

文章编号:1671-4229(2022)02-0086-09

带输入磁滞的非线性系统模糊事件触发控制

王 晨, 吴宇深, 李咏华, 杜泳萍, 黄 峥*, 王建晖

(广州大学 机械与电气工程学院, 广东 广州 510006)

摘要: 文章针对一类带输入磁滞的不确定非线性系统的控制问题进行了研究,提出一种自适应模糊事件触发控制方法。一方面,实际系统模型往往难于精确获取,建模过程中难免会有不确定部分,不确定部分的处理得当与否将直接影响控制的精度;另一方面,因为输入磁滞在实际物理系统中是不可避免的,系统需要大量的控制量来补偿磁滞以保证控制精度,所以磁滞会加重系统通信的负担。然而,系统的通信资源是有限的,研究如何减少通信资源的占用在理论和实践中都具有重要意义。针对上述问题,文章基于 Backstepping 技术,利用模糊逻辑系统处理系统中的不确定部分,与此同时设计一种特殊相对阈值事件触发机制,实现了非周期的事件触发控制。该方法可以在线补偿磁滞,在保证系统控制精度的前提下,减少输入信号的更新频率,从而节约通信资源。从理论上证明闭环系统中的所有信号都是半全局一致最终有界的,且设计的事件触发机制可以避免 Zeno 现象的出现。最后,仿真验证了所提方法的有效性。

关键词: 事件触发控制; 输入磁滞; 模糊逻辑系统; Backstepping; 自适应控制

中图分类号: TP 273

文献标志码: A

Fuzzy event-triggered control for nonlinear systems with input hysteresis

WANG Chen, WU Yu-shen, LI Yong-hua, DU Yong-ping, HUANG Zheng*, WANG Jian-hui

(School of Mechanical and Electric Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: In this article, the control scheme of a class of uncertain nonlinear systems with input hysteresis is studied and an adaptive fuzzy event-triggered control method is proposed. On one hand, the actual system model is difficult to obtain accurately, the modeling process inevitably has an uncertain part, whether the uncertain part is properly handled will directly affect the control accuracy. On the other hand, the input hysteresis is inevitable in the physical system, the system needs lots of input signals to compensate for the hysteresis and to ensure the control accuracy, so the hysteresis will increase the burden of system communication. However, the communication resources of the system are limited and therefore it is of great significance to study how to reduce the occupation of communication resources in both theory and practice. To solve the above problems, based on the backstepping technology, fuzzy logic systems are introduced to approximate the unknown items of the system. At the same time, a special relative threshold event triggering mechanism is constructed to realize the non-periodic event triggering control. The proposed method can compensate the hysteresis online and reduce the update frequency of input signal on the premise of ensuring the control accuracy of the system, so as

基金项目: 广东省教育厅创新人才资助项目(2018KQNCX197);广东省自然科学基金资助项目(2019A1515110995);广州市科技计划资助项目(202002030286);广州大学校内资助项目(YG2020009)

作者简介: 王晨(1995—),男,硕士研究生. E-mail: wangchen_chc@163.com

*通信作者. E-mail: hz01527@126.com

引文格式: 王 晨, 吴宇深, 李咏华, 等. 带输入磁滞的非线性系统模糊事件触发控制[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2022, 21(2): 86-94.

to save communication resources. Theoretical analysis shows that all signals in the closed loop system are semi-globally uniformly ultimately bounded and the event triggering mechanism designed can avoid Zeno phenomenon. Finally, simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: event-triggered control; input hysteresis; fuzzy logic systems; Backstepping; adaptive control

Backstepping 技术是研究非线性系统的实用工具之一^[1],引起了学者们的广泛关注,并且取得了大量的研究成果^[2-5]。文献[2]研究了一类非线性系统的跟踪控制问题,实现了跟踪误差在有限时间内收敛到期望的区间;文献[3]和文献[4]分别针对二阶多智能体系统及船舶系统设计了自适应控制器;文献[5]针对四旋翼无人机的姿态和位置的跟踪控制问题进行研究,分别设计了姿态和位置的跟踪控制器。

实际系统模型是难以精确获取的,系统中难免会出现不确定部分^[6],不确定部分的处理得当与否将直接影响控制的精度。由于模糊系统(fuzzy logic systems, FLSs)^[7-10]和神经网络(neural network, NN)^[11-14]具有有效逼近未知非线性函数的能力,模糊逻辑系统和神经网络在非线性系统的自适应控制中得到了广泛的应用。文献[7]基于模糊逻辑系统,针对一类非线性系统设计了自适应模糊跟踪控制器;文献[8]将模糊逻辑系统引入到随机非线性系统,提出了一种输入量化和状态不可测的随机非线性系统自适应控制方案;文献[10]利用模糊逻辑系统研究了一类非线性系统的实际固定时间稳定的控制问题;文献[12]将神经网络引入到滑模控制,提出了一种基于神经网络的鲁棒自适应滑模控制策略;文献[14]采用神经网络逼近机械臂的死区函数和系统不确定性部分,提出了具有输入死区和输出约束的机械臂自适应神经网络跟踪控制方法。模糊逻辑系统和神经网络可以很好地处理系统中存在的不确定性问题。

网络控制由于能提高控制效率、降低成本而受到越来越多的关注^[15]。传统的时间触发控制不管有没有必要更新控制输入,周期性地更新输入,都不可避免地造成网络资源的浪费^[16]。然而,系统的通信资源是有限的。网络控制需要解决的一个关键问题是网络带宽有限的通信约束问题。输入磁滞在实际系统中是不可避免的,对系统性能有很大的影响^[17]。为保证控制精度,系统需要大量的控制量来补偿磁滞的影响,所以磁滞会加重系统的

通信负担。研究如何减少系统通信资源占用的问题在理论和实践中都具有重要意义。

为了节省系统的通信和计算资源,20世纪90年代末,事件触发控制(event-triggered control, ETC)^[18-20]思想被提出。该思想的核心是“仅在有需要的时候进行信号的更新”。事件触发控制通过判断是否满足事件触发条件来决定信号的传输,非周期地更新输入。文献[18]针对一类不确定非线性系统,提出一种事件触发自适应控制方法,在保证系统控制精度的前提下,减少了通信资源的占用;文献[20]通过研究一类非线性系统的事件触发固定时间稳定控制问题,实现了系统固定时间稳定,同时缓解了系统通信压力。事件触发控制可以减少输入信号的更新频率,从而节约通信资源。

当系统面临不确定性、输入磁滞和通信资源约束的问题时,如何保证控制精度的同时减少通信资源的占用是一个极具挑战性的问题。本文针对一类带输入磁滞的不确定非线性系统控制问题进行研究,提出了一种自适应模糊事件触发控制方法。该方法可以有效地处理系统中的不确定性和在线对输入磁滞进行补偿,保证系统控制精度的同时,显著地节约通信资源。

1 问题描述

1.1 系统模型

考虑如下非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i), i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{x}_n = u(t) + f_n(\bar{x}_n) + g_n(\bar{x}_n), \\ y = x_1, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $x_i \in \mathbb{R} (i = 1, 2, \dots, n)$ 是系统状态, $\bar{x}_i = [x_1, \dots, x_i]^T \in \mathbb{R}^i$ 是状态向量, $y \in \mathbb{R}$ 表示系统的输出, $u(t)$ 代表系统输入; $f_i(\bar{x}_i)$ 是系统未知光滑的非线性函数; $g_i(\bar{x}_i)$ 是外界干扰项, 假设 $g_i(\bar{x}_i) \leq \bar{g}_i$, \bar{g}_i 是常数。为了方便, 将 $f_i(\bar{x}_i)$ 和 $g_i(\bar{x}_i)$ 分别记作 f_i 和 g_i 。

1.2 磁滞分析

考虑执行器的磁滞,其在运行过程中表现出类似逆冲磁滞的行为。控制信号表示为 $v_c = B(u_c)$, v_c 和 u_c 分别代表输出和输入。磁滞数学模型如下:

$$\frac{dv_c}{dt} = a \left| \frac{du_c}{dt} \right| (hu_c - v_c) + b \frac{du_c}{dt} \quad (2)$$

其中, a, h 和 b 是常数, $h > 0, h > b$, 根据文献[21]的研究,有如下结果

$$\begin{cases} v_c = hu_c + \bar{d}(u_c) \\ \bar{d}(u_c) = (v_c(0) - hu_c(0))e^{-a(u_c - u_c(0))\text{sign}(\dot{u}_c)} + \\ e^{-a(u_c - u_c(0))\text{sign}(\dot{u}_c)} \int_{u_c(0)}^{u_c} (b - h)e^{-a\xi\text{sign}(\dot{u}_c)} d(\xi) \end{cases} \quad (3)$$

其中, $\bar{d}(u_c)$ 有界, 记 $\bar{d} = \bar{d}(u_c)$, 因此, 输入磁滞的数学模型可表示如下:

$$u(t) = hu_c + \bar{d} \quad (4)$$

根据式(1)~(4), 考虑输入磁滞后的系统模型为

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i) + g_i(\bar{x}_i), i = 1, \dots, n-1, \\ \dot{x}_n = hu_c + \bar{d} + f_n(\bar{x}_i) + g_n(\bar{x}_i), \\ y = x_1 \end{cases} \quad (5)$$

1.3 模糊逻辑系统研究

模糊逻辑系统(FLSs)是处理系统中未知不确定部分的常用方法, 本文采用此方法对模型中的不确定项 $f_i(\bar{x}_i)$ 进行逼近处理。FLSs 函数形式如下:

$$F(X_\tau) = \phi^T \psi(X_\tau) \quad (6)$$

其中, $\phi = [\phi_1, \phi_1, \dots, \phi_N]^T \in \mathbb{R}^N$ 为未知的理想权重向量, $X_\tau = [x_1, x_2, \dots, x_\tau]^T$ 是输入向量, $\psi = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]^T \in \mathbb{R}^N$, $\psi_i(X_\tau)$ 为已知的模糊基函数。 $\psi_i(X_\tau)$ 的表达式如下:

$$\psi_i(X_\tau) = \frac{\prod_{p=1}^{\tau} \mu_{F_p^i}(x_p)}{\sum_{j=1}^N \prod_{p=1}^{\tau} \mu_{F_p^j}(x_p)} \quad (7)$$

$$\mu_{F_p^i}(x_p) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_p - \bar{x}_p^i}{\sigma_p^i}\right)^2\right] v_p^i \quad (8)$$

其中, v_p^i, \bar{x}_p^i 和 σ_p^i 均为实数。

任意连续非线性函数 $Y(X_\tau)$ 可采用上述 FLSs 进行逼近, 根据文献[22]得

$$\sup_{X_\tau \in \mathbb{R}^T} |Y(X_\tau) - \phi^T \psi(X_\tau)| \leq \varepsilon, \forall \varepsilon > 0 \quad (9)$$

因为逼近误差是一个时变的函数, 所以式(9)可以写成

$$Y(X_\tau) = \phi^T \psi(X_\tau) + \kappa(X_\tau) \quad (10)$$

其中, $\kappa(X_\tau)$ 为 FLSs 逼近误差, 满足 $\kappa(X_\tau) < \varepsilon$ 。

为方便后文的分析和设计, 给出以下引理:

引理1^[23] 对于 $\Gamma \in \mathbb{R}, \sigma > 0$, 下列不等式成立。

$$0 \leq |\Gamma| - \Gamma \tanh\left(\frac{\Gamma}{\sigma}\right) \leq 0.2785\sigma \quad (11)$$

引理2^[24] 对于 $x_1 \in \mathbb{R}, x_2 \in \mathbb{R}, (\ell - 1)(b - 1) = 1, \varepsilon > 0, \ell > 1, b > 1$, 下列不等式成立。

$$x_1 x_2 \leq \frac{\varepsilon^b}{b} |x_1|^b + \frac{1}{\ell \varepsilon^\ell} |x_2|^\ell \quad (12)$$

2 自适应模糊事件触发控制设计与分析

2.1 自适应模糊控制器设计

首先引入误差系统:

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - y_d \\ z_i = x_i - \alpha_{i-1} - y_d^{(i-1)}, i = 2, \dots, n \end{cases} \quad (13)$$

其中, z_i 是误差变量, α_{i-1} 为虚拟控制律, y_d 为参考信号, 假设 y_d 是光滑连续的函数且 $n+1$ 阶可导。

Step 1: 定义 Lyapunov 函数 V_1 :

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} \tilde{\theta}_1^2 \quad (14)$$

其中, $\tilde{\theta}_1 = \theta_1 - \hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_1$ 是 θ_1 的估计值, θ_1 定义将在后面给出。

由式(5)和式(13)可得

$$\dot{z}_1 = z_2 + \alpha_1 + f_1 + g_1 \quad (15)$$

对 V_1 求导得

$$\dot{V}_1 = z_1(z_2 + \alpha_1 + \bar{f}_1 + g_1) - \tilde{\theta}_1 \dot{\hat{\theta}}_1 \quad (16)$$

其中, $\bar{f}_1 = f_1$ 。进一步, 由式(10)可得 $\bar{f}_1 = \phi_1^T \psi(X_1) + \kappa_1(X_1)$, $\|\kappa_1(X_1)\|^2 < \tau_1$, τ_1 为大于零的常数, $X_1 = x_1$ 。

由引理2可得

$$\begin{aligned} z_1 \bar{f}_1 &= z_1 \phi_1^T \psi(X_1) + z_1 \kappa_1(X_1) \\ &\leq \frac{z_1^2 \theta_1 \psi_1^T \psi_1}{2a_1} + \frac{a_1^2}{2} + \frac{z_1^2}{2} + \frac{\tau_1^2}{2} \end{aligned} \quad (17)$$

$$z_1 g_1 \leq \frac{z_1^2}{2} + \frac{\bar{g}_1^2}{2} \quad (18)$$

其中, $a_1 > 0$, $\|\cdot\|$ 表示二范数, $\theta_1 = \|\phi_1\|^2$ 。

虚拟控制律 α_1 设计如下 ($c_1 > 0$):

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 - z_1 - \frac{z_1 \hat{\theta}_1 \psi_1^T \psi_1}{2a_1^2} \quad (19)$$

将式(17)~(19)代入式(16)得

$$V_1 \leq -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \frac{a_1^2}{2} + \frac{\tau_1^2}{2} + \frac{\bar{g}_1^2}{2} + \bar{\theta}_1 \left(\frac{z_1^2 \psi_1^T \psi_1}{2a_1^2} - \hat{\theta}_1 \right) \quad (20)$$

Step i ($i = 2, 3, \dots, n-1$), 定义 Lyapunov 函数 V_i :

$$V_i = V_{i-1} + \frac{1}{2} z_i^2 + \frac{1}{2} \bar{\theta}_i^2 \quad (21)$$

其中, $\bar{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i$, $\hat{\theta}_i$ 是 θ_i 的估计值, θ_i 定义将在后面给出。

由式(5)和式(13)可得

$$\dot{z}_i = z_{i+1} + \alpha_i + f_i + g_i - \dot{\alpha}_{i-1} \quad (22)$$

对 V_i 和 α_{i-1} 求导得

$$\dot{V}_i = \dot{V}_{i-1} + z_i (z_{i+1} + \alpha_i + f_i + g_i) - \bar{\theta}_i \dot{\hat{\theta}}_i \quad (23)$$

$$\dot{\alpha}_{i-1} = \sum_{j=1}^{i-1} \left(\frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial x_j} (x_{j+1} + f_j + g_j) + \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial \hat{\theta}_j} \dot{\hat{\theta}}_j \right) + \sum_{j=0}^{i-1} \frac{\partial \alpha_{i-1}}{\partial y_d^{(j)}} y_d^{(j+1)} \quad (24)$$

其中, $\bar{f}_i = f_i - \dot{\alpha}_{i-1}$, 进一步, 由式(10)可得 $\bar{f}_i = \phi_i^T \psi(X_i) + \kappa_i(X_i)$, $\|\kappa_i(X_i)\|^2 < \tau_i$, τ_i 为大于零的常数, $X_i = [x_1, \dots, x_i, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{i-1}, \hat{\theta}_1, \dots, \hat{\theta}_{i-1}, y_d, \dot{y}_d, \dots, y_d^{(i-1)}]^T$ 。

同 Step 1, 可以得到

$$z_i \bar{f}_i \leq \frac{z_i^2 \theta_i \psi_i^T \psi_i}{2a_i^2} + \frac{a_i^2}{2} + \frac{z_i^2}{2} + \frac{\tau_i^2}{2} \quad (25)$$

$$z_i g_i \leq \frac{z_i^2}{2} + \frac{\bar{g}_i^2}{2} \quad (26)$$

其中, $a_i > 0$, $\theta_i = \|\phi_i\|^2$ 。

虚拟控制律 α_i 设计如下 ($c_i > 0$):

$$\alpha_i = -c_i z_i - z_i - z_{i-1} - \frac{z_i \hat{\theta}_i \psi_i^T \psi_i}{2a_i^2} \quad (27)$$

将式(25)~(27)代入式(23)得

$$V_i \leq \sum_{j=1}^i \left(-c_j z_j^2 + \frac{a_j^2}{2} + \frac{\tau_j^2}{2} + \frac{\bar{g}_j^2}{2} + \bar{\theta}_j \left(\frac{z_j^2 \psi_j^T \psi_j}{2a_j^2} - \hat{\theta}_j \right) \right) + z_i z_{i+1} \quad (28)$$

Step n : 事件触发机制和控制律设计。相对阈值事件触发机制设计如下:

$$\begin{cases} w(t) = -(1+\delta) \left(\bar{u} \tanh\left(\frac{z_n h \bar{u}}{\rho}\right) + \bar{m}_1 \tanh\left(\frac{z_n h \bar{m}_1}{\rho}\right) \right) \\ u_c(t) = w(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1}) \\ t_{k+1} = \inf\{t \in \mathbb{R} \mid |e(t)| \geq \delta |u_c(t)| + m_1\} \end{cases} \quad (29)$$

其中, $e(t) = w(t) - u_c(t)$, $t_k > 0$, $k \in \mathbb{Z}^+$, $\rho > 0$, $m_1 > 0$, $\bar{m}_1 > m_1/1 - \delta$, $0 < \delta < 1$ 。

根据式(29)可以得到

$$w(t) = u_c(t) + \delta \lambda_1(t) u_c(t) + m_1 \lambda_2(t) \quad (30)$$

其中, $|\lambda_1(t)| \leq 1$, $|\lambda_2(t)| \leq 1$, 进一步可以得到

$$u_c = \frac{w(t) - \lambda_2(t) m_1}{1 + \lambda_1(t) \delta} \quad (31)$$

控制律 \bar{u} 的设计如下:

$$\bar{u} = K^T H \quad (32)$$

其中, $K = [1/h, -\bar{d}/h]^T$, $H = [\alpha_n, 1]^T$ 。实际应用中, K 的值比较难获取, 这里设计一个参数估计器对 K 的真值进行估计, 定义估计误差 $\bar{K} = K - \hat{K}$, 其中, \hat{K} 为估计值, 得到 \bar{u} 的表达式为

$$\bar{u} = \hat{K}^T H \quad (33)$$

定义 Lyapunov V_n 函数为

$$V_n = V_{n-1} + \frac{1}{2} z_n^2 + \frac{1}{2} \bar{\theta}_n^2 + \frac{h}{2} \bar{K}^T \Gamma^{-1} \bar{K} \quad (34)$$

其中, $\bar{\theta}_n = \theta_n - \hat{\theta}_n$, $\hat{\theta}_n$ 是 θ_n 的估计值, θ_n 定义将在后面给出, Γ 是 2×2 的正定矩阵。

由式(5)和式(13)可得

$$\dot{z}_n = h u_c + \bar{d} + f_n + g_n - \dot{\alpha}_{n-1} - y_d^{(n)} \quad (35)$$

对 V_n 求导得

$$\dot{V}_n = \dot{V}_{n-1} + z_n (h u_c + \bar{d} + f_n + g_n - \dot{\alpha}_{n-1} - y_d^{(n)}) - \bar{\theta}_n \dot{\hat{\theta}}_n - h \bar{K}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{K}} \quad (36)$$

根据式(31)可得

$$z_n h u_c = z_n h \left(\frac{w(t) - \lambda_2(t) m_1}{1 + \lambda_1(t) \delta} \right) \quad (37)$$

将式(29)代入上式, 可得

$$z_n h u_c = -z_n h \left(\frac{1+\delta}{1+\lambda_1(t)\delta} \left(\bar{u} \tanh\left(\frac{z_n h \bar{u}}{\rho}\right) + \bar{m}_1 \tanh\left(\frac{z_n h \bar{m}_1}{\rho}\right) \right) + \frac{\lambda_2(t) m_1}{1+\lambda_1(t)\delta} \right) \quad (38)$$

根据函数 $-q \tanh(q/\beta) < 0$, $\forall q \in \mathbb{R}, \beta > 0$ 的性质, 结合引理 1 对上式进行放缩可得到

$$\begin{aligned} z_n h u_c &\leq -z_n h \bar{u} \tanh\left(\frac{z_n h \bar{u}}{\rho}\right) - \\ & z_n h \bar{m}_1 \tanh\left(\frac{z_n h \bar{m}_1}{\rho}\right) - z_n h \frac{m_1}{1-\delta} \\ &\leq |z_n h \bar{u}| - z_n h \bar{u} \tanh\left(\frac{z_n h \bar{u}}{\rho}\right) - |z_n h \bar{u}| + \\ & |z_n h \bar{m}_1| - z_n h \bar{m}_1 \tanh\left(\frac{z_n h \bar{m}_1}{\rho}\right) - \\ & |z_n h \bar{m}_1| - z_n h \bar{m}_1 \end{aligned}$$

针对带干扰及输入磁滞的不确定系统式(5),设计虚拟控制律式(19)、式(27)和式(44),自适应律式(45)和式(46)及相对阈值事件触发机制式(29),系统输出可以跟踪期望的轨迹并且可以保证:

(1)闭环系统中的所有信号都是半全局一致最终有界的;

(2)控制器可以避免 Zeno 现象的出现。

证明:

$V_n \leq -QV_n + \Delta$ 两边同乘 e^{Qt} 得

$$\frac{d(V_n e^{Qt})}{dt} \leq \Delta e^{Qt},$$

解微分方程得

$$\frac{1}{2}z_1^2 \leq V_n(t) \leq \frac{\Delta}{Q} + (V_n(0) - \frac{\Delta}{Q})e^{-Qt},$$

因此,闭环系统中的所有信号都是半全局一致最终有界的。 z_1^2 以 Q 的速率呈指数收敛于集合 $\Omega = \{z_1 | z_1^2 \leq 2\Delta/Q\}$, 可以通过调整设计参数来调整 Ω 的大小。

对于 $\forall t \in [t_k, t_{k+1})$, 有

$$\frac{d}{dt} |e| = \text{sign}(e)\dot{e} \leq |\dot{w}|.$$

由式(30)可知, \dot{w} 是连续有界的, 记 $|\dot{w}| \leq \gamma$, $\gamma > 0$ 。由 $\lim_{t \rightarrow t_{k+1}^-} e(t) = \delta |u_c(t)| + m_1, e(t_k) = 0$, 触发时间间隔 $t^* \geq (\delta |u_c(t)| + m_1)/\gamma$ 。显然, 无 Zeno 现象的出现。

3 数值仿真与分析

为了验证所提算法的有效性, 基于 matlab 实验平台, 利用离散化方法对两类不同的系统进行了仿真实验。首先, 对一假定的复杂数值系统进行了算法的验证实验。其次, 为了测试算法在实际系统的效果, 将算法应用到了单连杆机械臂系统中。2 个实验均取得了预期的实验效果, 从而验证了算法的有效性。

3.1 数值系统仿真

选取数值系统如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(\bar{x}_1) + g_1(\bar{x}_1), \\ \dot{x}_2 = hu_c + \bar{d} + f_2(\bar{x}_2) + g_2(\bar{x}_2), \\ y = x_1, \end{cases}$$

其中, $f_1(\bar{x}_1) = x_1^2, f_2(\bar{x}_2) = x_1 x_2, g_1(\bar{x}_1) = 0.1 \sin$

$(x_1), g_2(\bar{x}_2) = 0.1 \cos(x_2)$, 参考信号 $y_d = \sin(t)$, 选取系统初始值 $x_1(0) = x_2(0) = 0$ 。

选取模糊逻辑系统的隶属度函数如下:

$$\mu_p^i(x_p) = e^{(-\frac{1}{2}(x+2-\frac{2}{7}(p-1))^2)}, p = 1, 2, \dots, 15.$$

设计自适应律及虚拟控制律如下:

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = \frac{z_1^2 \psi_1^T \psi_1}{2a_1^2} - \sigma_1 \hat{\theta}_1,$$

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 - z_1 - \frac{z_1 \hat{\theta}_1 \psi_1^T \psi_1}{2a_1^2},$$

$$\dot{\hat{\theta}}_2 = \frac{z_2^2 \psi_2^T \psi_2}{2a_2^2} - \sigma_2 \hat{\theta}_2,$$

$$\alpha_2 = -c_2 z_2 - z_1 - z_2 - \frac{z_2 \hat{\theta}_2 \psi_2^T \psi_2}{2a_2^2} + \ddot{y}_d,$$

$$\hat{K} = -z_2 \Gamma H - \eta \Gamma \hat{K}_0.$$

基于 matlab 实验平台, 对上述数值系统进行仿真实验, 其仿真结果见图 2 ~ 图 5, 表 1。

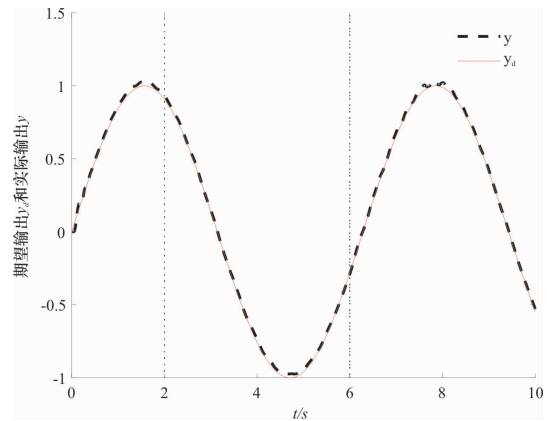


图 2 状态轨迹

Fig. 2 State trajectories

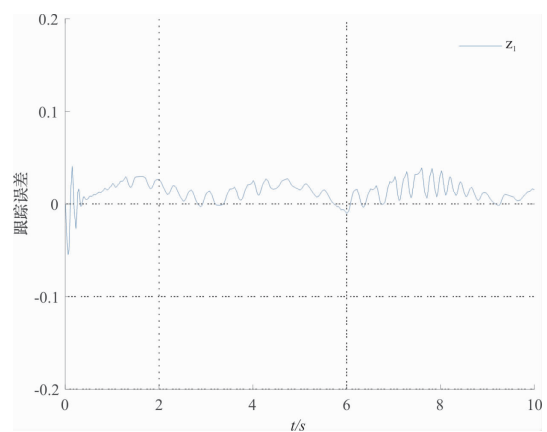


图 3 跟踪误差 z_1

Fig. 3 Tracking error z_1

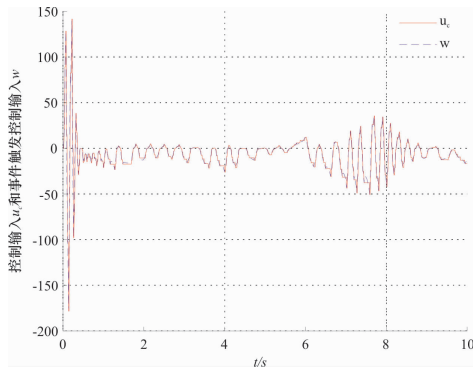


图 4 控制信号
Fig. 4 Control signals

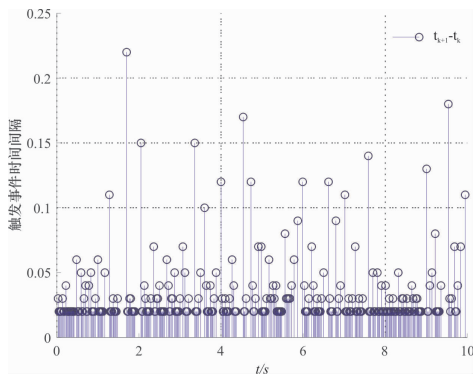


图 5 事件触发时间间隔
Fig. 5 Time interval of triggering events

表 1 事件触发次数

Table 1 Number of event triggers

| 项目 | 时间/s | | | | |
|----------|------|-----|-----|-----|------|
| | 1~2 | 2~4 | 4~6 | 6~8 | 8~10 |
| 事件触发次数/次 | 65 | 60 | 53 | 62 | 60 |

相关设计参数设定(仿真步长为 0.01 s): $\hat{\theta}_1(0) = \hat{\theta}_2(0) = 0, \hat{K}(0) = [0, 0]^T, \Gamma = [10; 01], c_1 = 50, c_2 = 5, a_1 = a_2 = 1, \sigma_1 = \sigma_2 = 3, \eta = \rho = 1, \delta = 0.2, m_1 = 0.2, \bar{m}_1 = 2$ 。

从图 2 和图 3 中可见,系统在受到输入磁滞和外界干扰的情况下,系统输出可以很好地跟踪参考轨迹;图 4 描述了控制输入和事件触发控制输入;图 5 表示了事件触发时间间隔,从图 5 中可以看出事件触发是非周期的;表 1 记录了各时段事件触发的次数,从表中可以知,在 10 s 内,事件触发总次数仅为 300 次(事件触发率为 30%),相对于传统的时间触发式控制节省了 70% 的通信资源。因此,采用本文方法设计的控制器在保证控制精度的同时,可以减小控制信号的更新频率,从而节约通信资源。

3.2 实际系统仿真

为了验证所提的方法在实际系统中的有效

性,选择文献[18]中的单连杆机械臂系统,并且考虑输入磁滞:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + g_1(x_1), \\ \dot{x}_2 = \frac{hu_c + \bar{d}}{J} - \frac{B}{J}x_2 - \frac{Mgl}{J}\sin(x_1) + g_2(x_1, x_2), \\ y = x_1, \end{cases}$$

其中, x_1 是关节角度, x_2 为角速度, y_1 为系统输出; J 是转动惯量, B 是摩擦阻尼系数, M 是连杆质量, g 是重力加速度, l 是连杆长度, u_c 是输入转矩。假定 $\frac{B}{J}x_2 - \frac{Mgl}{J}\sin(x_1)$ 为系统不确定部分; $g_1(x_1)$ 和 $g_2(x_1, x_2)$ 为外界干扰信号。

与文[18]类似,选取单连杆机械臂系统参数: $J = 1, B = 1, Mgl = 10, g_1(\bar{x}_1) = 0.1\sin(x_1), g_2(\bar{x}_2) = 0.1\cos(x_2)$, 初始值 $x_1(0) = x_2(0) = 0$ 。控制器参数设计(仿真步长 0.01 s): $\Gamma = [10; 01], c_1 = 60, c_2 = 5, a_1 = a_2 = 1, \sigma = 1, \eta = 1, \rho = 1, \delta = 0.3, m_1 = 0.5, \bar{m}_1 = 1, \hat{\theta}(0) = 0, \hat{K}(0) = [0, 0]^T$, 参考信号 $y_d = \sin(t)$ 。

基于 matlab 实验平台,对单连杆机械臂系统进行仿真实验,其仿真结果见图 6~图 9,表 2。

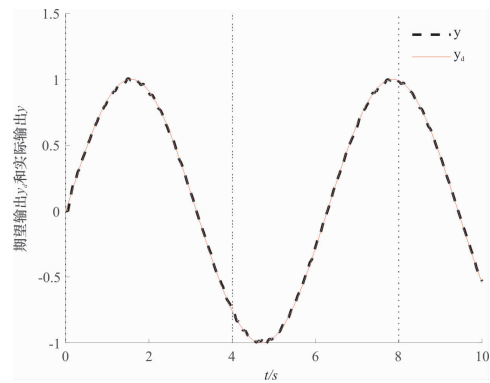


图 6 状态轨迹
Fig. 6 State trajectories

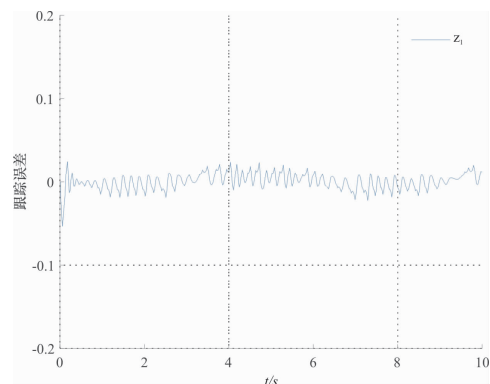


图 7 跟踪误差 z_1
Fig. 7 Tracking error z_1

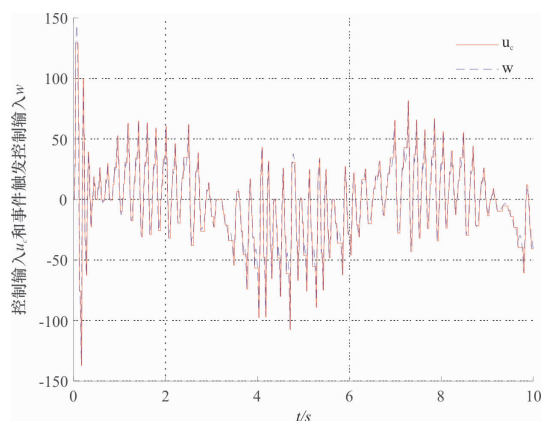


图8 控制信号

Fig. 8 Control signals

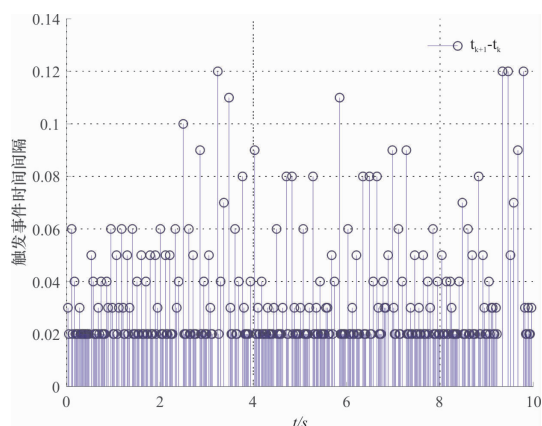


图9 事件触发时间间隔

Fig. 9 Time interval of triggering events

表2 事件触发次数

Table 2 Number of event triggers

| 项目 | 时间/s | | | | |
|----------|------|-----|-----|-----|------|
| | 1~2 | 2~4 | 4~6 | 6~8 | 8~10 |
| 事件触发次数/次 | 70 | 56 | 71 | 64 | 56 |

从仿真结果中可见,机械臂系统在受到输入磁滞和外界干扰的情况下,系统输出可以很好地跟踪参考轨迹;在10 s内,事件触发控制的触发总次数仅为317次(事件触发率为31.7%),相对于传统的时间触发式控制节省了68.3%的通信资源。

4 结论

本文针对一类带输入磁滞的不确定非线性系统控制问题进行了研究,基于Backstepping技术,结合模糊逻辑系统和事件触发控制,提出了一种自适应模糊事件触发控制方法。仿真结果表明,利用本文方法设计的控制器,在保证控制精度的同时,可以大幅减少通信资源的占用,从而验证了方法的有效性。本文所提方法可以有效地应对非线性系统中存在的不确定性和输入磁滞问题,在保证系统控制精度的前提下,可以显著地节约通信资源。

参考文献:

- [1] Xia J, Zhang J, Feng J, et al. Command filter-based adaptive fuzzy control for nonlinear systems with unknown control directions[J]. IEEE Transactions on Systems Man Cybernetics-systems, 2021, 51(3): 1945-1953.
- [2] Yu J, Shi P, Zhao L. Finite-time command filtered backstepping control for a class of nonlinear systems[J]. Automatica, 2018, 92: 173-180.
- [3] Jin X, Wang S, Qin J, et al. Adaptive fault-tolerant consensus for a class of uncertain nonlinear second-order multi-agent systems with circuit implementation[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2018, 65(7): 2243-2255.
- [4] 安顺,何燕,王龙金. 基于反步自适应控制算法的船舶航向控制方法[J]. 机电设备, 2020, 37(6): 65-69.
- [5] 张政,王芳,郭颖,等. 四旋翼无人机的自适应反步跟踪控制[J]. 控制工程, 2020, 27(3): 469-475.
- [6] 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, 2020, doi: 10.13195/j. kzyjc. 2020. 0907.
- [7] Bing C, Liu X, Liu K, et al. Direct adaptive fuzzy control of nonlinear strict-feedback systems[J]. Automatica, 2009, 45(6): 1530-1535.
- [8] Huo X, Ma L, Zhao X, et al. Observer-based fuzzy adaptive stabilization of uncertain switched stochastic nonlinear systems with input quantization[J]. Journal of the Franklin Institute, 2019, 356(4): 1789-1809.
- [9] Li B, Xia J, Zhang H, et al. Event-triggered adaptive fuzzy tracking control for nonlinear systems[J]. International Journal of Fuzzy Systems, 2020, 22(5): 1389-1399.
- [10] Chen M, Wang H, Liu X. Adaptive practical fixed-time tracking control with prescribed boundary constraints[J]. IEEE

- Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2021, 68(4): 1716-1726.
- [11] Zeng G, Sun B, Liang H. A robust adaptive controller based on neural network[C]//Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. Piscataway: IEEE,2000, doi:10.1109/WCICA.2000.863374.
- [12] Fei J, Ding H. Adaptive sliding mode control of dynamic system using RBF neural network[J]. Nonlinear Dynamics, 2012, 70(2): 1563-1573.
- [13] Yin Q, Wang M, Li X, et al. Neural network adaptive tracking control for a class of uncertain switched nonlinear systems[J]. Neurocomputing, 2018, 301(2): 1-10.
- [14] He W, David A O, Yin Z, et al. Neural network control of a robotic manipulator with input deadzone and output constraint[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2016, 46(6): 759-770.
- [15] Xing L, Wen C, Liu Z, et al. Event-triggered output feedback control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2019, 64(1): 290-297.
- [16] Chen Z, Wang J, Ma K, et al. Novel fuzzy event-triggered adaptive control for nonlinear systems with input hysteresis[J]. Soft Computing, 2021, 25(8): 6619-6631.
- [17] Huang Y, Wang T, Wang J, et al. Extended fuzzy adaptive event-triggered compensation control for uncertain nonlinear systems with input hysteresis[J]. IEEE Access, 2019, 7: 89658-89669.
- [18] Xing L, Wen C, Liu Z, et al. Event-triggered adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2017, 62(4): 2071-2076.
- [19] Chen Z, Wang L, Wang J, et al. Event-triggered fuzzy adaptive control for a class of uncertain nonlinear systems with input dead-zone[J]. IEEE Access, 2020, 8: 25738-25748.
- [20] Hu X, Li Y, Hou Z. Event-triggered fuzzy adaptive fixed-time tracking control for nonlinear systems[J]. IEEE Transactions on Cybernetics,2020. doi:10.1109/TCYB.2020.3035779.
- [21] Su C Y, Stepanenko Y, Svoboda J, et al. Robust adaptive control of a class of nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis[J]. IEEE Transactions on Automatic Control,2000, 45(12): 2427-2432.
- [22] Wang L X, Mendel J M. Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning[J]. IEEE Transactions on Neural Networks,1992, 3(5): 807-814.
- [23] Ren B, San P P, Ge S S, et al. Adaptive dynamic surface control for a class of strict-feedback nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis[C]//2009 American Control Conference. Piscataway:IEEE, 2009, doi:10.1109/ACC.2009.5160295.
- [24] Wang J, Liu Z, Chen C L P, et al. Fuzzy adaptive compensation control of uncertain stochastic nonlinear systems with actuator failures and input hysteresis[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(1): 2-13.

【责任编辑: 陈 钢】