

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.03.005

针对不确定非线性系统的输入死区约束控制 系统研究

Research on input dead zone constraint control system for uncertain nonlinear systems

黄文岐, 萧仲敏*, 张烨, 洪嘉纯, 马灿洪

HUANG Wenqi, XIAO Zhongmin*, ZHANG Ye, HONG Jiachun, MA Canhong

(广州大学 机械与电气工程学院, 广州 510006)

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

摘要:针对一类具有输入死区的不确定非线性系统,提出了一种基于事件触发的模糊自适应控制方法。考虑到函数近似误差是随时间变化的,采用改进过的模糊逻辑系统来解决所考虑系统的不确定部分。为节省系统传输资源,建立了一种包含一个2位信号传输机制的事件触发机制,且在控制设计中引入了设计好的辅助系统,以补偿在实际系统中出现的输入死区所带来的影响。根据理论分析和仿真结果,可以保证所有信号的有界性,并验证了所提方法的有效性。

关键词:事件触发控制;输入死区;模糊逻辑系统;辅助系统;2位信号传输;自适应控制

中图分类号:TK 01 **文献标志码:**A **文章编号:**2097-0706(2023)03-0034-07

Abstract: An event-triggered fuzzy adaptive control is proposed for a class of uncertain nonlinear systems with input dead zones. Considering that the function approximation error changes with time, improved fuzzy logic systems (FLSs) are used to solve the uncertain part of the proposed system. In order to save system transmission resources, an event trigger mechanism taking two-bit signal transmission is established. And a designed auxiliary system is introduced into the controller, to compensate for the impact of input dead zones appearing in the practical system. According to the theoretical analysis and simulation results, the proposed system is effective and can guarantee the boundedness of all signals.

Keywords: event-triggered control; input dead zone; fuzzy logic system; auxiliary system; two-bit signal transmission; adaptive control

0 引言

如何节省系统的传输资源是实际网络控制系统中通信带宽限制的研究热点^[1]。事件触发的控制策略发展迅速,因为它可以有效地节省传输资源^[2-3]。文献[2]中事件触发方案被组合来处理所考虑系统的故障检测。文献[3]针对执行器故障和滞后输入,设计了一种新的优化算法,该算法将事件触发的控制器和后推技术相结合。这样既可以保

证跟踪误差的范围,又可以节省传输资源。以上方法可以有效地节省系统传输资源。但是,它们均未考虑系统的输入死区。

由于外部干扰或自我约束,非线性系统始终具有不确定性。不确定部分将对系统性能产生很大影响。有很多方法可以解决这个问题,例如神经网络^[4-5]和模糊逻辑系统^[6-8]。文献[5]通过应用神经网络来近似不确定部分,提出了针对非线性不确定系统的事件触发策略。文献[6]考虑到执行器故障,结合模糊逻辑系统,研究了事件触发的补偿控制。以上结果可以有效补偿所考虑系统的不确定部分。但是,在这些方法中,近似误差被视为有界常数,而实际上却是随时间变化的。

输入死区现象经常出现在实际系统中,对控制性能有很大的影响。如何用有效方法补偿输入死区仍然是一个悬而未决的问题^[9-11]。文献[9]考虑了输出死区,而未考虑输入死区。文献[10]提出了

基金项目:广东省教育厅人才项目(2018KQNCX197);广东省自然科学基金项目(2019A15110995);广州市科技计划项目(202002030286);广州大学校内项目(YG2020009);大学生创新创业训练项目(XJ202011078051)

Talent Program of Guangdong Education Department (2018KQNCX197); Natural Science Foundation of Guangdong Province (2019A15110995); Science and Technology Plan of Guangzhou (202002030286); Internal Project of Guangzhou University (YG2020009); Innovation and Entrepreneurship Training Program for College Students (XJ202011078051)

一种新颖的自适应控制方法来解决未知的输入死区。然而这些方法没有考虑实际系统的通信带宽限制。因此,如何在考虑系统通信带宽约束的同时处理输入死区仍然是一个巨大的挑战。

基于上述原因,本文研究了在传输资源受限和输入死区的情况下如何有效地控制非线性不确定系统的问题。建议方法的主要贡献如下。

(1)如何节省传输资源是考虑输入死区和系统不确定部分的一大挑战。针对触发时触发条件的设置和控制信号的传输,提出了一种新颖的事件触发策略,以进一步节省系统的传输资源。

(2)在大多数促进处理的传统方法中,近似误差被视为一个边界常数。但是,近似误差在实际中是一个时间变化的函数^[4-8]。本文采用改进的模糊逻辑系统来处理此问题,该问题考虑了时间变化错误的补偿。

(3)与文献[9-11]中的系统相比,本文在遭受传输资源限制时考虑了非线性系统的输入死区。在控制设计中引入辅助系统,以补偿输入死区的影响。结合后推技术,提出了一种自适应补偿控制。

本文剩余部分安排如下:第1节提出所考虑系统的模型;第2节展示自适应模糊补偿事件触发控制的设计和分析;第3节通过提出的方法模拟一个例子以验证其有效性;第4节得出结论。

1 公式化及问题

本文考虑了非线性不确定系统。

$$\begin{cases} \dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(\bar{x}_i) \\ \dot{x}_n = D(u) + f_n(\bar{x}_n)y = x_1, \\ y = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $(x_1, \dots, x_n) \in \mathbf{R}$ 为系统状态, \mathbf{R} 为实数集; $y \in \mathbf{R}$ 和 $D(u)$ 为系统输出和输入的非线性死区; $f_i(\cdot)(i = 1, \dots, n-1)$ 为未知的平滑非线性函数。为了方便处理, $f_i(\cdot)$ 可以写成 f_i 。

本文的控制目标是保证跟踪性能,以及进一步节省所考虑系统的传输资源,意义重大。

$D(u)$ 可定义为

$$D(u) = \begin{cases} k_z(u + P_z), & u \leq -P_z \\ 0, & -P_z < u \leq P_y \\ k_y(u + P_y), & u > P_y \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u \in \mathbf{R}$ 为死区输入信号; P_z 和 P_y 分别为坐标轴左轴和右轴上的死区输入 u 的不确定断点; k_z 和 k_y 为死区的左右不确定斜率特性。 $D(u)$ 简化为

$$D(u) = ku(t) + b, \quad (3)$$

式中:当 $u \leq -P_z$ 时, $k = k_z$; $-P_z < u \leq P_y$ 时, $k = 0$; $u > P_y$ 时, $k = k_y$ 。当 $u \leq -P_z$ 时, $b = k_z P_z$; $-P_z < u \leq P_y$ 时, $b = 0$; $u > P_y$ 时, $b = -k_y P_y$ 。

对于后续设计,我们给出以下引理。

引理1:双曲函数具有以下特性

$$0 \leq \ell - \ell \tanh\left(\frac{\ell}{\alpha}\right) \leq 0.2785\alpha, \quad (4)$$

式中: $\ell \in \mathbf{R}, \alpha > 0, -\ell \tanh\frac{\ell}{\alpha} \leq 0$ 。

引理2:对于 $\forall \gamma, \hat{\gamma}$ 和 $\tilde{\gamma}$ 分别为 x 的估计值和估计误差。 $\tilde{\gamma} = \gamma - \hat{\gamma}$,因此 $\tilde{\gamma}^T \hat{\gamma} \leq -\frac{1}{2} \tilde{\gamma}^T \tilde{\gamma} + \frac{1}{2} \gamma^T \gamma$ 。

2 事件触发的模糊自适应补偿控制设计

2.1 模糊自适应补偿后推设计

考虑到输入死区的现象,很难获得出色的跟踪性能。本文介绍了一种辅助系统,以消除输入死区的影响。辅助系统的定义为

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_i = \varphi_{i+1} - \tau_i \varphi_i, i = 1, \dots, n-1 \\ \dot{\varphi}_n = \hat{D}(u) - u - \tau_n \varphi_n \end{cases}, \quad (5)$$

式中: $\hat{D}(u)$ 为 $D(u)$ 的估计值; τ 为一个设计常数, $\tau_i > \frac{1}{2}, \tau_i > 1(i = 2, 3, \dots, n)$ 。

如果系统未考虑输入死区,则表示 $D(u) = u$ 。在理想状态下, $\hat{D}(u)$ 和 $D(u)$ 的值相等。因此,辅助系统的状态始终为零, $\varphi_1 = 0$ 。

然后,坐标的变换如下

$$\begin{cases} z_1 = x_1 - r - \varphi_1 \\ z_i = x_i - \ell_{i-1} - r^{(i-1)} - \varphi_i, i = 2, \dots, n \end{cases}, \quad (6)$$

式中: ℓ_{i-1} 为虚拟控制律; z_i 为误差变量; $r(t)$ 为参考信号。

然后,结合反推技术,本文的控制设计过程如下。

步骤1:通过以上分析,可得出 \dot{z}_1

$$\dot{z}_1 = z_2 + \ell_1 + f_1 + \tau_1 \varphi_1, \quad (7)$$

Lyapunov函数 V_1 定义为

$$V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2\lambda_{\varphi_1}} \tilde{\omega}_1^T \tilde{\omega}_1, \quad (8)$$

根据模糊逻辑系统的研究,给出如下定义

$$f_1 = \theta^T \delta_1 + \vartheta_1, \quad (9)$$

式中: $\delta_i(\cdot): \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^r$ 为已知 $\gamma(\gamma \geq n+1-i)$ 阶光滑非线性函数,相对于 x_1, \dots, x_i ,即 $\delta_i(\cdot) = \delta_i(i = 1, 2, \dots, n)$; $\theta \in \mathbf{R}^r$ 为未知函数包含的未知权重值; ϑ_i 为随时间变化的近似误差。

虚拟控制律 ℓ_1 和调整函数 μ_1 的设计为

$$\begin{cases} \ell_1 = -c_1 z_1 - \hat{\theta}^T \delta_1 - \tau_1 \varphi_1 - sg_1(z_1) \hat{\omega}_1, \\ \mu_1 = z_1 \delta_1 \end{cases}, \quad (10)$$

式中: q_1 为一个确定的常数。为确保虚拟控制器的传导性和光滑性,文献[12]中的 sg_i 函数用于替换 sg_n 函数。于是可得

$$\dot{V}_1 \leq -q_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \tilde{\theta}^T \mu_1 + \frac{1}{\lambda_{\omega_1}} (\lambda_{\varepsilon_1} z_1 sg_1(z_1) - \dot{\hat{\omega}}_1), \quad (11)$$

自适应控制器 $\hat{\omega}_1$ 的设计为

$$\dot{\hat{\omega}}_1 = \lambda_{\varepsilon_1} z_1 sg_1(z_1) - \lambda_{\omega_1} \rho \hat{\omega}_1, \quad (12)$$

式(11)可写成

$$\dot{V}_1 \leq -q_1 z_1^2 + z_1 z_2 + \tilde{\theta}^T \mu_1 + \lambda_{\omega_1} \rho \hat{\omega}_1. \quad (13)$$

步骤 2: 将 Lyapunov 函数 V_2 定义为

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2 + \frac{1}{2\lambda_{\omega_2}} \tilde{\omega}_2^T \tilde{\omega}_2, \quad (14)$$

然后

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 \leq \dot{V}_1 + z_2 \dot{z}_2 - \frac{1}{\lambda_{\omega_2}} \tilde{\omega}_2^T \dot{\hat{\omega}}_2 \leq \dot{V}_1 + z_2 (z_3 + \ell_2 + \\ f_2 - \dot{\ell}_1 + \tau_2 \varphi_2) - \frac{1}{\lambda_{\omega_2}} \tilde{\omega}_2^T \dot{\hat{\omega}}_2, \end{aligned} \quad (15)$$

从式(10)可以获得

$$\dot{\ell}_1 = \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial \ell_1}{\partial r} \dot{r} + \frac{\partial \ell_1}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} + \frac{\partial \ell_1}{\partial \varphi_1} (\varphi_2 - \tau_1 \varphi_1). \quad (16)$$

与步骤 1 类似,下面给出了虚拟控制律 ℓ_2 和调整函数 μ_2 的设计。

$$\begin{cases} \ell_2 = -z_1 - q_2 z_2 + \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \ell_1}{\partial r} \dot{r} - \\ \hat{\theta}^T \left(\delta_2 - \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} \delta_1 \right) + \frac{\partial \ell_1}{\partial \hat{\theta}} \lambda_1 (\mu_2 - \rho \hat{\theta}) + \\ \frac{\partial \ell_1}{\partial \varphi_1} (\varphi_2 - \tau_1 \varphi_1) - \tau_2 \varphi_2 - sg_2(z_2) \hat{\omega}_2 \\ \mu_2 = \mu_1 + z_2 \left(\delta_2 - \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} \delta_2 \right) \end{cases}, \quad (17)$$

在模糊逻辑系统中,定义

$$f_2 - \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} \vartheta_2 = \theta^T \delta_2 + \vartheta_2, \quad (18)$$

由于 sg_i 函数,有

$$z_2 \vartheta_2 \leq z_2 sg_2(z_2) |\vartheta_2| \leq z_2 sg_2(z_2) \omega_2, \quad (19)$$

将式(16)——(19)代入式(15),其中一个具有

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq -q_1 z_1^2 - q_2 z_2^2 + z_2 z_3 + \tilde{\theta}^T \mu_2 + z_2 \frac{\partial \ell_1}{\partial \hat{\theta}} \left(\lambda_1 \mu_2 - \right. \\ \left. \lambda_1 \rho \hat{\theta} - \hat{\theta} \right) + z_2 sg_2(z_2) \tilde{\omega}_2 + \rho \tilde{\omega}_1^T \hat{\omega}_1 - \frac{1}{\lambda_{\omega_2}} \tilde{\omega}_2^T \dot{\hat{\omega}}_2, \end{aligned} \quad (20)$$

自适应控制器 $\hat{\omega}_2$ 的设计为

$$\dot{\hat{\omega}}_2 = \lambda_{\omega_2} z_2(z_2) - \lambda_{\omega_2} \rho \hat{\omega}_2, \quad (21)$$

与上述公式结合,有

$$\dot{V}_2 \leq -q_1 z_1^2 - q_2 z_2^2 + z_2 z_3 + \tilde{\theta}^T \mu_2 + \rho \tilde{\omega}_1^T \hat{\omega}_1 +$$

$$\rho \tilde{\omega}_2^T \hat{\omega}_2 + z_2 \frac{\partial \ell_1}{\partial \hat{\theta}} \left(\lambda_1 \mu_2 - \lambda_1 \rho \hat{\theta} - \hat{\theta} \right). \quad (22)$$

步骤 i : 同上,将得到 \dot{V}_i 、自适应控制器 $\hat{\omega}_i$ 设计,最后 \dot{V}_i 将重新计算。

2.2 新型事件触发控制器设计

首先,给出以下定义

$$w_i(t) = \begin{cases} -(1 + \sigma) \times \\ \left[\ell_n \tanh\left(\frac{z_n \ell_n}{\alpha}\right) + \bar{s}_1 \tanh\left(\frac{z_n \bar{s}_1}{\alpha}\right) \right], & |u| < K, \\ \ell_n - \bar{s}_2 \tanh\left(\frac{z_n \bar{s}_2}{\alpha}\right), & |u| \geq K \end{cases}, \quad (23)$$

式中: $\forall t \in [t_k, t_{k+1}]$, $t_k, t \in z^+$, $0 < \sigma < 1$, s_1, s_2, K ,

$\bar{s}_1 > \frac{s_1}{1 - \sigma}$, $\bar{s}_2 > s_2$ 都是正设计参数。

从式(3)可得如下定义

$$D(u) = ku + d = P^T W, \quad (24)$$

式中: $W = [u \quad 1]^T$, $P = [k \quad b]^T$ 。

于是

$$\hat{D}(u) = \hat{P}^T W, \quad (25)$$

式中: $\hat{D}(u)$ 为 $D(u)$ 的估计值; $\tilde{D}(u)$ 为估计误差; $\tilde{D}(u)$ 为 $D(u)$ 与 $\hat{D}(u)$ 之差。可得 $\tilde{D}(u) = \tilde{P}^T W$ 。

根据编码器的设计,解码器可相应地设置为

$$u(t) = \ell_n - \bar{s}_2 \tanh\left(\frac{z_n \bar{s}_2}{\alpha}\right), i = 10. \quad (26)$$

在这种情况下,2 位数字将是代码 10。自适应控制器的设计为

$$\dot{\hat{\theta}} = \lambda_1 \mu_n - \lambda_1 \rho \hat{\theta}, \quad (27)$$

上述公式中

$$w_2(t) = \ell_n - \bar{s}_2 \tanh\left(\frac{z_n \bar{s}_2}{\alpha}\right), \quad (28)$$

将 Lyapunov 函数 V_n 定义为

$$V_n = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n z_i^2 + \frac{1}{2\lambda_1} \tilde{\theta}^T \tilde{\theta} + \frac{1}{2\lambda_2} \tilde{P}^T \tilde{P} + \sum_{i=1}^n \frac{1}{2\lambda_{\omega_i}} \tilde{\omega}_i^T \tilde{\omega}_i, \quad (29)$$

可以得到微分 V_n

$$\begin{aligned} \dot{V}_n = z_n (D(u) + f_n - \dot{\ell}_{n-1} - r^{(n)} + \tau_n \varphi_n - \hat{D}(u) + \\ u) + \sum_{i=1}^{n-1} z_i \dot{z}_i - \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} - \frac{1}{\lambda_2} \tilde{P}^T \dot{\tilde{P}} - \\ \sum_{i=1}^n \frac{1}{\lambda_{\omega_i}} \tilde{\omega}_i^T \dot{\hat{\omega}}_i \leq z_n (\tilde{P}^T W + u + f_2 - \dot{\ell}_{n-1} - \\ r^{(n)} + \tau_n \varphi_n) + z_{n-1} z_n + \sum_{j=2}^{n-1} z_j \frac{\partial \ell_{n-2}}{\partial \hat{\theta}} \left(\lambda_1 \mu_{n-1} - \right. \\ \left. \lambda \rho \hat{\theta} - \hat{\theta} \right) + \tilde{\theta}^T \mu_{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} \rho \tilde{\omega}_i^T \hat{\omega}_i - \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}^T \dot{\tilde{\theta}} - \\ \frac{1}{\lambda_2} \tilde{P}^T \dot{\tilde{P}} - \sum_{j=1}^{n-1} q_j z_j^2 - \frac{1}{\lambda_{\omega_n}} \tilde{\omega}_n^T \dot{\hat{\omega}}_n. \end{aligned} \quad (30)$$

当 $\forall t \in [t_k, t_{k+1}]$ 和 $|e(t)| \leq s_2$ 时,可知 $w_2(t) =$

$k(t)s_2 + u(t)$ 并且 $k(t)$ 为连续随时间变化的参数。

从引理2中,有

$$z_n u = z_n \ell_n - z_n \bar{s}_2 \tanh\left(\frac{z_n \bar{s}_2}{\varphi}\right) - z_n k(t) s_2 \leq z_n \ell_n + 0.278 5\varphi, \quad (31)$$

因此, \dot{V}_n 将被重新计算

$$\begin{aligned} \dot{V}_n \leq & 0.278 5\alpha + z_n(\ell_n + f_n - \dot{\ell}_{n-1} - r^{(n)} + \\ & \tau_n \varphi_n) - \sum_{j=1}^{n-1} q_j z_j^2 + \sum_{j=1}^{n-1} z_j \frac{\partial \ell_{n-2}}{\partial \hat{\theta}} \left(\lambda \mu_{n-1} - \right. \\ & \left. \lambda \rho \hat{\theta} - \dot{\hat{\theta}} \right) + z_{n-1} z_n + \tilde{\theta}^\top \mu_{n-1} + \\ & \sum_{j=1}^{n-1} \rho \tilde{\omega}_j^\top \hat{\omega}_j - \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}^\top \dot{\hat{\theta}} + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{P}^\top \left(-\dot{\hat{P}} + \right. \\ & \left. \lambda_2 z_n \mathbf{W} \right) - \frac{1}{\lambda_{\varphi_n}} \tilde{\omega}_n^\top \dot{\hat{\omega}}_n. \end{aligned} \quad (32)$$

自适应控制器 $\dot{\hat{\omega}}_n$ 的设计为

$$\dot{\hat{\omega}}_n = \lambda_{\varphi_n} z_n s g_n(z_n) - \lambda_{\varphi_n} \rho \dot{\hat{\omega}}_n. \quad (33)$$

类似于上述情况,可得

$$\begin{aligned} \dot{\ell}_{n-1} = & \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial r^{(j-1)}} r^{(j)} + \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial \hat{\theta}} \dot{\hat{\theta}} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial x_j} \dot{x}_j + \\ & \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial x_j} (\varphi_{j+1} - \tau_j \varphi_j), \end{aligned} \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \ell_n = & -z_{n-1} - q_n z_n + \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial \hat{\theta}} \lambda_1 (\mu_n - \rho \hat{\theta}) + \\ & \hat{\theta}^\top \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial x_j} \delta_j + \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial \hat{\theta}} \lambda_1 (\mu_n - \rho \hat{\theta}) + \\ & \left(\sum_{j=2}^{n-1} z_j \frac{\partial \ell_1}{\partial \hat{\theta}} \right) \lambda_1 \left(\delta_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial x_j} \delta_j \right) + \\ & \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial r^{(j-1)}} r^{(j)} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial \varphi_j} (\varphi_{j+1} - \tau_j \varphi_j) - \\ & s g_n(z_n) \hat{\omega}_n + r^{(n)}, \end{aligned} \quad (35)$$

$$\mu_n = \mu_{n-1} + z_n \left(\delta_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial x_j} \delta_j \right), \quad (36)$$

在逻辑模糊系统中,定义为

$$f_n - \sum_{j=1}^{n-1} \frac{\partial \ell_{n-1}}{\partial x_j} \vartheta_j = \theta^\top \delta_n + \vartheta_n, \quad (37)$$

因此

$$\begin{aligned} \dot{V}_n \leq & 0.278 5\alpha - \sum_{i=1}^n q_i z_i^2 + \rho \tilde{\theta}^\top \dot{\hat{\theta}} + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{P}^\top \left(-\dot{\hat{P}} + \right. \\ & \left. \lambda_2 z_n \mathbf{W} \right) + \sum_{i=1}^n \rho \tilde{\omega}_i^\top \hat{\omega}_i, \end{aligned} \quad (38)$$

由上可得

$$\dot{V}_n \leq -\xi_1 V_n + \Delta_2, \quad (39)$$

式中: $\xi_1 = \min\{2q_1, \dots, 2q_n, \lambda_1 \rho, \lambda_2 \rho, \lambda_{\varphi_1} \rho, \dots, \lambda_{\varphi_n} \rho\}$,

$$\Delta_2 = \frac{\xi_1}{2\lambda_1} \theta^\top \theta + \frac{\xi_1}{2\lambda_1} \mathbf{P}^\top \mathbf{P} + \sum_{i=1}^n \frac{\xi_1}{2\lambda_{\varphi_i}} \omega_i^\top \omega_i + 0.278 5\alpha.$$

2.3 稳定性分析

由此可得 $\dot{V}_n \leq -s_1 V_n + \Delta$ 。于是可得以下定理。

定理:考虑非线性不确定系统(式(1))、输入死区模型(式(2))、虚拟控制器和参数自适应定律(式(10)、式(17)、式(35)),以及事件触发的控制策略(式(26))。可以确保:(1)闭环系统的所有信号都是有界的。(2)有效排除零行为。

证明:根据以上分析,考虑系统的稳定性分析将分为3部分。

由于 $\dot{V}_n \leq -s_1 V_n + \Delta_1$, 所以闭环系统的所有信号都可以作为有界度已知,并且 $\frac{1}{2} z_1^2 \leq V(t) \leq e^{-s_1 t} V(0) + (\Delta_1/s_1)(1 - e^{-s_1 t})$, 请参见文献[13-18]。因此, z_1^2 将以收敛集合 $\Omega = \{z_1 | z_1^2 \leq 2\Delta_1/s_1\}$ 的速度为 λ_i^{-1} ($i = 1, 2, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$) 的有界集, 该集以指数形式收敛。如果 λ_i^{-1} ($i = 1, 2, \varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$) 减小或 $\frac{\rho}{s_1} \geq \lambda_i^{-1}$ 减小, 则 Ω 将减小, 同时收敛速度 s_1 被设定。

对于 $\forall t \in [t_k, t_{k+1}]$, $e(t) = w_1(t) - u(t)$, 有

$$\frac{b}{dt} |e| = \frac{b}{dt} (e \times e)^{\frac{1}{2}} = \text{sign}(e) \dot{e} \leq |\dot{w}_1|, \quad (40)$$

因此所考虑的系统是收敛的。

根据以上分析, $\dot{w}_2(t)$ 必须是连续的。所以可以保证所有信号的有界性将是1个常数 $\nu > 0$, 满足 $|\dot{w}_2| < \nu$ 。需要注意的是 $e(t) = 0$ 且 $\lim_{t \rightarrow t_{k+1}} e(t) = s_1$, 因此可知较低的时间 $t^* > 0$ 的边界将满足

$$t^* \geq \frac{n|u(t)| + s_1}{\nu}, \quad \forall k \in \mathbb{Z}^+, \{t_{k+1} - t_k\} \geq t^*, \quad (41)$$

因此可有效地避免零行为。

下面分析辅助系统的稳定性。

选择 Lyapunov 函数 V_φ 作为

$$V_\varphi = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} \varphi_i^2, \quad (42)$$

于是

$$\begin{aligned} \dot{V}_\varphi = & \sum_{i=1}^{n-1} (\varphi_i \varphi_{i+1} - \tau_i \varphi_i^2) - \tau_n \varphi_n^2 + \varphi_n \Delta_3 \leq \\ & - \sum_{i=1}^{n-1} \bar{\tau}_i \varphi_i^2 + \frac{1}{2w} \Delta_3^2, \end{aligned} \quad (43)$$

式中: w 为已知的可选正常数; $\bar{\tau}_1 = \tau_1 - \frac{1}{2}$, $\bar{\tau}_i = \tau_i - 1$ ($i = 2, 3, \dots, n-1$), $\bar{\tau}_n = \tau_n - \frac{1}{2} - \frac{w}{2}$, $\Delta_3 = \hat{D}(u) - u$, 以及 $s_2 = \min\{2\bar{\tau}_1, 2\bar{\tau}_2, \dots, 2\bar{\tau}_n\}$, 可知 $V_\varphi \leq e^{-s_2 t} V_\varphi(0) + (\Delta_3^2/2ws_2)(1 - e^{-s_2 t})$ 。这样就可以得出辅助系统是稳定的。

对于辅助系统,可以通过选择适当的 Lyapunov

函数在理论上证明其稳定性。但是,如何有效处理 $\frac{1}{2w} \Delta_3^2$ 的期限仍然是一个悬而未决的问题。

3 仿真实验及结果

在本小节中,非线性不确定系统具有输入死区,定义为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 + f_1(\bar{x}_1) \\ \dot{x}_2 = D(u) + f_2(\bar{x}_2), \\ y = x_1 \end{cases} \quad (44)$$

式中: $f_1(\bar{x}_1), f_2(\bar{x}_2)$ 为未知的光滑非线性函数, $f_1(\bar{x}_1) = 1 - \sin^2 x_1, f_2(\bar{x}_2) = \sin x_2; x_1, x_2$ 的初始值分别为 $x_1(0) = 0, x_2(0) = 0$ 和 $y(0) = 0$ 。此外,选择 $Y_r = \sin(t) + 0.3\cos(t)$ 和 $Y_r = \sin(t) + 0.3\sin(0.5t)$ 作为参考输出。

辅助系统描述为

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_1 = \varphi_2 - \tau_1 \varphi_1 \\ \dot{\varphi}_2 = \hat{D}(u) - u - \tau_2 \varphi_2 \end{cases} \quad (45)$$

逼近系统的隶属函数设计为

$$\tau_{i,p}(x_p) = e^{\left(\frac{1}{2}(x+2-\frac{2}{7}(p-1))\right)^2}, p = 1, 2, \dots, 15 \quad (46)$$

虚拟控制器和参数更新定律为

$$\ell_1 = -q_1 z_1 - \hat{\theta}^T \delta_1 - \tau_1 \varphi_1 - s g_1(z_1) \hat{w}_1, \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \ell_2 = & -z_1 - q_2 z_2 + \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \ell_1}{\partial r} \dot{r} - \hat{\theta}^T \left(\delta_2 - \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} \delta_1 \right) + \\ & \frac{\partial \ell_1}{\partial \hat{\theta}} \lambda (\mu_2 - \rho \hat{\varphi}) + \frac{\partial \ell_1}{\partial \varphi_1} (\varphi_2 - \tau_1 \varphi_1) - \\ & \tau_2 \varphi_2 + \ddot{r} - s g_2(z_2) \hat{w}_2, \end{aligned} \quad (48)$$

$$\mu_1 = \delta_1 z_1, \quad (49)$$

$$\mu_2 = \mu_1 + \left(\delta_1 - \frac{\partial \ell_1}{\partial x_1} \delta_1 \right) z_2, \quad (50)$$

$$\dot{\hat{w}}_1 = \lambda_{\sigma_1} z_1 s g_1(z_1) - \lambda_{\sigma_1} \rho \hat{w}_1, \quad (51)$$

$$\dot{\hat{w}}_2 = \lambda_{\sigma_2} z_2 s g_2(z_2) - \lambda_{\sigma_2} \rho \hat{w}_2, \quad (52)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = \lambda_1 \mu_2 - \lambda_1 \rho \hat{\theta}, \quad (53)$$

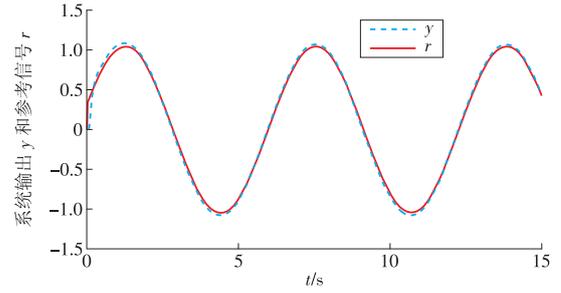
$$\dot{\hat{P}} = \lambda_2 z_2 W + \rho \lambda_2 \hat{P}, \quad (54)$$

式中: $K=0.8, s=0.5, s_1=0.01, \sigma=0.1, \alpha=0.01, \rho=0.1, q=0.1, q_1=20, q_2=2, \lambda_1=0.05, \lambda_2=0.01, \tau_1=10, \tau_2=5$ 。

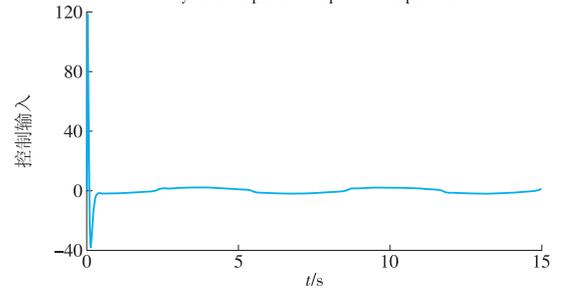
输出为 $Y_r = \sin(t) + 0.3\cos(t)$ 的系统控制效果如图 1 所示。

图 1a 显示了系统输出与期望输出的轨迹曲线。系统实际的控制输入如图 1b 所示。控制输入的原始传输次数为 100 次/s。

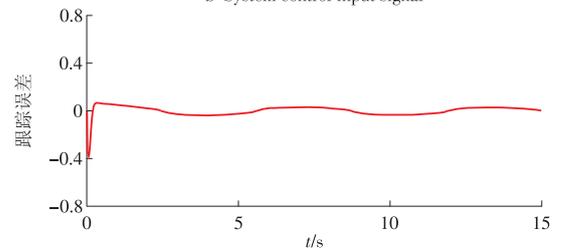
由图 1c 可知,跟踪误差最终在 ± 0.06 之内波动。



a 系统输出与期望输出曲线
a System output and expected output curve



b 系统控制输入信号
b System control input signal



c 系统跟踪误差曲线
c System tracking error curve

图 1 输出为 $Y_r = \sin(t) + 0.3\cos(t)$ 的系统控制效果
Fig. 1 System control renderings with output $Y_r = \sin(t) + 0.3\cos(t)$

由此可知系统输出是有界的,同时可以很好地保证系统的跟踪性能。

输出为 $Y_r = \sin(t) + 0.3\sin(0.5t)$ 的系统控制效果如图 2 所示。

在所提出的事件触发控制机制的作用下,控制信号每秒最大传输数如图 2b 所示。与传统方法相比,带宽资源减少了 70% 以上。

由于期望输出为有界的正弦函数和有界的余弦函数所组成,即期望输出为有界函数。因此可知系统的输出是有界的。

根据前面的理论推导可知,所考虑的系统是有界收敛的。由上述分析可知,仿真系统的所有信号都是有界的。

实践证明,该方法可以进一步节省传输资源,并保证系统性能。

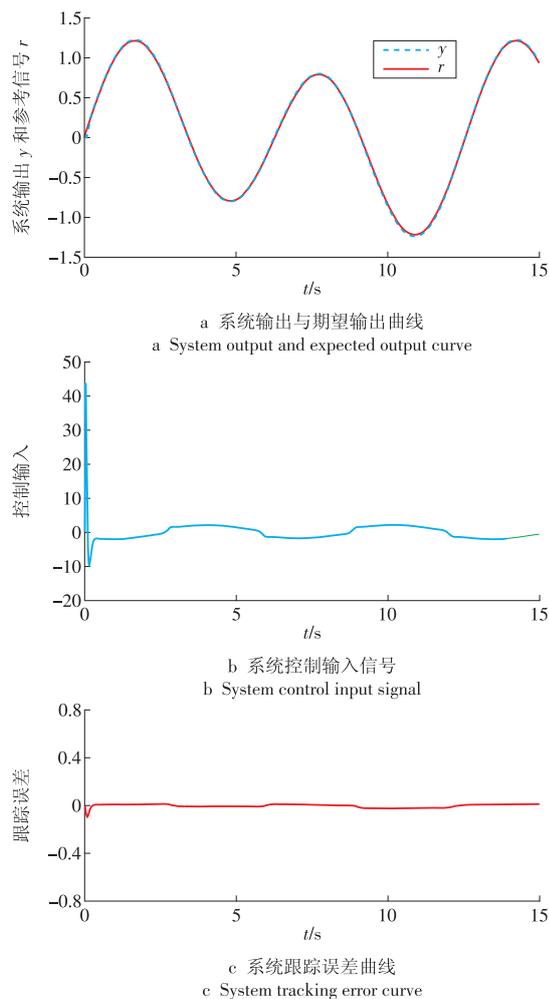


图 2 输出为 $Y_r = \sin(t) + 0.3\sin(0.5t)$ 的系统控制效果

Fig. 2 System control renderings with output $Y_r = \sin(t) + 0.3\sin(0.5t)$

4 结束语

针对一类具有输入死区的不确定非线性系统,提出了一种事件触发的模糊自适应控制方法。与传统的近似方法相比,本文考虑了时变近似误差。

自输入死区现象通常在实际系统中会出现,将设计良好的辅助系统引入控制设计以补偿其影响。改进后的模糊逻辑系统被用于处理所考虑系统的不确定部分。此外,建立了一种新颖的事件触发策略,以进一步节省系统的传输资源。仿真结果可以验证该方法的有效性。

参考文献:

[1] MA J, XU S, LI Y, et al. Neural networks-based adaptive output feedback control for a class of uncertain nonlinear systems with input delay and disturbances[J]. Journal of the Franklin Institute, 2018, 355(13):5503–5519.
[2] LI H, CHEN Z, WU L, et al. Event-triggered fault detection

of nonlinear networked systems [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2016, 47(4): 1041–1052.
[3] WANG J, LIU Z, ZHANG Y, et al. Neural adaptive event-triggered control for nonlinear uncertain stochastic systems with unknown hysteresis [J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2019, 30(11): 3300–3312.
[4] WANG J, LIU Z, ZHANG Y, et al. Adaptive neural control of a class of stochastic nonlinear uncertain systems with guaranteed transient performance [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 50(7):2971–2981.
[5] SAHOO A, XU H, JAGANNATHAN S. Neural network-based adaptive event-triggered control of nonlinear continuous-time systems [C]//2013 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC). IEEE, 2013: 35–40.
[6] 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, 2017, 49(1): 2–13.
[7] 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.
[8] 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.
[9] WANG J, LIU Z, CHEN C L, et al. Event-triggered neural adaptive failure compensation control for stochastic systems with dead-zone output [J]. Nonlinear Dynamics, 2019, 96(3): 2179–2196.
[10] TONG S, LI Y. Adaptive fuzzy output feedback control of MIMO nonlinear systems with unknown dead-zone inputs [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2012, 21(1): 134–146.
[11] WANG D, HE H, LIU D. Adaptive critic nonlinear robust control: A survey [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 47(10):3429–3451.
[12] ZHOU J, WEN C, ZHANG Y. Adaptive backstepping control of a class of uncertain nonlinear systems with unknown backlash-like hysteresis [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(10): 1751–1759.
[13] ZHOU J, WEN C. Adaptive backstepping control of uncertain systems: Nonsmooth nonlinearities, interactions or time-variations [M]. Berlin: Springer, 2008.
[14] 黄堃峰, 洪嘉纯, 吴宇深, 等. 带有执行器失效的确定时间事件触发机制 [J]. 华电技术, 2021, 43(10): 73–79.
HUANG Kunfeng, HONG Jiachun, WU Yushen, et al.

Event-triggered mechanism with settling time for actuator failures[J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(10): 73-79.

[15] 马灿洪, 黄峥, 严彦成, 等. 输入磁滞的非线性系统事件触发有限时间控制[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(12): 18-24.

MA Canhong, HUANG Zheng, YAN Yancheng, et al. Event-triggered finite-time control for non-linear systems with input hysteresis [J]. *Integrated Intelligent Energy*, 2022, 44(12): 18-24.

[16] LIU Z, LAI G, ZHANG Y, et al. Adaptive fuzzy tracking control of nonlinear time-delay systems with dead-zone output mechanism based on a novel smooth model [J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2015, 23(6): 1998-2011.

[17] 史耕金, 李东海, 丁艳军. 基于概率鲁棒的改进自抗扰控制器设计[J]. *综合智慧能源*, 2022, 44(10): 57-64.

SHI Gengjin, LI Donghai, DING Yanjun. Design of a hybrid active disturbance rejection control based on probabilistic robustness [J]. *Integrated Intelligent Energy*,

2022, 44(10): 57-64.

[18] 荆立坤, 唐宜强, 潘凤萍, 等. 基于鲁棒约束的 PI 控制器参数多目标优化及应用[J]. *华电技术*, 2021, 43(5): 1-8.

JING Likun, TANG Yiqiang, PAN Fengping, et al. Multi-objective optimization of PI controller parameters under robustness constraint and its application [J]. *Huadian Technology*, 2021, 43(5): 1-8.

(本文责编:张帆)

收稿日期:2022-12-30;修回日期:2023-02-15
上网日期:2023-03-25;附录网址:www.ienergy.cn

作者简介:

黄文岐(1996),男,在读硕士研究生,从事智能控制、机器人控制、振动控制以及多智能体协同控制等方面的研究, hwq0456@163.com;

萧仲敏*(1975),男,实验师,工程硕士,从事数控技术与 CAM、机器人控制等方面的研究, xzhmin@gzhu.edu.cn。

*为通信作者。

“双碳”目标下的新型电力系统”专刊征稿启事

能源绿色低碳转型是实现碳达峰、碳中和的关键举措,在能源转型进程中,电力供应保障难度大、电网安全控制难度增加、电力市场建设不完善等问题正成为当下的重大挑战。因此,在“双碳”目标愿景下,构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统成为重要方向。新型电力系统将激发负荷侧灵活调节和新型储能技术等潜力,形成源网荷储协同消纳新能源的格局,适应大规模高比例新能源的开发利用需求,促进可再生能源发电的消纳,降低用户用能成本,也符合未来灵活开放式电力市场体系的高效率电力系统。

为此,《综合智慧能源》特推出“双碳”目标下的新型电力系统”专刊,邀请华南理工大学朱继忠教授、新加坡南洋理工大学董朝阳教授、美国 GE 公司 Kwok Cheung 博士担任特约主编,共同探讨“双碳”目标下新型电力系统的最新学术动态、发展趋势及研究成果,推动我国能源转型取得切实成效,欢迎业内同仁踊跃投稿!

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)“双碳”目标下新型电力系统发展战略;
- (2)“双碳”目标下新型电力系统规划;
- (3)面向“双碳”目标的新型电力系统建模;
- (4)新型电力系统调度运行和控制;
- (5)新型电力系统“源荷”预测与协同控制;
- (6)新型电力系统市场机制与交易模式;
- (7)新型电力系统能量管理与市场调度;
- (8)低碳技术与碳中和发展路径;
- (9)新能源发电与并网;
- (10)低碳与综合能源技术;
- (11)电动汽车充放电策略;
- (12)能源互联网与新能源消纳模式;
- (13)碳监测、碳追踪及电碳协同技术。

二、时间进度

专刊拟于2023年4月30日截稿,择期优先出版。

三、征稿要求

- (1)专刊只收录未公开发表的论文,拒绝一稿多投。作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2)按照《综合智慧能源》论文格式要求使用 Word 软件排版,请登录《综合智慧能源》在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.ienergy.cn)下载中心下载论文模板。
- (3)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,并在投稿时按规定提交。
- (4)论文作者应遵守相关学术不端规定。

四、投稿方式

- (1)在线投稿(推荐):登录在线采编系统(www.hdpower.net 或 www.ienergy.cn)完成在线全文投稿,欢迎投稿时推荐审稿人。
- (2)邮箱投稿:zhujz@scut.edu.cn(朱教授);hdjs-chd@vip.163.com(编辑部)。
- (3)咨询联系:刘芳 0371-58501060,13838002988;杨满成 010-63918755,13801175292。