可以增加控制的自由度, 有利于操作平稳。当换热器增设旁路时, 换热器设计裕量的大小对于旁路控制的有效性十分重要。目前, 做工艺设计时, 通常根据设计经验而确定设计裕量的大小, 使得换热器的面积裕量过大或设计裕量不足, 难以满足控制的要求。本文提出了一种定量求解换热器设计裕量的方法, 对比分析旁路设计时操作裕量、结垢裕量和控制裕量的大小, 为旁路优化控制奠定基础。最后结合实例证明定量求解设计裕量是十分必要的, 且设置旁路可以使换热器在保证操作平稳的同时总满足控制要求。对换热器设计裕量与旁路设计的分析为提高换热网络的控制效果, 节能降耗奠定了基础。

关键词: 裕量; 控制; 旁路

中图分类号: TQ 021.8

文献标识码: A

文章编号: 1001-4160(2008)11-1369-1373

The analysis of the overdesign and the bypass design for the heat exchanger

Sun Lin, Chi Jinhao and Luo Xionglin

(Research Institute of Automation, China University of Petroleum, Beijing, 102249, China, E-mail: sunlin666@yahoo.com.cn)

Abstract: Through placing the bypass on the cold side or/and hot side of the heat exchanger, the degree of freedom of control can be promoted, and the stability of operation can be improved. Once the bypass is placed, the overdesign becomes very important for the effectiveness of the control. The designer always decides the amount of overdesign based on the designing experience and the variation of the operation, so that the heat exchanger area may not meet the requirement of control. The method of solving the amount of overdesign is presented, the comparison of the operation, fouling and control overdesign was also analyzed, which is the basis of bypass optimal control. Combined with the example, the results showed the calculation of overdesign is necessary, and the control requirement can be satisfied, at the same time the stability of operation can be proved by the bypass. The analysis of the overdesign and bypass design is the basis of the control of the heat exchangers network.

Key words: overdesign, control, bypass

Sun L, Chi JH and Luo XL. The analysis of the overdesign and the bypass design for the heat exchanger. Computers and Applied Chemistry, 2008, 25(11):1369-1373.

1 引言

目前, 做工艺设计时, 通常因工艺条件的改变以及设备老化, 仅凭经验和设计准则来决定裕量的大小, 而对于为达到操作方便而留出设计裕量的大小, 并无自觉和定量的分析。沈静珠等^[1]归纳求解设计裕量大小的三种方法, 及其特点。王传芳等^[2]提出了换热器设计裕量包括操作裕量, 结垢裕量和控制裕量三部分, 定性分析了控制裕量的大小及其对换热器设计的重要性。控制裕量的确定必须与过程的动态分析和控制系统的设计相结合, 在传统的换热器控制中, 往往存在控制的自由度不足, 以及操作不稳定等问题。Mathisen et al.^[3]从控制的角度, 提出旁路优化设计可以增加换

热器控制的自由度, 降低能耗, 却没有考虑设置旁路对换热器裕量的影响。Konukman et al.^[4]提出优化求解相应设定弹性约束的换热器面积和旁路开度的方法, Uztürk 和 Akman^[5]求解设置旁路时满足换热网络柔性要求的换热器面积和旁路开度, 但是以上两种旁路设计方法都仅考虑了换热器的操作裕量而不包括结垢裕量和控制裕量, 可能导致换热器面积满足不了控制的需求。将换热器的设计裕量与旁路设计相结合的定量分析, 则很少见诸文献。

本文结合设计裕量的分析求解旁路设计时操作裕量、结垢裕量和控制裕量的大小。并通过实例计算和分析旁路设计时设计裕量的大小, 证明方法有效。最后结合实例计算,

收稿日期: 2008-01-24; 修回日期: 2008-04-23

作者简介: 孙琳 (1981—)。

对比分析换热器在运行周期中旁路开度的变化,及其控制效果。

2 设计裕量与旁路设计分析

2.1 设计裕量分析

为使换热网络满足操作条件和换热器持续积垢引起的热阻变化以及控制的要求,换热器设计中留有换热面积的裕量。设计值与刚投用设备正常操作的计算量的差值称为设计裕量,设计裕量包括操作裕量、结垢裕量和控制裕量三部分内容^[2]。

操作裕量指生产操作条件的最大变化而留出的裕量。而生产条件的变化往往与网络的柔性和弹性相关。

结垢裕量指换热器管壁结垢,导致换热效果变差而留出的裕量。结垢裕量与换热器的运行时间相关,检修周期越长,裕量越大。

控制裕量指实现换热器良好的控制性能而留出的裕量。控制裕量与设定值和干扰的变化幅度相关。

工艺设计时,通常根据操作条件和其他因素的定性分析而确定裕量的大小。设计裕量通常为换热面积的增大,换热面积不能随操作条件或其他因素的变化而变。然而常运行在设定操作条件下^[6],使得换热面积裕量处于闲置状态,若按原设计方案运行,则物流出口温度又会超出设定值。如果在换热器上增设旁路,改变旁路开度则可以调节设计裕量的大小,旁路开度越大则设计裕量越小,反之则越大。从而面积裕量不致闲置,满足操作的稳定性,并且增大了控制的自由度。

2.2 旁路设计分析

换热器的操作,不必考虑其控制性也不必改变载热体的流量以达到控制换热器^[7],如图1所示。换热器的操作条件多变化,例如物流的入口温度、流量、结垢热阻等,若不控制换热器换热,物流出口温度可能不满足生产要求,而单纯改变载热体的流量以求控制换热器,一会使载热体流量波动,操作不稳定;另外当载热体的出口温度也是控制目标之一时,或该载热体的流量和温度受上游操作的约束时,则可能导致换热器不可控,如图2a和图2b所示。因而在换热器上增设旁路,可以改变旁路的开度而调节物流的流量,从而控制换热器。当操作条件变化的时候,旁路的开度随之变化,但各物流的流量不变,被控物流的出口温度始终满足控制要求。如图2c所示,通过对比,可知旁路设计可以自由控制换热器,有利于控制换热器和稳定操作。

3 换热器旁路设计裕量分析

设计裕量的大小为操作裕量、结垢裕量和控制裕量三者之和,设置旁路时分别计算三者大小,从而确定裕量的大小。求解方法大体上分为三类:①极小—极大法求解^[8],即取最不利于该系统的界限值为参数,在最不利的条件下求系统的解;②统计决策理论的统计算法;③基于灵敏度分析概念,通过优化方法求解。其中①法简单,设计裕量结果安全可

靠,本文选择该方法求解三部分裕量。

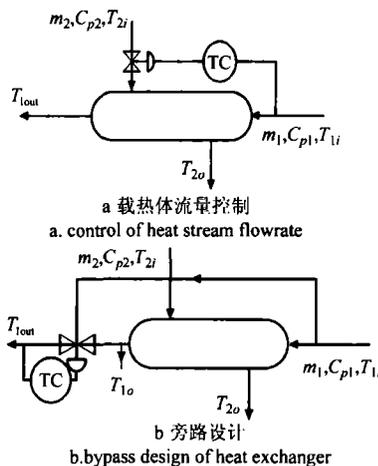


Fig. 1 The control scheme of heat exchanger.

图1 换热器控制结构示意图

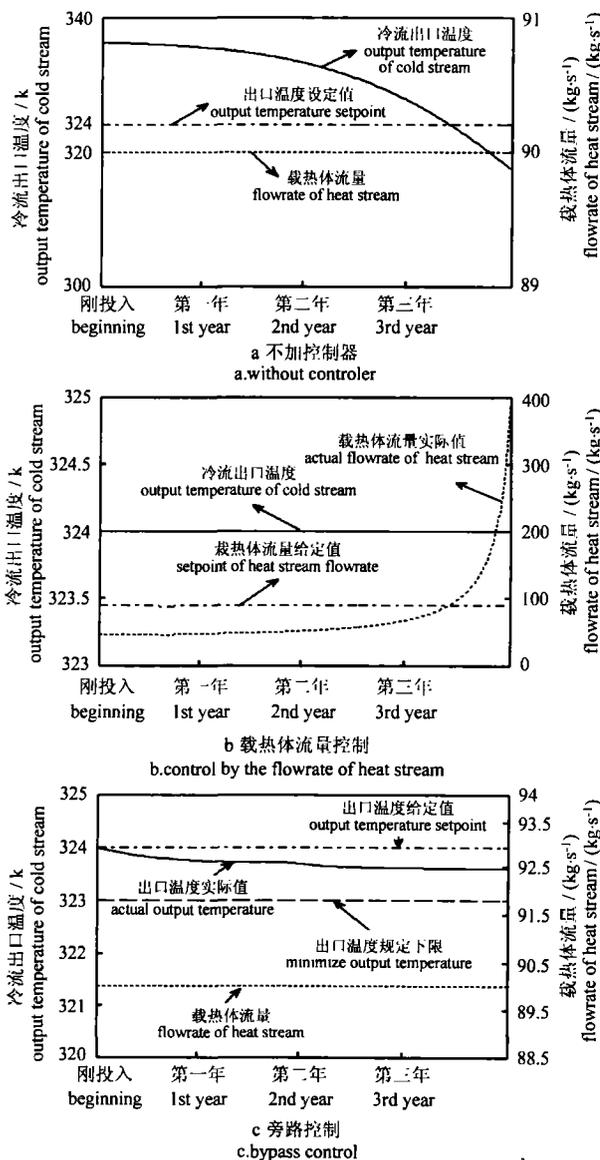


Fig. 2 Comparison of the operational stability.

图2 操作稳定性对比示意图

操作裕量指当操作条件变化最大时,为保证物流出口温度的稳态值,满足生产要求而留出的裕量,也即操作裕量可基于换热器稳态数学模型求解^[9] ($t \rightarrow \infty$),规定换热器物流的输入温度和/或热容流率的最大变量为 Δs ,而物流输出温度的偏差范围为 ΔT 。参考换热器动态数学模型,并假设在换热器的冷端增设旁路,当热流入口流量 m_2 波动,其它操作条件不变时,得数学模型如式(1)~式(7)所示。

$$A_m = \frac{(1-k) \cdot C_{p1} \cdot m_1 \cdot (T_{1o} - T_{1i})}{K \left[(T_{2i} - T_{1i}) - \frac{1}{2}(T_{1o} - T_{1i}) \left(1 + \frac{(1-k)m_1 C_{p1}}{m_2 C_{p2}} \right) \right]} \quad (1)$$

其中

$$T_{1o} = \frac{\bar{T}_{1out} - kT_{1i}}{1-k} \quad (2)$$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + R_o + R_i \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{K_2 d_i}}$$

上式中,

$$K_1 = 0.23 \frac{\lambda_2}{d_o} \left(\frac{d_o \cdot m_2}{\mu_2 \sqrt{S_c S_b}} \right)^{0.6} \left(\frac{C_{p2} \mu_2}{\lambda_2} \right)^{1/3} \quad (3)$$

$$K_2 = 0.023 \frac{\lambda_1}{d_i} \left(\frac{d_i \cdot (1-k) \cdot m_1}{\mu_1 S_i} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{p1} \mu_1}{\lambda_1} \right)^{0.4}$$

$$A'_m = \frac{(1-k) \cdot C_{p1} \cdot m_1 \cdot (T'_{1o} - T_{1i})}{K' \left[(T_{2i} - T_{1i}) - \frac{1}{2}(T'_{1o} - T_{1i}) \left(1 + \frac{(1-k)m_1 C_{p1}}{(m_2 \pm \Delta s) C_{p2}} \right) \right]} \quad (4)$$

其中

$$T'_{1o} = \frac{(\bar{T}_{1out} \pm \Delta T) - kT_{1i}}{1-k} \quad (5)$$

$$K'_1 = 0.23 \frac{\lambda_2}{d_o} \left(\frac{d_o \cdot (m_2 + \Delta s)}{\mu_2 \sqrt{S_c S_b}} \right)^{0.6} \left(\frac{C_{p2} \mu_2}{\lambda_2} \right)^{1/3} \quad (6)$$

$$S_o = \frac{(A'_m - A_m)}{A_m} \times 100\% \quad (7)$$

式(1)为刚投用设备正常操作的换热面积计算量,一部分冷流经换热器与热流换热后,与另一部分经旁路未换热的冷流混合,混合后温度为 \bar{T}_{1out} ;式(3)示换热器的总传热系数;当热流流量最大变化量为 Δs 时,式(4)求取为满足操作要求换热器换热面积的大小,此时旁路开度 k 的大小为满足操作要求时,旁路PID控制的仿真结果稳态值。同理,当其它操作条件也可能发生变化,如冷流入口温度 T_{1i} ,则在式(4)中入口温度 T_{1i} 处改为 $T_{1i} \pm \Delta T_{1i}$,采用极小—极大法求解换热器总换热面积;式(7)表示操作裕量为求解得到的换热面积与刚投用设备正常操作的换热面积之差,占刚投用设备正常操作需要的换热面积的百分比。

随着换热器运行时间的增长,换热器管壁结垢热阻不断增大,设定在检修周期内换热器管壁结垢热阻的最大值为 $R_{o,max}$ 和 $R_{i,max}$,为满足操作要求,此时设计换热面积如式(8)所示。

$$A''_m = \frac{(1-k) \cdot C_{p1} \cdot m_1 \cdot (T'_{1o} - T_{1i})}{K'' \cdot \left[(T_{2i} - T_{1i}) - \frac{1}{2}(T'_{1o} - T_{1i}) \left(1 + \frac{(1-k)m_1 C_{p1}}{m_2 C_{p2}} \right) \right]} \quad (8)$$

式中

$$K'' = \frac{1}{\frac{1}{K_1} + R_{o,max} + R_{i,max} \frac{d_o}{d_i} + \frac{d_o}{K_2 d_i}}$$

$$S_c = \frac{(A''_m - A_m)}{A_m} \times 100\% \quad (9)$$

结垢热阻增大,其传热系数将减小,从而通过式(8)可得为满足操作条件的相应换热面积 A''_m ,由式(9)求得结垢裕量的大小。同理,当已知操作裕量和结垢裕量的相应换热器面积时,也可以通过式(4)和式(8)求解相应的旁路开度。

控制裕量与设定值或干扰的变化幅度有关,设定换热器物流出口温度的数值为 T_{1i} 和/或 T_{2i} 。控制裕量是考虑操作条件变化的动态过程,为满足控制要求而留出的裕量。采用极小—极大法求解,换热器控制结构如图1所示,已知其动态数学模型^[2] 如式(10)~式(13)所示。

管壁

$$\frac{\partial T_1(x,t)}{\partial t} = \frac{m_1}{M_1} \cdot \frac{\partial T_1(x,t)}{\partial x} + \frac{n\pi d_i K_i}{M_1 C_{p1}} [T_{wi}(x,t) - T_1(x,t)] \quad (10)$$

壳程

$$\frac{\partial T_2(x,t)}{\partial t} = -\frac{(1-k)m_2}{M_2} \cdot \frac{\partial T_2(x,t)}{\partial x} + \frac{n\pi d_o K_o}{M_2 C_{p2}} [T_{wo}(x,t) - T_2(x,t)] \quad (11)$$

管内壁

$$\frac{\partial T_{wi}(x,t)}{\partial t} = \frac{2n\pi\lambda(T_{wo} - T_{wi})}{M_w C_{p1} \ln(d_i/d_o)} + \frac{n\pi d_i K_i}{M_w C_p} [T_1(x,t) - T_{wi}(x,t)] \quad (12)$$

管外壁

$$\frac{\partial T_{wo}(x,t)}{\partial t} = \frac{2n\pi\lambda(T_{wi} - T_{wo})}{M_w C_{p1} \ln(d_o/d_i)} + \frac{n\pi d_o K_o}{M_w C_p} [T_2(x,t) - T_{wo}(x,t)] \quad (13)$$

其中

$$\frac{1}{K_i} = \frac{1}{K_2} + R_i$$

$$K_2 = 0.023 \frac{\lambda_1}{d_i} \left(\frac{d_i \cdot (1-k) \cdot m_1}{\mu_1 S_i} \right)^{0.8} \left(\frac{C_{p1} \mu_1}{\lambda_1} \right)^{0.4}$$

$$\frac{1}{K_o} = \frac{1}{K_1} + R_o$$

$$K_1 = 0.23 \frac{\lambda_2}{d_o} \left(\frac{d_o \cdot m_2}{\mu_2 \sqrt{S_c S_b}} \right)^{0.6} \left(\frac{C_{p2} \mu_2}{\lambda_2} \right)^{1/3}$$

当物流出口温度达到稳态时 $T_{1out} = T_{1i}$ 或/和 $T_{2o} = T_{2i}$,满足控制指标的同时,借助 gPROMS 软件求取操作变量即旁路开度的大小以及相应时刻的换热面积 A''_m ,从而求得控制裕量的大小,如式(14)所示。

$$S_c = \frac{(A''_m - A_m)}{A_m} \times 100\% \quad (14)$$

最后,得到换热器设计裕量为操作裕量,结垢裕量与控制裕量之和,如式(15)所示。

$$S = S_o + S_r + S_c \quad (15)$$

4 实例分析

以用于循环水系统的水-水单管单壳换热器为例,分析旁路设计的裕量,换热器物流数据如表1所示。换热器的检修周期为三年,根据换热器的实际运行环境,估计换热器运行三年的结垢热阻变化情况^[10],具体数据见表2。当冷流入口流量 m_1 波动,其最大变化量为 4.5 kg/s,而其它操作条件不变时,规定物流输出温度的偏差幅度为 2 K,如果要求冷流出口温度降低 2 K 即变为 326 K,根据上文所述方法,求得其操作裕量、结垢裕量以及控制裕量,见表3。其旁路控制效果如图3所示。

求得设计裕量的换热器面积后,设定换热器面积,根据式(4)和式(8)反推求出在相同操作条件和控制要求下,在换热器运行周期中,旁路开度的稳态值。并选择在换热器刚投入运行时,在第1年末,第2年末以及第3年末时其旁路开度对应相同操作条件和控制要求的动态响应,以及冷流出口温度的动态相应曲线。对比分析在换热器冷端增设旁路时,旁路开度 k 在运行周期3年中对应相同的操作条件,为满足控制要求,其大小的变化,如图3所示。

表1 换热器物流数据

Table 1 Flow data of heat exchanger.

项目 item	壳程(热流) shell (heat)	管程(冷流) tube(old)
物流名称 name	水 water	水 water
流量/kg · s ⁻¹ flowrate	90	90
进口温度/°C input temperature	93.34	10
出口温度/°C output temperature	60.56	50.78
进口压力/kPa input pressure	551.59	551.59
出口压力/kPa output pressure	474.06	549.80

表2 换热器在不同时间段的结垢热阻

Table 2 Fouling resistance in different period of heat exchanger.

项目 item	壳程结垢热阻 R_o fouling resistance of shell side	管程结垢热阻 R_i fouling resis tance of tube side
刚投入运行 beginning	0	0
一年后 after one year	0.00002	0.00004
两年后 after two years	0.00004	0.00008
三年后 after three years	0.00016	0.00032

表3 换热器面积设计裕量求解结果

Table 3 Results of overdesign area.

项目 item	计算值 value
壳程传热系数/W · (m ² · K) ⁻¹ heat transfer coefficient (shell)	7852.6
管程传热系数/W · (m ² · K) ⁻¹ heat transfer coefficient (tube)	5119.5
不考虑结垢热阻的换热器传热系数/W · (m ² · K) ⁻¹ heat transfer coefficient (unconsider forling resistance)	2820.8
考虑结垢的换热器传热系数/W · (m ² · K) ⁻¹ heat transfer coefficient (consider forling resistance)	1093.5
换热面积设计值/m ² designing heat transfer area	126
旁路设计操作裕量,% operational overdesign of by pass	20.7%
旁路设计结垢裕量,% fouling overdesign of by pass	24.9%
旁路设计控制裕量,% control overdesign of by pass	12.5%
设计裕量(旁路设计),% overdesign (by pass design)	58.1%

为了解在操作条件和控制要求发生变化时,旁路开度和冷流出口温度的动态变化,在图3的相应时刻将其动态响应曲线放大,每个横坐标的时长为20分钟,其响应时间为12 min。为便于对比3年时间里,在相同操作条件和控制要求下,旁路开度的动态响应,将对应4个时刻的动态响应曲线在相同的纵坐标下表达。在网络的运行周期内调节旁路开度,冷流出口温度始终满足操作和控制的要求。在换热器刚刚投用时由于冷流流量升高,且控制目标温度也升高了2 K,因而在换热器运行之初,为满足控制和操作的要求旁路开度变小。当换热器运行一年时,结垢热阻增大,换热器传热系数减小,旁路开度与刚投用时相比有所下降。在换热器运行3年中,旁路开度逐年降低,换热器面积裕量在操作过程中的变化^[2]通过旁路开度的变化而体现。在相同的操作条件和控制要求下,随着运行时间的增长,旁路开度不断降低,而换热面积不变,各物流的出口温度和流量也不变见图3。

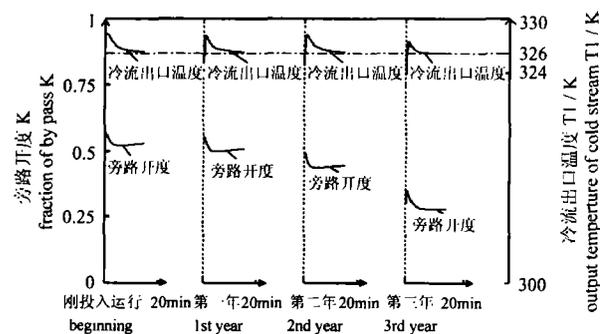


Fig. 3 Variation of by pass fraction and cold flow output temperature.

图3 旁路开度与冷流出口温度变化曲线

*注:上图:将4个时间段采用相同纵坐标在一张图中的描述
变化量“a1-a3”为相应控制裕量的旁路开度的变化量,

“b1-b3”为相应操作裕量的旁路开度的变化量,“c1-c3”为相应结垢裕量的旁路开度的变化量,“d”为考虑到其他因素(如物流物理性质的变化等),以及工程实施而设定的开度下限。旁路开度随着运行时间的增长而降低,由于结垢热阻不断增大,传热系数不断减小,换热器的面积裕量不断降低,对应操作裕量和控制裕量的旁路开度变化量不断增大。调节旁路开度,充分利用换热器换热面积,为下一步换热网络旁路优化控制奠定重要的基础,见图4。

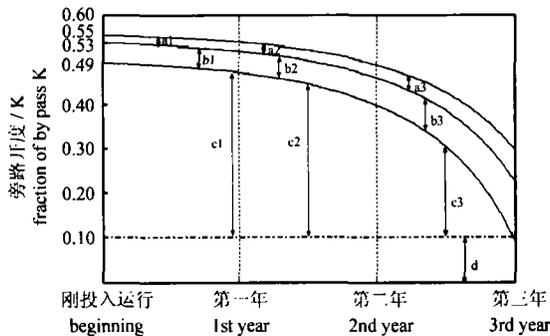


Fig. 4 Stable value of by pass fraction.

图4 旁路开度稳态值

5 结论

阐述了换热器旁路设计可增加控制的自由度,有利于操作的平稳。并且提出了定量求解换热器增设旁路时设计裕量的方法,并一一分析换热器操作裕量、结垢裕量和控制裕量。最后结合实例求解证明本方法有效;并对比分析了旁路设计时在运行周期中旁路开度的变化,说明了旁路开度体现了换热器的设计裕量的变化;并且通过旁路控制在换热器运行周期内物流出口温度始终满足操作和控制要求。旁路设计时设计裕量的计算为换热网络的旁路优化控制,为节能降耗奠定了重要的基础。

符号说明

A_m	换热面积, m^2 ;
k	旁路开度;
K	传热系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$;
C_p	比热容, $kJ / (kg \cdot K)$;
m	质量流量, kg/s ;
M	质量, kg ;
T	温度, K ;
R	结垢热阻, $m^2 \cdot K/W$;
d	换热管直径, m ;
λ	导热系数, $W/(m \cdot K)$;
μ	粘度, $Pa \cdot s$;
S_c	两折流板之间,靠近壳中心线处的管间流通面积, m^2 ;
S_b	折流板缺口的管间流通面积, m^2 ;
S_i	管程流通面积, m^2 ;
S_o	操作裕量;
S_f	结垢裕量;
S_c	控制裕量;
S	设计裕量;

x	管长, m ;
t	时间, s 。
上角标	
'	操作条件变化;
"	热阻变化。
下角标	
1	冷流;
2	热流;
o	管外;
i	管内;
out	混合后输出;
wo	管壁外侧;
wi	管壁内侧。

References

- Shen Jingzhu. Process System Optimization. Beijing: Tsinghua University Press, 1994:365-366.
- Wang Chuanfang and Luo Xionglin. Overdesign for control and its application in tube-shell heat exchanger design. Petroleum Refinery Engineering, 2004, 34(2):21-24.
- Mathisen KW, Skogestad S and Wolff EA. Bypass Selection for Control of Heat Exchanger Networks. Thesis, 1992.
- Konukman AE, Akman U and Camurdan MC. Optimal design of controllable heat-exchanger networks under multi-directional resiliency-target constraints. Computers Chem Engng Suppl, 1995, 19:149-154.
- Uztürk, Akman. Centralized and decentralized control of retrofit heat-exchanger network. Computer Chem Engineering, 1997, 21:373-378.
- Gao Weiping and Yang Ying. Petrofit and control of heat exchanger networks. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2003, 54(7):965-971.
- Alejandro H. Gonzalez, Darci Odloak, Jacinto L. Marchetti. Predictive control applied to heat-exchanger network. Chemical Engineering and Processing, Suppl, 2006, 45:661-671.
- Cao Bingyuan and Zhou Xuegang. Lattice linear programming with max_product composition operator. Journal of Shantou University (Natural Science), 2005, 20(2):5-11.
- Li Zhihong. Study for integration of synthesis and control of heat exchanger networks with nasplitting. Journal of Chemical Engineering of Chinese Universities, 2001, 15(2):155-160.
- Petrochemical Planning & Designing Institute. Heat Exchanger Technical Calculation. Beijing: Petroleum Industry Press, 1979:21-25.

中文参考文献

- 沈静珠,等. 过程系统优化. 北京:清华大学出版社, 1994:365-366.
- 王传芳,罗雄麟. 控制裕量及其在管壳式换热器中的应用. 炼油技术与工程, 2004, 34(2):21-24.
- 高维平,杨莹. 换热网络的优化改进和控制. 化工学报, 2003, 54(7):965-971.
- 曹炳元,周雪刚. 具有V-算子的格线性规划问题. 汕头大学学报(自然科学版), 2005, 20(2):5-11.
- 李志红. 无分流换热网络合成和控制的集成研究. 高校化学工程学报, 2001, 15(2):155-160.
- 石油化学工业部石油化工规划设计院. 冷换设备工艺计算. 北京:石油工业出版社, 1979:21-25.