



中国科技期刊卓越行动计划项目入选期刊

控制与决策

CONTROL AND DECISION



连续搅拌反应釜的固定时间命令滤波跟踪控制

刘凯, 辛丽平, 刘家硕, 张静

引用本文:

刘凯, 辛丽平, 刘家硕, 张静. 连续搅拌反应釜的固定时间命令滤波跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1936–1942.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1882>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于反演算法的严格反馈非线性系统固定时间跟踪控制

Fixed-time tracking control for strict-feedback nonlinear systems based on backstepping algorithm

控制与决策. 2021, 36(1): 173–179 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0658>

输入受限下自主水下航行器路径跟踪的级联控制

Path-following control of an AUV in cascade under input saturation

控制与决策. 2021, 36(12): 2964–2972 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0411>

线控转向系统的自适应高阶滑模控制

Adaptive higher-order sliding mode control for SbW system

控制与决策. 2021, 36(6): 1529–1536 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1526>

带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制

Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation

控制与决策. 2021, 36(12): 3007–3014 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0907>

一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

连续搅拌反应釜的固定时间命令滤波跟踪控制

刘 凯, 辛丽平[†], 刘家硕, 张 静

(青岛理工大学 信息与控制工程学院, 山东 青岛 266500)

摘要: 针对一类连续搅拌反应釜系统的跟踪控制问题, 提出一种基于反步法和模糊逻辑系统的自适应固定时间命令滤波控制方法. 利用命令滤波器引入误差补偿机制消除滤波误差的影响, 并解决反步法虚拟控制信号重复求导的问题; 采用模糊逻辑系统对系统中存在的非线性部分进行逼近; 利用固定时间控制方法使系统跟踪误差更迅速收敛至较小邻域内, 且收敛时间不依赖系统初始状态; 通过 Lyapunov 定理证明连续搅拌反应釜系统的闭环稳定性; 利用 Matlab/Simulink 仿真实验验证所提出控制方法的有效性. 与现有控制方法相比, 该控制方法具有控制器结构简单、收敛速度快、控制精度高、无超调等优点.

关键词: 连续搅拌反应釜; 固定时间控制; 模糊逻辑系统; 命令滤波; 反步法

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1882

引用格式: 刘凯, 辛丽平, 刘家硕, 等. 连续搅拌反应釜的固定时间命令滤波跟踪控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(6): 1936-1942.

Fixed-time command filter tracking control of continuous stirred tank reactor

LIU Kai, XIN Li-ping[†], LIU Jia-shuo, ZHANG Jing

(School of Information and Control Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266500, China)

Abstract: This paper proposes an adaptive fixed-time command filtering control methods based on backstepping method and fuzzy logic systems for a class of continuous stirred tank reactor systems. The repeated derivation of virtual control signal caused by backstepping is solved by the command filter technology, and the filtering error is eliminated by introducing error compensation mechanism. The nonlinear function of the system is approximated using a fuzzy logic system. Based on the fixed-time control method, the speed of convergence is faster, and the convergence time does not depend on the initial state of the system. The closed-loop stability of the continuous stirred tank reactor system is proved using the Lyapunov theorem. The effectiveness of the proposed control method is verified by Matlab/Simulink simulation experiments. Compared with the existing control methods, the proposed control method has the advantages of simple controller structure, fast convergence speed, high control accuracy and no overshoot.

Keywords: continuous stirred tank reactor; fixed-time control; fuzzy logic system; command filter; backstepping control

0 引言

连续搅拌反应釜 (continuous stirred tank reactor, CSTR) 是工业生产过程中广泛使用的一种反应器, 在医药试剂、石油化工、食品及合成材料等生产过程中被广泛应用^[1]. CSTR 是一种典型的复杂非线性系统, 具有多变性和强耦合的特点, 对其实施精准快速的控制一直是工业界和控制界的难题. 因此, 开展 CSTR 系统的精准跟踪控制研究具有重要意义和应

用价值^[2].

早期 CSTR 控制常采用结构简单且参数易调的比例积分微分 (PID)^[3] 控制, 但该控制方法只能在指定工作点的范围内运行, 工作点或环境的改变将严重影响系统的控制性能. 随着控制理论的深入发展, 国内外研究者提出众多新的控制方法应用到 CSTR 系统中, 基于反馈线性化的控制器设计保证了 CSTR 系统的全局稳定性^[4], 但是该控制器在存在强耦合的

收稿日期: 2022-10-31; 录用日期: 2023-03-12.

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2021MF076, ZR2016FB04); 国家自然科学基金项目 (201606141); 山东省重点研发项目 (2018GHY115025); 中国博士后基金面上项目 (2018M642611).

责任编辑: 关新平.

[†]通讯作者. E-mail: lpxin@qut.edu.cn.

情况下会影响系统稳态性能. 针对这个问题, 研究者又将模型预测控制^[5]应用到CSTR控制系统中, 使得CSTR系统在跟踪、抗干扰方面表现出更好的控制效果, 但CSTR模型预测控制未对系统非线性函数进行有效处理, 将导致控制精度降低. 近年来, 模糊逻辑系统或神经网络由于其固有的函数逼近能力, 在CSTR系统自适应反步控制器设计中得到了广泛应用^[6-9]: 文献[6]基于反步法为CSTR系统设计自适应模糊控制器, 成功实现了对温度的有效控制; 文献[7]提出应用于CSTR控制系统的神经网络自适应控制器, 并考虑输出约束的影响, 取得了良好的控制效果; 文献[8]针对具有输入约束的CSTR系统, 利用神经网络为CSTR系统建立精确的数学模型, 实现了对CSTR产物浓度、温度的控制, 更符合实际工业生产的要求; 文献[9]将神经网络自适应非线性补偿理论应用到CSTR系统控制器设计中, 仿真结果表明了所提出控制理论的有效性. 但是, 反步法需对虚拟控制信号重复求导, 增加了CSTR系统控制器的在线计算量, 限制了CSTR系统在化工生产中的进一步发展. 因此文献[10]提出动态面技术, 通过引入一阶低通滤波器解决反步法控制器设计过程中虚拟控制信号的重复求导问题, 但动态面技术没有考虑引入滤波器会产生滤波误差, 这将影响系统的跟踪性能^[11]; 文献[12]将命令滤波技术与反步法相结合, 同时引入误差补偿机制和滤波器, 既能消除滤波误差对系统的影响又能解决虚拟控制信号重复求导问题. 文献[6-12]仅仅实现了系统跟踪误差的渐近收敛, 无法实现快速收敛至跟踪值. 对于CSTR系统的跟踪控制问题, 收敛时间是一个重要考虑因素. 基于这个考虑, 有限时间控制方法在CSTR控制系统中得到了广泛应用^[13], 它能使系统的输出在有限时间内跟踪至参考值. 但有限时间控制受系统初始状态变量的影响较大, 当初始状态远离平衡态时, 会导致系统跟踪误差的收敛时间变慢. 固定时间控制技术能使收敛时间有明确上界且与系统初始状态无关^[14], 因此, 拟基于固定时间理论设计连续搅拌反应釜的命令滤波自适应控制器.

综上, 针对连续搅拌反应釜系统收敛速度慢的问题, 本文基于反步法和自适应技术设计CSTR系统固定时间命令滤波控制器. 采用模糊逻辑系统近似CSTR系统中存在的复杂非线性函数; 设计固定时间命令滤波控制器, 解决虚拟控制信号重复求导问题, 减少控制器的在线计算量, 利用误差补偿机制消除滤波信号引起的误差, 提高控制精度, 利用固定时间控制技术使CSTR系统收敛时间不再受初始状

态大小的影响, 确保系统拥有稳定的收敛时间上界; 通过Lyapunov定理证明CSTR系统的稳定性; 最后通过Matlab仿真实验验证该控制器的有效性和可行性. 与现有CSTR控制方法相比, 本文主要优势概括如下:

1) 与文献[13]的有限时间自适应反步控制器相比, 本文所设计的CSTR固定时间命令滤波控制器具有更快的收敛速度且收敛时间不受其初始状态的影响, 同时控制系统所需的控制输入信号变化幅度更小, 更易于工程实践.

2) 借助命令滤波技术引入误差补偿机制, 在解决传统反步法重复求导问题的同时消除了滤波信号引起的误差, 提高了控制精度.

1 CSTR系统描述及预备知识

1.1 CSTR系统描述

如图1所示, CSTR作为一种化学反应器, 需要精准控制物料反应的浓度、温度变化. 反应物A通过进料口进入反应器内, 经过搅拌电机的充分搅拌, 在反应器内发生 $A \rightarrow B$ 的不可逆放热反应, 随后输出反应后的物料B. 反应釜外围带有冷却夹套, 冷却夹套内可通入冷(热)剂调控反应釜的温度使其达到反应所需的温度. 同时为了建立CSTR系统的数学模型, 提出如下假设.

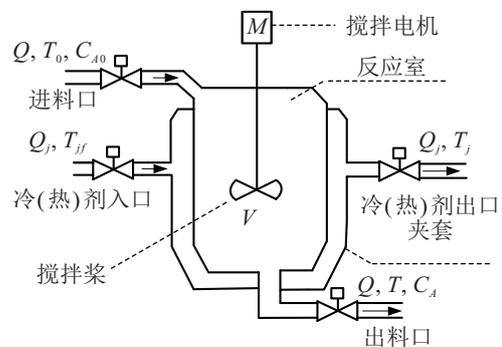


图1 CSTR系统结构

假设1 反应前后CSTR系统内的物料体积和密度不变.

假设2 反应过程中CSTR系统参数不发生变化.

根据物质和能量守恒定律, 连续搅拌反应釜的动力学模型^[15]为

$$\begin{cases} \frac{dC_A}{dt'} = \frac{Q(C_{A0} - C_A)}{V} - r, \\ \frac{dT}{dt'} = \frac{Q(T_0 - T)}{V} - \frac{hA(T - T_j)}{V\rho C_P} - \frac{\Delta H}{\rho C_P} r. \end{cases} \quad (1)$$

其中 $r = k_0 \exp\left(\frac{-E_A}{RT}\right) C_A$. 通过引入以下无量纲变

量和参数,实现CSTR数学模型的无量纲化处理:

$$\begin{cases} x_1 = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}}, x_2 = \frac{T - T_0}{T_0} \varphi, t = t' \frac{Q}{V}, \\ u = \frac{T_j - T_0}{T_0} \varphi, \varphi = \frac{E_A}{RT_0}, \delta = \frac{hA}{Q\rho C_p}, \\ D_a = \frac{k_0 e^{-\varphi} V}{Q}, B = \frac{(-\Delta H)C_{A0} \varphi}{\rho C_p T_0}. \end{cases} \quad (2)$$

无量纲化后的CSTR数学模型表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 + D_a(1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + x_2/\varphi}\right), \\ \dot{x}_2 = BD_a(1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + x_2/\varphi}\right) + \delta u - \\ \quad x_2(1 + \delta), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (3)$$

其中: x_1 和 x_2 为系统状态变量, y 为系统输出量.式(1)和(2)各参数含义^[16]见表1.

表1 CSTR系统各符号的含义

符号名称	含义	符号名称	含义
Q	进料速率	T_{jf}	冷却剂温度参考值
T_0	进料温度	E/R	活化能/通用气体常数
C_{A0}	进料浓度	C_p	物料比热容
T	出料温度	k_0	反应速率常数
C_A	出料浓度	h_A	传热面积
t'	时间	t	无量纲时间
T_j	冷却剂温度	D_a	达姆科勒数
Q_j	冷却剂流速	φ	无量纲活化能
V	反应釜体积	B	无量纲反应热
ρ	物料密度	δ	无量纲传热系数
ΔH	反应热		

本文控制目标是通过控制冷(热)剂使反应物的温度及浓度在固定时间内达到期望值并保持不变.

1.2 预备知识

引理1 非线性系统连续函数将用如下模糊逻辑系统^[17]近似:

$$f(x) = W^T S(x) + \epsilon(x).$$

其中: $W = [W_1, \dots, W_N]^T$ 为最优参数向量, $\epsilon(x)$ 为近似误差, $S(x) = \frac{[p_1(x), p_2(x), \dots, p_N(x)]^T}{\sum_{i=1}^n p_i(x)}$ 为模糊基向量, $\epsilon(x)$ 为近似误差, $N > 1$ 为模糊规则的数量.

模糊基向量用高斯函数表示为

$$p_i(x) = \exp\left(-\frac{(x - \mu_i)^T(x - \mu_i)}{2\eta_i^2}\right).$$

其中: η_i 为高斯函数宽度, $\mu = [\mu_{i1}, \mu_{i2}, \dots, \mu_{in}]$ 为中心向量, W 和 $\epsilon(x)$ 有界且 $\|W\| \leq \bar{W}, \|\epsilon(x)\| \leq \bar{\epsilon}, \bar{W}$

和 $\bar{\epsilon}$ 为任意标量.

引理2 命令滤波器^[18]定义为

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \omega_n \varphi_2, \\ \dot{\varphi}_2 = -2\zeta \omega_n \varphi_2 - \omega_n(\varphi_1 - \alpha_1). \end{cases} \quad (4)$$

若输入信号 α_1 满足 $|\dot{\alpha}_1| \leq \rho_1$ 和 $|\ddot{\alpha}_1| \leq \rho_2$ 对于所有 $t \geq 0$ 都成立,其中 $\varphi_1(0) = \alpha_1(0), \varphi_2(0) = 0$,并且 ρ_1 和 ρ_2 都是正的常量,则对于任意 $\mu > 0$,必然存在 $\zeta \in (0, 1]$ 和 $\omega_n > 0$,使得 $|\varphi_1 - \alpha_1| \leq \mu, |\dot{\varphi}_1|, |\ddot{\varphi}_1|$ 都是有界的.

引理3 如果存在设计参数^[19] $\alpha, \beta > 0, p > 1, 0 < q < 1, 0 < \phi < 1, 0 < \eta < \infty$,使得

$$\dot{V}(x) \leq \alpha V^p(x) - \beta V^q(x) + \eta, \quad (5)$$

则称系统(3)是固定时间稳定的,其稳定时间 T 满足

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\alpha\phi(p-1)} + \frac{1}{\beta\phi(1-q)}. \quad (6)$$

系统(3)解的残差集为

$$x \in \left[V(x) \leq \min \left[\left(\frac{\eta}{(1-\phi)\alpha} \right)^{\frac{1}{p}}, \left(\frac{\eta(1-\phi)}{\beta} \right)^{\frac{1}{q}} \right] \right]. \quad (7)$$

引理4^[20] 假设 $\chi_1, \chi_2, \dots, \chi_n \geq 0, 0 < k \leq 1, m > 1$,则有

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n \chi_i^k \geq \left(\sum_{i=1}^n \chi_i \right)^k, \\ \sum_{i=1}^n \chi_i^m \geq n^{1-m} \left(\sum_{i=1}^n \chi_i \right)^m. \end{cases} \quad (8)$$

2 固定时间命令滤波控制器设计

连续搅拌反应釜的固定时间命令滤波控制器设计步骤如下.

step 1: 将控制器的跟踪误差定义为 $z_1 = x_1 - x_d, z_2 = x_2 - x_c$,同时定义命令滤波器的补偿跟踪信号为 $v_1 = z_1 - \zeta_1$,其中 x_c 为命令滤波器输出信号, x_d 为系统参考信号($x_d = 0$).

选择Lyapunov函数 $V_1 = \frac{1}{2}v_1^2$,对 V_1 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= v_1(\dot{x}_1 - \dot{x}_d - \dot{\zeta}_1) = \\ &v_1 \left(-x_1 + D_a(1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + x_2/\varphi}\right) - \right. \\ &\quad \left. \alpha - \dot{x}_d + \alpha - \dot{\zeta}_1 \right). \end{aligned} \quad (9)$$

定义未知非线性函数

$$F_1(X_1) = -x_1 + D_a(1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + x_2/\varphi}\right), \quad (10)$$

其中 $X_1 = [x_1, x_2]^T$.基于模糊逻辑系统的逼近特性, $F_1(X_1)$ 可以近似为

$$F_1(X_1) = W_1^T S_1(X_1) + \varepsilon_1, \varepsilon_1 \leq \bar{\varepsilon}_1. \quad (11)$$

基于杨氏不等式, 可得

$$v_1 F_1 \leq \frac{1}{2l_1^2} v_1 \|W\|^2 S_1^T S_1 + \frac{1}{2} l_1^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_1^2. \quad (12)$$

选择虚拟控制函数 α 及误差补偿函数 ζ_1 为

$$\alpha = -c_1 z_1 - k_{11} v_1^{2p-1} - k_{12} v_1^{2q-1} + \dot{y}_d - \frac{1}{2l_1^2} v_1 \hat{\theta} S_1^T S_1, \quad (13)$$

$$\dot{\zeta}_1 = -k_{11} \zeta_1^{2p-1} - k_{12} \zeta_1^{2q-1} + x_c - \alpha + \zeta_2. \quad (14)$$

其中: 常数 $c_1 > 0, k_{11} > 0, k_{12} > 0, l_1 > 0$. 将式(12)~(14)代入(9), 可得

$$\dot{V}_1 \leq -k_{11} v_1^{2p} - k_{12} v_1^{2q} + \frac{1}{2l_1^2} v_1 (\|W_1\|^2 - \hat{\theta}) S_1^T S_1 + \frac{1}{2} l_1^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_1^2. \quad (15)$$

step 2: 定义命令滤波器的补偿跟踪信号 $v_2 = z_2 - \zeta_2$.

选择 Lyapunov 函数 $V_2 = V_1 + \frac{1}{2} v_2^2$, 对 V_2 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + v_2 (\dot{x}_2 - \dot{x}_c - \dot{\zeta}_2) = \\ &\dot{V}_1 + v_2 \left(BD_a (1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + x_2/\varphi}\right) + \right. \\ &\left. \delta u - x_2 (1 + \delta) - \dot{x}_c - \dot{\zeta}_2 \right). \end{aligned} \quad (16)$$

定义未知非线性函数

$$F_2(X_2) = BD_a (1 - x_1) \exp\left(\frac{x_2}{1 + x_2/\varphi}\right) - x_2 (1 + \delta), \quad (17)$$

其中 $X_2 = [x_1, x_2, \theta]^T$. 基于模糊逻辑系统的逼近特性, $F_2(X_2)$ 可以近似为

$$F_2(X_2) = W_2^T S_2(X_2) + \varepsilon_2, \quad \varepsilon_2 \leq \bar{\varepsilon}_2. \quad (18)$$

基于杨氏不等式, 可得

$$v_2 F_2 \leq \frac{1}{2l_2^2} v_2 W_2^T S_2^T S_2 + \frac{1}{2} l_2^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_2^2, \quad (19)$$

其中 $l_2 > 0$. 选取实际控制输入函数及误差补偿函数 ζ_2 为

$$\begin{aligned} u &= \\ &-c_2 z_2 - k_{21} v_2^{2p-1} - k_{22} v_2^{2q-1} - \frac{1}{2l_2^2} v_2 \hat{\theta} S_2^T S_2 - z_1, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\dot{\zeta}_2 = -k_{21} \zeta_2^{2p-1} - k_{22} \zeta_2^{2q-1} - \zeta_1. \quad (21)$$

其中: 常数 $c_2 > 0, k_{21} > 0, k_{22} > 0, l_2 > 0$. 将式(19)~(21)代入(16), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq -k_{21} v_2^{2p} - k_{22} v_2^{2q} + \frac{1}{2l_2^2} v_2 (\|W_2\|^2 - \hat{\theta}) S_2^T S_2 + \\ &\frac{1}{2} l_2^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_2^2. \end{aligned} \quad (22)$$

step 3: 定义 $\theta = \max \|W_i^2\|, i = 1, 2, \tilde{\theta} = \hat{\theta} - \theta$,

选择 Lyapunov 函数 $V_\theta = V_2 + \frac{1}{2r_1} \tilde{\theta}^2$, 假设 $\dot{\theta} = \hat{\theta}$, 求导可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_\theta &= \frac{1}{r_1} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} + \dot{V}_2 = \frac{1}{r_1} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} + V_2 \leq \\ &\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-k_{ij} v_i^{2q}) - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (l_i^2 + \bar{\varepsilon}_i + v_i^2) + \\ &\frac{1}{r_1} \tilde{\theta} \left(\dot{\hat{\theta}} - \frac{r_1}{2l_2^2} v_2^2 S_2^T S_2 - \frac{r_1}{2l_1^2} v_1^2 S_1^T S_1 \right). \end{aligned} \quad (23)$$

选择自适应律

$$\dot{\hat{\theta}} = \frac{r_1}{2l_1^2} v_1^2 S_1^T S_1 + \frac{r_2}{2l_2^2} v_2^2 S_2^T S_2 - m_1 \hat{\theta}. \quad (24)$$

其中: $r_1 > 0, r_2 > 0, m_1 > 0$.

3 稳定性分析

将式(24)代入(23), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_\theta &= \frac{1}{r_1} \tilde{\theta} \dot{\hat{\theta}} + \dot{V}_2 \leq \\ &\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-k_{ij} v_i^{2p} - k_{ij} v_j^{2q}) - \\ &\frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (l_i^2 + \bar{\varepsilon}_i + v_i^2) - \frac{1}{r_1} \tilde{\theta} \hat{\theta}. \end{aligned} \quad (25)$$

由 $-\tilde{\theta} \hat{\theta} = -\tilde{\theta}(\tilde{\theta} + \theta)$ 及杨氏不等式可知

$$-\tilde{\theta} \hat{\theta} \leq -\frac{\tilde{\theta}^2}{2} + \frac{\theta^2}{2}. \quad (26)$$

将式(26)代入(25), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V}_\theta &= \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 (-k_{ij} v_i^{2p} - k_{ij} v_j^{2q}) - \frac{1}{2} l_1^2 + \\ &\frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_1^2 - \frac{1}{2} l_2^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_2^2 + \frac{m_1}{2r_1} \tilde{\theta}^2 + \frac{m_1}{2r_1} \theta^2 \leq \\ &-a \left(\sum_{i=1}^2 \frac{z_i}{2} \right)^p - a \left(\sum_{i=1}^2 \frac{z_i}{2} \right)^q - \left(\frac{\tilde{\theta}^2}{2r_1} \right) - \\ &a \left(\frac{\tilde{\theta}^2}{2r_1} \right) - \frac{1}{2} l_2^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_2^2 - \frac{1}{2} l_1^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_1^2, \end{aligned} \quad (27)$$

其中 $a = \min\{2^p k_{11}, 2^p k_{12}, 2^q k_{21}, 2^q k_{22}, r_1, m_1\}$.

根据引理4可知

$$\left(\sum_{i=1}^2 \frac{\tilde{\theta}^2}{2r_1} \right)^q \leq \sum_{i=1}^2 \frac{\tilde{\theta}^2}{2r_1} + (1+q)q \frac{\tilde{\theta}^2}{1+q}. \quad (28)$$

将式(28)代入(27), 可得

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \\ &\alpha V^p - \beta V^q + \sum_{i=1}^2 m_1 \left(\frac{\tilde{\theta}^2}{2r_1} \right)^p - \sum_{i=1}^2 \frac{m_1}{2r_2} \tilde{\theta}^2 + \eta_1 \leq \\ &-\alpha V^p - \beta V^q + \eta_1 < 0. \end{aligned} \quad (29)$$

其中: $\alpha = \frac{a}{(2+1)^p}, \beta = a, \eta = \frac{1}{2} l_1^2 + \frac{1}{2} l_2^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_1^2 + \frac{1}{2} \bar{\varepsilon}_2^2 + (1-q)q \frac{\tilde{\theta}^2}{1+q}$.

根据稳定性分析可知, 存在一个常数 $0 < \varphi < 1$,

使得 x 最终收敛于如下紧集范围内:

$$x \in \min \left[V(X) \leq \left[\left(\frac{\eta}{(1-\phi)\alpha} \right)^{\frac{1}{p}}, \left(\frac{\eta}{(1-\phi)\beta} \right)^{\frac{1}{q}} \right] \right]. \quad (30)$$

且收敛时间满足

$$T \leq T_{\max} = \frac{1}{\alpha\phi(p-1)} + \frac{1}{\beta\phi(1-q)}. \quad (31)$$

由引理3可知,适当调整设计参数可使得系统输出信号在固定时间内收敛到零的小邻域范围内.固定时间的收敛时间也与 α 、 β 有关, α 和 β 越大收敛速度越快.

注1 与CSTR系统有限时间自适应反步法控制器相比,本文所设计的固定时间命令滤波控制器不仅实现了CSTR系统跟踪误差的快速收敛,并且收敛时间上界不依赖于系统的初始状态.

4 仿真分析

为了验证所提出控制方案的有效性,利用 Matlab/Simulink 对固定时间命令滤波控制器进行仿真实验,同时基于系统实际生产过程中状态变量的变化趋势,选取如下3组初始状态不同的状态变量作为对比:

情况1: $x_1(0) = 1, x_2(0) = -1$;

情况2: $x_1(0) = 1.5, x_2(0) = -1.5$;

情况3: $x_1(0) = 2, x_2(0) = -2$.

本文所选取的模糊隶属度函数为

$$p_1(x) = \exp \left(- \left(\frac{x+2}{2} \right)^2 \right),$$

$$p_2(x) = \exp \left(- \left(\frac{x+1}{2} \right)^2 \right),$$

$$p_3(x) = \exp \left(- \left(\frac{x-0}{2} \right)^2 \right),$$

$$p_4(x) = \exp \left(- \left(\frac{x-1}{2} \right)^2 \right),$$

$$p_5(x) = \exp \left(- \left(\frac{x-2}{2} \right)^2 \right).$$

CSTR系统固定时间命令滤波控制器的参数设置如表2所示.CSTR系统模型的相关参数如表3所示.

表2 CSTR系统的控制参数

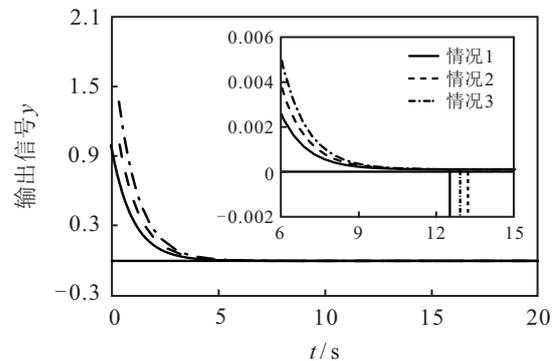
参数	参数值	参数	参数值
k_{11}	1.52	l_2	1000
k_{12}	2.1	m_1	10
k_{21}	20.1	r_1	0.1
k_{22}	0.2	r_2	0.1
p	2	ω_{n1}	2000
q	97/101	η	0.99
l_1	1000	c_2	1
c_1	1		

表3 CSTR系统模型的相关参数

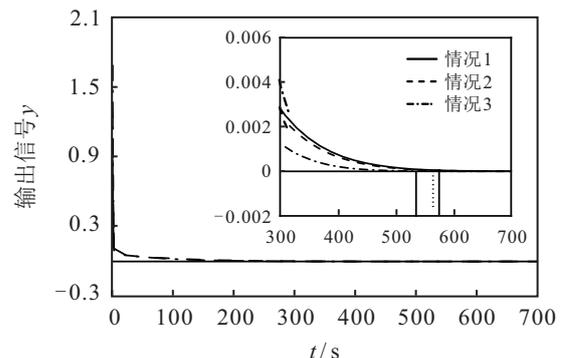
符号	数值	符号	数值
$Q/(L/min)$	100	$\Delta H/(cal/mol)$	-2×10^5
T_0/K	350	$\rho/(g/L)$	1000
$C_{A0}/(mol/L)$	1	$h_A/(cal/min K)$	7×10^5
T_{jf}/K	350	D_a	0.072
V/L	100	φ	20
$E/R/K$	1×10^4	B	8
$C_P/(cal/gk)$	1	δ	0.3
k_0/min^{-1}	7.2×10^{10}		

为了验证本文方法的优越性,在上述模型参数和初始条件相同的条件下,与文献[13]有限时间自适应反步控制方法进行仿真对比,结果如图2~图4所示.

3种不同初始状态变量情况下的仿真结果如图2和图3所示.图2描述了CSTR系统在两种不同控制器下输出信号随时间 t 的变化趋势.由图2(a)可知,在固定时间命令滤波控制器的作用下,当系统的状态变量 $[x_1, x_2]$ 分别取 $[1, -1]$ 、 $[1.5, -1.5]$ 、 $[2, -2]$ 时,其输出信号 y 收敛至参考信号0的邻域范围内需要的时间分别为12.5s、12.9s、13.2s(该时间由Matlab仿真数据表查表得到);由图2(b)可知,在有限时间自适应反步控制器的作用下,当系统的状态变量 $[x_1, x_2]$ 分别取 $[1, -1]$ 、 $[1.5, -1.5]$ 、 $[2, -2]$ 时,其输出信号 y' 收敛至参考信号0的邻域范围内需要的时间分别为575.3s、564.8s、535.4s.显然,本文所

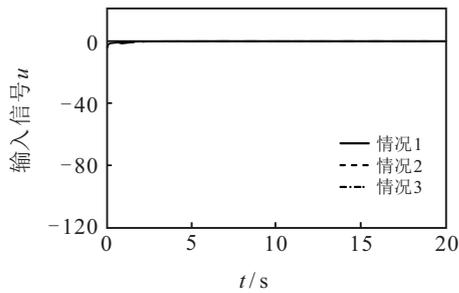


(a) 固定时间命令滤波控制的输出信号

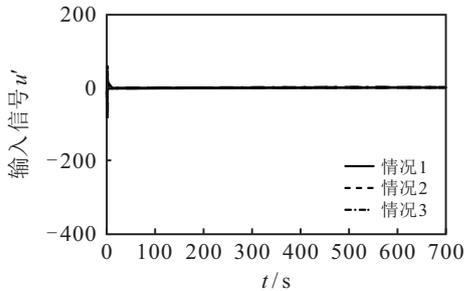


(b) 有限时间自适应反步控制的输出信号

图2 CSTR系统输出信号 $y(t)$ 对比



(a) 固定时间命令滤波控制的输入信号



(b) 有限时间自适应反步控制的输入信号

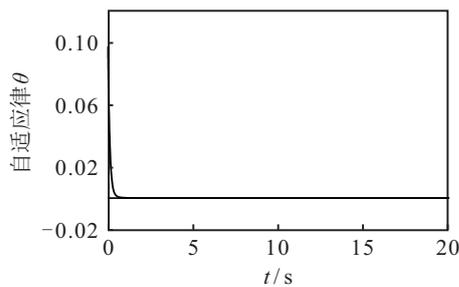
图3 CSTR系统输入信号 $u(t)$ 对比

图4 CSTR系统自适应律

提出控制方法输出信号的跟踪速度更快,收敛至参考信号的时间均约为13s,几乎不受输出信号初始状态的影响.图3描述了CSTR系统在两种不同控制器下输入信号随时间 t 的变化趋势.由图3(a)可知,在固定时间命令滤波控制器的作用下,当系统的状态变量 $[x_1, x_2]$ 分别取 $[1, -1]$ 、 $[1.5, -1.5]$ 、 $[2, -2]$ 时,其输入信号 u 变化幅度分别为 $[-5.153, -0.212]$ 、 $[-20.012, 0.4425]$ 、 $[-97.889, 2.716]$;由图3(b)可知,在有限时间自适应反步控制器的作用下,当系统的状态变量 $[x_1, x_2]$ 分别取 $[1, -1]$ 、 $[1.5, -1.5]$ 、 $[2, -2]$ 时,其输入信号 u' 的变化幅度分别为 $[-364.954, 43.523]$ 、 $[-108.317, 103.931]$ 、 $[-167.048, 162.169]$.显然,所提出控制方法输入信号的变化幅度更小,更易于实际工业生产实现.图4是自适应律 θ 随时间的变化曲线,显然该曲线是光滑且合理的.以上仿真结果表明,所提出控制策略在不同情况下均具有更快的收敛速度、更好的跟踪效果、更高的控制精度、更小的输入信号.使用固定时间命令滤波控制器,可以提高连续搅拌釜系统的控制性能,减少反应物的浪费和提高产品

的质量,更符合工业的实际要求.

5 结论

本文基于反步法,针对CSTR系统的跟踪控制问题提出一种固定时间命令滤波控制方法.该方法在自适应反步控制器中引入误差补偿机制补偿滤波误差提高了控制精度,并减少了反步法虚拟控制信号重复求导导致的在线计算量增大问题.采用模糊逻辑系统对系统中存在的非线性部分进行逼近,同时利用固定时间控制技术使CSTR系统的输出信号在固定时间内快速跟踪至期望值,且不受初始状态的影响.最后,通过仿真实验表明所提出控制方法具有收敛速度更快、控制精度更高、控制器结构简单、无超调等优点.

参考文献(References)

- [1] Zhang H G, Yang J, Su C Y. T-S fuzzy-model-based robust H_∞ design for networked control systems with uncertainties[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2007, 3(4): 289-301.
- [2] Srivastava V, Srivastava S. Control of continuous stirred tank reactor (CSTR) using nature inspired algorithms[J]. Journal of Information and Optimization Sciences, 2019, 40(2): 329-338.
- [3] Goud H, Swarnkar P. Investigations on metaheuristic algorithm for designing adaptive PID controller for continuous stirred tank reactor[J]. Mapan-Journal of Metrology Society of India, 2019, 34(1): 113-119.
- [4] Barkhordari Yazdi M, Jahed-Motlagh M R. Stabilization of a CSTR with two arbitrarily switching modes using modal state feedback linearization[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 155(3): 838-843.
- [5] Deepa S N, Baranilingesan I. Optimized deep learning neural network predictive controller for continuous stirred tank reactor[J]. Computers & Electrical Engineering, 2018, 71: 782-797.
- [6] Salehi S, Shahrokhi M. Adaptive fuzzy backstepping approach for temperature control of continuous stirred tank reactors[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(12): 1804-1818.
- [7] Li D J, Li D P. Adaptive controller design-based neural networks for output constraint continuous stirred tank reactor[J]. Neurocomputing, 2015, 153: 159-163.
- [8] Zhou W, Liu H C, He H B, et al. Neuro-optimal tracking control for continuous stirred tank reactor with input constraints[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(8): 4516-4524.
- [9] Ren X M, Rad A B. Adaptive non-linear compensation control based on neural networks for non-linear systems

- with time delay[J]. *International Journal of Systems Science*, 2009, 40(12): 1283-1292.
- [10] Swaroop D, Hedrick J K, Yip P P, et al. Dynamic surface control for a class of nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(10): 1893-1899.
- [11] Li Y M, Tong S C, Li T S. Adaptive fuzzy output feedback dynamic surface control of interconnected nonlinear pure-feedback systems[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2015, 45(1): 138-149.
- [12] Farrell J A, Polycarpou M, Sharma M, et al. Command filtered backstepping[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1391-1395.
- [13] Li D J, Wang D X, Liu L, et al. Adaptive finite-time tracking control for continuous stirred tank reactor with time-varying output constraint[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(9): 5929-5934.
- [14] Polyakov A. Nonlinear feedback design for fixed-time stabilization of linear control systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(8): 2106-2110.
- [15] 朱群雄, 王军霞. 连续搅拌釜式反应器的鲁棒最优控制[J]. *化工学报*, 2013, 64(11): 4114-4120.
(Zhu Q X, Wang J X. Robust optimal control for nonlinear continuous stirred tank reactor[J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(11): 4114-4120.)
- [16] Cervantes A L, Agamennoni O E, Figueroa J L. A nonlinear model predictive control system based on Wiener piecewise linear models[J]. *Journal of Process Control*, 2003, 13(7): 655-666.
- [17] 陈子聪, 王林, 刘建圻, 等. 带输入饱和的不确定非线性系统自适应模糊触发式补偿控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(12): 3007-3014.
(Chen Z C, Wang L, Liu J Q, et al. Adaptive fuzzy trigger compensation control for uncertain nonlinear system with input saturation[J]. *Control and Decision*, 2021, 36(12): 3007-3014.)
- [18] 于金鹏, 于海生, 林崇. 考虑铁损的异步电动机模糊自适应命令滤波反步控制[J]. *控制与决策*, 2016, 31(12): 2189-2194.
(Yu J P, Yu H S, Lin C. Fuzzy approximation-based adaptive command filtered backstepping control for induction motors with iron losses[J]. *Control and Decision*, 2016, 31(12): 2189-2194.)
- [19] 刘宜成, 熊宇航, 杨海鑫. 基于RBF神经网络的多关节机器人固定时间滑模控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(11): 2790-2798.
(Liu Y C, Xiong Y H, Yang H X. Fixed-time sliding mode control of multi-joint robot based on RBF neural network[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(11): 2790-2798.)
- [20] 王芳, 吕紫青, 单锐, 等. 输出受限的不确定非线性系统的自适应固定时间控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(9): 2265-2273.
(Wang F, Lv Z Q, Shan R, et al. Adaptive fixed-time control for uncertain nonlinear systems with output constraints[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(9): 2265-2273.)

作者简介

刘凯(1996—), 男, 硕士生, 从事非线性系统控制理论及其应用的研究, E-mail: 1395208853@qq.com;

辛丽平(1986—), 女, 副教授, 博士, 从事复杂系统的智能建模与控制、模式识别与智能检测系统等研究, E-mail: lpxin@qut.edu.cn;

刘家硕(1996—), 男, 硕士生, 从事非线性离散系统控制理论及其应用的研究, E-mail: 1225887783@qq.com;

张静(1999—), 女, 硕士生, 从事非线性系统的有限时间控制及观测器应用的研究, E-mail: 19853256181@163.com.