

## 计及污垢影响的换热网络综合研究

靳遵龙,董其伍,刘敏珊

(郑州大学 热能工程研究中心,河南 郑州 450002)

**摘 要:**利用换热网络进出口温度之间固有的线性性质,在理论分析的基础上,提出温度传递系数的概念,对换热网络温度波动的影响进行定量分析,从而确定温度波动在系统中的传递性质;计算温度波动在系统中产生的影响,进而获得需要改进换热网络的数据和信息.利用换热网络温度传递系数法计算的实例结果对于指导实际生产具有积极意义.通过温度传递系数可以较为明确地看出哪些影响因素占据主导地位、哪些影响因素较为次要,以方便工程技术人员及时、准确地测控各个影响因素.

**关键词:**换热网络;污垢;综合

**中图分类号:**TK9 **文献标识码:**A

### 0 引言

换热网络的污垢影响分析,对现有换热网络的优化操作、技术改造、以及分析污垢所引起的变化及其他非稳定因素带给换热网络的负面影响,具有非常重要的意义.通常情况下,由于污垢及其他因素的影响,操作参数往往偏离正常值.如果目标变量(控制变量)对干扰因素过于敏感,就很难获得一个稳定的操作系统.所以,总是希望给定参数值变化时,控制变量能够保持定值或者在允许的范围内波动.对于一个现存的或将要进行设计的换热网络,如何确定各个换热设备的操作参数、如何对换热面积进行合理调整再分配,使换热网络保持在最佳的操作状态,网络分析是解决这类问题的基础<sup>[1-3]</sup>.在前人所做工作的基础上,笔者将从定量分析的角度,分析、计算污垢对换热网络的影响.

### 1 污垢对换热网络影响的定量分析

充分认识并研究污垢对换热网络的影响程度,以及如何尽可能地降低或消除污垢因素所带来的负面影响,污垢影响的定量分析成为关键.笔者提出温度传递系数的概念,对污垢的影响程度进行定量分析.

对于易结垢的换热网络,随着污垢在网络结

构中某台换热器传热表面上形成,其出口温度的波动往往能够影响其下游换热设备,而且这种影响将会在系统中传递.

给定换热网络中某一控制变量温度 $t_9$ 的干扰变量为: $t_1, t_2, t_4, t_5, t_6$ .这里借用多元函数微分的形式,把温度 $t_9$ 表示成温度 $t_1, t_2, t_4, t_5, t_6$ 的函数:

$$t_9 = f(t_1, t_2, t_4, t_5, t_6)$$

干扰因素(自变量)的变化带给控制变量(因变量)的干扰,形式如:

$$dt_9 = \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_1}\right)dt_1 + \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_2}\right)dt_2 + \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_4}\right)dt_4 + \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_5}\right)dt_5 + \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_6}\right)dt_6 \quad (1)$$

式中: $\left(\frac{\partial t_9}{\partial t_1}\right), \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_2}\right), \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_4}\right), \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_5}\right), \left(\frac{\partial t_9}{\partial t_6}\right)$ 可以称之为温度传递系数,只需求出温度传递系数的值,即可得到相关的干扰因素带给控制变量的影响.

#### 1.1 求解温度传递系数

给定一台逆流换热器,由冷、热流体的热负荷平衡公式及传热速率公式推导出的进出口温度关系式为:

$$\begin{cases} (1-BR) \times t_2 + (B-1)R \times t_3 + (R-1) \times t_1 = 0 \\ (1-BR) \times t_4 + (B-1) \times t_1 + (R-1)B \times t_3 = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中: $R = C_{pc}/C_{ph}$ ;

收稿日期:2010-01-08;修订日期:2010-03-12

基金项目:河南省杰出人才创新基金资助项目(0221000600)

作者简介:靳遵龙(1973-),男,郑州大学讲师,博士,主要从事过程系统能量综合优化、换热设备流体流动及传热强化研究, E-mail: zljn@zzu.edu.cn.

$B = \exp(UA/C_{pc}) \times (R - 1).$

$C_{pc}, C_{ph}$ , 分别表示冷、热流股的质量流量与比热容之积, 即热容流率,  $\text{kW}/^{\circ}\text{C}$ ;  $t_1, t_2$  表示热物流的进、出口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_3, t_4$  表示冷物流的进、出口温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U$  表示总传热系数,  $\text{kW}/\text{m}^2\text{C}$ ;  $A$  表示传热面积,  $\text{m}^2$ .

Fryer<sup>[4]</sup>、Kern<sup>[5]</sup> 和刘宝兴等<sup>[6]</sup>, 都曾以不同形式给出上述表达式.

依据上述公式, 把冷、热流体的出口温度表示为入口温度的函数:

$$\begin{cases} t_2 = \xi \times t_3 + (1 - \xi) \times t_1 \\ t_4 = \sigma \times t_3 + (1 - \sigma) \times t_1 \\ \frac{\partial t_2}{\partial t_3} = \xi; \frac{\partial t_2}{\partial t_1} = 1 - \xi \\ \frac{\partial t_4}{\partial t_3} = \sigma; \frac{\partial t_4}{\partial t_1} = 1 - \sigma \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\xi = (B - 1)R / (RB - 1)$ ,  $\sigma = (R - 1)B / (RB - 1)$ .

如(3)式所示, 进出口温度之间是线性关系, 给定冷热流股的热容流率、传热系数以及传热面积, 只需知道 4 个温度中的其中任何 2 个温度, 便可求解其他未知温度.

对于图 1 所示的换热网络, 假定温度  $t_1$  偏离设定值, 这种干扰能够影响除进口温度以外的所有温度. 假定换热器的  $UA$  和  $C_p$  的值不发生变化, 可以求解温度  $t_2, t_4, t_6, t_7$ , 进而掌握干扰因素

带给各个测控温度的影响.

对于换热器 E2, 2 个进口温度  $t_1, t_3$  已知, 即可求算 2 个出口温度  $t_2, t_6$ ; 于是, 换热器 E1 的 2 个进口温度  $t_3, t_6$  已知, 同样可以求算 2 个出口温度  $t_4, t_7$ . 至此, 获得了网络当中的各个测控温度的值.

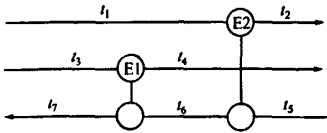


图 1 一个简单的换热网络  
Fig. 1 A simple network

然而, 对于带有回路的换热网络, 换热器的未知温度超过 2 个, 可以把整个网络结构看作一个整体对待, 对于具有  $n$  个换热器的网络可列出  $2n$  个方程, 利用网络结构中固有的线性性质, 即可求出相关的温度传递系数, 以及网络中的  $2n$  个未知温度.

通过求解温度传递系数, 把两两相关的传递系数列出如表 1 式样, 组成温度传递系数表. 由温度传递系数的大小, 可以一目了然地掌握干扰变量对控制变量的影响程度, 并可依此计算控制变量随干扰变量变化的具体数值.

通过分析可以得出: 控制变量受较近的干扰因素的影响较大. 如果一个干扰因素经过几个换热单元以后对一控制变量生产作用, 这一干扰作用随着路径的延伸将得到一定程度的减弱.

表 1 温度传递系数表  
Tab. 1 The coefficients of temperature propagation

$\Delta t$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	$\Delta t_4$	$\Delta t_5$	$\Delta t_6$	$\Delta t_7$	$\Delta t_8$	$\Delta t_9$	$\Delta t_{10}$	$\Delta t_{11}$	$\Delta t_{12}$	$\Delta t_{13}$	$\Delta t_{14}$	$\Delta t_{15}$	$\Delta t_{16}$
$\Delta t_{17}$	0.415 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.584 4	0	0	0	0	0
$\Delta t_{18}$	0.121 9	0.568 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0.171 5	0.138 2	0	0	0	0
$\Delta t_{19}$	0.090 1	0.420 1	0	0	0	0	0	0.201 4	0	0.059 5	0.126 7	0.102 1	0	0	0	0
$\Delta t_{20}$	0.057 3	0.267 2	0	0	0	0	0	0.128 1	0	0.037 9	0.080 6	0.064 9	0	0.364 0	0	0
$\Delta t_{21}$	0	0.368 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.631 8	0	0	0	0
$\Delta t_{22}$	0	0.232 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.398 3	0.369 6	0	0	0
$\Delta t_{23}$	0	0.099 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.171 5	0.159 1	0.569 5	0	0
$\Delta t_{24}$	0	0	0.715 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{25}$	0	0	0	0.917 6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.082 4	0
$\Delta t_{26}$	0	0	0	0.211 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.018 9	0
$\Delta t_{27}$	0	0	0	0.014 9	0.322 5	0	0.390 6	0	0	0	0	0	0	0	0.272 0	0
$\Delta t_{28}$	0	0	0	0	0	0.680 8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{29}$	0	0	0	0.029 2	0	0	0.438 1	0	0	0	0	0	0	0	0.532 7	0
$\Delta t_{30}$	0	0	0	0	0	0	0	0.169 1	0	0.830 9	0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{31}$	0	0	0	0	0	0	0	0.131 4	0	0.645 7	0	0	0	0	0	0

续表 1																
$\Delta t$	$\Delta t_1$	$\Delta t_2$	$\Delta t_3$	$\Delta t_4$	$\Delta t_5$	$\Delta t_6$	$\Delta t_7$	$\Delta t_8$	$\Delta t_9$	$\Delta t_{10}$	$\Delta t_{11}$	$\Delta t_{12}$	$\Delta t_{13}$	$\Delta t_{14}$	$\Delta t_{15}$	$\Delta t_{16}$
$\Delta t_{32}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0.461 5	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{33}$	0	0	0	0	0	0	0	0.771 8	0	0.228 2	0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{34}$	0.064 4	0.300 1	0	0	0	0	0	0.364 3	0	0.107 7	0.090 5	0.072 9	0	0	0	0
$\Delta t_{35}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000 0	0	0	0	0	0
$\Delta t_{36}$	0.804 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.195 6	0	0	0	0	0
$\Delta t_{37}$	0.234 8	0.349 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0.330 2	0.085 1	0	0	0	0
$\Delta t_{38}$	0	0.230 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.395 4	0.374 3	0	0	0
$\Delta t_{39}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000 0	0	0
$\Delta t_{40}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.000 0	0	0
$\Delta t_{41}$	0	0	0	0.051 9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.948 0	0
$\Delta t_{42}$	0	0	0	0.022 0	0	0	0.576 5	0	0	0	0	0	0	0	0.401 5	0
$\Delta t_{43}$	0	0	0	0.010 5	0.520 8	0	0.276 2	0	0	0	0	0	0	0	0.192 4	0
$\Delta t_{44}$	0	0	0	0.010 0	0.494 7	0	0.262 3	0	0	0	0	0	0	0	0.182 7	0
$\Delta t_{45}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.806 1

## 2 CO 变换及 CO<sub>2</sub> 脱除工段能量系统温度传递分析

合成氨厂经过一段时间的运行之后,生产设备特别是换热设备中经常有污垢形成.这些沉积污垢往往影响换热设备能力的正常发挥,使产量减少、消耗增加、产品质量下降,甚至使生产无法进行下去.

在该工段的运行操作过程中,应该严格控制温度的波动.对换热网络进行温度传递分析以定量地获得干扰因素对控制变量的影响非常重要.

### 2.1 换热网络温度标识

对于 CO 变换及 CO<sub>2</sub> 脱除能量系统,在合成的初始网络结构的基础上,为了便于说明网络结构中间各点及出口处的物流温度之间的影响关系,对各点温度进行标识,如图 2 所示.

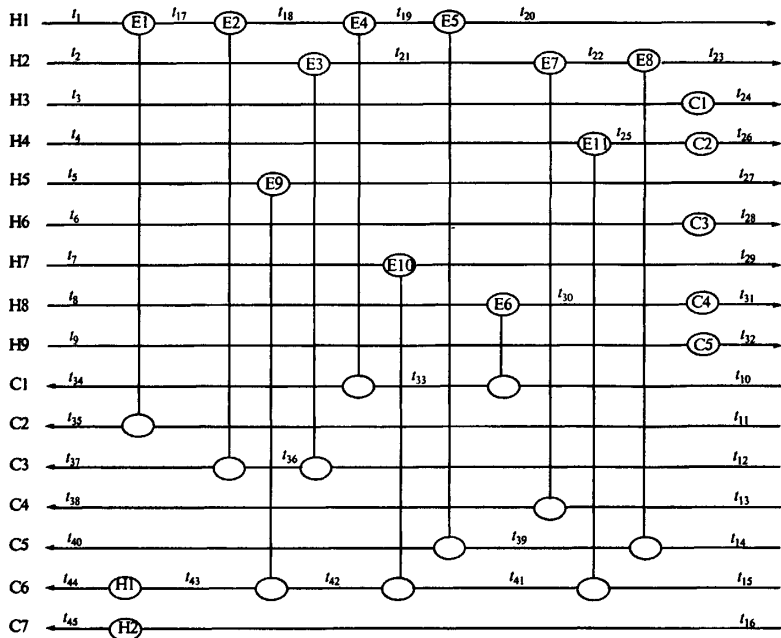


图 2 网络系统中温度点标识图

Fig. 2 Temperature numbering system for the temperature propagation

## 2.2 温度传递系数表

通过求解温度传递系数,把两两相关的传递系数,特别是输入温度对网络结构中间各点及出口处的物流温度影响系数,组成温度传递系数表.针对某一给定的能量系统,只需分析一次,做一个温度传递系数表,便可计算各种温度波动带来的影响,而不必象模拟那样需要反复求解各个温度波动带给系统的影响. CO 变换及 CO<sub>2</sub> 脱除能量系统温度传递系数列于表 1.

依据表 1,输入温度  $t_s$  的变化对其他温度的影响如图 3 所示.

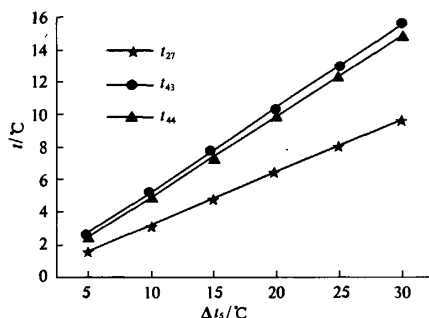


图 3 输入温度  $t_s$  的变化对其他温度的影响

Fig. 3 Effect of  $t_s$  on several temperatures

## 3 结论

通过具体分析及实例计算,指出充分认识并控制污垢带来的影响的重要性.利用换热网络固有的线性性质,在理论分析的基础上,提出温度传递系数的概念.基于换热网络的温度传递系数分析,能够定量地求得决策变量和参数对状态变量和目标函数产生的影响,可以求得状态变量随决

策变量的定量变化情况.网络设计时往往存在很多种选择,在满足工艺要求的前提下,可以把易结垢的单元设备设计得小一些,作为补偿,可以把不易结垢的单元设备设计得大一些.通过建立温度传递系数表,对受污垢影响的换热网络进行分析.采用增加补偿换热器的方式设计网络结构,把污垢的影响程度降至最低.利用换热网络温度传递系数法计算的实例结果对于指导实际生产具有积极意义.

## 参考文献:

- [1] CHEN C L, HUANG P S. Multicriteria synthesis of flexible heat-exchanger networks with uncertain source-stream temperatures. *Chemical Engineering and Processing* [J]. 2005, 44(1): 89-100.
- [2] TELLEZ R. Heat exchanger network process modifications for controllability using design reliability theory. *Computer and Chemical Engineering* [J]. 2006, 30(4): 730-743.
- [3] ZHENG W, Verheijen N. Design of flexible heat exchanger network for multi-period operation, *Chemical Engineering Science* [J]. 2006, 61(23): 7730-7753.
- [4] MELO L F. Fouling science and technology: Peter Fryer. *Basic concepts in heat exchanger network modeling* [M]. 1988, 495-510.
- [5] KERN D Q. *Process heat transfer*. New York: McGraw-Hill [M]. 1950.
- [6] 刘宝兴. 换热网络灵敏度研究. *化学工程* [J]. 1997, 25(5): 28-32.

## Synthesis of Heat Exchanger Networks in Consideration of Fouling Effects

JIN Zun-long, DONG Qi-wu, LIU Min-shan

(Thermal Energy Engineering Research Center, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** The concept of temperature-change sensitivity coefficient was put forward based on the inherently linear nature between outlet and inlet temperatures of heat exchanger network and theory analysis. Quantitative influence of temperature fluctuation in the network was carried out in order to examine transmission character of temperature fluctuation in the system. And the information was obtained for improving heat exchanger network. The case result was obtained by the proposed method, which was of benefit to supervising production. It can help to find out which factor holds dominant position and which factor is comparatively secondary through the coefficients, facilitating engineers to distinguish primary and secondary factors in order to observe and control influence factor accurately.

**Key words:** heat exchanger network; fouling; synthesis