

基于事件触发的大规模互联非线性系统的 自适应分散漏斗控制

杨文静, 夏建伟

(聊城大学 数学科学学院, 山东 聊城 252000)

摘要: 研究了一类不确定大规模非线性系统的分散自适应事件触发漏斗控制问题。首先, 利用一个新的带有障碍李雅普诺夫函数的漏斗控制方法, 构造了一种自适应分散漏斗控制器, 以实现给定瞬态行为的输出跟踪。其次, 为了解决控制器设计中的互联项问题, 引入了一个辅助非线性函数。同时, 将命令滤波技术应用到反步设计中, 避免了反步过程中的“复杂性爆炸”问题。此外, 还设计了一种事件触发机制, 以减少控制器和执行器之间不必要的传输, 从而提高资源效率。结果表明, 所提出的控制方案能保证闭环系统的所有信号都是有界的, 并且跟踪误差总是在漏斗中演化。最后, 通过一个数值系统验证了该控制方法的有效性。

关键词: 大规模非线性系统; 漏斗控制; 事件触发控制; 命令滤波技术

中图分类号: TG156

文献标志码: A

文章编号: 1007-7162(2022)05-0137-08

Adaptive Decentralized Funnel Control for Large-scale Interconnected Nonlinear Systems Based on Event-triggered

Yang Wen-jing, Xia Jian-wei

(School of Mathematical Science, Liaocheng University, Liaocheng 252000, China)

Abstract: A decentralized adaptive event-triggered funnel control for a class of uncertain large-scale nonlinear systems is studied. Firstly, a new adaptive decentralized funnel controller was constructed by using a new funnel control method with barrier Lyapunov function to achieve output tracking for a given transient behavior. Secondly, an auxiliary nonlinear function was introduced to solve the interconnection problem in controller design. At the same time, the command filtering technique was applied to backstepping design to avoid ‘complexity explosion’ in backstepping process. In addition, an event-triggered mechanism was designed to reduce unnecessary transfers between controllers and actuators, thus improving resource efficiency. The results show that the proposed control scheme can ensure that all the signals of the closed-loop system are bounded and the tracking error always evolves in the funnel. Finally, the effectiveness of the control method is verified by a numerical system.

Key words: large-scale nonlinear; funnel control; event-triggered control; command filter technology

众所周知, 大规模非线性系统通常被视为由许多相互关联的子系统组成的系统。由于控制结构的复杂性以及各子系统之间信息交换的局限性, 给大规模非线性系统的控制器设计和稳定性分析带来了很大的困难。为了克服这个困难, 在过去的几十年中, 许多学者利用分散自适应技术控制大规模系统^[1-3]。

然而该控制方法有一定的局限性, 即系统中的不确定非线性函数要么是参数未知的线性函数, 要么是已知非线性函数。为了克服这些限制, 文献[4-6]中利用神经网络或文献[7-8]中利用模糊逻辑系统来识别未知非线性函数的自适应分散控制方法得到了广泛研究。其中, 在文献[8]中, 针对一类具有执行器故障

收稿日期: 2022-03-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61973148)

作者简介: 杨文静(1998-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为非线性系统、自适应控制、反步控制, E-mail: yangwenjing1024@163.com

通信作者: 夏建伟(1978-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为时滞系统稳定性分析、随机系统鲁棒控制、非线性系统自适应控制等, E-mail: njstxjw@126.com

的非严格反馈非线性系统,利用模糊控制构造了一种改进的容错控制器,使闭环系统中的所有信号都是半全局有限时间稳定的。

另一方面,为了有效地节省通信资源,减轻通信负担,非线性系统的自适应事件触发控制也受到了广泛的关注。与传统的时间触发控制不同,事件触发控制是一种仅在系统需要时才将控制器输出应用于系统的控制机制。最近,将模糊和神经网络逼近方法与反步技术相结合,针对具有不同触发机制的非线性系统,文献[9-14]提出了一些自适应事件触发控制方案。其中,针对具有未建模动态的随机非线性系统,文献[12]提出了一种基于变阈值方案的模糊自适应有限时间事件触发控制策略。在文献[15]中,针对一类不确定严格反馈非线性系统,设计了一种新的自适应事件触发机制,使控制器和参数估计器同时触发。然而,上述控制方案不能用于控制系统的瞬态行为和稳态性能。在许多实际应用中,除了跟踪稳定性外,经常需要系统的跟踪性能满足预定的约束条件,并要求系统达到预期的稳态跟踪精度。

最近,预定义性能控制(Predefined Performance Control, PPC)技术一经在文献[16]中提出就引起了广泛关注。预定义性能控制技术通过利用规定的性能函数(Predefined Performance Function, PPF)和构造误差变化来处理预定义的性能约束[15, 17-18]。其中,文献[17]针对一类严格反馈系统,提出了一种基于有限时间性能函数的自适应模糊控制器,该控制器可以确保闭环系统的所有信号都有界,并且跟踪误差在有限时间内收敛到预定范围。然而,以上所述的基于PPF的性能控制方法取决于初始条件,这限制了其在实际中的应用。文献[19]提出了一种漏斗控制方法(Funnel Control)放宽了对初始条件的要求。近年来,利用反步技术,文献[20-21]中研究了相对度为2的非线性系统的漏斗控制问题,文献[22-24]研究了相对度大于2的非线性系统的漏斗控制问题。然而,到目前为止,对于大规模非线性系统的漏斗控制的研究还很少。因此,对于不确定大规模非线性系统,如何设计控制器,使得跟踪误差不仅在预定义的漏斗内演化,而且与初始值无关,是一个值得解决的问题。

基于上述讨论,本文研究了一类互联大规模非线性系统的自适应事件触发漏斗控制问题。本文的主要贡献如下:

(1) 与文献[15, 17-18]中基于PPF的预定义性能控制相比,本文放宽了对初始条件的约束,所提出的漏斗函数的初始值是无穷大而不是一个有界常数。

(2) 与文献[24]的研究相比,本文提出了一种新的障碍Lyapunov函数来处理漏斗约束,并确保系统的输出总是在漏斗中演化。

(3) 与文献[19-23]结果相比,利用神经网络系统、事件触发机制和反步技术设计了有限时间事件触发控制器,该控制器能有效降低控制器与执行器之间的传输负担,并大大节省通信资源。

1 问题陈述和准备工作

1.1 问题陈述

本文考虑了一类具有严格反馈结构的大规模非线性系统,它由多个子系统组成,第*i*个子系统($i = 1, \dots, N$)可建模为

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij} = x_{ij+1} + f_{ij}(\bar{x}_{ij}) + h_{ij}(\bar{y}) \\ \dot{x}_{m_i} = u_i + f_{m_i}(\bar{x}_{m_i}) + h_{m_i}(\bar{y}) \\ y_i = x_{i1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $j = 1, \dots, n_i - 1$; $\bar{x}_{ij} = [x_{i1}, \dots, x_{ij}]^T \in \mathbf{R}^j$ 为系统的状态向量; $\bar{y} = (y_1, \dots, y_N)^T$, $y_i \in \mathbf{R}$ 为系统的输出; $u_i \in \mathbf{R}$ 为系统的输入; $f_{ij}(\bar{x}_{ij}): \mathbf{R}^j \rightarrow \mathbf{R}$ 为未知的光滑的非线性函数; $h_{ij}(\bar{y})$ 为一个未知的光滑函数,表示第*i*个系统与其他子系统之间的互联。

1.2 准备工作

假设1 参考信号 $y_d, \dot{y}_d, \ddot{y}_d (i = 1, \dots, N)$ 是已知的,有界的以及连续的。

假设2 非线性函数 $h_{ij}(\bar{y}), j = 1, \dots, n_i$ 满足

$$|h_{ij}(\bar{y})| \leq \sum_{l=1}^N \rho_{ijl} \bar{h}_{ijl}(y_l) \quad (2)$$

式中: ρ_{ijl} 为未知的常数, $\bar{h}_{ijl}(y_l) \geq 0$ 为已知的光滑函数。

引理1^[4] 设 $f(X)$ 是一个定义在紧集 Λ_X 上的连续函数,存在一个神经网络系统,使式(3)成立。

$$f(X) = W^{*T} S(X) + \delta(X) \quad (3)$$

式中: δ 为近似误差,满足 $|\delta| \leq \bar{\delta}$ 且 $\bar{\delta} > 0$ 为正数; $X \in \Lambda_X \subset \mathbf{R}^q$ 为输入向量; $W = [w_1, \dots, w_l]^T \subset \mathbf{R}^l$ 为神经网络的权向量; $l > 1$ 为神经网络的节点数; $S(X) = [S_1(X), \dots, S_l(X)]^T$ 为径向基函数向量, $S_i(X) = \exp\left[-\frac{(X - Y_i)^T(X - Y_i)}{\gamma^2}\right]$ 为高斯函数,其中 $Y_i = [Y_{i1}, \dots, Y_{im_i}]$ 为接受域中心,正数 γ 为高斯函数宽度。 W^* 为理想的权重向量:

$$W^* = \arg \min_{W \in \Lambda_X} \left\{ \sup_{X \in \Lambda_X} |f(X) - W^T S(X)| \right\}$$

引理2^[25] 对于神经网络的径向基函数向量 $S(\bar{z}_n) = [S_1(\bar{z}_n), \dots, S_l(\bar{z}_n)]^T$,有不等式(4)成立。

$$S^T(\bar{z}_n)S(\bar{z}_n) \leq S^T(\bar{z}_k)S(\bar{z}_k) \quad (4)$$

式中: $\bar{z}_n = [x_1, \dots, x_n]$, n 和 k 为任意正数且满足 $k \leq n$ 。

基于上述假设,本文的控制目标是为大规模非线性系统(1)设计一个事件触发控制器使得:

- (1) 闭环系统的所有信号都是有界的。
- (2) 跟踪误差总是在预定的性能漏斗中演化。

1.3 漏斗性能

首先介绍如下的漏斗性能:

$$F_{\phi_i} := \{(t, e_i) \in \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^N \mid \phi_i(t) \| e_i(t) \| < 1\} \quad (5)$$

式中 $e_i = y_i - y_{d_i}$ 为跟踪误差, $\phi_i(t)$ 称为漏斗函数, 具有以下性质:

- (1) $\phi_i(t): \mathbf{R}_+ \rightarrow \mathbf{R}$ 是一个有上界的单调递增的连续函数;
- (2) $\phi_i(t), \dot{\phi}_i(t)$ 是有界可测函数;
- (3) $\phi_i(0) = 0$, 当 $t > 0$ 时有 $\phi_i(t) > 0$, $\lim_{t \rightarrow \infty} \phi_i(t) = \bar{\phi}_i$ ($\bar{\phi}_i \gg 1$ 是一个常数)。

备注: 如果跟踪误差能够在以下的性能区域内发展, 则表明所提出的控制器可以实现第二个控制目标

$$F_{\phi_i} := \{(t, e_i) \in \mathbf{R}_+ \times \mathbf{R}^N \mid -I_i(t) < e_i(t) < I_i(t)\}$$

式中: $I_i(t) = 1/\phi_i(t)$ 为性能函数。根据函数 $\phi_i(t)$ 的性质可以得到性能函数是一个从无穷大收敛到一个有界常数的单调递减的函数。图1为对应的跟踪误差预定性能示意图。如果能够设计一个控制器, 使跟踪误差在性能区域内演化, 即 $(t, e_i) \in F_{\phi_i}, \forall t > 0$, 则可以实现第二个控制目标。

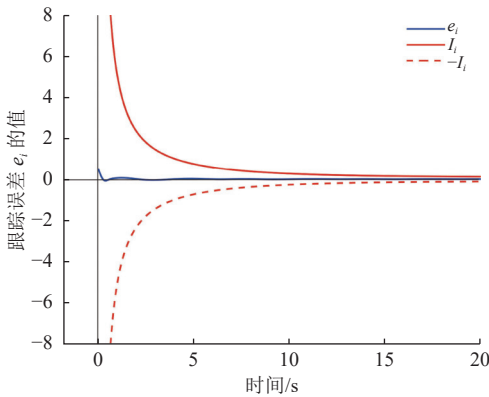


图1 跟踪误差预定性能示意图

Fig.1 A diagram of the prescribed tracking behavior.

为保证跟踪误差始终在漏斗内演化, 定义障碍函数为

$$\zeta_i(t) = \frac{s_i(t)}{1 - s_i^2(t)} \quad (6)$$

式中: $s_i(t) = \phi_i(t)e_i(t)$ 。由 $\phi_i(t)$ 的性质有

$$s_i(0) = \phi_i(0)e_i(0) = 0 \in (-1, 1) \quad (7)$$

从 $\zeta_i(t)$ 的表达式可知, $\zeta_i(t)$ 趋向于无穷大, 当且仅当 $s_i(t)$ 趋向于 ± 1 , 即对任意 $s_i(0)$, 有

$$\zeta_i(t) \rightarrow \pm\infty \text{ 当且仅当 } s_i(t) \rightarrow \pm 1$$

这意味着对于跟踪误差的任意初值 $e_i(0)$ 都有 $s_i(0) = 0 \in (-1, 1)$ 。如果 $\zeta_i(t)$ 在控制下有界, 即 $\zeta_i(t) \in L_\infty$, 那么就会存在一个正数 ε_i 使得 $|s_i(t)| \leq \varepsilon_i < 1$ 。

2 事件触发控制器设计

在本节中, 将给出事件触发控制器的设计过程。定义误差变换为

$$\begin{cases} z_{i1} = \zeta_i \\ z_{ij} = x_{ij} - \xi_{ij-1}^* \end{cases} \quad (8)$$

式中: $j = 2, \dots, n_i$, ξ_{ij-1}^* 为相对于虚拟控制器 α_{ij-1} 的一阶命令过滤器的输出, 其定义如下

$$\varepsilon_{ij-1} \dot{\xi}_{ij-1}^*(t) + \xi_{ij-1}^*(t) = \alpha_{ij-1}(t) \quad (9)$$

式中: $\xi_{ij-1}^*(0) = \alpha_{ij-1}(0)$, $j = 2, \dots, n_i$, ε_{ij} 为需要设计的常数。然而随着阶数的增加, 命令滤波器引起的滤波误差可能会变得相当大, 这将导致难以获得小的跟踪误差。为了处理滤波误差 $\xi_{ij-1}^* - \alpha_{ij-1}$, 将在滤波器的每一步采用误差补偿机制。补偿信号 ς_{ij} 设计为

$$\begin{cases} \dot{\varsigma}_{i1} = -c_{i1}\varsigma_{i1} + \varsigma_{i2} + \xi_{i1}^* - \alpha_{i1} \\ \dot{\varsigma}_{ij} = -c_{ij}\varsigma_{ij} + \varsigma_{ij+1} + \xi_{ij}^* - \alpha_{ij} - \varsigma_{ij-1} \\ \dot{\varsigma}_{in_i} = -\varsigma_{in_i-1} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $j = 2, \dots, n_i - 1$, c_{ij} 为需要设计的常数。定义补偿误差为 $\vartheta_{ij} = z_{ij} - \varsigma_{ij}$ 。为了避免繁琐的分析和计算, 首先为未知参数向量定义为

$$\zeta_i^* = \max\{\|W_{i1}^*\|^2, \dots, \|W_{in_i}^*\|^2\} \quad (11)$$

第 i 步 ($i = 1, \dots, N$): 根据 ϑ_{i1} 的定义, 对 ϑ_{i1} 求导有

$$\dot{\vartheta}_{i1}(t) = \mu_{i2} + \mu_{i1}\phi_i(x_{i2} + f_{i1}(\bar{x}_{i1}) + h_{i1}(\bar{y}) - \dot{y}_{d_i}) - \dot{\varsigma}_{i1} \quad (12)$$

式中:

$$\mu_{i1} = \frac{1 + s_i^2}{(1 - s_i^2)^2}$$

$$\mu_{i2} = \frac{1 + s_i^2}{(1 - s_i^2)^2} \dot{\phi}_i e_i$$

选择李雅普诺夫候选函数

$$V_{i1} = \frac{1}{2}\vartheta_{i1}^2 + \frac{1}{2r_i}\tilde{\zeta}_i^2 \quad (13)$$

式中: $\tilde{\zeta}_i = \zeta_i^* - \zeta_i$, ζ_i 是 ζ_i^* 的估计, r_i 是正数。对 V_{i1} 求导得

$$\dot{V}_{il} = \vartheta_{il}(\vartheta_{i2} + \alpha_{il} + \mu_{il}\phi_i h_{il}(\bar{\mathbf{y}}) + g_{il}(\mathbf{X}_{il}) + c_{il}S_{il}) - \frac{1}{r_i}\tilde{\zeta}_i\dot{\zeta}_i - \rho_i\vartheta_{il}M_i \quad (14)$$

式中: $\rho_i = \max\{\rho_{ijl}, j = 1, \dots, n_i; l = 1, \dots, N\}$ 为一个未知常数, $M_i = (2\vartheta_{il}/\vartheta_{il}^2 + q_i) \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^{n_l} \bar{h}_{ijl}(y_l)$ 为一个光滑的非线性函数, q_i 为正数, $g_{il}(\mathbf{X}_{il}) = \mu_{i2} + \mu_{il}\phi_i(x_{i2} + f_{il}(\bar{x}_{il}) - \dot{y}_{di}) - x_{i2} + \rho_i W_i$, $\mathbf{X}_{il} = [\bar{x}_{i2}, y_{di}, \dot{y}_{di}]^T$ 为未知的非线性函数。利用杨氏不等式有

$$\vartheta_{il}\mu_{il}\phi_i h_{il}(\bar{\mathbf{y}}) \leq \frac{1}{4}\mu_{il}^2\phi_i^2\vartheta_{il}^2 + \sum_{l=1}^N \rho_{il}\bar{h}_{il}(y_l) \quad (15)$$

由于 $g_{il}(\mathbf{X}_{il})$ 是一个未知的非线性函数, 利用神经网络逼近未知的函数 $g_{il}(\mathbf{X}_{il})$, 可以得到方程

$$g_{il}(\mathbf{X}_{il}) = \mathbf{W}_{il}^T \mathbf{S}_{il}(\mathbf{X}_{il}) + \delta_{il}(\mathbf{X}_{il}) \quad (16)$$

式中: δ_{il} 为逼近误差, 满足 $|\delta_{il}| \leq \bar{\delta}_{il}$, $\bar{\delta}_{il} > 0$ 为一个正数。利用引理2和杨氏不等式, 可以得到

$$\begin{aligned} \vartheta_{il}g_{il}(\mathbf{X}_{il}) &\leq \frac{1}{2a_{il}^2}\vartheta_{il}^2\zeta_i^* \mathbf{S}_{il}^T \mathbf{S}_{il} + \frac{1}{2}a_{il}^2 + \\ &\frac{1}{2}\vartheta_{il}^2 + \frac{1}{2}\bar{\delta}_{il}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{S}_{il} = \mathbf{S}_{il}(\mathbf{X}_{il1})$, $\mathbf{X}_{il1} = [x_{il}, y_{di}, \dot{y}_{di}]^T$, a_{il} 为一个正数。将式(15)和式(17)代入式(14)中, 式(14)可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{il} &\leq \vartheta_{il}(\vartheta_{i2} + \alpha_{il} + \frac{1}{2a_{il}^2}\vartheta_{il}^2\zeta_i^* \mathbf{S}_{il}^T \mathbf{S}_{il} + \frac{1}{4}\vartheta_{il}^2\phi_i^2\mu_{il}^2 + \\ &c_{il}S_{il} + \frac{1}{2}\vartheta_{il}) + \frac{1}{r_i}\tilde{\zeta}_i(\frac{r_i}{2a_{il}^2}\vartheta_{il}^2\mathbf{S}_{il}^T \mathbf{S}_{il} - \dot{\zeta}_i) - \\ &\rho_i\vartheta_{il}M_i + \frac{1}{2}\bar{\delta}_{il}^2 + \frac{1}{2}a_{il}^2 + \sum_{l=1}^N \rho_{il}\bar{h}_{il}(y_l) \end{aligned} \quad (18)$$

此时, 将虚拟控制器设计为如式(19)所示的形式。

$$\alpha_{il} = -c_{il}z_{il} - \frac{1}{2a_{il}^2}\vartheta_{il}\zeta_i^* \mathbf{S}_{il}^T \mathbf{S}_{il} - \frac{1}{2}\vartheta_{il} - \frac{1}{4}\vartheta_{il}\phi_i^2\mu_{il}^2 \quad (19)$$

式中: $i = 1, \dots, N$; $c_{il} > 0$ 为需要设计的参数。将式(19)代入式(18)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{il} &\leq -c_{il}\vartheta_{il}^2 + \vartheta_{il}\vartheta_{i2} + \frac{1}{2}a_{il}^2 + \frac{1}{2}\bar{\delta}_{il}^2 + \\ &\sum_{l=1}^N \rho_{il}\bar{h}_{il}(y_l) - \rho_i\vartheta_{il}M_i + \\ &\frac{1}{r_i}\tilde{\zeta}_i(\frac{r_i}{2a_{il}^2}\vartheta_{il}^2\mathbf{S}_{il}^T \mathbf{S}_{il} - \dot{\zeta}_i) \end{aligned} \quad (20)$$

第 j 步 ($i = 1, \dots, N$; $j = 2, \dots, n_i - 1$): 由式(10)的定义, 并对 ϑ_{ij} 求导, 可以得到

$$\begin{aligned} \dot{\vartheta}_{ij}(t) &= \vartheta_{ij+1} + \varsigma_{ij-1} + f_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_{ij}) + h_{ij}(\bar{\mathbf{y}}) + \\ &c_{ij}S_{ij} + \alpha_{ij} - \dot{\zeta}_{i,j-1}^* \end{aligned} \quad (21)$$

选择式(22)所示的李雅普诺夫候选函数

$$V_{ij} = V_{ij-1} + \frac{1}{2}\vartheta_{ij}^2 \quad (22)$$

对 V_{ij} 求导得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ij} &= \dot{V}_{ij-1} + \vartheta_{ij}(\vartheta_{ij+1} + \alpha_{ij} + h_{ij}(\bar{\mathbf{y}}) + \\ &g_{ij}(\mathbf{X}_{ij}) + \varsigma_{ij-1} + c_{ij}S_{ij}) \end{aligned} \quad (23)$$

式中: $g_{ij}(\mathbf{X}_{ij}) = f_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_{ij}) - \dot{\zeta}_{i,j-1}^*$, $\mathbf{X}_{ij} = [\bar{x}_{ij}, y_{di}, \dot{y}_{di}]^T$ 为未知的非线性函数。利用杨氏不等式, 可以得到

$$\vartheta_{ij}h_{ij}(\bar{\mathbf{y}}) \leq \frac{1}{4}\vartheta_{ij}^2 + \sum_{l=1}^N \rho_{ijl}\bar{h}_{ijl}(y_l) \quad (24)$$

由于 $g_{ij}(\mathbf{X}_{ij})$ 是一个未知函数, 利用神经网络逼近未知函数 $g_{ij}(\mathbf{X}_{ij})$, 可以得到

$$g_{ij}(\mathbf{X}_{ij}) = \mathbf{W}_{ij}^T \mathbf{S}_{ij}(\mathbf{X}_{ij}) + \delta_{ij}(\mathbf{X}_{ij}) \quad (25)$$

式中: δ_{ij} 为逼近误差, 满足 $|\delta_{ij}| \leq \bar{\delta}_{ij}$, $\bar{\delta}_{ij} > 0$ 为一个正数。利用引理2和杨氏不等式, 可以得到

$$\vartheta_{ij}g_{ij}(\mathbf{X}_{ij}) \leq \frac{1}{2a_{ij}^2}\vartheta_{ij}^2\zeta_i^* \mathbf{S}_{ij}^T \mathbf{S}_{ij} + \frac{1}{2}a_{ij}^2 + \frac{1}{2}\vartheta_{ij}^2 + \frac{1}{2}\bar{\delta}_{ij}^2 \quad (26)$$

式中: $\mathbf{S}_{ij} = \mathbf{S}_{ij}(\mathbf{X}_{ij})$, a_{ij} 为一个正数。将虚拟控制器设计为如式(27)所示形式。

$$\alpha_{ij} = -c_{ij}z_{ij} - \frac{1}{2a_{ij}^2}\vartheta_{ij}\zeta_i^* \mathbf{S}_{ij}^T \mathbf{S}_{ij} - z_{ij-1} - \frac{3}{4}\vartheta_{ij} \quad (27)$$

式中: $c_{ij} > 0$ 为需要设计的参数。从而将式(24)、式(26)和式(27)代入式(23)得到

$$\begin{aligned} \dot{V}_{ij} &\leq -\sum_{m=1}^j c_{im}\vartheta_{im}^2 + \vartheta_{ij}\vartheta_{ij+1} + \sum_{m=1}^j \sum_{l=1}^N \rho_{iml}\bar{h}_{iml}(y_l) - \\ &\rho_i\vartheta_{il}M_i + \sum_{m=1}^j (\frac{1}{2}a_{im}^2 + \frac{1}{2}\bar{\delta}_{im}^2) + \\ &\frac{\tilde{\zeta}_i}{r_i} \left(\sum_{m=1}^j \frac{r_i}{2a_{im}^2}\vartheta_{im}^2\mathbf{S}_{im}^T \mathbf{S}_{im} - \dot{\zeta}_i \right) \end{aligned} \quad (28)$$

第 n_i 步 ($i = 1, \dots, N$): 事件触发控制器设计为

$$\begin{cases} \omega_i(t) = -(1 + k_i) \left(\alpha_{in_i} \tanh \frac{\vartheta_{in_i} \alpha_{in_i}}{\epsilon_i} + \bar{k}_i \tanh \frac{\vartheta_{in_i} \bar{k}_i}{\epsilon_i} \right) \\ u_i(t) = \omega_i(t_k), \forall t \in [t_k, t_{k+1}) \end{cases} \quad (29)$$

事件触发机制为

$$t_{k+1} = \inf \{t > t_k \mid |\eta_i| \geq k_i |u_i| + d_i\} \quad (30)$$

式中: $\eta_i(t) = \omega_i(t) - u_i(t)$, $d_i > 0$, $0 < k_i < 1$ 和 $\bar{k}_i > d_i/(1 - k_i)$ 都是需要设计的正参数。由式(29)和式(30), 可以得到

$$\omega_i(t) = (1 + k_i \lambda_{i_1}(t))u_i(t) + \lambda_{i_2}(t)d_i \quad (31)$$

式中: $t_k \leq t < t_{k+1}$, $|\lambda_{i_1}(t)| \leq 1$ 以及 $|\lambda_{i_2}(t)| \leq 1$ 。从而 u_i 可以改写为

$$u_i(t) = \frac{\omega_i(t)}{1 + k_i \lambda_{i_1}(t)} - \frac{\lambda_{i_2}(t) d_i}{1 + k_i \lambda_{i_1}(t)} \quad (32)$$

由式(10)的定义, 并对 ϑ_{in_i} 求导, 可以得到

$$\dot{\vartheta}_{in_i} = u_i + s_{in_i-1} + f_{in_i}(\bar{x}_{ij}) + h_{in_i}(\bar{y}) - \dot{\xi}_{in_i}^* \quad (33)$$

选择李雅普诺夫候选函数

$$V_{in_i} = V_{in_i-1} + \frac{1}{2} \vartheta_{in_i}^2 \quad (34)$$

V_{in_i} 的导数是

$$\begin{aligned} \dot{V}_{in_i} = & \dot{V}_{in_i-1} + \vartheta_{in_i} \left(\frac{\omega_i(t)}{1 + k_i \lambda_{i_1}(t)} - \frac{\lambda_{i_2}(t) d_i}{1 + k_i \lambda_{i_1}(t)} + \right. \\ & \left. s_{in_i-1} + g_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i}) + h_{in_i}(\bar{y}) \right) \end{aligned} \quad (35)$$

式中: $g_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i}) = f_{in_i}(\bar{x}_{in_i}) - \dot{\xi}_{in_i}^*$, $\mathbf{X}_{in_i} = [\bar{x}_{in_i}, y_{d_i}, \dot{y}_{d_i}]^T$ 为一个未知的非线性函数。由于 $|\lambda_{i_1}(t)| \leq 1$ 和 $|\lambda_{i_2}(t)| \leq 1$, 可以得到

$$\begin{cases} \vartheta_{in_i} \frac{\omega_i(t)}{1 + k_i \lambda_{i_1}(t)} \leq \vartheta_{in_i} \frac{\omega_i(t)}{1 + k_i} \\ \left| \frac{\lambda_{i_2}(t) d_i}{1 + k_i \lambda_{i_1}(t)} \right| \leq \frac{d_i}{1 - k_i} \end{cases} \quad (36)$$

根据文献[12], 有不等式(37)成立。

$$0 \leq |x_i| - x_i \tanh\left(\frac{x_i}{\epsilon_i}\right) \leq 0.278 \ 5 \epsilon_i \quad (37)$$

式中: $\epsilon_i > 0$ 和 $x_i \in \mathbf{R}$ 。从而式(35)可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{in_i} = & \dot{V}_{in_i-1} + \vartheta_{in_i} \alpha_{in_i} + \vartheta_{in_i} (s_{in_i-1} + h_{in_i}(\bar{y}) + \\ & g_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i})) + 0.557 \epsilon_i \end{aligned} \quad (38)$$

利用杨氏不等式, 可以得到

$$\vartheta_{in_i} h_{in_i}(\bar{y}) \leq \frac{1}{4} \vartheta_{in_i}^2 + \sum_{l=1}^{n_l} \rho_{in_i l} \tilde{h}_{in_i l}(y_l) \quad (39)$$

根据引理1, 利用神经网络来逼近未知的非线性函数 $g_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i})$, 可以得到

$$g_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i}) = \mathbf{W}_{in_i}^T \mathbf{S}_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i}) + \delta_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i}) \quad (40)$$

式中: δ_{in_i} 为逼近误差满足 $|\delta_{in_i}| \leq \bar{\delta}_{in_i}$, $\bar{\delta}_{in_i} > 0$ 为一个正数。利用引理3和杨氏不等式, 可以得到

$$\vartheta_{in_i} g_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i}) \leq \frac{1}{2a_{in_i}^2} \vartheta_{in_i}^2 \zeta_i^T \mathbf{S}_{in_i}^T \mathbf{S}_{in_i} + \frac{1}{2} a_{in_i}^2 + \frac{1}{2} \vartheta_{in_i}^2 + \frac{1}{2} \bar{\delta}_{in_i}^2 \quad (41)$$

式中: $\mathbf{S}_{in_i} = \mathbf{S}_{in_i}(\mathbf{X}_{in_i})$, a_{in_i} 为一个正数。将式(39)和式(41)代入到式(38)中, 式(38)可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{V}_{in_i} \leq & \dot{V}_{in_i-1} + \vartheta_{in_i} \left(\alpha_{in_i} + \frac{1}{2a_{in_i}^2} \vartheta_{in_i} \zeta_i^T \mathbf{S}_{in_i}^T \mathbf{S}_{in_i} + \frac{3}{4} \vartheta_{in_i} + \right. \\ & \left. s_{in_i-1} \right) + \frac{1}{2a_{in_i}^2} \vartheta_{in_i}^2 \zeta_i^T \mathbf{S}_{in_i}^T \mathbf{S}_{in_i} + \frac{1}{2} a_{in_i}^2 + \frac{1}{2} \bar{\delta}_{in_i}^2 + \\ & \sum_{l=1}^N \rho_{in_i l} \tilde{h}_{in_i l}(y_l) + 0.557 \epsilon_i \end{aligned} \quad (42)$$

将虚拟控制器 α_{in_i} 和自适应率 $\dot{\zeta}_i$ 设计为

$$\alpha_{in_i} = -c_{in_i} \vartheta_{in_i} - \frac{1}{2a_{in_i}^2} \vartheta_{in_i} \zeta_i^T \mathbf{S}_{in_i}^T \mathbf{S}_{in_i} - z_{in_i-1} - \frac{3}{4} \vartheta_{in_i} \quad (43)$$

$$\dot{\zeta}_i = \sum_{m=1}^{n_i} \frac{r_i}{2a_{im}^2} \vartheta_{im}^2 \mathbf{S}_{im}^T \mathbf{S}_{im} - \tau_i \zeta_i \quad (44)$$

式中: $i = 1, \dots, N$; c_{in_i} , a_{im} , τ_i 为需要设计的正数。将式(43)和式(44)代入式(42)得

$$\begin{aligned} \dot{V}_{in_i} \leq & - \sum_{m=1}^{n_i} c_{im} \vartheta_{im}^2 + \sum_{m=1}^{n_i} \sum_{l=1}^N \rho_{iml} \tilde{h}_{iml}(y_l) + \frac{\tau_i}{r_i} \zeta_i \widehat{\zeta}_i - \\ & \rho_i \vartheta_{i1} M_i + \sum_{m=1}^{n_i} \left(\frac{1}{2} a_{im}^2 + \frac{1}{2} \bar{\delta}_{im}^2 \right) + 0.557 \epsilon_i \end{aligned} \quad (45)$$

3 稳定性分析

定理1 考虑一类具有性能约束的大规模非线性系统(1), 虚拟控制器(27), 事件触发控制器(29)和自适应律(44)。在假设1和假设2的条件下, 可以保证以下性能:

(1) 系统的输出信号在一定误差内可以追踪到参考信号;

(2) 闭环系统中所有信号都是半全局一致有界;

(3) 跟踪误差的轨迹始终在漏斗内演变。

证明 可以通过以下4个步骤来证明定理的结果。

步骤1 对整个系统构造李雅普诺夫候选函数为

$$V = \sum_{i=1}^N V_{in_i} \quad (46)$$

利用杨氏不等式, 能得到

$$\frac{\tau_i}{r_i} \zeta_i \widehat{\zeta}_i \leq -\frac{\tau_i}{2r_i} \zeta_i^2 + \frac{\tau_i}{2r_i} \zeta_i^{*2} \quad (47)$$

将式(47)代入式(46), 并对 V 求导可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & - \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{n_i} c_{im} \vartheta_{im}^2 - \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{2r_i} \zeta_i^2 + \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{2r_i} \zeta_i^{*2} + \\ & h_i + \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{n_i} \left(\frac{1}{2} \bar{\sigma}_{im}^2 + \frac{1}{2} a_{im}^2 \right) + \sum_{i=1}^N 0.557 \epsilon_i \end{aligned} \quad (48)$$

式中:

$$h_i = \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^{n_l} \rho_{lji} \tilde{h}_{lji}(y_l) - \rho_i \vartheta_{i1} M_i$$

是互连的剩余项。由于 $\bar{h}_{ij}(y_i) \geq 0$, 根据 ρ_i 和 M_i 的定义, 可以得到

$$h_i \leq \rho_i \frac{q_i - \vartheta_{i1}^2}{\vartheta_{i1}^2 + q_i} \sum_{l=1}^N \sum_{j=1}^{n_l} \bar{h}_{lji}(y_i) \tag{49}$$

通过式(49), 可以得到对任意的 $i = 1, \cdots, N$, 当 $|\vartheta_{i1}| > \sqrt{q_i}$ 时, 有 $h_i < 0$; 当 $|\vartheta_{i1}| \leq \sqrt{q_i}$ 时, 根据式(6), 可以推断 y_i 是有界的。因此, h_i 有一个上界 $\bar{h}_i \geq 0$ 。从而式(48)可以改写为

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & - \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{n_i} c_{im} \vartheta_{im}^2 - \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{2r_i} \tilde{\zeta}_i^2 + \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{2r_i} \zeta_i^{*2} + \bar{h}_i + \\ & \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{n_i} \left(\frac{1}{2} \bar{\sigma}_{im}^2 + \frac{1}{2} a_{im}^2 \right) + \sum_{i=1}^N 0.557 \epsilon_i \leq d_1 V + d_2 \end{aligned} \tag{50}$$

式中: $d_1 = \min\{2c_{im}, \tau_i, m = 1, \cdots, n_i, i = 1, \cdots, N\}$

$$d_2 = \sum_{i=1}^N \frac{\tau_i}{2r_i} \zeta_i^{*2} + \sum_{i=1}^N 0.557 \epsilon_i + \sum_{i=1}^N \sum_{m=1}^{n_i} \left(\frac{1}{2} a_{im}^2 + \frac{1}{2} \bar{\sigma}_{im}^2 \right) + \bar{h}_i$$

对式(50)进行求解, 可以得到不等式(51)成立。

$$V(t) \leq \left(V(0) - \frac{d_2}{d_1} \right) e^{-d_1 t} + \frac{d_2}{d_1} \tag{51}$$

这意味着 ϑ_{ij} 是有界的。又根据 $\vartheta_{ij} = z_{ij} - s_{ij}$ 的定义, 如果 s_{ij} 能保证收敛到一个小的邻域, 则误差 z_{ij} 有界。接下来, 将证明 s_{ij} 是有界的。

步骤2 定义李雅普诺夫候选函数为

$$V_s = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{2} s_{ij}^2 \tag{52}$$

取 V_s 的导数, 得到

$$\dot{V}_s = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i-1} (c_{ij} s_{ij}^2 + \vartheta_{ij} (\xi_{ij}^* - \alpha_{ij})) \tag{53}$$

基于在文献[26]中的引理有 $|\xi_{ij}^* - \alpha_{ij}| \leq \bar{\omega}_{ij}$, 其中 $\bar{\omega}_{ij}$ 是一个已知常数, 从而, 式(53)可以重写为

$$\dot{V}_s = - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i-1} (c_{ij} s_{ij}^2 + \vartheta_{ij} \bar{\omega}_{ij}) \tag{54}$$

利用杨氏不等式, 得到

$$\bar{\omega}_{ij} s_{ij} \leq \frac{1}{2} s_{ij}^2 + \frac{1}{2} \bar{\omega}_{ij}^2 \tag{55}$$

将式(55)代入式(54)得到

$$\dot{V}_s \leq - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i-1} \left(c_{ij} - \frac{1}{2} \right) s_{ij}^2 + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{2} \bar{\omega}_{ij}^2 \leq -l_1 V_s + l_2 \tag{56}$$

式中: $l_1 = \min\{2c_{ij} - 1, i = 1, 2, \cdots, N; j = 1, 2, \cdots, n_{i-1}\}$, $l_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \frac{1}{2} \bar{\omega}_{ij}^2$ 。对式(56)进行积分, 可以得到 $\lim_{t \rightarrow \infty} V_s \leq \frac{l_2}{l_1}$ 。因此 $s_{ij}(t)$ 是有界的。由假设1可知 y_{d_i} 是有界的, 并且 $\vartheta_{ij} = z_{ij} - s_{ij}$, $z_{i1} = \zeta_i$, $z_{ij} = x_{ij} - \xi_{ij-1}^*$ 。这确保了信号 z_{i1} , z_{ij} 是有界的。从而根据式(29)中的定义, u_i 也是有界的。

步骤3 这一步证明了闭环系统的跟踪误差始终在预定义的漏斗内演化。从 z_{i1} 的定义和第2节的讨论可以看出, 存在一个常数 $\delta_i < 1$, 使得 $|s_i(t)| = |\phi_i(t)| \|e_i(t)\| \leq \delta_i < 1$, 表明系统的跟踪误差始终在预定义的漏斗内演化。

步骤4 下面证明芝诺现象并不发生, 即存在一个 t_* 使得 $t_{k+1} - t_k \geq t_*$, $k \in \mathbf{Z}^+$ 。因此, 对任意的 $t \in [t_k, t_{k+1})$, 由 $\eta_i(t) = \omega_i(t) - u_i(t)$ 有

$$\frac{d}{dt} |\eta_i| = \text{sgn}(\eta_i), \quad \dot{\eta}_i \leq |\dot{\omega}_i| \tag{57}$$

通过式(57), 可以得到 $\omega_i(t)$ 可微。不等式 $|\dot{\omega}_i| \leq \iota_i$, ι_i 是正数。由于 $\eta_i(t_k) = 0$ 和 $\lim_{t \rightarrow t_{k+1}} \eta_i(t) = k_i |u_i| + d_i$, 因此 $t_* > \frac{k_i |u_i| + d_i}{\kappa_i}$, 芝诺现象被成功消除。

4 仿真

本节用一个数值例子来证明所提出的控制方法的有效性。考虑如式(58)所示的大规模非线性系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_{ij} = x_{ij+1} + f_{ij}(\bar{\mathbf{x}}_{ij}) + h_{ij}(\bar{\mathbf{y}}) \\ \dot{x}_{m_i} = u_i + f_{m_i}(\bar{\mathbf{x}}_{m_i}) + h_{m_i}(\bar{\mathbf{y}}) \\ y_i = x_{i1} \end{cases} \tag{58}$$

式中:

$$\begin{aligned} f_{11} &= 0.2x_{11} \sin(x_{11}) + x_{12}, f_{12} = x_{12} \sin(x_{1,1}) \\ f_{22} &= 0.2x_{22} \sin(x_{21}), f_{21} = x_{21} \cos(x_{21}) \\ h_{11} &= 0.1x_{11} \sin(x_{21}) + x_{22}, h_{12} = 0.5x_{12}x_{21} \\ h_{21} &= 0.2x_{11}x_{22}, h_{22} = 0.5(x_{11}^2 + x_{21}^2) + x_{12} \end{aligned}$$

初始值和其他需要设计的参数选择如下:

$$\begin{aligned} c_{11} &= c_{12} = 50, c_{21} = c_{22} = 50, a_{11} = a_{12} = 1, a_{21} = 1, \\ a_{22} &= 1, \varepsilon_{11} = \varepsilon_{21} = 0.001, \phi_1 = 1/(1 - b_{f_1}) e^{-t_1 + b_{f_1}} - 1, \\ b_{f_1} &= 0.09, t_1 = 0.2, \phi_2 = 1/(1 - b_{f_2}) e^{-t_2 + b_{f_2}} - 1, t_2 = 0.2, \\ b_{f_2} &= 0.08, r_1 = 0.1, r_2 = 0.1, \tau_1 = 100, \tau_2 = 100, d_1 = 25, \\ d_2 &= 25, k_1 = 0.4, k_2 = 0.4, \bar{\kappa}_1 = 60, \bar{\kappa}_2 = 60, \epsilon_i = 10, y_{d_1} = \sin(2t), \\ y_{d_2} &= \sin(t), x_{11}(0) = 0, x_{12}(0) = 0.2, x_{21}(0) = 0, \end{aligned}$$

$x_{22}(0) = 0, \hat{\zeta}_1(0) = 1, \hat{\zeta}_2(0) = 1$ 。

模拟结果如图2~图6所示。图2表示了系统的输出 $y_i(t)$ 与参考信号 $y_{di}(t)(i=1,2)$ 的运动轨迹,从图中可以看出,系统的输出可以很好地跟踪到参考信号。

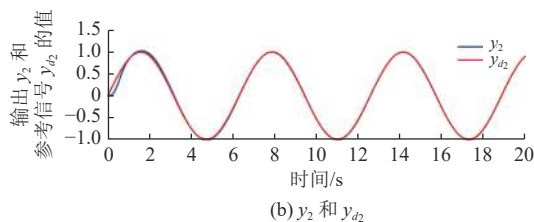
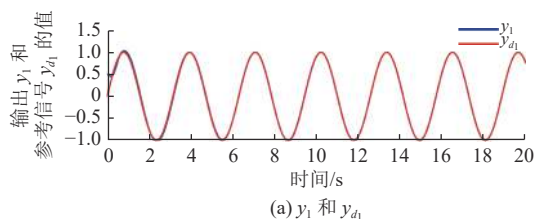


图2 $y_i(t)$ 和 $y_{di}(t), i=1,2$ 的运动轨迹

Fig.2 The trajectories of $y_i(t)$ and $y_{di}(t), i=1,2$

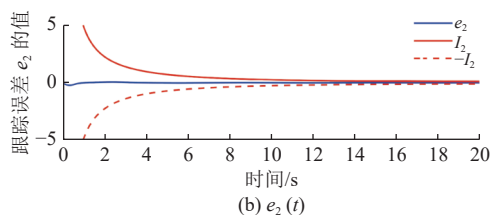
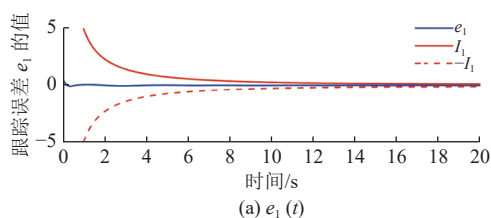


图3 跟踪误差 $e_i(t), i=1,2$ 的运动轨迹

Fig.3 The trajectories of error tracking $e_i(t), i=1,2$

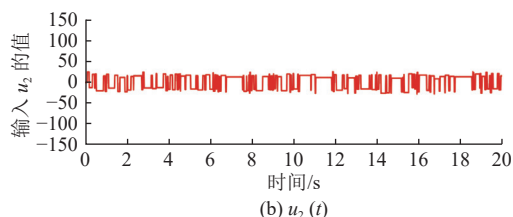
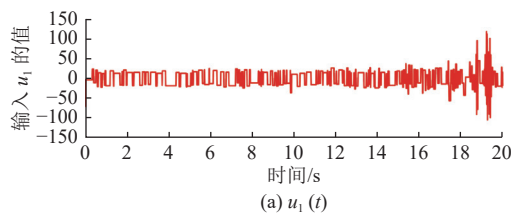


图4 $u_i(t), i=1,2$ 的运动轨迹

Fig.4 The trajectories of $u_i(t), i=1,2$

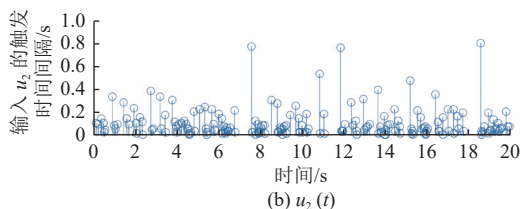
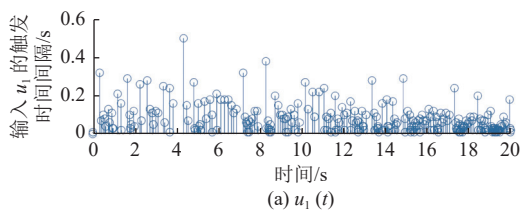


图5 $u_i(t), i=1,2$ 的触发时间间隔

Fig.5 Trigger time interval of $u_i(t), i=1,2$

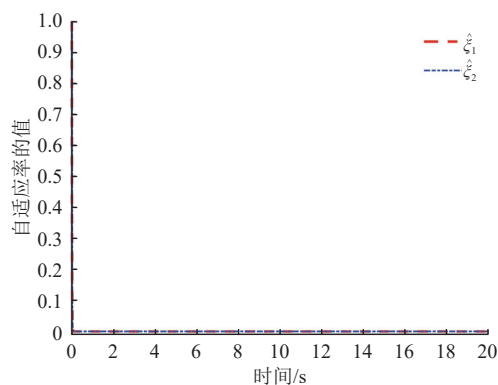


图6 自适应率 $\hat{\zeta}_1$ 和 $\hat{\zeta}_2$ 的轨迹

Fig.6 The trajectories of adaptive laws $\hat{\zeta}_1$ and $\hat{\zeta}_2$

图3展示了跟踪误差 $e_i(t)(i=1,2)$ 的运动轨迹,从图中可以看出,跟踪误差总是在给定的区域内演化,并且所提出的控制机制放宽了对初始条件的要求。图4描述了控制器 $u_i(t)(i=1,2)$ 的轨迹。图5显示了触发间隔 $t_{k+1}-t_k$ 。图6显示了自适应率 $\hat{\zeta}_i(i=1,2)$ 的运动轨迹。

5 结论

本文研究了一类不确定大规模非线性系统的分散自适应事件触发漏斗控制问题。首先,通过障碍李雅普诺夫函数变换,递归构造了一种新的自适应分散漏斗控制器,以实现给定瞬态行为的输出跟踪。其次,为了解决控制器设计中的互联项问题,引入了一个辅助非线性函数。同时,将命令滤波技术应用到反步设计中,避免了反步过程中的“复杂性爆炸”问题。此外,还设计了一种事件触发机制,以减少控制器和执行器之间不必要的传输,从而提高资源效率。结果表明所提出的控制方案能保证闭环系统的所有信号都是有界的,并且跟踪误差总是在漏斗中演化。最后,通过一个数值系统验证了该控制方法的有效性。

参考文献:

- [1] JAIN S, KHORRAMI F. Decentralized adaptive output feedback design for large-scale nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(5): 729-735.
- [2] JIANG Z P. Decentralized and adaptive nonlinear tracking of large-scale systems via output feedback [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(11): 2122-2128.
- [3] LIU S J, ZHANG J F, JIANG Z P. Decentralized adaptive output-feedback stabilization for large-scale stochastic nonlinear systems [J]. *Automatica*, 2007, 43(2): 238-251.
- [4] TONG S C, LI Y M, LIU Y J. Observer-based adaptive neural networks control for large-scale interconnected systems with nonconstant control gains [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(4): 1575-1585.
- [5] LI Y M, TONG S C. Adaptive neural networks prescribed performance control design for switched interconnected uncertain nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2018, 29(7): 3059-3068.
- [6] GONG J Y, JIANG B, SHEN Q K. Adaptive fault tolerant neural control for large-scale systems with actuator faults [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17: 1421-1431.
- [7] LI Y M, TONG S C. Fuzzy adaptive control design strategy of nonlinear switched large-scale systems [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(12): 2209-2218.
- [8] WANG H Q, PETER LIU X P, ZHAO X D, *et al.* Adaptive fuzzy finite-time control of nonlinear systems with actuator faults [J]. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2020, 50(5): 1786-1797.
- [9] SUI S, PHILIP CHEN L P, TONG S C. Event-trigger-based finite-time fuzzy adaptive control for stochastic nonlinear system with unmodeled dynamics [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2021, 29(7): 1914-1926.
- [10] LIANG H J, LIU G L, ZHANG G H, *et al.* Neural-network-based event-triggered adaptive control of nonaffine nonlinear multiagent systems with dynamic uncertainties [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, 32(5): 2239-2250.
- [11] HUANG J S, WANG W, WEN C Y, *et al.* Adaptive event-triggered control of nonlinear systems with controller and parameter estimator triggering [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2020, 65(1): 318-324.
- [12] MA H, LI H Y, LIANG H J, *et al.* Adaptive fuzzy event-triggered control for stochastic nonlinear systems with full state constraints and actuator faults [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2019, 27(11): 2242-2254.
- [13] WANG L J, PHILIP CHEN C L. Reduced-order observer-based dynamic event-triggered adaptive NN control for stochastic nonlinear systems subject to unknown input saturation [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2020, 32(4): 1678-1690.
- [14] JI Y H, ZHOU H L, ZONG Q. Decentralized adaptive event-triggered control for nonlinear interconnected systems in strict-feedback form [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, 18(4): 980-990.
- [15] BECHLIOULIS C P, ROVITHAKIS G A. Robust adaptive control of feedback linearizable MIMO nonlinear systems with prescribed performance [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2008, 53(9): 2090-2099.
- [16] ZHOU Q, LI H Y, WU C W, *et al.* Adaptive fuzzy control of nonlinear systems with unmodeled dynamics and input saturation using small-gain approach [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2017, 47(8): 1979-1989.
- [17] LI Y M, SHAO X F, TONG S C. Adaptive fuzzy prescribed performance control of nontriangular structure nonlinear systems [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2020, 28(10): 2416-2426.
- [18] ZHANG L L, YANG G H. Adaptive fuzzy prescribed performance control of nonlinear systems with hysteretic actuator nonlinearity and faults [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 2018, 48(12): 2349-2358.
- [19] ILCHMANN A, RYAN E P, TOWNSEND P. Tracking with prescribed transient behaviour [J]. *ESAIM: Control, Optimisation and Calculus of Variations*, 2002, 7: 471-493.
- [20] HACKL M C, HOPFE N, ILCHMANN A, *et al.* Funnel control for systems with relative degree two [J]. *SIAM Journal on Control and Optimization*, 2013, 51(2): 965-995.
- [21] BERGER T, REIS T. Funnel control via funnel precompensator for minimum phase systems with relative degree two [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2018, 63(7): 2264-2271.
- [22] LIBERZON D, TRENN S. The bang-bang funnel controller for uncertain nonlinear systems with arbitrary relative degree [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, 58(12): 3126-3141.
- [23] CHOWDHURY D, KHALIL H K. Funnel control for nonlinear systems with arbitrary relative degree using high-gain observers [J]. *Automatica*, 2019, 105: 107-116.
- [24] LIU Y H, SU C Y, LI H Y. Adaptive output feedback funnel control of uncertain nonlinear systems with arbitrary relative degree [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2021, 66(6): 2854-2860.
- [25] SUN Y M, CHEN B, LIN C, *et al.* Adaptive neural control for a class of stochastic nonlinear systems by backstepping approach [J]. *Information Sciences*, 2016, 369(10): 748-764.
- [26] FARRELL J A, POLYCARPOU M, SHARMA M, *et al.* Command filtered backstepping [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2009, 54(6): 1391-1395.

(责任编辑: 赵少飞)