

切换式连续搅拌槽自适应安全控制

闫诗宇 谢 静

沈阳工业大学 辽宁沈阳 110870

摘要: 连续搅拌槽反应釜 (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) 作为一类化学反应器, 由于其具有成本低、产品质量稳定和热交换能力强等特点, 在化工、生物制药、石油生产等工业生产过程中得到了广泛的应用。CSTR 的工作原理, 往往需要在不同时间加入不同的反应物进行混合, 所以在很多的传统 CSTR 中加入了切换机制, 将其建模成切换系统, 从而提高工作效率。并且由于网络技术的不断发展, 切换式连续搅拌槽反应釜 (Switching Continuous Stirred Tank Reactor, SCSTR) 的数据也通过网络传输。这也就同时需要考虑网络安全的问题。基于此, 本文中首先在传统 CSTR 基础上对 SCSTR 系统进行建模, 并考虑了其传感器到执行器, 执行器到控制器之间的网络通道遭受欺骗攻击。最后通过 Matlab 仿真对模型自身稳定性进行了深入的研究。

关键词: 连续搅拌槽反应釜; 切换系统; 安全控制; 自适应控制

Adaptive safety control for switching continuous stirring tank

Shiyu Yan, Jing Xie

Shenyang University of Technology, Shenyang, Liaoning, 110870, China

Abstract: As a kind of chemical Reactor, Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) has been widely used in chemical, biopharmaceutical, petroleum and other industrial processes due to its low cost, stable product quality and strong heat exchange capacity. The working principle of CSTR often requires mixing of different reactants at different times, so a switching mechanism is added to many traditional CSTR to model it as a switching system, so as to improve working efficiency. Due to the development of network technology, the data of Switching Continuous Stirred Tank Reactor (SCSTR) is also transmitted through the network. This also needs to consider the problem of network security. Based on this, the SCSTR system is first modeled on the basis of traditional CSTR, and the network channel between sensor and actuator and actuator to controller is subjected to spoofing attacks. Finally, the stability of the model is studied by Matlab simulation.

Key words: continuous stirred tank reactor; Switching system; Safety control; Adaptive control

0 前言:

在化工、石油生产等工业领域, CSTR 被广泛应用, 是工业生产中的重要设备。正因为其广泛的应用, 使其的稳定性以及控制性能的好坏变得尤为的重要^[1]。由于 CSTR 系统的工作过程中往往需要在不同时间加入不同的反应物进行混合, 所以在很多的传统 CSTR 中加入了切换机制, 将其建模成切换系统, 从而提高工作效率。另一方面, 在现代工业过程快速的发展下, 大多数的控制系统中引入了通信网络, CSTR 系统也不例外。然而, CSTR 控制系统在享受网络所带来的便捷的同时, 避免不了网络可能会受到恶意攻击, 可能会造成灾难性的经济损失, 甚至生命危险。

为了更好的解决上述问题, 采用自适应安全控制对 CSTR 进行控制。由于自适应所具有的特性, 常常用来处理系统中不确定性问题, 这也使自适应控制逐渐发展成为控制方式的一个重要分支^[2-3]。

因此, 针对带有欺骗攻击的 SCSTR 系统设计自适应控制方法具有实际意义。

1 系统建模

SCSTR 结构如图 1 所示:

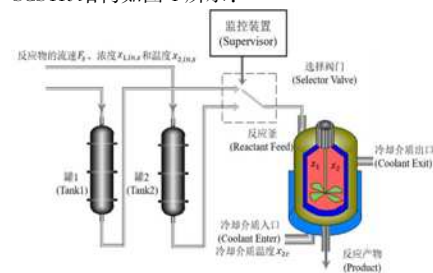


图 5.1 切换式连续搅拌槽反应釜示意图

Fig. 5.1 Diagram of the switching continuously stirred tank reactor systems

切换式连续搅拌槽反应器的系统模型可以描述为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= \frac{F_s}{V}(x_{1,in,s} - x_1) + K_s \varphi_s(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 &= \frac{F_s}{V}(x_{2,in,s} - x_2) + \gamma(x_{2c} - x_2) - \Delta H_s(x_1, x_2) \varphi_s(x_1, x_2) \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $s \in S = \{1, 2\}$, $x_{1,in,s}$, x_1 分别是输入流和反应器中的化学物质浓度, $x_{2,in,s}$, x_2 分别是输入流和反应器中的温度, x_{2c} 是冷却剂温度, φ 是反应速率, K_s 是化学计量系数, V/F_s 是平均停留时间, $\Delta H_s(x_1, x_2)$ 是反应热, γ 是传热系数。

对于稳态值 x_1^* , x_2^* 和 x_{2c}^* , 引入变量变换: $\eta_1 = x_1 - x_1^*$, $\eta_2 = x_2 - x_2^*$ 和 $u = x_{2c} - x_{2c}^*$ 。考虑欺骗攻击和扰动, 式 (1) 可以描述为:

$$\begin{aligned} \dot{\eta}_1 &= \eta_2 + f_{s,1}(\eta_1, \eta_2) + D_1(t) \\ \dot{\eta}_2 &= \gamma u + \delta_{a,s}(\eta, t) + f_{s,2}(\eta_1, \eta_2) + D_2(t) \\ \dot{\eta}_q &= \eta_q + \delta_q(\eta_q, t) \end{aligned} \quad (2)$$

其中, 定义 $f_{s,1} = F_s/V(x_{1,in,s} - x_1^* - \eta_1) + K_s \varphi_s(\eta_1 + x_1^*, \eta_2 + x_2^*) - \eta_2$ 和 $f_{s,2} = F_s/V(x_{2,in,s} - x_2^* - \eta_2) + \gamma(x_{2c}^* - x_2^* - \eta_2) - \Delta H_s(\eta_1 + x_1^*, \eta_2 + x_2^*) \varphi_s(\eta_1 + x_1^*, \eta_2 + x_2^*)$ 。

2 自适应控制器设计

设计虚拟控制器、控制器以及自适应律如下:

$$\alpha_r = -k_r \bar{\omega}_r + N(\xi_r) \bar{\alpha}_r \quad (3)$$

$$\bar{\alpha}_r = \frac{\bar{\omega}_r \hat{h}_r S_r^T(\bar{\Xi}_r) S_r(\bar{\Xi}_r)}{2a_r^2} + d_r \bar{\omega}_r + \frac{\hat{Y}_r \bar{\omega}_r}{\sqrt{\bar{\omega}_r^2 + \tau_r^2}} \quad (4)$$

$$\dot{\hat{h}}_r = \frac{\bar{\omega}_r^2 S_r^T(\bar{\Xi}_r) S_r(\bar{\Xi}_r)}{2a_r^2} - l_{r,1} \hat{h}_r \quad (5)$$

$$\dot{\hat{Y}}_r = \frac{\bar{\omega}_r^2}{\sqrt{\bar{\omega}_r^2 + \tau_r^2}} - l_{r,2} \hat{Y}_r, \quad r = 1, \dots, n \quad (6)$$

$$u_s = N(\xi_{n+1}) \bar{\alpha}_{n+1} \quad (7)$$

$$\bar{\alpha}_{n+1} = \bar{\omega}_n \hat{\Gamma}_1 \alpha_n^2 \quad (8)$$

$$\dot{\hat{\Gamma}}_1 = \bar{\omega}_n^2 \alpha_n^2 - l_{n+1,1} \hat{\Gamma}_1 \quad (9)$$

其中, k_r , d_r , a_r , τ_r , $l_{r,1}$, $l_{r,2}$ 和 $l_{n+1,1}$ 是需要设计的正参数。

滤波器设计为:

$$G_{r+1,\sigma} \dot{z}_{r+1} = -\Lambda_{r+1}^{2c-1} - G_{r+1,\sigma} \Lambda_{r+1} - G_{r+1,\sigma} \text{sgn}(\Lambda_{r+1}) \hat{\Psi}_r \quad (10)$$

$$\dot{\hat{\Psi}}_r = \Lambda_{r+1} \text{sgn}(\Lambda_{r+1}) - \eta_r \hat{\Psi}_r \quad (11)$$

其中, $G_{r+1,\sigma}$, η_r , $r = 1, \dots, n-1$ 是正常数且 $z_r(0) = \alpha_{r-1}(0)$, 并存在一个未知的正常数 Ψ_r 满足 $|\dot{\alpha}_r| \leq \Psi_r$ 。 $\hat{\Psi}_r$ 是 Ψ_r 上界的估计, $\tilde{\Psi}_r = \Psi_r - \hat{\Psi}_r$ 是估计误差。

取李雅普诺夫函数为:

$$\text{第 1 步: } V_1 = \frac{1}{2} \bar{\omega}_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{h}_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{Y}_1^2 + \frac{H_M^2}{2} \Lambda_2^2 + \frac{H_M^2}{2} \tilde{\Psi}_1^2$$

第 r 步 ($r = 2, 3, \dots, n-1$):

$$V_r = V_{r-1} + \frac{1}{2} \bar{\omega}_r^2 + \frac{1}{2} \tilde{h}_r^2 + \frac{1}{2} \tilde{Y}_r^2 + \frac{H_M^2}{2} \Lambda_{r+1}^2 + \frac{H_M^2}{2} \tilde{\Psi}_r^2$$

$$\text{第 } n \text{ 步: } V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} \bar{\omega}_n^2 + \frac{1}{2} \tilde{h}_n^2 + \frac{1}{2} \tilde{Y}_n^2 + \tilde{\Gamma}_1^2$$

对上述李雅普诺夫函数进行求导, 并将式 (3) — (11) 代入其中, 可以得到

$$\dot{V}_n \leq -\kappa_1 V_n - \kappa_2 V_n^c + \bar{\chi} \quad (12)$$

其中 $\bar{\chi} = \chi_{\max} + \sum_{j=1}^n \bar{\mu}_j$, $\chi_{\max} = \max_{t \in [0, t_f]} \sum_{j=1}^{n+1} (g_j(t)N(\xi_j) + 1)\xi_j$ 。根据文献^[4], 可知设计的控制器保证了 SCSTR 系统的稳定性。

3 仿真实现

对于第一个子系统 $f_{1,1} = \eta_2 e^{-1-\eta_1^2} + (1 - e^{\eta_1}) / (1 + e^{-\eta_1})$, $f_{1,2} = \eta_1^2 - \eta_2$ 。对于第二个子系统, $f_{2,1} = 0.3\eta_2 - 2\eta_1 + 0.4 \tanh(\eta_1 + \eta_2)\eta_2$, $f_{2,2} = \eta_1 \cos(\eta_1)$, $f_{s,1}(0,0)$, $f_{s,2}(0,0) = 0$ 。假设 $\delta_{a,1} = e^{\sin(t)}\eta_1\eta_2$, $\delta_{a,2} = \cos(\eta_1)\eta_2$, $\delta_1 = 0.6 \cos(t)\eta_1$, $\delta_2 = (0.2 + 0.5 \sin(t))\eta_2$ 和 $D_2(t) = 0.01 \cos(t)$ 。然后, 参数选择为: $k_1 = 5$, $k_2 = 5$, $d_1 = d_2 = 0.1$, $a_1 = 0.5$, $a_2 = 0.7$, $t_{1,1} = 1.5$, $t_{2,1} = 1$, $t_{3,1} = 1$, $t_{1,2} = t_{2,2} = 2.3$, $\tau_1 = \tau_2 = 5$ 和 $G_2 = 0.03$ 。神经网络 $\Theta_1^T \mathcal{S}_1(\Xi_1)$ 和 $\Theta_2^T \mathcal{S}_2(\Xi_2)$ 分别包含 3 和 5 个节点, 且它们的宽度分别等于 5 和 2, 它们的中心均匀地间隔在 $[-3, 3]$ 中。图 2 表示 SCSTR 系统的状态轨迹, 从中可以看到 SCSTR 系统状态在欺骗攻击和干扰下是有界的。

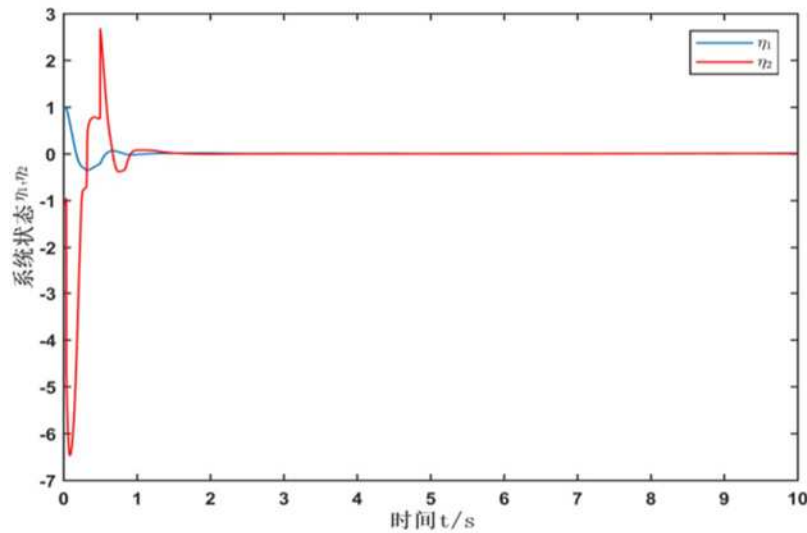


图 2 系统状态轨迹图

Fig. 2 Trajectory of the system state

4 结语

本文采用自适应控制器设计方法, 对带有欺骗攻击的 SCSTR 系统进行控制, 使系统具有较好的控制性能。最后通过 Matlab 仿真验证了算法的有效性, 具有一定的实际意义。

参考文献:

- [1] 陈露, 李凌. 模糊无模型自适应控制在 CSTR 中的仿真研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2022(01):36-40+47. DOI:10.19950/j.cnki.cn61-1121/th.2022.01.008.
- [2] Liu Y J, Ma L, Liu L, et al. Adaptive neural network learning controller design for a class of nonlinear systems with time-varying state constraints[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 31(1): 66-75.
- [3] Li Z, Zhao J. Resilient adaptive control of switched nonlinear cyber-physical systems under uncertain deception attacks[J]. Information Sciences, 2021, 543: 398-409.
- [4] Yu J, Shi P, Zhao L. Finite-time command filtered backstepping control for a class of nonlinear systems[J]. Automatica, 2018, 92: 173-180.