



基于障碍李雅普诺夫函数非线性系统的死区补偿控制

摘要

本文集中在带有部分状态约束的非线性单输入单输出系统的自适应控制器设计上.考虑了非对称死区的非线性输入特性,选取障碍李雅普诺夫函数用来阻止部分受约束的状态违反约束条件.根据障碍李雅普诺夫函数反步法,解决了该类系统的输出跟踪问题,同时也处理了死区非线性带来的影响.针对下三角结构的非线性系统,设计了自适应控制器,证明了闭环系统所有信号都是有界的,同时保证了系统输出可以跟踪上参考信号.最后,仿真结果表明了所提方法的有效性.

关键词

约束控制;障碍李雅普诺夫函数;死区非线性输入;反步法

中图分类号 TP13

文献标志码 A

收稿日期 2018-07-19

资助项目 国家自然科学基金(61803190,61622303,61603164,61773188,61803189);辽宁省创新团队(LT2016006);辽宁特聘教授(辽教发[2015]153号);辽宁省高等学校基本科研项目重点项目(JZL201715402)

作者简介

刘磊,男,博士,讲师,研究方向为约束系统的自适应控制、容错控制.liulei@live.cn

0 引言

受约束的系统普遍存在于现实中的许多物理系统中.例如在静电微驱动机构中,可移动电极的速度和位移必须受到约束以防止该电极触碰到固定电极.实际控制系统中,为保证系统的安全运行,对系统中的各变量进行恰当的约束变得十分有必要.通常而言,系统的超调量不能过大,否则会导致系统的运行状态非常不理想甚至会导致系统不稳定.如何快速有效地处理控制系统中的约束问题也是工业过程控制中一个很重要的工作.基于障碍李雅普诺夫函数(BLF)的控制设计方法能有效处理一类约束问题.其基本思想是当自变量的值趋于某些区域边界时,BLF的值趋于无穷大.通过保证BLF的有界性,可以达到限制系统状态的目的.

具体而言,基于BLF的控制方法大致可以总结为三类:输出约束控制、全状态约束控制和部分状态约束控制.输出约束控制要在系统稳定性分析的基础上确保系统的输出保持在一定的约束范围之内.文献[1]解决了严格反馈系统的输出约束问题,分别利用传统的BLF以及对称BLF,基于backstepping方法,提出了相应的自适应控制策略.全状态约束控制需要在确保系统稳定的同时保证所有的状态都满足一定的约束条件.文献[2]针对一类带有参数不确定的随机非线性系统,利用对称BLF和非对称BLF,提出了两类自适应控制算法,确保了系统的稳定性.文献[3]提出了严格反馈系统的自适应全状态约束控制方案,解决了控制方向未知的问题.部分状态约束控制是解决控制系统里只有一部分状态需要满足一些特定的约束条件(且保证系统的稳定性)的方法.事实上,输出约束控制和全状态约束控制可以看成是部分状态约束控制的特殊形式^[4].虽然约束控制的研究日趋成熟,但是,很多已有成果都忽略了死区非线性输入的现象^[5-6].

死区是一种典型的非线性输入形式.由于执行器物理限制、机械设计和制造等方面原因,死区输入特性不可避免地存在于实际控制系统中,并且会造成闭环控制系统的性能下降,甚至导致系统不稳定.因此,近年来关于具有死区非线性输入特性的动态系统的研究受到广泛重视,并且取得了一些研究成果^[7-8].文献[9]利用死区特性里斜率有界的性质,提出了基于小增益定理和状态观测器的鲁棒模糊自

¹ 辽宁工业大学 理学院,锦州,121001

适应输出反馈死区补偿控制策略,并确保系统里所有的信号都是半全局一致最终有界的.然而,以上成果都是针对存在对称死区的执行器进行探讨的,而许多实际的机械系统中经常存在不对称死区机构,为了克服这一局限性,文献[10]详细给出了非对称死区的具体模型,针对三角结构的互联非线性系统,提出了分散式自适应镇定控制器的设计方法.不过,这些已有方法^[8-10]并没有考虑状态约束问题.当系统的部分状态也必须满足一定的约束条件时,如何设计有效的自适应控制器来补偿死区现象仍未解决.

本文在障碍李雅普诺夫函数的基础上,针对一类带有部分状态约束的非线性系统,设计自适应死区补偿控制器,解决该类系统的输出跟踪问题.通过稳定性分析,证明了系统所有的信号都是有界的.与现有结果对比,本文在部分状态约束控制问题中,引入非线性死区特性,结合自适应辅助信号,克服了传统部分状态约束控制中难以补偿死区的难点.最后,数值仿真结果验证了所提方法的有效性.

1 问题描述

考虑如下严格反馈单输入单输出系统

$$\begin{cases} \dot{\xi}_i = f_i(\xi_i) + g_i(\xi_i)\xi_{i+1}, & i = 1, 2, \dots, n-1, \\ \dot{\xi}_n = f_n(\xi_n) + g_n(\xi_n)u, \\ y = \xi_1, \end{cases} \quad (1)$$

其中, $f_i(\cdot), g_i(\cdot), i = 1, \dots, n$ 是光滑非线性函数, $\bar{\xi}_i = [\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_i]^T$ 是系统状态, u 和 y 分别是系统的输入和输出. 本文考虑系统带有死区非线性输入情形:

$$u(t) = D(v(t)) = \begin{cases} m_r(v(t) - b_r), & v(t) \geq b_r, \\ 0, & \text{其他}, \\ m_l(v(t) - b_l), & v(t) \leq -b_l, \end{cases}$$

其中, $v(t)$ 是死区输入, m_r 和 m_l 分别代表了死区特征的右斜率和左斜率, b_r 和 b_l 分别表示右截点和左截点. 进一步, 通过一些数学处理, 死区模型可转化为如下形式:

$$u(t) = m(t)v(t) + b(t), \quad (2)$$

其中,

$$m(t) = \begin{cases} m_r, & v(t) > 0, \\ m_l, & v(t) \leq 0, \end{cases}$$

$$b(t) = \begin{cases} -m_r b_r, & v(t) \geq b_r, \\ -m(t)v(t), & \text{其他}, \\ m_l b_l, & v(t) \leq -b_l, \end{cases}$$

并假设 $m(t)$ 已知, $b(t)$ 未知但有界, 其上界为 \bar{b} , 即

$$|b(t)| \leq \bar{b}.$$

另一方面, 本文着重研究部分状态受约束的问题. 将所有状态划分为约束状态 $\bar{\xi}_c = [\xi_1, \dots, \xi_c]^T$ 和自由状态 $\bar{\xi}_f = [\xi_{c+1}, \dots, \xi_n]^T$. 约束状态需要满足以下约束条件:

$$|\xi_i| < k_i, \quad (3)$$

其中, k_i 是正常数.

本文主要控制目标是设计恰当的自适应死区补偿控制器使得: 1) 闭环系统的所有信号均有界; 2) 输出跟踪误差尽可能小; 3) 受约束状态满足约束条件.

为了便于控制器的设计, 给出如下假设条件和引理.

假设 1 参考信号 y_d 有界, 即存在已知常数 Y_0 , 使得 $|y_d| \leq Y_0$. 此外, 存在已知常数 Y_i , 使其导数满足: $|y_d^{(i)}| \leq Y_i, i = 1, \dots, n$.

假设 2 系统增益函数 $g_i(\bar{\xi}_i)$ 是已知的, 且满足 $0 < g_0 \leq |g_i(\bar{\xi}_i)|$, 其中 g_0 是正常数. 不失一般性, 进一步假设 $g_i(\bar{\xi}_i)$ 是正的.

引理 1^[21] 对任意正常数 k_b 及任意实数 $|z| < k_b$, 总存在

$$\log \frac{k_b^{2p}}{k_b^{2p} - z^{2p}} < \frac{z^{2p}}{k_b^{2p} - z^{2p}}, \quad (4)$$

其中, p 是正整数.

2 部分状态约束的控制设计

首先, 定义 $\eta_1 = \xi_1 - y_d, \eta_i = \xi_i - \beta_{i-1}, \beta_i$ 为虚拟控制.

第 1 步. 由以上定义可知:

$$\dot{\eta}_1 = \dot{\xi}_1 - \dot{y}_d = f_1(\bar{\xi}_1) + g_1(\bar{\xi}_1)\xi_2 - \dot{y}_d, \quad (5)$$

设计虚拟控制为

$$\beta_1 = \frac{1}{g_1(\bar{\xi}_1)}(-f_1(\bar{\xi}_1) - \mu_1 \eta_1 + \dot{y}_d). \quad (6)$$

在式(5)右边同时加一项减一项 $g_1(\bar{\xi}_1)\beta_1$, 得

$$\dot{\eta}_1 = -\mu_1 \eta_1 + g_1(\bar{\xi}_1)\eta_2. \quad (7)$$

选取障碍李雅普诺夫函数

$$V_1 = \frac{1}{2} \log \frac{k_{b1}^2}{k_{b1}^2 - \eta_1^2},$$

其导数为

$$\dot{V}_1 = \frac{\eta_1 \dot{\eta}_1}{k_{b1}^2 - \eta_1^2} = \frac{-\mu_1 \eta_1^2 + g_1(\bar{\xi}_1)\eta_1 \eta_2}{k_{b1}^2 - \eta_1^2}. \quad (8)$$

第 $i (i = 2, \dots, c)$ 步. 显然 $\dot{\eta}_i = \dot{\xi}_i - \dot{\beta}_{i-1}$, 于是

$$\dot{\eta}_i = f_i(\bar{\xi}_i) + g_i(\bar{\xi}_i)\xi_{i+1} - \dot{\beta}_{i-1}. \quad (9)$$

设计虚拟控制为

$$\beta_i = \frac{1}{g_i(\bar{\xi}_i)} \left(-f_i(\bar{\xi}_i) + \dot{\beta}_{i-1} - \mu_i \eta_i - \frac{k_{bi}^2 - \eta_i^2}{k_{b,i-1}^2 - \eta_{i-1}^2} g_{i-1}(\bar{\xi}_{i-1}) \eta_{i-1} \right). \quad (10)$$

在式(9)右边同时加一项减一项 $g_i(\bar{\xi}_i)\beta_i$,得

$$\dot{\eta}_i = -\frac{k_{bi}^2 - \eta_i^2}{k_{b,i-1}^2 - \eta_{i-1}^2} g_{i-1}(\bar{\xi}_{i-1}) \eta_{i-1} - \mu_i \eta_i + g_i(\bar{\xi}_i) \eta_{i+1}. \quad (11)$$

选取障碍李雅普诺夫函数

$$V_i = \sum_{j=1}^i \frac{1}{2} \log \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2}, \quad (12)$$

则有

$$\dot{V}_i = \sum_{j=1}^i \frac{-\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} + \frac{g_i(\bar{\xi}_i) \eta_i \eta_{i+1}}{k_{bi}^2 - \eta_i^2}. \quad (13)$$

第 $c+1$ 步.由于 $\dot{\eta}_{c+1} = \dot{\xi}_{c+1} - \dot{\beta}_c$,则有

$$\dot{\eta}_{c+1} = f_{c+1}(\bar{\xi}_{c+1}) + g_{c+1}(\bar{\xi}_{c+1})\xi_{c+2} - \dot{\beta}_c. \quad (14)$$

设计虚拟控制为

$$\beta_{c+1} = \frac{1}{g_{c+1}(\bar{\xi}_{c+1})} \left(-f_{c+1}(\bar{\xi}_{c+1}) + \dot{\beta}_c - \mu_{c+1} \eta_{c+1} - \frac{g_c(\bar{\xi}_c) \eta_c}{k_{bc}^2 - \eta_c^2} \right). \quad (15)$$

在式(14)右边同时加一项减一项 $g_{c+1}(\bar{\xi}_{c+1})\beta_{c+1}$,得

$$\dot{\eta}_{c+1} = -\mu_{c+1} \eta_{c+1} + g_{c+1}(\bar{\xi}_{c+1}) \eta_{c+2} - \frac{g_c(\bar{\xi}_c) \eta_c}{k_{bc}^2 - \eta_c^2}. \quad (16)$$

选取障碍李雅普诺夫函数

$$V_{c+1} = \sum_{j=1}^c \frac{1}{2} \log \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} + \frac{1}{2} \eta_{c+1}^2. \quad (17)$$

进一步,有

$$\dot{V}_{c+1} = -\sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} + \eta_{c+1} \dot{\eta}_{c+1} + \frac{g_c(\bar{\xi}_c) \eta_c \eta_{c+1}}{k_{bc}^2 - \eta_c^2} = -\sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} - \mu_{c+1} \eta_{c+1}^2 + g_{c+1}(\bar{\xi}_{c+1}) \eta_{c+1} \eta_{c+2}. \quad (18)$$

第 $m(m=c+2, \dots, n-1)$ 步.由于 $\dot{\eta}_m = \dot{\xi}_m - \dot{\beta}_{m-1}$,有

$$\dot{\eta}_m = f_m(\bar{\xi}_m) + g_m(\bar{\xi}_m)\xi_{m+1} - \dot{\beta}_{m-1}. \quad (19)$$

设计虚拟控制为

$$\beta_m = \frac{1}{g_m(\bar{\xi}_m)} (-f_m(\bar{\xi}_m) + \dot{\beta}_{m-1} -$$

$$\mu_m \eta_m - g_{m-1}(\bar{\xi}_{m-1}) \eta_{m-1}). \quad (20)$$

在式(19)右边同时加一项减一项 $g_m(\bar{\xi}_m)\beta_m$,得

$$\dot{\eta}_m = -\mu_m \eta_m + g_m(\bar{\xi}_m) \eta_{m+1} - g_{m-1}(\bar{\xi}_{m-1}) \eta_{m-1}. \quad (21)$$

选取李雅普诺夫函数

$$V_m = \sum_{j=1}^c \frac{1}{2} \log \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} + \sum_{j=c+1}^m \frac{1}{2} \eta_j^2. \quad (22)$$

进一步,有

$$\dot{V}_m = -\sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} + \sum_{j=c+1}^m \eta_j \dot{\eta}_j = -\sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} - \sum_{j=c+1}^m \mu_j \eta_j^2 + g_m(\bar{\xi}_m) \eta_m \eta_{m+1}. \quad (23)$$

第 n 步.由于 $\dot{\eta}_n = \dot{\xi}_n - \dot{\beta}_{n-1}$,考虑死区非线性输入(2),有

$$\dot{\eta}_n = f_n(\bar{\xi}_n) + g_n(\bar{\xi}_n)u - \dot{\beta}_{n-1} = f_n(\bar{\xi}_n) + g_n(\bar{\xi}_n)m(t)v(t) + g_n(\bar{\xi}_n)b(t) - \dot{\beta}_{n-1}. \quad (24)$$

定义 $\delta = \bar{b}, \bar{b}$ 是 $b(t)$ 的上界.易知, δ 是未知有界常数.令 $\hat{\delta}$ 是 δ 的估计,并定义 $\tilde{\delta} = \hat{\delta} - \delta$ 为估计误差.

设计控制器为

$$v(t) = \frac{1}{g_n(\bar{\xi}_n)m(t)} (-f_n(\bar{\xi}_n) + \dot{\beta}_{n-1} - \mu_n \eta_n - g_n(\bar{\xi}_n)\hat{\delta} - g_{n-1}(\bar{\xi}_{n-1})\eta_{n-1}), \quad (25)$$

自适应律设计为

$$\dot{\hat{\delta}} = -\gamma \hat{\delta} + g_n(\bar{\xi}_n) \eta_n, \quad (26)$$

其中, γ 是设计参数.

将控制器 $v(t)$ 代入式(24),得

$$\dot{\eta}_n = -\mu_n \eta_n - g_{n-1}(\bar{\xi}_{n-1}) \eta_{n-1} + g_n(\bar{\xi}_n)(b(t) - \delta - \tilde{\delta}). \quad (27)$$

选取李雅普诺夫函数

$$V_n = \sum_{j=1}^c \frac{1}{2} \log \frac{k_{bj}^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} + \sum_{j=c+1}^n \frac{1}{2} \eta_j^2 + \frac{1}{2} \tilde{\delta}^2, \quad (28)$$

可得其导数为

$$\dot{V}_n = -\sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} + \sum_{j=c+1}^n \eta_j \dot{\eta}_j + \tilde{\delta} \dot{\tilde{\delta}} = -\sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} - \sum_{j=c+1}^n \mu_j \eta_j^2 + g_n(\bar{\xi}_n) \eta_n (b(t) - \delta - \tilde{\delta}) + \tilde{\delta} \dot{\tilde{\delta}}. \quad (29)$$

运用杨氏不等式,有如下不等式成立:

$$g_n(\bar{\xi}_n) \eta_n b(t) \leq \frac{1}{2} g_n^2(\bar{\xi}_n) \eta_n^2 + \frac{1}{2} \delta^2 - g_n(\bar{\xi}_n) \eta_n \delta \leq \frac{1}{2} g_n^2(\bar{\xi}_n) \eta_n^2 + \frac{1}{2} \delta^2,$$

将上式和式(26)一起代入式(29),可得

$$\dot{V}_n \leq - \sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} - \sum_{j=c+1}^{n-1} \mu_j \eta_j^2 - (\mu_n - g_n^2(\bar{\xi}_n)) \eta_n^2 + \delta^2 - \gamma \tilde{\delta} \hat{\delta} \quad (30)$$

根据 $\tilde{\delta} = \hat{\delta} - \delta$, 有如下等式成立:

$$-\gamma \tilde{\delta} \hat{\delta} = -\frac{\gamma}{2} \tilde{\delta}^2 - \frac{\gamma}{2} \delta^2 + \frac{\gamma}{2} \delta^2 \quad (31)$$

结合式(30)、(31)和引理1,可知:

$$\dot{V}_n \leq - \sum_{j=1}^c \frac{\mu_j \eta_j^2}{k_{bj}^2 - \eta_j^2} - \sum_{j=c+1}^{n-1} \mu_j \eta_j^2 - \frac{\gamma}{2} \tilde{\delta}^2 - (\mu_n - g_n^2(\bar{\xi}_n)) \eta_n^2 + \frac{\gamma + 2}{2} \delta^2 \quad (32)$$

由式(32)可得,若参数 $\mu_j (j=1, \dots, n)$ 和 γ 恰当选取,总存在正常数 ρ 和 λ 使得下式成立:

$$\dot{V}_n \leq -\rho V_n + \lambda, \quad (33)$$

其中,

$$\rho = \min \{ 2\mu_j, 2\mu_n - 2g_n^2(\bar{\xi}_n), \gamma \}, \quad \lambda = \frac{\gamma + 2}{2}$$

综合以上的设计过程,得到如下定理:

定理1 考虑非线性严格反馈单输入单输出系统(1),基于假设1、假设2和引理1,设计虚拟控制如式(6)、(10)、(15)、(20)所示,设计控制器如式(25)所示,那么有:1) 闭环系统的所有信号都是有界的;2) 系统输出能跟踪上期望信号;3) 局部状态约束条件不被违反.

证明 在式(33)两边同时乘以 $e^{\rho t}$,可得

$$d(V_n e^{\rho t})/dt \leq \lambda e^{\rho t},$$

上式两边,同时在区间 $[0, t]$ 上求取定积分,则有

$$V_n(t) \leq [V_n(0) - \lambda/\rho] e^{-\rho t} + \lambda/\rho \leq V_n(0) + \lambda/\rho, \quad (34)$$

那么,从上述不等式和式(28)可以得出结论: $\log k_{bj}^2/k_{bj}^2 - \eta_j^2$ 和 $\tilde{\delta}$ 是有界的,则得出 η_j 是有界的.由于 δ 有界且 $\tilde{\delta} = \hat{\delta} - \delta$, $\hat{\delta}$ 必定是有界的.

对于 $\eta_1 = \xi_1 - y_d$ 和 $|y_d| \leq Y_0$, 我们可以得到 $|\xi_1| = |\eta_1 + y_d| \leq |\eta_1| + |y_d| < k_{b_1} + Y_0$. 若参数 k_{b_1} 设置为 $k_{b_1} = k_1 - Y_0$, 则得到 $|\xi_1| < k_1$. 从(6)中可以看出虚拟控制器 β_1 是关于 g_1, f_1, μ_1, η_1 和 y_d 的函数. 由于 $g_1, f_1, \mu_1, \eta_1, y_d$ 有界, 则 β_1 有界, 且满足 $|\beta_1| \leq \bar{\beta}_1$. $|\xi_2| \leq |\eta_2| + |\beta_1| \leq k_{b_2} + \bar{\beta}_1$, 如果选取 $k_{b_2} = k_2 - \bar{\beta}_1$, 那么就有 $|\xi_2| \leq k_2$. 同样, 可以证明 $|\xi_i| \leq k_i$. 对于式(25)中的控制器 v , 可以用相似的方法证明它们的有界性.

从以上分析可知,闭环系统中 v, ξ_i 和 $\hat{\delta}$ 都是有界

的,且系统状态不被违反.基于式(34),可以得到 $\log k_{b_1}^2/(k_{b_1}^2 - \eta_1^2) \leq 2[V_n(0) - \lambda/\rho] e^{-\rho t} + 2\lambda/\rho$.

取上述不等式两边的指数,有 $k_{b_1}^2/(k_{b_1}^2 - \eta_1^2) \leq e^{2[V_n(0) - \lambda/\rho] e^{-\rho t} + 2\lambda/\rho}$. 可以直接得到 $|\eta_1| \leq k_{b_1} \sqrt{1 - e^{-2[V_n(0) - \lambda/\rho] e^{-\rho t} - 2\lambda/\rho}} = \Delta$. 如果 $V_n(0) = \lambda/\rho$, 则 $|\eta_1| \leq k_{b_1} \sqrt{1 - e^{-2\lambda/\rho}} = \Delta$, 如果 $V_n(0) \neq \lambda/\rho$, 则 $\Delta > k_{b_1} \sqrt{1 - e^{-2\lambda/\rho}} \rightarrow \infty$, 存在 T 使得对于任何 $t > T$, 它有 $|\eta_1| \leq \Delta$. 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $|\eta_1| \leq k_{b_1}$. 这意味着 $|\eta_1| \leq k_{b_1} \sqrt{1 - e^{-2\lambda/\rho}}$. 通过选择适当的设计参数,可以看出 η_1 可以任意小.

证毕.

注1 基于障碍李雅普诺夫函数的非线性系统的约束控制成果有很多,比如文献[1]的输出约束控制和文献[2-3]的全部状态约束控制.这些成果都忽略了非线性死区输入对约束系统的性能影响.死区作为一种典型的非线性现象,严重制约了非线性系统的控制器设计和稳定性分析.虽然文献[8]研究了基于障碍李雅普诺夫函数的非线性系统的自适应死区补偿控制,但只局限在输出约束的环境下.如何拓展到部分状态约束意义下的死区补偿控制仍然没有相关成果报道.基于此,本文解决了具有部分状态约束的非线性系统的死区补偿控制,有望拓展该方法的理论应用范围.

注2 值得一提的是,虽然死区非线性输入的补偿研究在控制领域比较受重视,如多变量系统的自适应控制^[7]、基于小增益定理的输出反馈控制^[9]以及大规模互联系统的分散镇定控制^[10]等,但与已有的这些方法对比,本文的重要特色在于研究系统的部分状态受到约束的条件下,提出了基于障碍李雅普诺夫函数的自适应补偿机制,实现了相应的控制目标.

3 仿真算例

考虑如下单输入单输出系统:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1 + g_1 x_2, \\ \dot{x}_2 = f_2 + g_2 u, \\ y = x_1, \end{cases}$$

其中 $f_1 = x_1(1 - e^{x_1})$, $f_2 = \frac{0.2x_2 \sin(x_1 x_2)}{1 + e^{-x_1 x_2}}$, $g_1 = 1$, $g_2 = 2(1 - 0.1 \sin(x_1))$. 考虑的死区参数为 $m_1 = 2$, $m_r = 1.2$, $b_1 = 0.8$, $b_r = 0.5$. 参考信号选取为 $y_d = \sin(t)$.

在此仿真中,初值选取为 $x_1(0) = 0.2, x_2(0) = 0.15$. 相关设计参数为 $\mu_1 = 10, \mu_2 = 20, \gamma = 0.5, k_1 = 2.2, k_{b_1} = 2$.

图1—4为仿真结果.图1为系统的跟踪曲线,很显然,系统的输出能跟踪上参考信号,并且保证系统的第一个状态 x_1 在其给定的约束界以内.图2给出了 η_2 的轨迹,表明 η_2 是有界的.另外,图3给出的是控制器的图象.图4描绘的是本仿真中的相位图.通过图1—4,可以看出这些信号都是有界的.

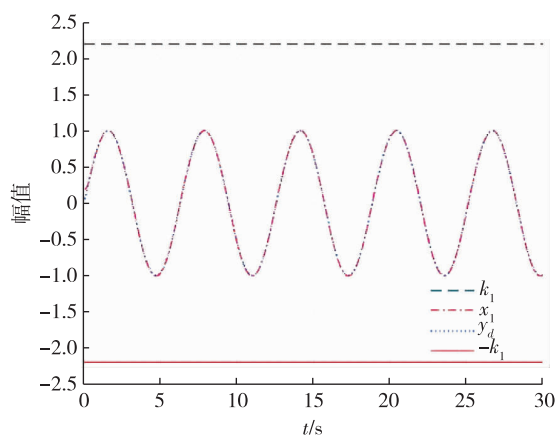


图1 跟踪曲线
Fig.1 The tracking curves

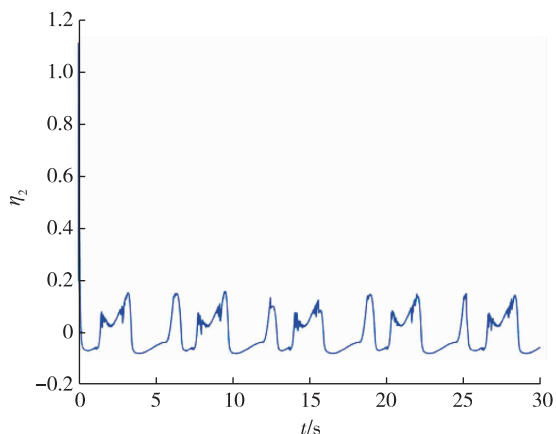


图2 η_2 的轨迹
Fig.2 The trajectories of η_2

4 结论

本文提出了基于障碍李雅普诺夫函数方法的非线性单输入单输出系统的自适应部分状态约束控制器,并对非对称死区设计了补偿控制策略,有效解决了该类系统的输出跟踪问题.根据障碍李雅普诺夫

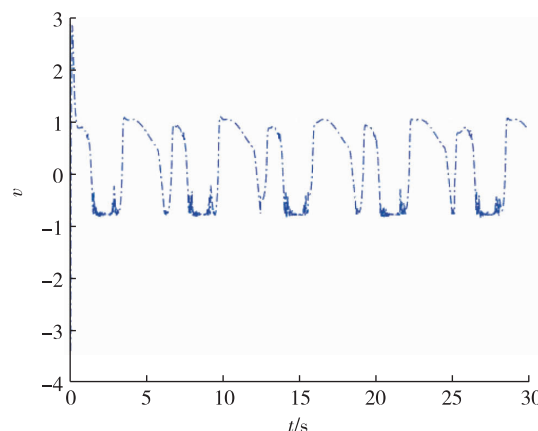


图3 控制信号
Fig.3 The control signals

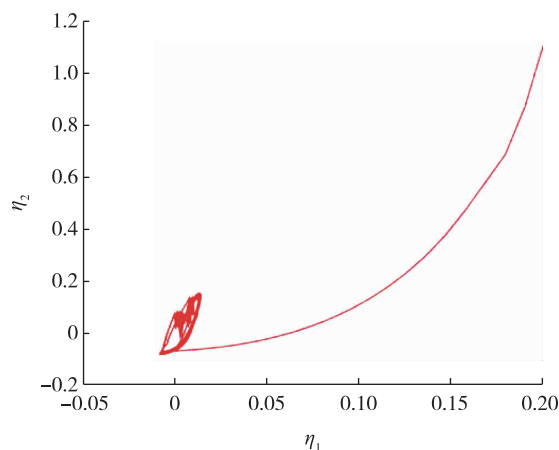


图4 相位图
Fig.4 The phase diagram

反步法,通过稳定性分析,证明了闭环系统内所有信号都是有界的.该方法建立了下三角结构系统的部分状态约束控制方案,实现了该类系统的死区补偿控制.最后,通过仿真算例验证了本文所提方法的有效性.

参考文献

References

- [1] Tee K P, Ge S S, Tay E H. Barrier Lyapunov functions for the control of output-constrained nonlinear systems [J]. Automatica, 2009, 45(4) : 918-927
- [2] Liu Y J, Lu S M, Tong S C, et al. Adaptive control based Barrier Lyapunov functions for a class of stochastic nonlinear systems with full state constraints [J]. Automatica, 2018, 87: 83-93
- [3] Liu Y J, Tong S C. Barrier Lyapunov functions for Nussbaum gain adaptive control of full state constrained non-

- linear systems[J].Automatica,2017,76:143-152
- [4] Tee K P,Ge S S.Control of nonlinear systems with partial state constraints using a Barrier Lyapunov function [J]. International Journal of Control, 2011, 84 (12) : 2008-2023
- [5] Liu L,Wang Z,Zhang H.Adaptive fault-tolerant tracking control for MIMO discrete-time systems via reinforcement learning algorithm with less learning parameters [J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,2017,14(1):299-313
- [6] Li Y,Tong S,Li T.Composite adaptive fuzzy output feedback control design for uncertain nonlinear strict-feedback systems with input saturation[J].IEEE Transactions on Cybernetics,2015,45(10):2299-2308
- [7] Tong S,Li Y.Adaptive fuzzy output feedback control of MIMO nonlinear systems with unknown dead-zone inputs [J].IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2013,21(1):134-146
- [8] Liu L,Liu Y J,Chen C L P.Adaptive neural network control for a DC motor system with dead-zone[J].Nonlinear Dynamics,2013,72(1/2):141-147
- [9] Li Y,Tong S,Liu Y, et al.Adaptive fuzzy robust output feedback control of nonlinear systems with unknown dead zones based on a small-gain approach[J].IEEE Transactions on Fuzzy Systems,2014,22(1):164-176
- [10] Yoo S J,Park J B,Choi Y H.Decentralized adaptive stabilization of interconnected nonlinear systems with unknown non-symmetric dead-zone inputs[J].Automatica,2009,45(2):436-443
- [7] Tong S,Li Y.Adaptive fuzzy output feedback control of

Barrier Lyapunov function based compensation control for a class of nonlinear systems with dead zone

LIU Lei¹

¹ College of Science, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001

Abstract An adaptive controller design for a class of nonlinear single-input single-output systems with partial state constraints is presented in this paper. The approach adopted is to consider the asymmetric dead zone of the nonlinear systems and employ the barrier Lyapunov function (BLF) to prevent partial states from transgressing the constraints. Using a BLF-based backstepping technique, a good tracking performance is obtained and the non-linearity of the dead zone is addressed. For the triangular system, an adaptive controller is designed. It is shown that all the signals in the resulting closed-loop system are bounded, and the system output can track the reference signal. The simulation results show the effectiveness of the proposed method.

Key words constrained control; barrier Lyapunov function; dead zone nonlinear input; backstepping method