

基于扰动观测器的时滞非线性系统的跟踪控制

齐晓静, 刘文慧

(南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023)

[摘要] 研究了具有输入时滞和未知外部扰动的单输入单输出非线性系统的跟踪控制问题. 针对系统中未知扰动, 设计了扰动观测器对其进行良好的监测, 针对输入时滞问题, 采用 pade 近似和增加中间变量的方法消除其带来的影响. 在系统具有未知外部扰动的情况下, 利用反步法和扰动观测器的技术提出了鲁棒跟踪控制. 在基于扰动观测器的鲁棒跟踪控制下, 通过李雅普诺夫分析, 保证了闭环系统中所有信号的一致渐近收敛性. 最后通过一个仿真实例验证了该控制方法的有效性.

[关键词] 扰动观测器, 输入时滞, 外部扰动, 反步法, 跟踪控制

[中图分类号] TP13 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2020)01-0001-07

Disturbance Observer-Based Tracking Control for Nonlinear Systems with Input Delay

Qi Xiaojing, Liu Wenhui

(School of NARI Electrical and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China)

Abstract: This paper studies tracking control problem of a class of single input single output nonlinear systems with input delay and unknown external disturbances. First, a disturbance observer is designed to deal with the unknown disturbances. Then, pade approximation method and intermediate variable are introduced to eliminate the effects of the input delay. By using the backstepping technique and disturbance observer, we propose the tracking control scheme for the nonlinear systems with unknown external disturbances. Under the designed tracking control scheme based on the Lyapunov method, it is proved that all the signals in the closed-loop system are uniformly asymptotic convergence. Finally, a simulation example is given to verify the effectiveness of the proposed control method.

Key words: disturbance observer, input delay, external disturbance, backstepping, tracking control

非线性系统的跟踪控制问题是控制系统设计中的热点问题,更是一个难点问题. 上个世纪,人们对跟踪问题的研究绝大部分还只限于不考虑系统的非线性和不确定性^[1-5]. 但在现代的许多实际问题中,系统的非线性及不确定性是客观存在的,不可避免的,例如机器人的轨迹跟踪和飞行器的姿态跟踪等工程问题,由此非线性系统的跟踪控制问题得到了更多的关注^[6-10]. 由于对实际系统无法建立精确模型,所以对不确定性非线性系统的跟踪控制问题的研究更具有实际意义^[11-12]. 本文研究了具有输入时滞和未知外部扰动的非线性系统的跟踪控制问题. 提出了一种基于扰动观测器的跟踪控制方案. 在基于扰动观测器的鲁棒跟踪控制下,通过李雅普诺夫分析,保证了闭环系统中所有信号的一致渐近收敛性.

时滞是自然界过程和化工、生物、网络控制等许多工业系统中普遍存在的一种现象,如:连续的搅拌槽^[13]、龙门吊^[14]、信号轴磁悬浮^[15]等. 时滞的存在往往会导致系统的不稳定性,从而破坏系统的性能^[16]. 由于时滞的普遍存在使得许多工程控制和理论研究具有大量的困难,因此近年来人们对时滞系统的稳定性分析问题进行了大量的研究,时滞控制问题已经成为近年来的一个重要研究课题. 处理输入时滞的主要工具是 Lyapunov Razumikhin 函数(LRFs)和 Lyapunov Krasovskii 函数(LKF)^[17]. 但是,目前对于

收稿日期:2019-02-26.

基金项目:国家自然科学基金青年基金项目(61803208)、江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20180726)、江苏省高校自然科学研究面上项目(18KJB120005).

通讯作者:刘文慧,博士,讲师,研究方向:非线性控制、智能控制. E-mail:liuwenhui1211@163.com

处理输入时滞问题的方法较少,本文主要采用 pade 近似和增加中间变量的方法消除输入延迟的影响.

在实际的控制系统中,被控对象往往伴随着扰动和不确定性,对控制系统的性能及稳定性产生不利影响. 因此抑制扰动和不确定性是控制系统设计的一个重要目标. 然而很多时候外部干扰无法直接测量或测量成本太高^[18]. 解决这一问题的一种直观的想法是从可测量的变量来估计扰动,然后采取控制行动,在扰动估计的基础上以补偿干扰的影响. 近年来,各种扰动观测器得到了广泛的研究. 在这些研究中,通常采用扰动观测器来逼近外部扰动,并根据扰动观测器的近似输出来设计跟踪控制. 本文是通过设计扰动观测器来对系统中的扰动进行监测,并利用反步法和扰动观测器的技术提出了跟踪控制.

1 问题描述

考虑如下具有输入时滞的严格反馈非线性系统

$$\begin{cases} dx_1/dt = x_2 + f_1(x_1), \\ dx_i/dt = x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i), \quad i = 2, \dots, n-1, \\ dx_n/dt = u(t-\tau) + f_n(x) + d, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\bar{x}_i = [x_1, x_2, \dots, x_i]^T (i=1, 2, \dots, n)$ 为系统的可测状态向量且令 $x = \bar{x}_n, y$ 为系统的输出, $u(t-\tau)$ 为带时滞的控制输入, τ 是未知的非负延迟, $f_i(\bar{x}_i), i=1, 2, \dots, n$ 为已知的光滑非线性函数, d 是未知的外界扰动.

本文的控制目标是设计一个基于扰动观测器的跟踪控制器,保证系统的输出 $y(t)$ 能够跟踪给定的参考信号 $y_r(t)$, 并且保证闭环系统中的所有信号一致渐近收敛.

为了对不确定非线性系统(1)进行基于扰动观测器的跟踪控制设计,需要如下假设:

假设 1^[19] 对于任意 $t>0$, 均存在 $Y_i>0$, 使得 $|y_r^{(i)}(t)| \leq Y_i, i=1, 2, \dots, n$.

假设 2^[19] 对于任意一个系统状态 x , 都存在一个已知的常数 D , 使得 $\left| \frac{dd(t)}{dt} \right| \leq D$.

注 1 上述假设意味着外部扰动的变化率必须是有界的,这对于实际系统是合理的.

2 扰动观测器的设计

由于 $d(t)$ 是未知的,不能直接用于不确定非线性系统(1)的鲁棒跟踪控制,因此要设计扰动观测器对其进行估计. 为了设计一个非线性扰动观测器,引入了一个辅助设计变量

$$z = d - kx_n. \quad (2)$$

式中, $k>0$ 是设计参数.

式(2)中, z 对时间的导数为

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dd(t)}{dt} - k \cdot \frac{dx_n}{dt} = \frac{dd(t)}{dt} - k(u(t-\tau) + f_n(x) + d) = \frac{dd(t)}{dt} - k(u(t-\tau) + f_n(x) + z + kx_n). \quad (3)$$

辅助变量 z 的估计为

$$\frac{d\hat{z}}{dt} = -k(u(t-\tau) + f_n(x) + \hat{z} + kx_n). \quad (4)$$

式中, \hat{z} 是 z 的估计值.

由式(2)得扰动 d 的估计值为

$$\hat{d} = \hat{z} + kx_n. \quad (5)$$

我们定义

$$\tilde{z} = z - \hat{z} = d - \hat{d} = \tilde{d}. \quad (6)$$

由式(3)和式(4)可得 \tilde{z} 的导数

$$\frac{d\tilde{z}}{dt} = \frac{dz}{dt} - \frac{d\hat{z}}{dt} = \frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{z} = \frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{d}. \quad (7)$$

又由于

$$\frac{d\hat{d}(t)}{dt} = \frac{d\hat{z}}{dt} + k \cdot \frac{dx_n}{dt} = -k[u(t-\tau) + f_n(x) + \hat{z} + kx_n] + k[u(t-\tau) + f_n(x) + d] = k(d - \hat{z} - kx_n) = k(z - \hat{z}) = k\tilde{z} = k\tilde{d}. \quad (8)$$

根据式(6)可知,式(5)可变换为

$$\frac{d\tilde{z}}{dt} = \frac{dz}{dt} - \frac{d\hat{z}}{dt} = \frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{z} = \frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{d} = \frac{dd(t)}{dt} - \frac{d\hat{d}(t)}{dt} = \frac{d\tilde{d}(t)}{dt}. \quad (9)$$

非线性扰动观测器的设计可归纳为以下定理.

定理 1 考虑不确定非线性系统(1),将非线性扰动观测器设计为式(4)和式(5),则所提出的非线性扰动观测器的近似误差一致渐近收敛.

证明 为了考虑估计误差 \tilde{d} 的收敛性,选择如下 Lyapunov 函数

$$V = \frac{1}{2}\tilde{d}^2 = \frac{1}{2}\tilde{z}^2. \quad (10)$$

可得 V 的导数为

$$\frac{dV}{dt} = \tilde{d} \cdot \frac{d\tilde{d}(t)}{dt} = \tilde{d} \cdot \frac{d\tilde{z}}{dt} = \tilde{d} \cdot \left(\frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{z} \right) = \tilde{z} \cdot \left(\frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{z} \right) = \tilde{z} \cdot \frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{z}^2. \quad (11)$$

$$\tilde{z} \cdot \frac{dd(t)}{dt} \leq \frac{1}{2} \left(\tilde{z}^2 + \left(\frac{dd(t)}{dt} \right)^2 \right). \quad (12)$$

将(12)代入(11)可得

$$\frac{dV}{dt} = \tilde{z} \cdot \frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{z}^2 \leq - \left(k - \frac{1}{2} \right) \tilde{z}^2 + \frac{1}{2} D^2. \quad (13)$$

故当 $\tilde{z}^2 > \frac{0.5}{k-0.5} D^2$ 时, $\frac{dV}{dt} < 0$ 成立. 因此,只有选择合适的设计参数 k ,扰动观测器的逼近误差 \tilde{d} 才是一致渐近收敛的.

3 基于扰动观测器的跟踪控制器设计

下面运用鲁棒跟踪控制设计,针对系统(1),采用反步法和扰动观测器的技术实现鲁棒跟踪控制. 利用反步法,将设计过程分为 n 步,在最终的设计步骤中,出现了带有时滞的输入 $u(t-\tau)$. 为了解决输入延迟的问题,本文引入了 pade 近似方法,具体方法如下

$$L[u(t-\tau)] = \exp(-\tau s) L[u(t)] = \frac{\exp(-\tau s/2)}{\exp(\tau s/2)} L[u(t)] \approx \frac{1-\tau s/2}{1+\tau s/2} L[u(t)]. \quad (14)$$

式中, $L[u(t)]$ 为 $u(t)$ 的 Laplace 变换, s 代表 Laplace 变量. 然后定义了中间变量 x_{n+1} , 并满足以下方程

$$\frac{1-\tau s/2}{1+\tau s/2} L[u(t)] = L[x_{n+1}(t)] - L[u(t)]. \quad (15)$$

故式(15)可进一步表示成以下形式

$$2L[u(t)] = L[x_{n+1}(t)] + \frac{\tau s}{2} L[x_{n+1}(t)]. \quad (16)$$

对式(16)进行 Laplace 反变换可变为

$$\frac{dx_{n+1}}{dt} = \frac{4}{\tau} u - \frac{2}{\tau} x_{n+1}. \quad (17)$$

令 $\gamma = \frac{2}{\tau}$, 式(17)可重新表示为

$$\frac{dx_{n+1}}{dt} = 2\gamma u - \gamma x_{n+1}. \quad (18)$$

根据式(18),系统(1)可进一步描述为

$$\begin{cases} dx_i/dt = x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i), & i = 1, 2, \dots, n-1, \\ dx_n/dt = f_n(x) + x_{n+1}(t) - u(t) + d, \\ dx_{n+1}/dt = 2\gamma u(t) - \gamma x_{n+1}, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (19)$$

考虑如下坐标变换:

$$\begin{aligned} e_1 &= y - y_r, \\ e_i &= x_i - \alpha_{i-1}, \quad i = 2, 3, \dots, n-1. \\ e_n &= x_n - \alpha_{n-1} + \frac{1}{\gamma} x_{n+1}. \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $e_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为虚拟误差, $\alpha_i, i=1, 2, \dots, n-1$ 为虚拟控制器, 将在下文中给出.

接下来, 我们将采用反步法提出一种鲁棒跟踪控制策略.

(1) 第 1 步: 定义跟踪误差 $e_1 = y - y_r$, 且计算跟踪误差 e_1 的导数为

$$\frac{de_1}{dt} = \frac{dy}{dt} - \frac{dy_r}{dt} = \frac{dx_1}{dt} - \frac{dy_r}{dt} = x_2 + f_1(x_1) - \frac{dy_r}{dt}. \quad (21)$$

由于 $e_2 = x_2 - \alpha_1$, 故可得

$$\frac{de_1}{dt} = e_2 + \alpha_1 + f_1(x_1) - \frac{dy_r}{dt}. \quad (22)$$

选择虚拟控制器 α_1 为

$$\alpha_1 = -k_1 e_1 - f_1(x_1) + \frac{dy_r}{dt}. \quad (23)$$

式中, $k_1 > 0$.

将式(23)代入式(22)可得

$$\frac{de_1}{dt} = -k_1 e_1 + e_2. \quad (24)$$

考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} e_1^2. \quad (25)$$

由式(24)和式(25)可得 V_1 对时间的导数为

$$\frac{dV_1}{dt} = e_1 \cdot \frac{de_1}{dt} = e_1(-k_1 e_1 + e_2) = -k_1 e_1^2 + e_1 e_2. \quad (26)$$

(2) 第 i 步 ($2 \leq i \leq n-1$): 由于 $e_i = x_i - \alpha_{i-1}$, 可计算 e_i 的导数为

$$\frac{de_i}{dt} = \frac{dx_i}{dt} - \frac{d\alpha_{i-1}}{dt} = x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i) - \frac{d\alpha_{i-1}}{dt}. \quad (27)$$

由于 $e_{i+1} = x_{i+1} - \alpha_i$, 故可得

$$\frac{de_i}{dt} = \frac{dx_i}{dt} - \frac{d\alpha_{i-1}}{dt} = e_{i+1} + \alpha_i + f_i(\bar{x}_i) - \frac{d\alpha_{i-1}}{dt}. \quad (28)$$

选择虚拟控制器 α_i 为

$$\alpha_i = -k_i e_i - f_i(\bar{x}_i) + \frac{d\alpha_{i-1}}{dt}. \quad (29)$$

式中, $k_i > 0$.

将式(29)代入式(28)可得

$$\frac{de_i}{dt} = -k_i e_i + e_{i+1}. \quad (30)$$

考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V_i = \frac{1}{2}e_i^2. \quad (31)$$

由式(30)和式(31)可得 V_i 对时间的导数为

$$\frac{dV_i}{dt} = e_i \cdot \frac{de_i}{dt} = e_i(-k_i e_i + e_{i+1}) = -k_i e_i^2 + e_i e_{i+1}. \quad (32)$$

(3)第 n 步:由于 $e_n = x_n - \alpha_{n-1} + \frac{1}{\gamma}x_{n+1}$,可计算 e_n 的导数为

$$\begin{aligned} \frac{de_n}{dt} &= \frac{dx_n}{dt} - \frac{d\alpha_{n-1}}{dt} + \frac{1}{\gamma}x_{n+1} = \\ &= f_n(x) + x_{n+1}(t) - u(t) + d - \frac{d\alpha_{n-1}}{dt} + \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{dx_{n+1}}{dt} = \\ &= f_n(x) + x_{n+1}(t) - u(t) + d - \frac{d\alpha_{n-1}}{dt} + \frac{1}{\gamma}(2\gamma u(t) - \gamma x_{n+1}) = \\ &= u(t) + f_n(x) - \frac{d\alpha_{n-1}}{dt} + d. \end{aligned} \quad (33)$$

考虑扰动观测器的输出,将控制律设计为

$$u = -k_n e_n - f_n(x) + \frac{d\alpha_{n-1}}{dt} - \hat{d}. \quad (34)$$

式中, $k_n > 0$.

将式(34)代入式(33)可得

$$\frac{de_n}{dt} = -k_n e_n + d - \hat{d} = -k_n e_n + \tilde{d}. \quad (35)$$

考虑如下 Lyapunov 函数:

$$V_n = \frac{1}{2}e_n^2. \quad (36)$$

由式(35)和式(36)可得 V_i 对时间的导数为

$$\frac{dV_n}{dt} = e_n \cdot \frac{de_n}{dt} = e_n(-k_n e_n + \tilde{d}) = -k_n e_n^2 + e_n \tilde{d}. \quad (37)$$

定理 2 针对具有外部扰动的非线性系统(1),在假设 1 和假设 2 下,对于未知的扰动,扰动观测器设计为(4)和(5),在基于扰动观测器的控制律(34)下,所提出的非线性扰动观测器的逼近误差 \tilde{d} 和跟踪误差 e_1 是一致渐近收敛的.

证明 为了考虑扰动逼近误差 \tilde{d} 的稳定性,选择如下 Lyapunov 函数

$$V = V_n + \frac{1}{2}\tilde{d}^2. \quad (38)$$

由式(9)、式(37)和式(38)可得 V 的导数为

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_n}{dt} + \tilde{d} \cdot \frac{d\tilde{d}(t)}{dt} = -k_n e_n^2 + e_n \tilde{d} + \tilde{d} \cdot \left(\frac{dd(t)}{dt} - k\tilde{d} \right) = -k_n e_n^2 + e_n \tilde{d} - k\tilde{d}^2 + \tilde{z} \cdot \frac{dd(t)}{dt}. \quad (39)$$

由 Young 不等式可得

$$e_n \tilde{d} = \frac{1}{2}(e_n^2 + \tilde{d}^2). \quad (40)$$

$$\tilde{z} \cdot \frac{dd(t)}{dt} \leq \frac{1}{2} \left(\tilde{z}^2 + \left(\frac{dd(t)}{dt} \right)^2 \right) \leq \frac{1}{2}(\tilde{z}^2 + D^2). \quad (41)$$

故将(40)及(41)代入(39)可得

$$\frac{dV}{dt} = -k_n e_n^2 + e_n \tilde{d} - k\tilde{d}^2 + \tilde{z} \cdot \frac{dd(t)}{dt} \leq -k_n e_n^2 + \frac{1}{2}(e_n^2 + \tilde{d}^2) - k\tilde{d}^2 + \frac{1}{2}(\tilde{z}^2 + D^2) \leq -\left(k_n - \frac{1}{2}\right)e_n^2 - (k-1)\tilde{d}^2 + \frac{1}{2}D^2. \quad (42)$$

为了使得 $\frac{dV}{dt} < 0$, 设计参数 k_n 和 k 需满足以下条件

$$k_n \geq \frac{1}{2}, \quad k \geq 1, \quad \left(k_n - \frac{1}{2}\right)e_n^2 + (k-1)\tilde{d}^2 > \frac{1}{2}D^2. \quad (43)$$

4 仿真算例

以下仿真实例可以验证上述方法的有效性.

考虑如下带有扰动的非线性系统:

$$\begin{cases} dx_1/dt = x_2 + x_1^2, \\ dx_2/dt = u(t-\tau) + x_1x_2^2 + d, \\ y = x_1. \end{cases} \quad (44)$$

式中, u 和 y 是系统的输入和输出, 外部扰动为 $d = \sin(0.5t)$, 输入延迟选择为 $\tau = 0.1$.

仿真中选取的设计参数为 $k_1 = 18, k_2 = 100, k = 20$, 初始条件设置为 $x_1(0) = 0, x_2(0) = 0, \hat{d}(0) = 0$.

该控制目标是对不确定非线性系统(44)达到预期的目标. 这里, 我们假设期望轨迹是 $y_r = \sin t$. 对于未知的扰动, 根据(4)和(5)设计扰动观测器, 基于扰动观测器的跟踪控制设计为 $u = -k_2e_2 - f_2(x) + \frac{d\alpha_1}{dt} - \hat{d}$.

在所提出的基于扰动观测器的跟踪控制下, 图 1 表示的是 y 的轨迹与跟踪信号 y_r 的轨迹, 图 2 表示跟踪误差 e_1 的仿真结果. 由图 1 和图 2 可以看出, 在外部的时变扰动下的跟踪性能是符合要求的. 图 3 表示在基于扰动观测器的控制律(34)下, 所提出的非线性扰动观测器的逼近误差 \tilde{d} 的仿真结果. 由仿真结果可知所提出的非线性扰动观测器的逼近误差 \tilde{d} 和跟踪误差 e_1 是一致渐近收敛的.

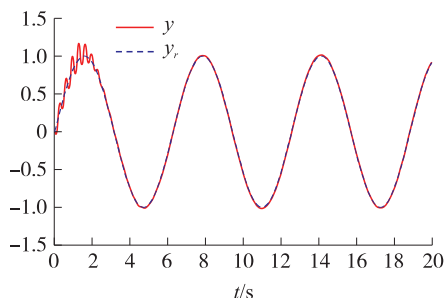


图 1 输出 y 的轨迹与跟踪信号 y_r 的轨迹

Fig. 1 Trajectories of output y and tracking signal y_r

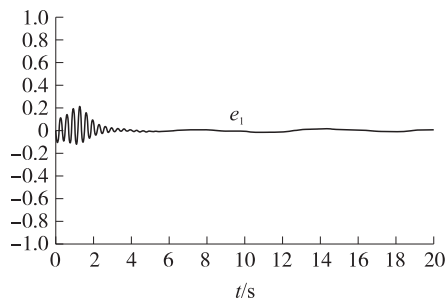


图 2 跟踪误差 e_1 的轨迹

Fig. 2 Trajectory of tracking error e_1

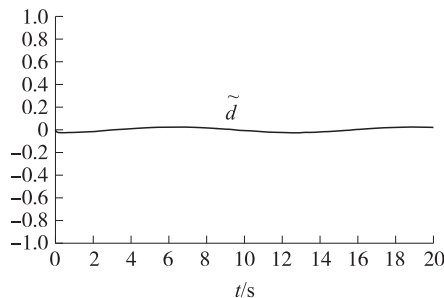


图 3 扰动观测器的逼近误差 \tilde{d} 的轨迹

Fig. 3 Trajectory of approximation error \tilde{d} of disturbance observer

5 结论

本文针对一类具有输入时滞和未知的扰动的非线性系统, 提出了一种基于扰动观测器的跟踪控制方案. 为了有效地解决未知的扰动问题, 首先提出了扰动观测器的设计方法, 其次提出了 pade 近似和增加中间变量的方法消除了输入时滞的影响. 然后在此基础上利用反步法对系统的输出进行跟踪控制, 该控制方法保证了闭环信号的一致渐近收敛性. 最后通过一个仿真算例验证了该控制方法的有效性.

[参考文献] (References)

- [1] 庄光明, 张化生, 赵军圣, 等. 中立随机马尔科夫跳变系统延迟反馈控制器设计[J]. 聊城大学学报(自然科学版),

- 2018,31(4):65-71.
- [2] 李大中,王晓慧,张爱平. 非线性鲁棒控制方法的新进展[J]. 热能动力工程,2003,18(3):220-224.
 - [3] 李永明. 非匹配不确定非线性系统自适应模糊控制[D]. 大连:大连海事大学,2014.
 - [4] YU W S, SUN C J. Fuzzy model based adaptive control for a class of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2001,9(3):415-425.
 - [5] MIRKIN B M, GUTMAN P O. Output feedback model reference adaptive control for MIMO plants with state delay[J]. Systems and Control Letters, 2005,54(10):961-972.
 - [6] TANG X D, TAO G, JOSHI S M. Adaptive actuator failure compensation for nonlinear MIMO systems with an aircraft control application[J]. Automatica, 2007,43(11):1869-1883.
 - [7] MAKOUDI M, RADOUANE L. A robust model reference adaptive control for non-minimum phase systems with unknown or time-varying delay[J]. Automatica, 2000,36(7):1057-1065.
 - [8] GE S S, WANG J. Robust adaptive tracking for time varying uncertain nonlinear systems with unknown control coefficients[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2003,48(8):1463-1469.
 - [9] TUAN H D, NARIKIYO T, APKARIAN P. Adaptive control for nonlinearly parameterized uncertainties in robot manipulators[J]. IEEE Transactions on Control System Technology, 2008,16(3):458-468.
 - [10] LUO W C, CHU Y C, LING K V. Inverse optimal adaptive control for attitude tracking of spacecraft[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2005,50(11):1639-1654.
 - [11] GE S S. Adaptive control of robots having both dynamical parameter uncertainties and unknown input scalings[J]. Mechatronics, 1996,6(5):557-569.
 - [12] CHEN M, GE S S. Robust adaptive neural network control for a class of uncertain MIMO nonlinear systems with input nonlinearities[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2010,21(5):796-812.
 - [13] MEHRKANOON S, SHARDT Y A W, SUYKENS J A K, et al. Estimating the unknown time delay in chemical processes[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2016,55:219-230.
 - [14] DELGADO E, DIAZ C M, BUSTELO D, et al. Generic approach to stability under time-varying delay in teleoperation; application to the position-error control of a gantry crane[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013,18(5):1581-1591.
 - [15] CHOI J S, BAEK Y S. A single DOF magnetic levitation system using time delay control and reduced-order observer[J]. Ksme International Journal, 2002,16(12):1643-1651.
 - [16] WU C W, LIU J X, JING X J, et al. Adaptive fuzzy control for nonlinear networked control systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 2017,47(8):2420-2430.
 - [17] YU Z X, DONG Y, LI S G, et al. Adaptive tracking control for switched strict-feedback nonlinear systems with time-varying delays and asymmetric saturation actuators[J]. Neurocomputing, 2017,238:245-254.
 - [18] CHEN W H, YANG J, GUO L, et al. Disturbance-observer-based control and related methods—an overview[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016,63(2):1083-1095.
 - [19] CHEN M, MEI R. Robust tracking control of uncertain nonlinear systems using disturbance observer[C]//Proceedings of 2011 International Conference on System Science and Engineering. Macau, China-June 2011.

[责任编辑:陈 庆]