

文章编号:1673-9469(2010)02-0073-04

CSTR 系统的 II 型模糊控制器设计

马晓雨¹, 刘杰¹, 郑岩²

(1. 河北工程大学 土木工程学院, 河北 邯郸 056038; 2. 邯郸市房地产开发公司, 河北 邯郸 056002)

摘要:将连续搅拌槽反应系统转化为带有结构时变不确定性的线性系统, 利用 II 型模糊控制原理, 对该不确定性系统进行控制器设计, 从而达到对具有参数不确定性的复杂非线性连续搅拌槽反应系统的稳定控制。仿真结果表明 II 型模糊控制器可以将带有时变时延特性且具有参数不确定性的 CSTR 系统, 稳定控制在其不稳定的工作点上。

关键词:连续搅拌槽反应器; 非线性; 模糊控制

中图分类号: TP13

文献标识码: A

Design of type - II fuzzy controller of CSTR

MA Xiao-yu¹, LIU Jie¹, ZHENG Yan²

(1. College of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan 056038, China;

2. Real Estate Development Company of Handan, Hebei Handan 056002, China)

Abstract:The system of continuous stirred tank reactors is converted to an uncertain linear system with structured time - varying uncertainties. Based on the type - II fuzzy control principle, the controller is designed to stably control the nonlinear system of continuous stirred tank reactors with parameter uncertainty. The results of simulation show that this type - II fuzzy controller could stably control the CSTR which has the characteristics of time - varying, time - delaying and parameter uncertainties in the unstable operating point .

Key words: stirred tank reactors; nonlinear characteristic; fuzzy control

由于化学反应过程的高度复杂性, 几乎所有的化学反应动态模型都具有明显的非线性、时变时延性及参数不确定性的特征, 直接影响 CSTR 系统运行的可靠性和稳定性。控制系统的稳定性问题长久以来一直备受关注^[1]。针对非线性系统以及时延系统的稳定性问题, 提出了很多基于 Lyapunov 第二方法的控制器设计方案^[2-4], I 型 T-S 模糊控制器就是其中之一。

由于 I 型模糊控制系统是建立在 I 型模糊集合基础之上, 其隶属度函数是二维的, 不能直接掌控复杂动态环境中系统的不确定性信息^[5], 在诸如 CSTR 这样复杂的热化学反应系统中其适用性不可避免地受到制约。而 II 型模糊控制系统是建立在 II 型模糊集合基础之上, 其隶属度函数是三维的, 能够掌控更多的不确定性信息利用 II 型模

糊控制系统对多重不确定性信息的精确掌控能力, 针对具有非线性、时变时延性及参数不确定性的 CSTR 系统提出其 II 型模糊控制器设计方案, 使其能够稳定的运行在期望的工作点上。

1 CSTR 系统模糊控制模型的建立

考虑 CSTR 系统中进行的不可逆热化学反应 $A \rightarrow B^{[4]}$, 其简化的动力学模型表示如下

$$x_1(t) = -\frac{1}{\lambda}x_1(t) + D_a(1-x_1(t))e^{\frac{x_2(t)}{1+x_2(t)/\gamma_0}} + (\frac{1}{\lambda} - 1)x_1(t - \tau) \quad (1)$$

$$x_2(t) = -(\frac{1}{\lambda} + \beta)x_2(t) + HD_a(1-x_1(t))$$

$$e^{\frac{x_2(t)}{1+x_2(t)/\gamma_0}} + \left(\frac{1}{\lambda} - 1\right)x_2(t - \tau) + \beta u(t) \quad (2)$$

其中,状态变量 $x_1(t)$ 相应于原料的反应效率, $0 \leq x_1(t) \leq 1$; $x_2(t)$ 相应于反应槽温度;建立条件:循环系数 $\lambda \neq 0$ 。

为了表明二型模糊控制器可以对具有参数不确定性的 CSTR 系统进行稳定控制,取 $\lambda \in [0.7, 0.9]$ 且服从 $N(0.8, 0.05^2)$ 分布的随机数,并得到系统的静态工作点变化曲线(图)。从图 1 可以看出,当 $\lambda \in [0.7, 0.9]$ 时 CSTR 系统有 3 个静态工作点,其中对应高温和低温的工作点为稳定工作点,而中间的工作点为不稳定工作点。当 λ 的期望值为 0.8 时,可以计算出三个静态工作点分别为 $(0.144, 0.8862)$, $(0.4472, 2.752)$, $(0.7646, 4.705)$;系统参数分别为 $\gamma_0 = 20, H = 8, \beta = 0.3, D_a = 0.072, \tau = 2.5(1.01 - \sin(t))$ 。鉴于文献[4]并未考虑 λ 是随机变量以及时延系统为时变时延的情况,本文试图在 λ 为高斯随机分布的情况下,使 CSTR 系统能稳定工作在中间温度——工作在开环时不稳定的静态工作点上。

由于只有反应槽温度为可测、可控变量,因此依据 λ 变化时搅拌槽温度的静态工作点,即静态工作点中 $x_2(t)$ 的变动来建立 CSTR 系统的 II 型模糊控制系统模型。模糊规则如下

规则 1: 如果温度较低(即随着 λ 的变化, $x_2(t) \in [0.7141, 1.2945]$ 时), 则

$$\delta x(t) = A_1^1 \delta x(t) + A_1^1 \delta x(t - \tau) + B^1 u(t); u(t) = -F_1 \delta x(t)$$

规则 2: 如果温度适当(即随着 λ 的变化, $x_2(t) \in [1.9555, 3.363]$ 时), 则

$$\delta x(t) = A_1^2 \delta x(t) + A_1^2 \delta x(t - \tau) + B^2 u(t); u(t) = -F_2 \delta x(t)$$

规则 3: 如果温度较高(即随着 λ 的变化, $x_2(t) \in [4.633, 4.7056]$ 时), 则

$$\delta x(t) = A_1^3 \delta x(t) + A_1^3 \delta x(t - \tau) + B^3 u(t); u(t) = -F_3 \delta x(t)$$

其中, $x_d = [x_{1d}, x_{2d}]^T$ 为系统的期望工作点, $x(t) = [x_1(t), x_2(t)]^T, \delta x(t) = x(t) - x_d, \delta x(t - \tau) = x(t - \tau) - x_d; F_1, F_2, F_3$ 为待确定的反馈控制系数;

$$A_1^1 = \begin{bmatrix} -1.4274 & 0.0757 \\ -1.4189 & -0.9442 \end{bmatrix};$$

$$A_1^2 = \begin{bmatrix} -2.0507 & 0.3958 \\ -6.4066 & 1.6168 \end{bmatrix};$$

$$A_1^3 = \begin{bmatrix} -4.5279 & 0.3167 \\ -26.2228 & 0.9837 \end{bmatrix};$$

$$B^1 = B^2 = B^3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.3 \end{bmatrix};$$

$$A_2^1 = A_2^2 = A_2^3 = \begin{bmatrix} 0.25 & 0 \\ 0 & 0.25 \end{bmatrix}。$$

II 型模糊隶属度函数分别如图 2、图 3、图 4 所示。

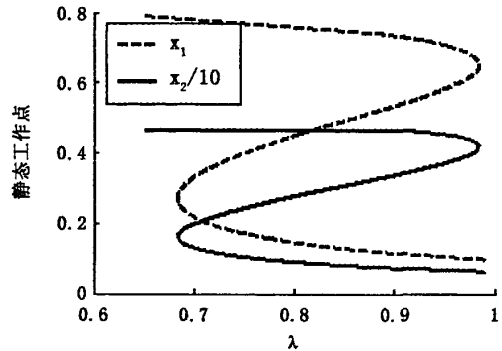


图1 CSTR系统的静态工作点曲线
Fig.1 Steady-state curve of CSTR

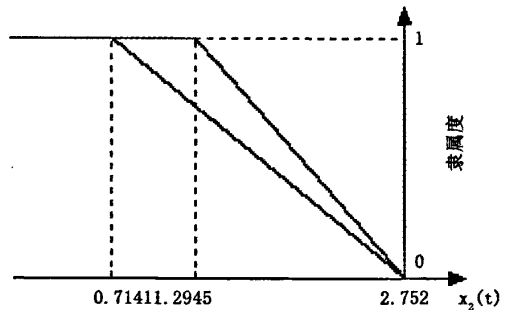


图2 规则1的隶属度函数
Fig.2 Membership function of rule 1

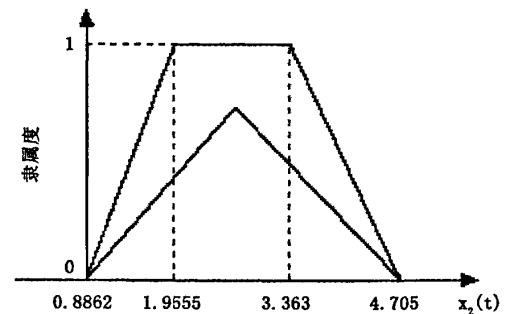


图3 规则2的隶属度函数
Fig.3 Membership function of rule 2

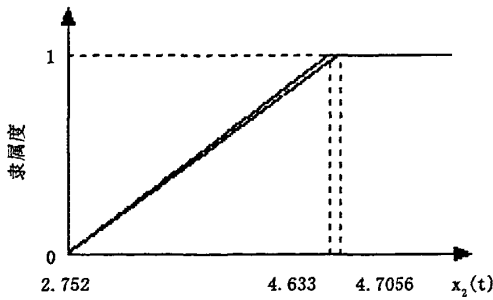


图4 规则3的隶属度函数

Fig. 4 Membership function of rule 3

2 II 型模糊控制器设计

考虑一个由 IF-THEN 规则描述的 II 型 T-S 连续时延模糊系统,其第 i 个规则如下所述

规则 i : 如果 $\theta_1(t)$ 是 \bar{M}_1^i 且...且 θ_Ψ 是 \bar{M}_Ψ^i , 则

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_i x(t) + A_{di} x(t - \sigma(t)) + B_i u(t); \\ x(t) &= \Psi(t), t \in [-\tau, 0], i = 1, 2, \dots, p \end{aligned} \quad (3)$$

式中, p —规则的数目; \bar{M}_a^i —规则 i 的区间 II 型模糊集合; $\theta_a(t)$ —前提变量; $x(t)$ —系统的状态变量; $u(t)$ —控制变量; $\sigma(t)$ —可微的时间函数,且满足 $0 \leq \sigma(t) \leq \tau$ 和 $|\dot{\sigma}(t)| \leq \mu$; τ 和 μ —常数。

根据模糊运算法则,该 II 型 T-S 连续时延模糊系统可表达为

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p w_i(t) [A_i x(t) + A_{di} x(t - \sigma(t)) + B_i u(t)] \quad (4)$$

其中, 权重 $w_i(t) = \frac{0.5w_i^L + 0.5w_i^U}{\sum_{i=1}^p (0.5w_i^L + 0.5w_i^U)}$; $w_i^L(t) = \mu_{\bar{M}_1^i}(\theta_1(t)) \times \dots \times \mu_{\bar{M}_\Psi^i}(\theta_\Psi(t))$; $w_i^U(t) = \mu_{\underline{M}_1^i}(\theta_1(t)) \times \dots \times \mu_{\underline{M}_\Psi^i}(\theta_\Psi(t))$; $\bar{\mu}_{\bar{M}_\Psi^i}(\theta_\Psi(t))$ 和 $\mu_{\underline{M}_\Psi^i}(\theta_\Psi(t))$ 分别为规则 i 的前提变量 $\theta_\Psi(t)$ 的上下成员隶属度值。

以上描述的 II 型 T-S 连续时延模糊系统将由相应的 II 型 T-S 连续时延模糊控制器进行控制操作,该模糊控制器描述如下

规则 j : 如果 $\theta_1(t)$ 是 \bar{M}_1^j 且...且 $\theta_\Psi(t)$ 是 \bar{M}_Ψ^j , 则

$$u(t) = -F_j x(t) \quad (5)$$

式中 F_j —规则 j 的反馈增益, $j = 1, 2, \dots, p$ 。

根据模糊运算规则,最终的控制器可定义为

$$u(t) = -\sum_{j=1}^p (h_j(t) + \bar{h}_j(t)) F_j x(t) \quad (6)$$

其中 $\bar{h}_j(t) = \frac{w_j^U(t)}{\sum_{j=1}^p (w_j^L(t) + w_j^U(t))}$ 和 $h_j(t) = \frac{w_j^L(t)}{\sum_{j=1}^p (w_j^L(t) + w_j^U(t))}$ 分别为上下限隶属度函数权重。

由式(4)和式(6)可得最终的闭环 II 型 T-S 连续时延模糊控制系统为

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^p w_i(t) (h_j(t) + \bar{h}_j(t)) [(A_i - B_i F_j) x(t) + A_{di} x(t - \sigma(t))] \quad (7)$$

I 型时变时延模糊系统的稳定性条件参考文献^[6]。

定理 1: 给定参数 $\rho_i (i = 1, 2)$ 、 τ 和 μ , 具有时变

$\sigma(t)$ 时延且满足 $0 \leq \sigma(t) \leq \tau$ 及 $|\dot{\sigma}(t)| \leq \mu$ 的系统式(7)将渐进稳定, 如果存在正定矩阵 P, Q, R, Z , 矩阵 $X, Y_j (j = 1, 2, \dots, p), N_{ij} = [N_{1ij} \ N_{2ij} \ 0 \ 0]^T, M_{ij} = [0 \ M_{1ij} \ M_{2ij} \ 0]^T, S_{ij} = [S_{1ij} \ S_{2ij} \ 0 \ 0]^T, T_{ij} = [0 \ T_{1ij} \ T_{2ij} \ 0]^T$ 同时满足线性矩阵不等式 $\begin{bmatrix} \Xi_1 & \tau N_{ij} \\ * & -\tau Z \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} \Xi_1 & \tau M_{ij} \\ * & -\tau Z \end{bmatrix} < 0,$

$$\begin{bmatrix} \Xi_2 & \tau S_{ij} \\ * & -\tau Z \end{bmatrix} < 0, \begin{bmatrix} \Xi_2 & \tau T_{ij} \\ * & -\tau Z \end{bmatrix} < 0.$$

其中 $\Xi_1 = \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_2^T, \Xi_2 = \Phi_1 + \Phi_3 + \Phi_3^T; \Phi_1 =$

$$\begin{bmatrix} Q + R & 0 & 0 & P \\ * & -(1 - \mu)Q & 0 & 0 \\ * & * & -R & 0 \\ * & * & * & \tau Z \end{bmatrix}, \Phi_2 = [N_{ij} -$$

$$A_c + Y_{N_{ij}} + M_{ij} - A_{dc} M_{ij} \ L],$$

$$\Phi_3 = [S_{ij} - A_c + Y_{S_{ij}} + T_{ij} - A_{dc} T_{ij} \ L];$$

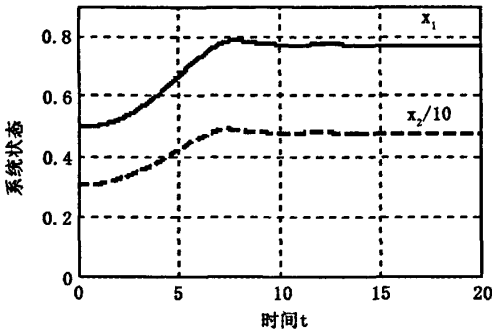
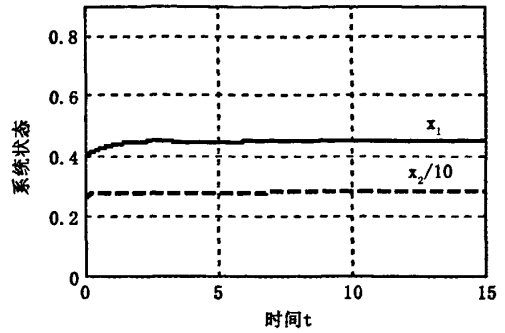
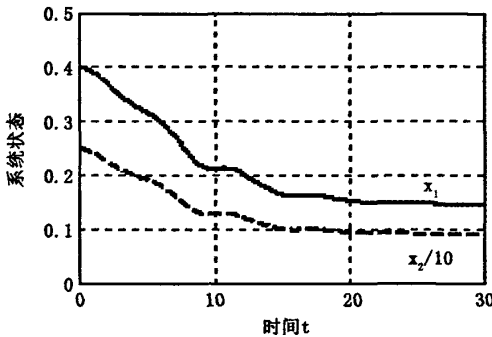
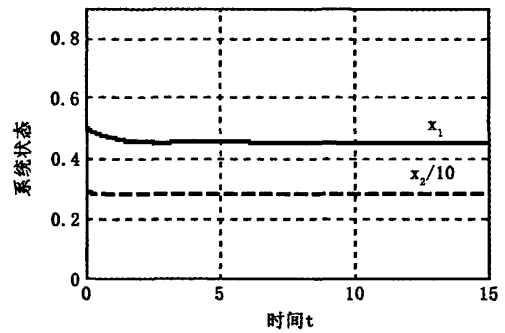
$$L = [X \ \rho_1 X \ 0 \ \rho_2 X]^T;$$

$$A_c = [A_i X \ \rho_1 A_i X \ 0 \ \rho_2 A_i X]^T; A_{dc} = [A_{di} X \ \rho_1 A_{di} X \ 0 \ \rho_2 A_{di} X]^T;$$

$Y = [B_i Y_j \ \rho_1 B_i Y_j \ 0 \ \rho_2 B_i Y_j]^T$; “*” 表示对称矩阵中的对称项。

由上述线性矩阵不等式可得到控制器的反馈增益为 $F_j = Y_j X^{-1} (j = 1, 2, \dots, p)$ 。

证明: 略。

图5 开环响应, $x_0 = (0.4 \ 2.5)$ Fig.5 Open-loop response, $x_0 = (0.4 \ 2.5)$ 图6 闭环响应, $x_0 = (0.4 \ 2.5)$ Fig.6 Closed-loop response, $x_0 = (0.4 \ 2.5)$ 图7 开环响应, $x_0 = (0.5 \ 3)$ Fig.7 Open-loop response, $x_0 = (0.5 \ 3)$ 图8 闭环响应, $x_0 = (0.5 \ 3)$ Fig.8 Closed-loop response, $x_0 = (0.5 \ 3)$

3 仿真实例

为了让 CSIR 系统稳定工作在不稳定的工作点 $(0.447 \ 2, 2.752)$ 上,由定理 1 及 CSIR 系统的模型参数可得到 CSIR 系统的 II 型模糊控制器反馈增益为 $F_1 = F_2 = F_3 = [-63.666 \ 1 \ 41.460 \ 4]$ 。图 5、图 6 分别为初始状态为 $x_0 = (0.4 \ 2.5)$ 的系统开环和闭环响应状态轨迹。由两图对比可以看出 II 型模糊控制器可以将带有时变时延特性且具有参数不确定性的 CSIR 系统控制在其不稳定的工作点 $(0.447 \ 2, 2.752)$ 上。图 7、图 8 同样显示了 II 型模糊控制器在 CSIR 系统控制中的有效性。

4 结语

通过该控制器的设计过程展示了针对具有非线性、时变时延特性及参数不确定性的复杂动力系统的 II 型模糊控制器的设计流程,仿真结果表明 II 型模糊控制理论在设计具有多重不确定性的复杂非线性控制系统过程中的有效性,同时也可作为离散领域的复杂动力系统的控制器设计提供参考。

参考文献:

- [1] WU F. LMI - based Robust model predictive control and its application to an industrial CSIR problem[J]. Journal of Process Control, 2001, 11(6): 649 - 659.
- [2] TANAKA K, SUGENO M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45 (2): 136 - 156.
- [3] RICHARD J P. Time - delay systems: An overview of some recent advances and open problems[J]. Automatica, 2003, 39(10): 1667 - 1694.
- [4] CAO Y Y, FRANK P M. Analysis and synthesis of nonlinear time - delay systems via fuzzy control approach[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2000, 8(2): 200 - 211.
- [5] HAGRAS H. Type - 2 FLCs: A new generation of fuzzy controllers [J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2007, 2(1): 30 - 43.
- [6] TIAN G, YUE D, ZHANG Y J. Delay - dependent robust H_∞ control for T - S fuzzy system with interval time - varying delay [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160: 1708 - 1719.

(责任编辑 马立)