

控制与决策

Control and Decision

输入死区和全状态约束下不确定非线性系统的快速稳定事件触发控制

王建晖, 杜泳萍, 邹涛, 刘治, 岳夏

引用本文:

王建晖, 杜泳萍, 邹涛, 刘治, 岳夏. 输入死区和全状态约束下不确定非线性系统的快速稳定事件触发控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 490–498.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1132>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[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>

[基于神经动态优化的非线性系统近似最优跟踪控制](#)

Approximate optimal tracking control for nonlinear systems based on neurodynamic optimization
控制与决策. 2021, 36(1): 97–104 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0056>

[纵向速度和艏向角受限的水面艇有限时间协同路径跟踪](#)

Finite-time cooperative path following of surface vessels with surge velocity and yaw angle constraints
控制与决策. 2021, 36(2): 363–370 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0977>

[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>

[具有未建模动态和输出约束的耦合系统的分散自适应控制](#)

Decentralized adaptive control for interconnected systems with unmodeled dynamics and output constraints
控制与决策. 2018, 33(12): 2113–2121 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2017.0933>

输入死区和全状态约束下不确定非线性系统的 快速稳定事件触发控制

王建晖¹, 杜泳萍¹, 邹涛^{1†}, 刘治², 岳夏¹

(1. 广州大学机械与电气工程学院, 广州 510006; 2. 广东工业大学自动化学院, 广州 510006)

摘要: 在实际工业系统中普遍存在输入死区、全状态约束等不可忽视的问题, 其对系统的性能造成较大的影响, 甚至可能会导致系统不稳定. 为了克服上述问题, 针对一类不确定非线性系统, 提出一种快速收敛的自适应神经网络事件触发控制方法. 首先, 将障碍 Lyapunov 函数引入到反步控制框架中, 采用径向基函数神经网络逼近未知非线性函数, 同时设计自适应事件触发机制对输入死区进行动态补偿, 通过减少控制信号的更新频率来减轻系统的通信负担, 并保证系统所有状态不违反预定义的约束区间. 在此基础上, 引入快速有限时间稳定理论, 在有限时间内能够保证闭环系统所有信号的有界性以及跟踪误差快速收敛到有界的紧集内. 最后, 通过两个仿真算例验证所提出控制方法的有效性.

关键词: 快速有限时间稳定; 输入死区; 全状态约束; 事件触发机制; 障碍 Lyapunov 函数; 非线性系统

中图分类号: TP13

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.1132

引用格式: 王建晖, 杜泳萍, 邹涛, 等. 输入死区和全状态约束下不确定非线性系统的快速稳定事件触发控制[J]. 控制与决策, 2024, 39(2): 490-498.

Fast stability event-triggered control for uncertain nonlinear systems with input dead-zone and full-state constraints

WANG Jian-hui¹, DU Yong-ping¹, ZOU Tao^{1†}, LIU Zhi², YUE Xia¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. College of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Many problems can not be ignored in practical industrial systems, such as input dead-zone and full-state constraints, which have a significant impact on the performance of the system and may even lead to system instability. To overcome the above problems, this paper proposes a fast convergent adaptive neural network event-triggered control strategy for a class of uncertain nonlinear systems. First of all, the barrier Lyapunov function is introduced into the backstepping control framework and the radial basis function neural networks approximate the unknown nonlinear function. At the same time, an adaptive event triggering mechanism is designed to dynamically compensate for the input dead-zone. By reducing the update frequency of the control signal, the communication burden of the system is reduced, and all states of the system do not violate the predefined constraint interval. On this basis, the theory of fast finite-time stability is introduced, which can guarantee the boundedness of all signals in the closed-loop system in finite time and the tracking error quickly converges to the bounded compact set. Finally, the effectiveness of the control strategy is verified by two simulation examples.

Keywords: fast finite-time stability; input dead-zone; full-state constraints; event-triggered mechanism; barrier Lyapunov functions; nonlinear systems

0 引言

输入死区是存在于许多实际工业生产系统中典型的非线性问题之一, 受到了学者的广泛关注与研究

究^[1-4]. Li 等^[1]将障碍 Lyapunov 函数与自适应反步控制方法相结合, 求解具有死区非线性系统的有限时间控制问题, 但前提需要假设死区的斜率和转折点或者

收稿日期: 2022-06-28; 录用日期: 2022-10-10.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52171331, 52275097); 广东省自然科学基金项目(2019A1515110995); 广州市科技计划项目(202002030286); 广州羊城学者项目(202235199).

责任编辑: 孙宗耀.

[†]通讯作者. E-mail: tzou@gzhu.edu.cn.

边界条件是已知的,这显然无法满足许多实际应用工程. Liu等^[2]通过自适应模糊逻辑方法来估计死区宽度, Li等^[3]采用反步控制方法和动态面技术,设计了一种基于神经网络的自适应控制方法,二者都避免了关于死区参数有界性的假设. 此外,全状态约束是一个具有挑战性的问题^[1,5-7]. 在文献[1]的基础上,将障碍 Lyapunov 函数引入到每一步设计过程中,可以确保所有状态保持在预定义的紧集内. Sun等^[5]构造了高阶正切型障碍 Lyapunov 函数来处理控制系统的全状态约束. 张天平等^[6]引入非线性映射处理全状态约束,将有约束系统变成无约束系统. 除此之外,系统还普遍存在不确定性和非线性特征. 近年来,许多学者利用模糊逻辑系统 (fuzzy logic systems, FLSs)^[8-10]或径向基函数神经网络 (radial basis function neural networks, RBFNNs)^[11-13]逼近未知非线性函数. Wang等^[13]利用 RBFNNs 和反步控制方法,研究了输入时滞和饱和的不确定非线性系统的自适应神经网络跟踪问题. 然而,在实际系统中,对系统的收敛速度要求更高.

近年来,许多学者提出了多种有限时间控制的设计机制^[14-21]. 例如, Sun等^[17]利用半全局实际有限时间稳定性判据,提出了一种有限时间自适应神经控制策略,但当初始状态远离原点时,这种控制方法存在收敛速度降低的局限性. 为了克服上述困难, Yu等^[18]利用快速有限时间稳定理论,使 Lyapunov 函数满足 $\dot{V}(x) \leq -aV(x) - cV^p(x) + \rho$, 提出了一种新的有限时间命令滤波反步控制方法. 但在许多实际工程系统中,非线性光滑的增益函数是未知的. 因此, Wang等^[19]进一步放宽增益函数的边界条件,并利用反步控制方法和快速有限时间稳定理论,研究了一类不确定非线性严格反馈系统的自适应快速有限时间跟踪控制问题.

上述结果都是基于时间触发机制框架. 由于传统的采样周期存在占用系统通信资源的问题,增加了系统的通信压力. 随着网络技术和信息技术的迅速发展,事件触发机制 (event-triggered mechanism, ETM) 备受学者的关注. 因此,人们提出了许多 ETM 方法来取代时间触发机制^[22-26]. Peng等^[24]对现有的事件触发机制方案的研究状况与最新成果进行了回顾与展望. 针对具有外部扰动和动态不确定性的非线性系统, Liu等^[25]通过改进非线性小增益定理和输入-状态稳定 (input-to-state stability, ISS), 设计了一种新的 ETM 方法. 但上述结果引来一个新的问题,即在非线性系统中难以保证 ISS 假设. 范利蓉等^[26]将控

制器与事件触发机制同时设计,实现了所有智能体的输出一致性,因此完全避免了 ISS 假设.

综上所述,本文针对一类具有输入死区和全状态约束的不确定非线性系统,为减小系统受输入死区和全状态约束的影响,提出一种快速有限时间的自适应神经网络事件触发控制方法. 与现有结果比较,本文提出的控制方法的主要创新点如下:

1) 针对实际工业生产系统中普遍存在输入死区和全状态约束的工况,而现有的补偿方案需要占用大量的通信资源,设计自适应事件触发机制. 利用双曲正切函数的特点设计控制律,进而在实现输入死区动态补偿的同时减少通信资源占用,并引入 log 型对称障碍 Lyapunov 函数,保证系统所有状态不违反系统预定义的全状态约束区间,在实际工程更具有广泛性.

2) 基于快速有限时间稳定理论、未知增益函数以及非线性特征,提出快速有限时间自适应神经网络控制方法,利用神经网络逼近未知非线性函数,并构造具有分数指数幂的自适应律,使系统满足快速有限时间稳定定理的条件,同时保证闭环系统具有更快的收敛速度和更高的跟踪精度. 此外,跟踪误差在有限时间内快速收敛到有界且可调的紧集内,而且收敛时间可调,其边界与设计参数有关.

1 问题描述与预备知识

1.1 系统模型

考虑如下不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = \phi_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i)x_{i+1}, \\ \dot{x}_n = \phi_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n)D(u), \\ y = x_1. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\bar{x}_i = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t)]^T \in R^i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) 为系统状态, $D(u)$ 为输入死区, $y \in R$ 为系统输出, $\phi_i(\cdot)$ 和 $g_i(\cdot)$ 为未知非线性光滑函数. 为便于分析,分别将 $\phi_i(\bar{x}_i)$ 和 $g_i(\bar{x}_i)$ 简写成 ϕ_i 和 g_i . 所有状态都具有约束边界 $|x_i| < \bar{o}_i$, 且 $\bar{o}_i > 0$.

考虑输入死区模型

$$D(u) = cu + d. \quad (2)$$

其中: u 表示系统控制输入.

$$c = \begin{cases} c_1, & u < d_1; \\ 0, & d_1 \leq u \leq d_2; \\ c_2, & u > d_2. \end{cases} \quad d = \begin{cases} -c_1 d_1, & u < d_1; \\ 0, & d_1 \leq u \leq d_2; \\ -c_2 d_2, & u > d_2. \end{cases}$$

$c_1 > 0$ 和 $c_2 > 0$ 分别表示曲线在负半轴和正半轴上的未知斜率, $d_1 < 0$ 和 $d_2 > 0$ 表示未知的转折点.

1.2 神经网络研究

RBFNNs具有逼近任意非线性函数的能力,本文利用该方法来逼近 ϕ_n ,则有

$$\phi_n = \Phi^T R(X) + f(X). \quad (3)$$

其中: $\Phi = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_m]^T \in R^m$ 表示理想权重向量,且 $m > 1$ 为神经网络的节点数; $X = [x_1, x_2, \dots, x_m]^T \in R^m$ 表示输入向量; $f(X)$ 为逼近误差,且 $|f(X)| \leq \tau$; $R(X) = [R_1(X), R_2(X), \dots, R_m(X)]^T$ 为基函数向量,并选择高斯函数作为径向基函数,其表达式为

$$R_i(X) = \exp\left(-\frac{(X - \nu_i)^T(X - \nu_i)}{\psi_i^2}\right), \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, m$, ν_i 和 ψ_i 分别表示高斯函数的中心和宽度.

1.3 预备知识

本文控制目标是设计一个自适应事件触发控制律,因此,不失一般性地引入以下假设与引理.

假设1^[27] 函数 $g_i(\cdot)$ ($i = 1, 2, \dots, n$)是有界的,满足 $0 < \underline{g}_i \leq |g_i(\cdot)| \leq \bar{g}_i$,其中 \bar{g}_i 和 \underline{g}_i 为未知常数.

假设2^[27-28] 期望信号 y_m 及其 n 阶导数都是连续且有界的.存在正数 S_0 和 S_i ($i = 1, 2, \dots, n$),且满足 $|y_m| \leq S_0 \leq \bar{o}_1$ 和 $|y_m^{(i)}| \leq S_i$.

引理1^[19] 考虑非线性系统 $\dot{x} = f(x, u)$,如果存在正定的光滑连续函数 $V(x, t)$, $\gamma_1 > 0$, $\gamma_2 > 0$, $0 < q < 1$ 和 $0 < \rho < \infty$,使得 $\dot{V}(x, t) \leq -\gamma_1 V(x, t) - \gamma_2 V(x, t)^q + \rho$,则系统 $\dot{x} = f(x, u)$ 是快速有限时间稳定的.系统解的紧集如下所示:

$$\lim_{t \rightarrow T} V(x) \leq \min \left\{ \frac{\rho}{(1 - \omega_0)\gamma_1}, \left(\frac{\rho}{(1 - \omega_0)\gamma_2} \right)^{\frac{1}{q}} \right\}, \quad (5)$$

其中 ω_0 满足 $0 < \omega_0 < 1$.其稳定时间为

$$T \leq \max \left\{ t_0 + \frac{1}{\omega_0 \gamma_1 (1 - q)} \ln \frac{\omega_0 \gamma_1 V(t_0)^{1-q} + \gamma_2}{\gamma_2}, t_0 + \frac{1}{\gamma_1 (1 - q)} \ln \frac{\gamma_1 V(t_0)^{1-q} + \omega_0 \gamma_2}{\omega_0 \gamma_2} \right\}. \quad (6)$$

引理2^[29] 对于任意 $x \in R$ 和任意变量 $y \in R$,有

$$xy \leq \frac{\varepsilon^a}{a} |x|^a + \frac{1}{p\varepsilon^p} |y|^p. \quad (7)$$

引理3^[30] 对于任意 $\Delta \in R$ 和任意变量 $\eta > 0$,下列不等式成立:

$$0 \leq |\Delta| - \Delta \tanh\left(\frac{\Delta}{\eta}\right) \leq 0.2785\eta. \quad (8)$$

引理4^[19] 对于任意 $\iota_1 > 0$, $\iota_2 > 0$, $\iota_3 > 0$, $\beta_1 > 0$, $\beta_2 > 0$, $\beta_3 > 0$,有

$$\beta_1^{\iota_1} \beta_2^{\iota_2} \beta_3 \leq \iota_3 \beta_1^{\iota_1 + \iota_2} + \frac{\iota_2}{\iota_1 + \iota_2} \times$$

$$\left[\frac{\iota_1}{(\iota_1 + \iota_2)\iota_3} \right]^{\frac{\iota_1}{\iota_2}} \beta_2^{\iota_1 + \iota_2} \beta_3^{\frac{\iota_1 + \iota_2}{\iota_2}}. \quad (9)$$

引理5^[31] 对于任意 $\chi_j \in R$ ($j = 1, 2, \dots, n$)和 $0 \leq l \leq 1$,有

$$\left(\sum_{j=1}^n |\chi_j| \right)^l \leq \sum_{j=1}^n |\chi_j|^l. \quad (10)$$

2 快速有限时间事件触发控制设计

将反步控制方法与RBFNNs相结合,设计一个快速有限时间控制律,并验证系统的稳定性.

2.1 控制器设计

首先,定义误差系统

$$\begin{cases} \xi_1 = x_1 - y_m, \\ \xi_i = x_i - \alpha_{i-1}, \quad i = 2, \dots, n. \end{cases} \quad (11)$$

其中: ξ_i 为误差变量, y_m 为期望信号, α_{i-1} 为虚拟控制律.

step 1: 结合系统(1)和式(11)可得

$$\dot{\xi}_1 = g_1(\xi_2 + \alpha_1) + \phi_1 - \dot{y}_m. \quad (12)$$

选择如下障碍Lyapunov函数:

$$V_1 = \frac{1}{2} \log \frac{o_1^2}{o_1^2 - \xi_1^2} + \frac{1}{2r_1} \tilde{\theta}_1^2. \quad (13)$$

其中: $o_1 = \bar{o}_1 - S_0$; $\tilde{\theta}_1 = \theta_1 - \hat{\theta}_1$ 为估计误差, $\hat{\theta}_1$ 为不确定参数 θ_1 的估计值; $r_1 > 0$.对 V_1 求导可得

$$\dot{V}_1 = \bar{\xi}_1(g_1\alpha_1 + \bar{\phi}_1) - \frac{1}{r_1} \tilde{\theta}_1 \dot{\hat{\theta}}_1 + \bar{\xi}_1 g_1 \xi_2. \quad (14)$$

其中: $\bar{\xi}_1 = \frac{\xi_1}{o_1^2 - \xi_1^2}$, $\bar{\phi}_1 = \phi_1 - \dot{y}_m$ 为未知组合项.利用RBFNNs逼近 $\bar{\phi}_1$,其表达式如下:

$$\bar{\phi}_1(X_1) = \Phi_1^T R_1(X_1) + f_1(X_1). \quad (15)$$

其中: $X_1 = [x_1, \dot{y}_m]^T$; $|f_1(X_1)| < \mu_1$ 为估计误差,且 $\mu_1 > 0$.根据引理2得到

$$\bar{\xi}_1 \bar{\phi}_1(X_1) \leq \frac{\bar{\xi}_1^2 \theta_1 R_1^T R_1}{2a_1^2} + \frac{a_1^2}{2} + \frac{\bar{\xi}_1^2}{2} + \frac{\mu_1^2}{2}. \quad (16)$$

其中: $\theta_1 = \|\Phi_1\|^2$, $\|\cdot\|$ 表示二范数, $a_1 > 0$.

构造虚拟控制律

$$\alpha_1 = -\frac{\bar{\xi}_1 \bar{\alpha}_1^2}{g_1 \sqrt{\bar{\xi}_1^2 \bar{\alpha}_1^2 + \tau_1^2}}. \quad (17)$$

其中: $\tau_1 > 0$, $0 < g_1 \leq g_1$.进一步,得到

$$\bar{\xi}_1 g_1 \alpha_1 \leq -\frac{\bar{\xi}_1^2 \bar{\alpha}_1^2}{\sqrt{\bar{\xi}_1^2 \bar{\alpha}_1^2 + \tau_1^2}} \leq \tau_1 - \bar{\xi}_1 \bar{\alpha}_1. \quad (18)$$

设计 $\bar{\alpha}_1$ 和自适应律 $\dot{\hat{\theta}}_1$ 如下:

$$\bar{\alpha}_1 = z_1 \xi_1 + \frac{s_1 \bar{\xi}_1^{2h-1}}{(o_1^2 - \xi_1^2)^{h-1}} + \frac{\bar{\xi}_1 \hat{\theta}_1 R_1^T R_1}{2a_1^2} - \frac{\bar{\xi}_1}{2}, \quad (19)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \frac{r_1 \bar{\xi}_1^2 R_1^T R_1}{2a_1^2} - \sigma_1 \hat{\theta}_1. \quad (20)$$

其中: z_1, s_1 和 σ_1 均为正数, $h \in (1/2, 1)$.

将式(15)~(20)代入(14), 得到

$$\dot{V}_1 \leq -\frac{z_1 \xi_1^2}{o_1^2 - \xi_1^2} - \frac{s_1 \xi_1^{2h}}{(o_1^2 - \xi_1^2)^h} + \frac{1}{r_1} \sigma_1 \hat{\theta}_1 \dot{\theta}_1 + \bar{\xi}_1 g_1 \xi_2 + \frac{a_1^2}{2} + \frac{\mu_1^2}{2} + \tau_1. \quad (21)$$

step i ($2 \leq i \leq n-1$): 由式(11)和系统(1)得

$$\dot{\xi}_i = g_i(\xi_{i+1} + \alpha_i) + \phi_i - \dot{\alpha}_{i-1}. \quad (22)$$

定义如下障碍 Lyapunov 函数:

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2} \log \frac{o_i^2}{o_i^2 - \xi_i^2} + \frac{1}{2r_i} \tilde{\theta}_i^2. \quad (23)$$

其中: $o_i = \bar{o}_i - \underline{o}_i$; $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$ 为估计误差, $\hat{\theta}_i$ 为不确定参数 θ_i 的估计值; $r_i > 0$. 对 V_i 求导可得

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{i-1} + \bar{\xi}_i(g_i \alpha_i + \bar{\phi}_i) - \frac{1}{r_i} \tilde{\theta}_i \dot{\theta}_i + \bar{\xi}_i g_i \xi_{i+1} - \bar{\xi}_{i-1} g_{i-1} \xi_i. \quad (24)$$

其中: $\bar{\xi}_i = \frac{\xi_i}{o_i^2 - \xi_i^2}$, $\bar{\phi}_i = \phi_i - \dot{\alpha}_{i-1} + g_{i-1} \bar{\xi}_{i-1}(o_i^2 - \xi_i^2)$ 为未知组合项. 与 step 1 同理, 可利用 RBFNNs 逼近 $\bar{\phi}_i$, 得到

$$\bar{\xi}_i \bar{\phi}_i(X_i) \leq \frac{\bar{\xi}_i^2 \theta_i R_i^T R_i}{2a_i^2} + \frac{a_i^2}{2} + \frac{\bar{\xi}_i^2}{2} + \frac{\mu_i^2}{2}. \quad (25)$$

其中: $X_i = [\bar{x}_i^T, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{i-1}, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{i-1}, y_m, \dots, y_m^{(i-1)}]^T$; $\bar{\phi}_i(X_i) = \Phi_i^T R_i(X_i) + f_i(X_i)$, $|f_i(X_i)| < \mu_i$ 为估计误差, 且 $\mu_i > 0$; $\theta_i = \|\Phi_i\|^2$; $a_i > 0$.

构造虚拟控制律

$$\alpha_i = -\frac{\bar{\xi}_i \bar{\alpha}_i^2}{\underline{g}_i \sqrt{\bar{\xi}_i^2 \bar{\alpha}_i^2 + \tau_i^2}}. \quad (26)$$

其中: $\tau_i > 0, 0 < \underline{g}_i \leq g_i$. 进一步, 得到

$$\bar{\xi}_i g_i \alpha_i \leq -\frac{\bar{\xi}_i^2 \bar{\alpha}_i^2}{\sqrt{\bar{\xi}_i^2 \bar{\alpha}_i^2 + \tau_i^2}} \leq \tau_i - \bar{\xi}_i \bar{\alpha}_i. \quad (27)$$

设计 $\bar{\alpha}_i$ 和自适应律 $\hat{\theta}_i$ 如下:

$$\bar{\alpha}_i = z_i \xi_i + \frac{s_i \xi_i^{2h-1}}{(o_i^2 - \xi_i^2)^{h-1}} + \frac{\bar{\xi}_i \hat{\theta}_i R_i^T R_i}{2a_i^2} - \frac{\bar{\xi}_i}{2}, \quad (28)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_i = \frac{r_i \bar{\xi}_i^2 R_i^T R_i}{2a_i^2} - \sigma_i \hat{\theta}_i, \quad (29)$$

其中 z_i, s_i 和 σ_i 为正数.

将式(25)~(29)代入(24), 得到

$$\dot{V}_i \leq -\sum_{j=1}^i \frac{z_j \xi_j^2}{o_j^2 - \xi_j^2} - \sum_{j=1}^i \frac{s_j \xi_j^{2h}}{(o_j^2 - \xi_j^2)^h} + \bar{\xi}_i g_i \xi_{i+1} + \sum_{j=1}^i \frac{1}{r_j} \sigma_j \tilde{\theta}_j \dot{\theta}_j + \sum_{j=1}^i \left(\frac{a_j^2}{2} + \frac{\mu_j^2}{2} + \tau_j \right). \quad (30)$$

step n : 在这一步中, 将对实际控制输入 $u(t)$ 进行设计. 事件触发机制设计如下:

$$\begin{cases} \varpi(t) = -(1 + \lambda) \left(\bar{u} \tanh \left(\frac{\bar{\xi}_n \bar{u}}{\eta} \right) + \bar{\varepsilon} \tanh \left(\frac{\bar{\xi}_n \bar{\varepsilon}}{\eta} \right) \right); \\ u(t) = \varpi(t_k), t_k \leq t < t_{k+1}; \\ t_{k+1} = \inf\{t \in R | |e(t)| \geq \lambda u(t) + \varepsilon\}. \end{cases} \quad (31)$$

其中: $0 < \lambda < 1, \eta > 0, \varepsilon > 0$ 和 $\bar{\varepsilon} > \varepsilon/(1 - \lambda)$ 都为正数; $e(t) = \varpi(t) - u(t)$ 为测量误差; t_k 表示事件被触发的时刻, $t_k > 0$, 且 $k \in \mathbb{Z}^+$.

中间控制律 \bar{u} 的设计如下:

$$\bar{u} = \varphi^T \Omega. \quad (32)$$

其中: $\varphi = \left[\frac{1}{c}, -\frac{d}{c} \right]^T$, $\Omega = [\alpha_n, 1]^T$. 但在实际应用中, 参数 φ 难以获取数值. 为解决该问题, 引入估计参数 $\hat{\varphi}$ 来估计 φ , $\tilde{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi}$ 表示估计误差. 其中: $\hat{\varphi} = [\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2]^T$, 且 $\hat{\varphi}_1$ 和 $\hat{\varphi}_2$ 分别为 $\frac{1}{c}$ 和 $-\frac{d}{c}$ 的估计值. 因此, 中间控制律 \bar{u} 的设计如下:

$$\bar{u} = \hat{\varphi}^T \Omega. \quad (33)$$

根据式(31)可得 $\varpi(t) = (1 + v_1(t)\lambda)u(t) + v_2(t)\varepsilon, t \in [t_k, t_{k+1})$. 其中: $|v_1(t)| \leq 1, |v_2(t)| \leq 1$ 为时变参数. 进一步, 得到以下等式:

$$u(t) = \frac{\varpi(t) - v_2(t)\varepsilon}{1 + v_1(t)\lambda}. \quad (34)$$

结合式(11)和系统(1)得到

$$\dot{\xi}_n = g_n(cu + d) + \phi_n - \dot{\alpha}_{n-1}. \quad (35)$$

构造如下障碍 Lyapunov 函数:

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} \log \frac{o_n^2}{o_n^2 - \xi_n^2} + \frac{1}{2r_n} \tilde{\theta}_n^2 + \frac{1}{2} c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \tilde{\varphi}. \quad (36)$$

其中: $o_n = \bar{o}_n - \underline{o}_n$; $\tilde{\theta}_n = \theta_n - \hat{\theta}_n$ 为估计误差, $\hat{\theta}_n$ 为不确定参数 θ_n 的估计值; $r_n > 0$; K 为正定矩阵, K^{-1} 为 K 的逆矩阵. 对 V_n 求导可得

$$\dot{V}_n = \dot{V}_{n-1} + \bar{\xi}_n(g_n(cu + d) + \bar{\phi}_n) - \frac{1}{r_n} \tilde{\theta}_n \dot{\theta}_n - c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \dot{\tilde{\varphi}} - \bar{\xi}_{n-1} g_{n-1} \xi_n. \quad (37)$$

其中: $\bar{\xi}_n = \frac{\xi_n}{o_n^2 - \xi_n^2}$, $\bar{\phi}_n = \phi_n + g_{n-1} \bar{\xi}_{n-1}(o_n^2 - \xi_n^2) - \dot{\alpha}_{n-1}$ 为未知组合项. 与 step 1 同理, 可利用 RBFNNs 逼近 $\bar{\phi}_n$, 得到

$$\bar{\xi}_n \bar{\phi}_n(X_n) \leq \frac{\bar{\xi}_n^2 \theta_n R_n^T R_n}{2a_n^2} + \frac{a_n^2}{2} + \frac{\bar{\xi}_n^2}{2} + \frac{\mu_n^2}{2}. \quad (38)$$

其中: $X_n = [\bar{x}_n^T, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{n-1}, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{n-1}, y_m, \dots, y_m^{(n-1)}]^T$; $\bar{\phi}_n(X_n) = \Phi_n^T R_n(X_n) + f_n(X_n)$, $|f_n(X_n)| < \mu_n$ 为估计误差, 且 $\mu_n > 0$; $\theta_n = \|\Phi_n\|^2$; $a_n > 0$.

根据式(31)、(34)和引理3可得

$$\begin{aligned} \bar{\xi}_n u \leq & |\bar{\xi}_n \bar{u}| - \bar{\xi}_n \bar{u} \tanh\left(\frac{\bar{\xi}_n \bar{u}}{\eta}\right) - |\bar{\xi}_n \bar{u}| + \\ & |\bar{\xi}_n \bar{\varepsilon}| - \bar{\xi}_n \bar{\varepsilon} \tanh\left(\frac{\bar{\xi}_n \bar{\varepsilon}}{\eta}\right) \leq \\ & 0.557\eta + \bar{\xi}_n \bar{u}. \end{aligned} \quad (39)$$

构造虚拟控制律

$$\alpha_n = -\frac{\bar{\xi}_n \bar{\alpha}_n^2}{g_n \sqrt{\bar{\xi}_n^2 \bar{\alpha}_n^2 + \tau_n^2}}. \quad (40)$$

其中: $\tau_n > 0, 0 < g_n \leq \bar{g}_n$. 进一步, 得到

$$\bar{\xi}_n g_n \alpha_n \leq -\frac{\bar{\xi}_n^2 \bar{\alpha}_n^2}{\sqrt{\bar{\xi}_n^2 \bar{\alpha}_n^2 + \tau_n^2}} \leq \tau_n - \bar{\xi}_n \bar{\alpha}_n. \quad (41)$$

设计 $\bar{\alpha}_n$ 、自适应律 $\hat{\theta}_n$ 和 $\dot{\hat{\phi}}$ 如下:

$$\bar{\alpha}_n = z_n \xi_n + \frac{s_n \xi_n^{2h-1}}{(o_n^2 - \xi_n^2)^{h-1}} + \frac{\bar{\xi}_n \hat{\theta}_n R_n^T R_n}{2a_n^2} - \frac{\bar{\xi}_n}{2}, \quad (42)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_n = \frac{r_n \bar{\xi}_n^2 R_n^T R_n}{2a_n^2} - \sigma_n \hat{\theta}_n, \quad (43)$$

$$\dot{\hat{\phi}} = -K(\bar{\xi}_n \Omega + \zeta \hat{\phi}), \quad (44)$$

其中 z_n, s_n, σ_n 和 ζ 为正数.

将式(38)~(44)代入(37), 得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_n \leq & -\sum_{j=1}^n \frac{z_j \xi_j^2}{o_j^2 - \xi_j^2} - \sum_{j=1}^n \frac{s_j \xi_j^{2h}}{(o_j^2 - \xi_j^2)^h} + \\ & \sum_{j=1}^n \frac{1}{r_j} \sigma_j \tilde{\theta}_j \hat{\theta}_j + c g_n \zeta \tilde{\varphi}^T \hat{\varphi} + \\ & 0.557c\eta \bar{g}_n + \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j^2}{2} + \frac{\mu_j^2}{2} + \tau_j\right). \end{aligned} \quad (45)$$

根据引理2得到

$$\frac{1}{r_j} \sigma_j \tilde{\theta}_j \hat{\theta}_j \leq -\frac{1}{2r_j} \sigma_j \tilde{\theta}_j^2 + \frac{1}{2r_j} \sigma_j \theta_j^2, \quad (46)$$

$$c g_n \zeta \tilde{\varphi}^T \hat{\varphi} \leq -\frac{1}{2} c g_n \zeta \tilde{\varphi}^T \tilde{\varphi} + \frac{1}{2} c g_n \zeta \varphi^T \varphi. \quad (47)$$

根据引理4, 令 $\iota_1 = 1 - \iota_2, \iota_2 = h, \iota_3 = \iota_1 \iota_2^{\frac{1}{2}}$,

$\beta_1 = 1, \beta_2 = \sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \tilde{\theta}_j^2, \beta_3 = 1$, 得到下列不等式:

$$\left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \tilde{\theta}_j^2\right)^h \leq \iota_3 + \sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \tilde{\theta}_j^2. \quad (48)$$

同理可得

$$\left(\frac{1}{2} c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \tilde{\varphi}\right)^h \leq \iota_3 + \frac{1}{2} c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \tilde{\varphi}. \quad (49)$$

将式(46)和式(49)代入(45), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}_n \leq & -\sum_{j=1}^n \frac{z_j \xi_j^2}{o_j^2 - \xi_j^2} - \sum_{j=1}^n \frac{s_j \xi_j^{2h}}{(o_j^2 - \xi_j^2)^h} - \\ & (\sigma_j - 1) \sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \tilde{\theta}_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \tilde{\theta}_j^2\right)^h - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\zeta}{\lambda_{\max}(K^{-1})} - 1\right) \frac{1}{2} c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \tilde{\varphi} - \\ & \left(\frac{1}{2} c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \tilde{\varphi}\right)^h + \mathcal{Y}_2. \end{aligned} \quad (50)$$

其中: $\lambda_{\max}(K^{-1})$ 为 K^{-1} 的最大特征值, $\mathcal{Y}_2 = \sum_{j=1}^n \left(\frac{a_j^2}{2} + \frac{\mu_j^2}{2} + \tau_j\right) + 0.557c\eta \bar{g}_n + \sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \sigma_j \theta_j^2 + \frac{1}{2} c g_n \zeta \varphi^T \varphi + 2\iota_3$. 进一步, 根据引理5得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_n \leq & -\kappa_1 \sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \log \frac{o_j^2}{o_j^2 - \xi_j^2} - m_1 \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{2} \log \frac{o_j^2}{o_j^2 - \xi_j^2}\right)^h - \\ & \kappa_2 \sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \tilde{\theta}_j^2 - \left(\sum_{j=1}^n \frac{1}{2r_j} \tilde{\theta}_j^2\right)^h - \\ & \kappa_3 \frac{1}{2} c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \tilde{\varphi} - \left(\frac{1}{2} c g_n \tilde{\varphi}^T K^{-1} \tilde{\varphi}\right)^h + \mathcal{Y}_2. \end{aligned} \quad (51)$$

其中: $\kappa_1 = 2 \min\{z_1, z_2, \dots, z_n\}, \kappa_2 = \sigma_j - 1, \kappa_3 = \frac{\zeta}{\lambda_{\max}(K^{-1})} - 1, m_1 = 2^h \min\{s_1, s_2, \dots, s_n\}$.

最后, 可以得到

$$\dot{V}_n \leq -\kappa V_n - m V_n^h + \mathcal{Y}_2. \quad (52)$$

其中: $\kappa = \min\{\kappa_1, \kappa_2, \kappa_3\}, m = \min\{m_1, 1, 1\}$.

注1 由文献[32]可得, 对于任意常数 o 满足 $|b| < o$, 则 $\log \frac{o^2}{o^2 - b^2} \leq \frac{b^2}{o^2 - b^2}$ 成立. 因此推出: 当 $0 < q < 1$ 时, 有 $\left(\log \frac{o^2}{o^2 - b^2}\right)^q \leq \left(\frac{b^2}{o^2 - b^2}\right)^q$ 成立.

2.2 收敛性分析

定理1 具有输入死区和全状态约束的不确定非线性系统(1)在满足假设1和假设2的前提下, 设计虚拟控制律(17)、(26)、(40)和自适应律(20)、(29)、(43)、(44), 则满足以下条件:

- 1) 系统中所有信号有界, 且跟踪误差 ξ_1 在有限时间内快速收敛到有界的紧集内;
- 2) 系统中所有状态不违反预定义的约束区间;
- 3) Zeno 现象不发生.

证明 根据式(52)和引理1, 在快速有限时间内, 系统误差信号 $Z = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n, \tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \dots, \tilde{\theta}_n, \tilde{\varphi}]^T$ 快速收敛到如下紧集:

$$\begin{aligned} \Xi = & \left\{ \lim_{t \rightarrow T} |V_n(Z, t)| \leq \left\{ \frac{\mathcal{Y}_2}{(1 - \omega_0)\kappa}, \left(\frac{\mathcal{Y}_2}{(1 - \omega_0)m}\right)^{\frac{1}{h}} \right\} \right\}, \end{aligned} \quad (53)$$

其中 ω_0 满足 $0 < \omega_0 < 1$. 其收敛时间 T 为

$$\begin{aligned} T \leq & \max \left\{ t_0 + \frac{1}{\omega_0 \kappa (1 - h)} \ln \frac{\omega_0 \kappa V(t_0)^{1-h} + m}{m}, \right. \\ & \left. t_0 + \frac{1}{\kappa (1 - h)} \ln \frac{\kappa V(t_0)^{1-h} + \omega_0 m}{\omega_0 m} \right\}. \end{aligned} \quad (54)$$

由式(53)可知, 误差信号是有界的, 而且 θ_1 是常数且 y_m 是有界的, 所以 x_1 和 $\hat{\theta}_1$ 有界. 进一步, 根据式(17)、(19)和 ξ_2 的有界性可知 α_1 、 $\bar{\alpha}_1$ 和 x_2 均有界. 同理可知 x_i 、 $\hat{\theta}_i$ 、 α_i 和 $\bar{\alpha}_i$ ($i = 2, 3, \dots, n$)都是有界的. 由于 $\tilde{\varphi} = \varphi - \hat{\varphi}$ 且 $\tilde{\varphi}$ 有界, 即 $\hat{\varphi}$ 有界, 闭环系统中所有信号全局一致最终有界, 并根据式(36)有

$$\frac{1}{2}\xi_1^2 \leq V_n \leq \min \left\{ \frac{\Upsilon_2}{(1-\omega_0)\kappa}, \left(\frac{\Upsilon_2}{(1-\omega_0)m} \right)^{\frac{1}{h}} \right\}. \quad (55)$$

因此, 跟踪误差 ξ_1 在有限时间内快速收敛到可调的紧集, 即

$$|\xi_1| \leq \min \left\{ \sqrt{\frac{2\Upsilon_2}{(1-\omega_0)\kappa}}, \sqrt{2 \left(\frac{\Upsilon_2}{(1-\omega_0)m} \right)^{\frac{1}{h}}} \right\}. \quad (56)$$

由 $\xi_1 = x_1 - y_m$ 和 $|y_m| \leq S_0$ 可推导出 $|x_1| \leq |\xi_1| + |y_m| \leq \alpha_1 + S_0 \leq \bar{\alpha}_1$, 因为 $|y_m| \leq S_0$ 和 α_1 有界, 若假设 $|\alpha_{i-1}| \leq |\bar{\alpha}_{i-1}|$, 则 $|x_i| \leq \bar{\alpha}_i$, 所以该系统状态不违反预定义的约束区间.

根据式(31)可得

$$\frac{d|e|}{dt} \leq |\dot{w}|. \quad (57)$$

由 $\varpi(t) = (1 + v_1(t)\lambda)u(t) + v_2\varepsilon$ 可知, \dot{w} 是连续有界的, 且存在一个常数 $\bar{w} > 0$, 使得 $|\dot{w}| \leq \bar{w}$. 由

$\lim_{t \rightarrow t_{k+1}^-} \varpi(t) = (\lambda|u(t)| + \varepsilon)/\bar{\varepsilon}$ 知, 触发时间间隔 t^* 满足 $t^* \geq (\lambda|u(t)| + \varepsilon)/\bar{\varepsilon}$, 因此Zeno现象不会发生. \square

3 仿 真

为了验证本文控制方法的有效性, 下面对数值算例和实际二阶机械臂系统的算例进行仿真实验并分析.

3.1 数值仿真

考虑如下具有输入死区和全状态约束的不确定非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1(t) = \phi_1(\bar{x}_1) + g_1(\bar{x}_1)x_2, \\ \dot{x}_2(t) = \phi_2(\bar{x}_2) + g_2(\bar{x}_2)D(u), \\ y(t) = x_1. \end{cases} \quad (58)$$

其中: $\phi_1(\bar{x}_1) = 0.1 \sin x_1$, $\phi_2(\bar{x}_2) = 0.5 \cos(x_1x_2)$, $g_1(\bar{x}_1) = 1 + 0.01 \sin x_1$, $g_2(\bar{x}_2) = 2 + \cos(x_1x_2)$; 全状态约束区间为 $|x_1| \leq 1.5$, $|x_2| \leq 3$; 系统的初始状态为 $x_1(0) = 0.1$, $x_2(0) = 0$, 期望信号 $y_m = \sin(2t)$.

选取如下高斯函数为RBFNNs的基函数:

$$R_i(X) = \exp \left(- \frac{(X - \nu_i)^T (X - \nu_i)}{2} \right). \quad (59)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, 16$; 高斯函数的中心 ν_i 分布区间为 $[-1, 1]$.

控制律、自适应律以及事件触发机制相关的参数设计如下: $h = 17/20$, $z_1 = s_1 = 14$, $z_2 = s_2 = 8$, $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 2$, $a_1 = a_2 = 0.5$, $r_1 = r_2 = 1$, $\zeta = 0.1$, $\sigma_1 = \sigma_2 = 0.1$, $d_1 = -1$, $c_1 = c_2 = d_2 = 1$, $\lambda = 0.03$, $\eta = 0.5$, $\varepsilon = 0.5$, $\bar{\varepsilon} = \varepsilon/(1 - \eta) + 0.001$, $\hat{\theta}_1(0) = \hat{\theta}_2(0)$, $K = [1, 0; 0, 1]$, $\hat{\varphi}(0) = [0, 0]^T$, $X_1 = [x_1, y_m]^T$, $X_2 = [x_1, x_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_1, y_m, \dot{y}_m]^T$.

从图1~图5仿真结果可知, 闭环系统中所有信号都是有界的. 如图1所示, 系统输出信号 y 有效地跟踪期望信号 y_m . 图2为状态 x_2 的曲线, 再结合图1可以发现, 输出信号和系统状态都不违反预定义的约束区间. 由图3可知, 跟踪误差 ξ_1 在0.11 s内快速收敛到有界的紧集内. 图4分别为事件触发控制输入 $\varpi(t)$ 和控制输入 $u(t)$, 因此输入信号是有界的. 图5为事件触发的时间间隔, 在10 s内, 基于事件触发机制的总触发次数为321, 与时间触发机制相比, 事件触发机制有效地节省了67.9%的通信资源, 且Zeno现象不会发生.

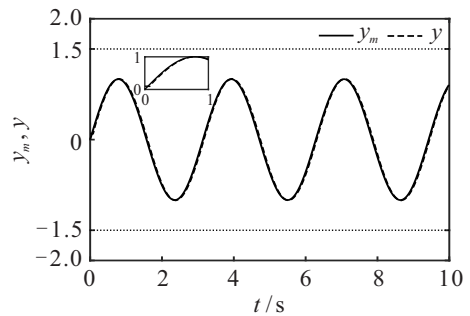


图1 期望信号 y_m 和系统输出 y 的轨迹(1)

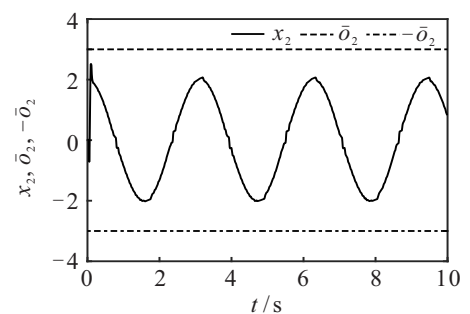


图2 状态 x_2 和约束边界(1)

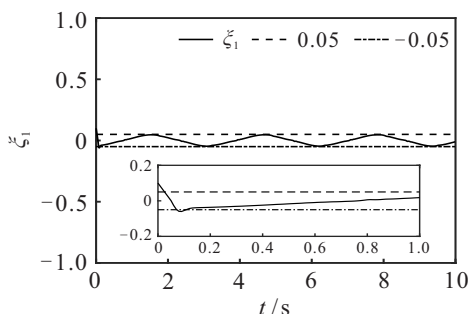


图3 跟踪误差 ξ_1 (1)

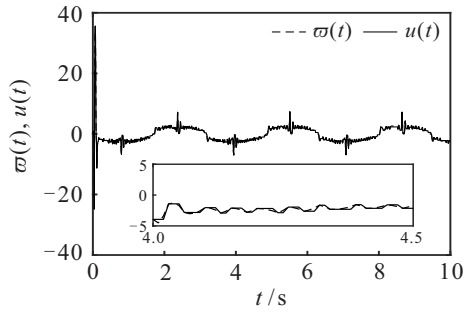


图4 控制信号(1)

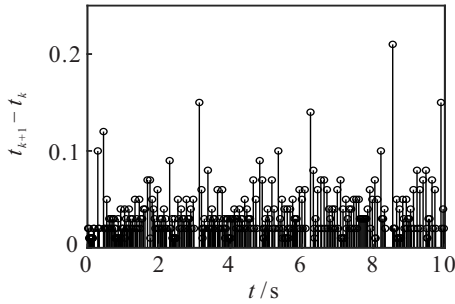


图5 事件触发时间间隔(1)

3.2 实例仿真

为了验证本文所设计的控制方法在实际系统中的有效性,参考文献[32]的单连杆机械臂系统

$$J\ddot{q} + B\dot{q} + mgl \sin q = u. \quad (60)$$

其中: $x_1 = q$ 和 $x_2 = \dot{q}$ 分别为关节角度和角速度, $D(u) = cu + d$ 为输入死区, u 为输入转矩, y 为系统输出, $-\frac{1}{J}(Bx_2 + mgl \sin x_1)$ 为不确定部分;机械臂系统参数为 $J = 0.8, B = 1, mgl = 10$;全状态约束区间为 $|x_1| \leq 1.5, |x_2| \leq 3$.

设系统的初始状态为 $x_1(0) = x_2(0) = 0$,期望信号 $y_m = \sin(2t)$,取基函数与数值算例一样.

其余相关设计参数: $h = 17/20, z_1 = s_1 = 18, z_2 = s_2 = 17, o_1 = 0.5, o_2 = 2, a_1 = a_2 = 0.5, r_1 = r_2 = 1, \zeta = 0.5, \sigma_1 = \sigma_2 = 0.3, d_1 = -1, c_1 = c_2 = d_2 = 1, \lambda = 0.02, \eta = 0.5, \varepsilon = 0.5, \bar{\varepsilon} = \varepsilon/(1 - \eta) + 0.001, \hat{\theta}_1(0) = \hat{\theta}_2(0), K = [1, 0; 0, 1], \hat{\varphi}(0) = [0, 0]^T, X_1 = [\dot{y}_m]^T, X_2 = [x_1, x_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, y_m, \dot{y}_m]^T$.

图6~图11为单连杆机械臂系统(60)的仿真结

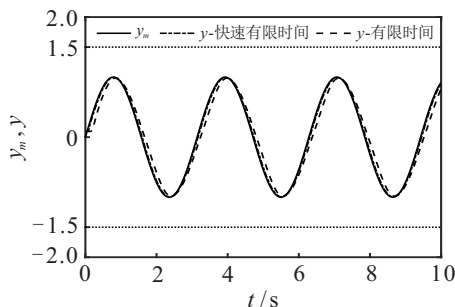


图6 期望信号 y_m 和系统输出 y 的轨迹(2)

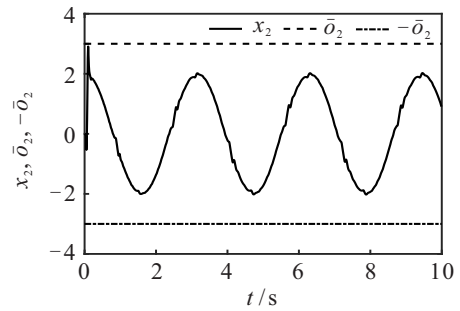


图7 状态 x_2 和约束边界(2)

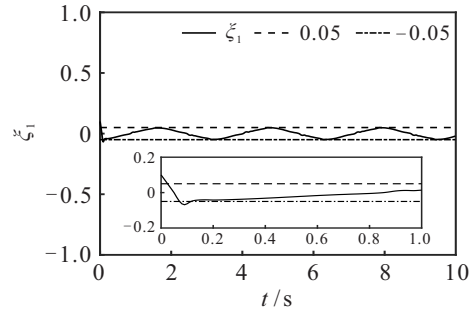


图8 跟踪误差 ξ_1 (2)

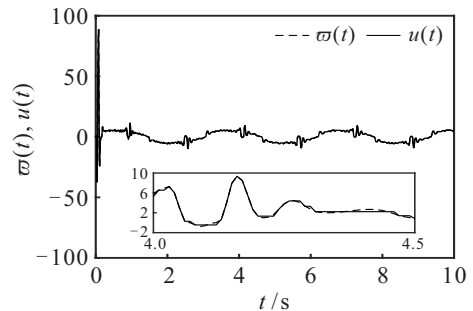


图9 控制信号(2)

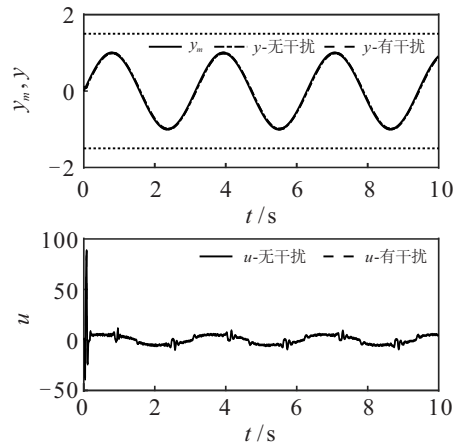


图10 有干扰和无干扰的控制器输出与输入

果,其分析与数值仿真相似,通过利用本文控制方法,保证了期望的跟踪性能和所有信号的有界性,且不违反预定义的约束区间.此外,保证了Zeno现象不会发生.

注2 将本文控制方法与传统的有限时间控制方法在跟踪性能上进行了对比.从图6可知,本文控制方法能够使系统输出在0.12s内快速跟踪到期望

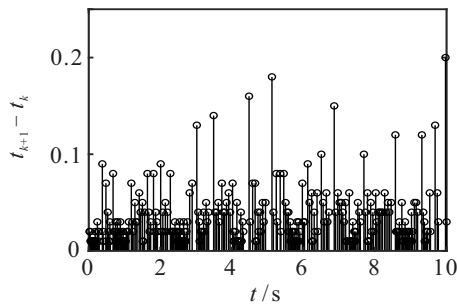


图 11 事件触发时间间隔(2)

信号,而传统的有限时间控制方法则需要0.83 s. 与传统的控制方法相比,本文方法能够提高85.5%的跟踪速度。

注3 为了验证本文所设计的控制方法的鲁棒性,在机械臂控制输入 u 中加入干扰信号 $p(t) = 0.6 \sin t$,图10给出了系统输出信号 y 和输入信号 u 的曲线。根据 u 的曲线可知,即使加入干扰信号,仍能实现对输入死区的动态补偿。因此,本文所设计的控制方法具有很好的鲁棒性。

4 结论

本文以一类具有输入死区和全状态约束的不确定非线性系统为研究对象,提出了一种快速有限时间的自适应神经网络事件触发控制方法。通过该控制方法实现了输入死区的在线动态补偿,在减少通信资源占用的同时Zeno现象不会发生,基于障碍Lyapunov函数和快速有限时间稳定理论能够保证闭环系统中所有信号的有界性以及跟踪误差可以快速收敛到有界的紧集内,且系统状态不违反预定义的约束区间。最后,仿真结果表明了该控制方法的有效性。

参考文献(References)

- [1] Li H Y, Zhao S Y, He W, et al. Adaptive finite-time tracking control of full state constrained nonlinear systems with dead-zone[J]. *Automatica*, 2019, 100: 99-107.
- [2] Liu J H, Wang C L, Li X B, et al. Adaptive finite-time practical consensus protocols for second-order multiagent systems with nonsymmetric input dead zone and uncertain dynamics[J]. *Journal of the Franklin Institute*, 2019, 356(6): 3217-3244.
- [3] Li Z F, Li T S, Feng G, et al. Neural network-based adaptive control for pure-feedback stochastic nonlinear systems with time-varying delays and dead-zone input[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2020, 50(12): 5317-5329.
- [4] Cai M J, Shi P, Yu J P. Adaptive neural finite-time control of non-strict feedback nonlinear systems with non-symmetrical dead-zone[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3178366.
- [5] Sun W, Su S F, Wu Y Q, et al. Adaptive fuzzy control with high-order barrier Lyapunov functions for high-order uncertain nonlinear systems with full-state constraints[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(8): 3424-3432.
- [6] 张天平, 邓伟伟, 吴自文, 等. 具有全状态约束和未建模动态的严格反馈系统有限时间自适应动态面控制[J]. *控制与决策*, 2022, 37(1): 108-118. (Zhang T P, Deng W W, Wu Z W, et al. Finite-time adaptive dynamic surface control for strict-feedback systems with full state constraints and unmodeled dynamics[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(1): 108-118.)
- [7] Li S, Ding L, Gao H B, et al. Adaptive fuzzy finite-time tracking control for nonstrict full states constrained nonlinear system with coupled dead-zone input[J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2022, 52(2): 1138-1149.
- [8] Xia J W, Zhang J, Feng J E, et al. Command filter-based adaptive fuzzy control for nonlinear systems with unknown control directions[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(3): 1945-1953.
- [9] Ruan Z W, Yang Q M, Ge S S, et al. Adaptive fuzzy fault tolerant control of uncertain MIMO nonlinear systems with output constraints and unknown control directions[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2022, 30(5): 1224-1238.
- [10] Li Y M, Min X, Tong S C. Observer-based fuzzy adaptive inverse optimal output feedback control for uncertain nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(6): 1484-1495.
- [11] Ma L, Liu L. Adaptive neural network control design for uncertain nonstrict feedback nonlinear system with state constraints[J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2021, 51(6): 3678-3686.
- [12] Zhang Z Q, Wang Q F, Sang Y L, et al. Globally adaptive neural network output-feedback control for uncertain nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, DOI: 10.1109/TNNLS.2022.3155635.
- [13] Wang J H, Zhang H K, Ma K M, et al. Neural adaptive self-triggered control for uncertain nonlinear systems with input hysteresis[J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2022, 33(11): 6206-6214.
- [14] Ren P X, Wang F. Fast finite-time adaptive fuzzy control for quantized stochastic uncertain nonlinear systems[J]. *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, 2022, 36(6): 1460-1479.
- [15] Zhou T Y, Liu C G, Liu X P, et al. Finite-time prescribed performance adaptive fuzzy control for unknown nonlinear systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2021, 402: 16-34.
- [16] 刘婷婷, 杨轩, 黄丽琼. 切换非线性正系统的有限时间

- 稳定性[J]. 控制与决策, 2022, 37(7): 1915-1920.
(Liu T T, Yang X, Huang L Q. Finite-time stability of switched nonlinear positive systems[J]. Control and Decision, 2022, 37(7): 1915-1920.)
- [17] Sun Y M, Chen B, Lin C, et al. Finite-time adaptive control for a class of nonlinear systems with nonstrict feedback structure[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2018, 48(10): 2774-2782.
- [18] Yu J P, Shi P, Zhao L. Finite-time command filtered backstepping control for a class of nonlinear systems[J]. Automatica, 2018, 92: 173-180.
- [19] Wang H Q, Xu K, Liu P X, et al. Adaptive fuzzy fast finite-time dynamic surface tracking control for nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(10): 4337-4348.
- [20] Shang Y, Chen B, Lin C. Fast finite-time adaptive neural control of multi-agent systems[J]. Journal of the Franklin Institute, 2020, 357(15): 10432-10452.
- [21] 王建晖, 邹涛, 张春良, 等. 带输出死区的多智能体系统预设时间事件触发式协同控制[J]. 控制与决策, 2023, 38(2): 441-449.
(Wang J H, Zou T, Zhang C L, et al. Prescribed setting time event-triggered synergetic control of multiagent systems with output dead-zone[J]. Control and Decision, 2023, 38(2): 441-449.)
- [22] Zhang Y, Wang F, Yan F. Fast finite time adaptive neural network control for a class of uncertain nonlinear systems subject to unmodeled dynamics[J]. Information Sciences, 2021, 565: 306-325.
- [23] Liu T F, Jiang Z P. A small-gain approach to robust event-triggered control of nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2015, 60(8): 2072-2085.
- [24] Peng C, Li F Q. A survey on recent advances in event-triggered communication and control[J]. Information Sciences, 2018, 457/458: 113-125.
- [25] Liu T F, Zhang P P, Jiang Z P. Event-triggered input-to-state stabilization of nonlinear systems subject to disturbances and dynamic uncertainties[J]. Automatica, 2019, 108: 108488.
- [26] 范利蓉, 王芳, 周超, 等. 状态时延和全状态约束下的多智能体系统自适应事件触发控制[J]. 控制与决策, 2022, 37(4): 892-902.
(Fan L R, Wang F, Zhou C, et al. Adaptive event-triggered control for multi-agent systems with state time-delays and full state constraints[J]. Control and Decision, 2022, 37(4): 892-902.)
- [27] Liu J D, Niu B, Zhao P, et al. Almost fast finite-time adaptive tracking control for a class of full-state constrained pure-feedback nonlinear systems[J]. International Journal of Robust Nonlinear Control, 2020, 30: 7517-7532.
- [28] Liu Y J, Li J, Tong S C, et al. Neural network control-based adaptive learning design for nonlinear systems with full-state constraints[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2016, 27(7): 1562-1571.
- [29] Wang J H, Gong Q J, Huang K F, et al. Event-triggered prescribed settling time consensus compensation control for a class of uncertain nonlinear systems with actuator failures[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2021, DOI: 10.1109/TNNLS.2021.3129816.
- [30] Zhang J, Li S, Xiang Z R. Adaptive fuzzy output feedback event-triggered control for a class of switched nonlinear systems with sensor failures[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2020, 67(12): 5336-5346.
- [31] Wang J H, Yan Y C, Ma C H, et al. Fuzzy adaptive event-triggered finite-time constraint control for output-feedback uncertain nonlinear systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2022, 443: 236-257.
- [32] Zhao L, Liu G Q, Yu J P. Finite-time adaptive fuzzy tracking control for a class of nonlinear systems with full-state constraints[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2021, 29(8): 2246-2255.

作者简介

王建晖(1984—), 男, 讲师, 博士, 从事智能控制、振动控制等研究, E-mail: jhwang@gzhu.edu.cn;

杜泳萍(1998—), 女, 硕士生, 从事自适应控制、非线性系统等研究, E-mail: du_ypcillin@163.com;

邹涛(1975—), 男, 教授, 博士生导师, 从事工业实时优化、先进过程控制等研究, E-mail: tzou@gzhu.edu.cn;

刘治(1977—), 男, 教授, 博士生导师, 从事自适应控制、智能机器人等研究, E-mail: lz@gdut.edu.cn;

岳夏(1980—), 男, 讲师, 博士, 从事智能系统预测控制、机电系统故障诊断等研究, E-mail: smnsss@gzhu.edu.cn.