

文章编号: 1005-8893 (2006) 01-0010-04

换热网络动态数学模型及其求解

杨德明

(江苏工业学院 化学工程系, 江苏 常州 213016)

摘要: 以能量守恒为基础, 建立了换热网络的机理动态数学模型, 利用 Visual Basic 编程语言, 运用显式差分法求解了该偏微分方程组。得到了当某流体入口温度扰动后, 所有换热器出口温度的动态响应, 求解结果表明所建立的动态数学模型符合实际情况, 并成功应用于加氢裂化装置的高压换热网络的仿真培训。

关键词: 换热网络; 动态模型; 显式差分法; 仿真

中图分类号: TE 624

文献标识码: A

Dynamic Models for Heat—Exchange Network and its Solutions

YANG De—ming

(Department of Chemical Engineering, Jiangsu Polytechnic University, Changzhou 213016, China)

Abstract: Based on energy conservation, dynamic models for heat—exchange network are obtained, and by Visual Basic language, the mathematic differential equations are solved by method of explicit difference law. The dynamic responses for the out—temperature of heat—exchangers are determined when the input temperature is changed, and the results coincide with practical situation, the dynamic models are applied to simulation training of hydrocracking.

Key words: heat—exchange network; dynamic models; explicit difference law; simulation

过程动态学的形成与发展离不开对化学工程学科的探讨。早在化学工程形成一门完整的学科时, 人们就开始探讨所谓“暂态(过渡状态)”行为。特别是近几年来, 随着国内外开始重视换热网络系统的最优化设计工作及化工过程仿真系统的开发, 对换热网络过程动态行为的研究显得尤为重要^[1~6]。50年代后, 由于经典控制理论的发展和运用, 进一步推动了关于过程动态学的研究工作, 原来只认为选好仪表就等于自控设计的全部的这种认识, 转变为要从选表、工艺和控制三者有机结合地考虑它们的动态特性的想法。实际上首先是要在了解三者关系的基础上, 建立起系统的动态模型,

从而了解其动态行为, 研究系统的稳定性和根据某种性能指标实现优化控制的问题, 显而易见最重要的是对过程动态的描述。而化工过程的仿真首先是建立在动态行为的基础上。不言而喻, 过程动态学在化工过程仿真、控制优化等方面愈来愈占据重要的位置。

本文以加氢裂化装置中的高压换热网络为原型, 通过建立该换热系统的动态数学模型, 利用VB编写求解模型, 得到了该换热系统的动态运行特性, 成功地应用于加氢裂化装置高压换热部分的过程仿真, 也为换热网络的优化提供了可靠的动态数学模型。

收稿日期: 2005-10-10

作者简介: 杨德明(1966—), 男, 江苏苏州人, 副教授, 硕士, 在读博士生, 从事化学工程与计算机模拟方面的研究。

1 换热器的动态数学模型^[7,8]

加氢裂化装置中的部分高压换热网络系统如图 1 所示, 经裂化后的高温裂解油 (S6) 依次经过换热器 E1、E2 和 E3; 原料 (S1) 依次经过 E3 和 E1 与高温裂解油进行换热; 另外还有一股去分馏的该股 (S4) 经 E2 与高温裂解油进行换热, 冷热两股物流均采用逆流操作。

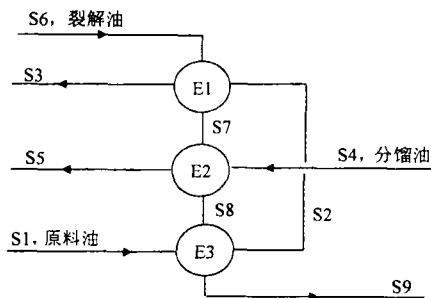


图 1 换热网络

Fig. 1 The heat exchange network

现取任一换热器作分析, 如图 2 所示。在冷、热流体进口温度发生扰动的情况下, 导出管内任何截面处于任何时间的温度分布函数, 即温度与时间 t 和管长 x (以冷流体入口处的距离为 0 计算) 之间的动态关系。现假设: ①流体的物性参数不随温度而改变; ②无热损失。

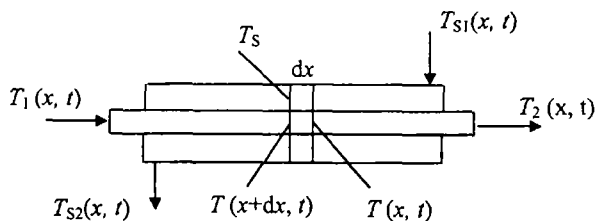


图 2 微元段 dx 温度分布

Fig. 2 The temperature distribution of dx

对换热器管内某一微元段 dx 作热量衡算, 即: 微元段内的能量积累 = 流体流入微元段的能量 - 流体流出微元段的能量 + 传入微元段的能量, 则数学表达式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} (A dx \rho C_p T) = A v \rho C_p T|_x - A v \rho C_p T|_{x+dx} + U \pi dx (T_s - T) \quad (1)$$

式中: T 为管内流体温度; A 为管的内截面积; ρ 为管内流体密度; C_p 为管内流体的定压比热; v 为管内流体流速; U 为总传热系数; D 为管子内径; T_s 为壳体流体温度; 由于 A , dx , ρ , C_p , v 可视为常数, 式 (1) 可简化为:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{v T|_x - v T|_{x+dx}}{dx} + \frac{U \pi D}{A \rho C_p} (T_s - T) \quad (2)$$

当 $dx \rightarrow 0$, 则有:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -v \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{U \pi D}{A \rho C_p} (T_s - T) \quad (3)$$

以上偏微分方程的初始条件和边值条件分别为:

$$T(x, 0) = f_1(x) \quad (4)$$

$$T(0, t) = g_1(t) \quad (5)$$

上式即为管内流体温度 T 与管长 x 及时间 t 的函数关系。上式中包含了管壳温度 T_s , 因 T_s 也随着管长和时间变化, 因此要求解该方程还需要建立 $T_s(x, t)$ 模型联合求解。同样的方法可以得到描述管外流体温度变化的数学模型:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{v_s \partial T_s}{\partial x} - \frac{U \pi D}{A_s \rho_s C_{ps}} (T_s - T) \quad (6)$$

以上偏微分方程的初始条件和边值条件分别为:

$$T_s(x, 0) = f_2(x) \quad (7)$$

$$T_s(0, t) = g_2(t) \quad (8)$$

式 (3) 至式 (8) 即构成了描述换热器的动态数学模型。

2 换热网络的动态模型求解

2.1 基础数据和公式

稳定工况各流股的温度 (K)、压力 (MPa)、流量 (kg/s) 和密度 (kg/m³) 依次为: S1 (318、8.0、27.8、853); S2 (373、8.0、27.8、853); S3 (458、8.0、27.8、853); S4 (338、3.5、20.83、780); S5 (453、8.0、27.8、853); S6 (658、8.2、29.17、785); S7 (569、8.0、27.8、853); S8 (483、8.0、27.8、853); S9 (425、8.0、27.8、853)。其中热流体 (裂解油) 走管程, 其余物流的走壳程。

为了计算各换热器的总传热系数, 需知道各换热器的结构尺寸。各换热器的管长均为 6 m, 管子尺寸均为 $\phi 25 \times 2.5$; E1 为 4 管程单壳程, 换热管总数为 6 128 根; E2 和 E3 均为双管程单壳程, 换热管总数为 5 986 根。

总传热系数 U 用以下公式计算: $\frac{1}{U} = \frac{d_o}{\alpha_i d_i} + \frac{b d_o}{\lambda d_m} + \frac{1}{\alpha_o}$; 其中管内传热膜系数 α_i 用 Dittus-Boelter 公式计算: $\alpha_i = 0.36 \left(\frac{\lambda}{d_i} \right) \left(\frac{d_i u \rho}{\mu} \right)^{0.8}$

$\left(\frac{C_p \mu}{\lambda}\right)^{0.35}$; 管外传热膜系数 α_o 用 Kern 公式计算:

$$\alpha_o = 0.36 \left(\frac{\lambda}{d_m}\right) \left(\frac{d_e u_o \rho}{\mu}\right)^{0.55} \left(\frac{C_p \mu}{\lambda}\right)^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w}\right)^{0.14}$$

2.2 动态模型的求解^[9]

换热网络构成的动态数学模型系偏微分方程, 需用差分方法求解。为了将偏微分方程式变换为差分方程式, 使连续问题离散化, 取换热器管微元长度 Δx 为 0.1, 时间微元单位为 1 min, 采用向前差分法, 则对于管内流体有:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta t} \quad (9)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{m+1,n} - T_{m,n}}{\Delta x} \quad (10)$$

对于管外流体, 同理可得:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{T_{sm+1,n} - T_{sm,n}}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{T_{sm+1,n} - T_{sm,n}}{\Delta x} \quad (12)$$

则原偏微分方程组可改写成如下的差分方程组:

$$T_{m,n} = T_{m,n} - \frac{\Delta x}{\Delta t \cdot v} (T_{m+1,n} - T_{m,n}) + \frac{\Delta x}{v} \cdot \frac{U \pi D}{A \rho C_p} (T_s - T) \quad (13)$$

$$T_{sm,n} = T_{sm,n} - \frac{\Delta x}{\Delta t \cdot v_s} (T_{sm+1,n} - T_{sm,n}) + \frac{\Delta x}{v_s} \cdot \frac{U \pi D}{A_s \rho_s C_{ps}} (T_s - T) \quad (14)$$

用 Visual Basic 语言编写程序求解。限于篇幅, 本文只列出了当热流温度发生扰动后 (即温度由 385 °C 升高到 398 °C), 各换热器出口温度的动态响应曲线 (图 3~图 8)。

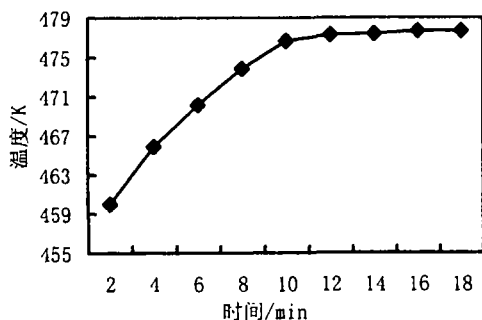


图 3 E1 管外流体温度动态响应曲线
Fig. 3 Dynamic response curve of E1 outside temperature

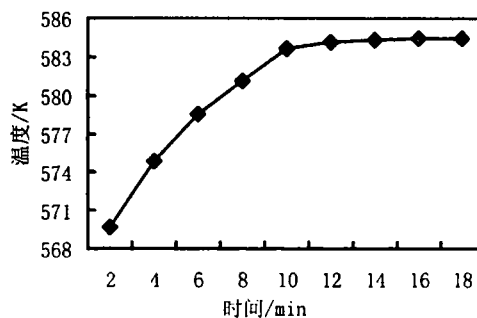


图 4 E1 管内流体温度动态响应曲线
Fig. 4 Dynamic response curve of E1 inside temperature

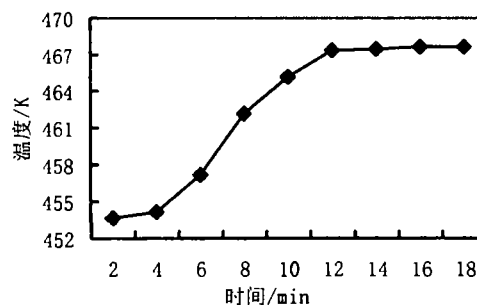


图 5 E2 管外流体温度动态响应曲线
Fig. 5 Dynamic response curve of E2 outside temperature

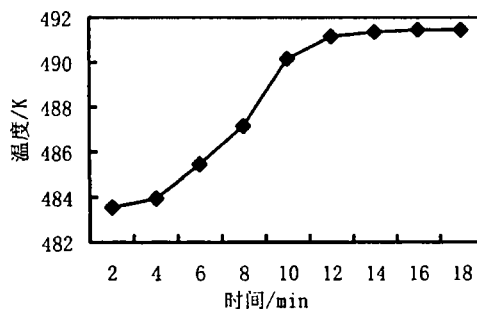


图 6 E2 管内流体温度动态响应曲线
Fig. 6 Dynamic response curve of E2 inside temperature

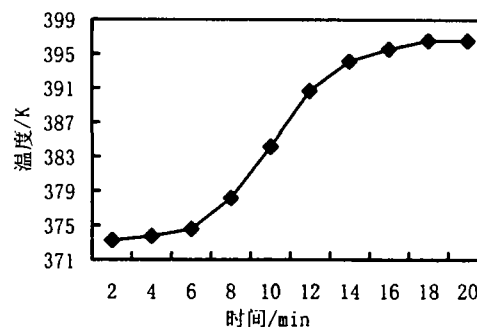


图 7 E3 管外流体温度动态响应曲线
Fig. 7 Dynamic response curve of E3 outside temperature

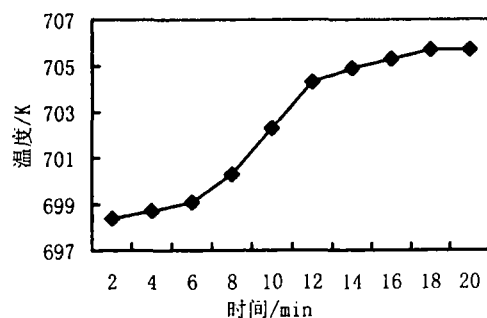


图8 E3管内流体温度动态响应曲线

Fig. 8 Dynamic response curve of E3 inside temperature

3 结论

对换热网络的动态特性进行了研究,建立了换热网络的动态数学模型,利用显式差分法进行了求解,得到了如下结论:①与隐式差分法相比,显式差分法收敛性不是很好,为此在计算过程中尽量取足够小的微单元,即把时间 t 和管长切分为足够小的微元,这样求解就可以很快的收敛;②计算结果表明,E1、E2和E3换热器流体出口温度的动态响应依次滞后,表明建立的换热网络动态数学模型能够较为合理的反映换热网络的动态特性,符合实际情况;③计算结果,即动态响应曲线可拟合成多项式,用于换热网络的过程仿真。

参考文献:

- [1] 刘博强,袁修干,李敏.板翅式热交换器动态特性[J].化工学报,1994,45(6):673-677.
- [2] Fox G C, Furmanski W, Hawick K A, et al. Exploration of the Informal Concept [A]. Npac Technical Report [R]. New York: SCCS, 1994.
- [3] Prasad B S V. The Performance Prediction of Multistream Plate-Fin Heat Exchangers Based on Stacking Pattern [J]. Heat Transfer Engineering, 1991, 12(4): 58-70.
- [4] ASHRAE. Handbook—2001 Fundamentals [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers, 2001.
- [5] 章熙民,任泽霖,梅飞鸣.传热学[M].第三版.北京:中国建筑工业出版社,1993.
- [6] 崔萍.地热换热器的传热模型与设计计算[D].济南:山东建筑工程学院,2002.
- [7] 房德中,朱建业.化工过程分析与模拟[M].北京:化学工业出版社,1991.124-127.
- [8] 王骥程.过程动态模型[M].杭州:浙江大学出版社,1994.4-12.
- [9] 王树生.化学工程计算方法[M].北京:化学工业出版社,1989.186-192.