

不确定非线性时滞系统的自适应滑模控制

罗小元, 朱志浩, 关新平

(燕山大学 电气工程学院, 河北 秦皇岛 066004)

摘要:针对一类不确定非线性时滞系统的鲁棒滑模控制器设计问题,提出了一种自适应滑模控制方法,该方法能够有效地削弱系统的输入抖动.基于自适应滑模控制技术和Lyapunov稳定方法,克服了系统不确定性和时滞特性影响,不但保证系统状态可以在有限的时间内到达滑模面,而且还保证了系统的渐近稳定特性.最后给出的仿真结果验证了该控制方案的有效性.

关键词:非线性时滞系统;自适应控制;滑模控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2010)04-0332-04

Adaptive sliding mode control for uncertain nonlinear time-delay systems

LUO Xiao-yuan, ZHU Zhi-hao, GUAN Xin-ping

(College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, qinhuangdao 066004, China)

Abstract: Problems occur when robust sliding model controller designs are applied in uncertain nonlinear time-delay systems. To resolve them, an adaptive sliding mode controller which effectively reduced input chattering was proposed. With the sliding controller technique and the Lyapunov stability method, the influence of both uncertainty and time-delays on the system was considerably reduced. Furthermore, system states reached a sliding mode plane within a finite time, with asymptotical stability guaranteed. The simulation results demonstrated the validity of the proposed approach.

Keywords: nonlinear systems; adaptive control; sliding model control

在实际工程系统中,时滞经常是不可避免的,时滞的存在使系统丧失了许多性质,甚至稳定性.因此,时滞系统的鲁棒控制得到了广泛关注^[1].近年来,滑模控制(sliding mode control, SMC)已得到深入研究,并被广泛应用于工业控制系统中^[2],例如:大跨距双起升轨道式集装箱龙门起重机(双起升场桥)由于存在不同箱重、不同提升速率以及驱动电机特性等差异,其吊具机构在运动过程中会出现两吊具之间的动态与静态偏差,从而影响双吊具系统的装卸效率,双吊具运动的同步协调控制是提高其装卸效率的重要因素.在匹配条件下由于滑模控制

独立于参数不确定性和外界干扰,故SMC在此类情况下起到了较好的控制性能,除此之外,在坦克炮控伺服系统、航空气动伺服控制系统、电机-泵组控制系统等实际场合中也得到了广泛应用.因此,SMC已成为一种强有力的鲁棒控制方法.

尽管如此,系统输入抖动仍是滑模控制实际应用中的主要障碍.通常利用较大的控制增益来处理未知参数的变化和外界干扰,但它会增加输入抖动和导致系统的不稳定性,与此同时,边界层技术^[3-4]和自适应参数辨识机理^[5-6]是削弱系统输入抖动的普遍方法.现有的文献已验证边界层宽度可变的SMC比固定宽度的SMC具有更好的跟踪性能.文献[7]提出了边界层宽度与控制增益自适应方法.文献[8-10]提出了调整边界层宽度的模糊算法.但上述文献中都未同时考虑不确定性和时滞特性对系统

收稿日期:2009-06-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(60525303,60704009);燕山大学博士基金资助项目(B209).

通信作者:罗小元. E-mail: xyluo@ysu.edu.cn.

的影响.

本文利用鲁棒自适应滑模控制和 Lyapunov 稳定方法,研究了一类更广泛的不确定非线性时滞系统的滑模控制问题,利用自适应滑模控制技术克服了系统不确定性和时滞特性的影响,确保系统在有限的时间内可以到达滑模面.最后通过仿真验证了所提出的控制方法的有效性.

1 系统描述

考虑一类具有不确定性和时滞特性的非线性系统,此系统用如下方程描述

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) + \mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d)) + \mathbf{b}u, \\ \mathbf{x}(t) &= \boldsymbol{\varphi}(t), t \in [-d, 0], \\ y &= x_1.\end{aligned}\quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} = [x_1 \ x_2 \ \cdots \ x_n]^T = [x_1 \ \dot{x} \ \cdots \ x_1^{(n-1)}]^T \in \mathbf{R}^n$ 是状态矢量, $\mathbf{u} \in \mathbf{R}^n$ 是控制输入向量, $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^n$ 和 $\mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d)) \in \mathbf{R}^n$ 是时变矢量函数, d 是系统定常时滞, $\mathbf{b} = [0 \ \cdots \ 0 \ 1]^T$ 初始条件 $\boldsymbol{\varphi}(t)$ 是 $t \in [-d, 0]$ 上的连续初始矢量函数. 设 $\mathbf{f}(\mathbf{x}), \mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d))$ 可以转化为如下形式

$$\begin{cases} \mathbf{f}(\mathbf{x}(t)) = \mathbf{f}_0(\mathbf{x}(t)) + \Delta\mathbf{f}(\mathbf{x}(t)), \\ \mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d)) = \mathbf{g}_0(\mathbf{x}(t-d)) + \Delta\mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d)). \end{cases}\quad (2)$$

式中: $\mathbf{f}_0(\mathbf{x}) = [x_2 \ \cdots \ x_n \ f_0]^T$ 分别是 $\mathbf{f}(\mathbf{x}) \in \mathbf{R}^n$ 、 $\mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d)) \in \mathbf{R}^n$ 的标称部分, 参数变量 $\Delta\mathbf{f}(\mathbf{x}) = [0 \ \cdots \ 0 \ \Delta f_0]^T$ 、 $\Delta\mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d)) = [0 \ \cdots \ 0 \ \Delta g_0]^T$ 是有界可微的.

假定系统的期望状态矢量为 $\mathbf{x}_d = [x_{1d} \ x_{2d} \ \cdots \ x_{nd}]^T \in \mathbf{R}^n$, 跟踪误差定义为 $e = x_1 - x_{1d}$. 本文的控制目标为使状态 x_1 逼近期望状态 x_{1d} , 即 $e \rightarrow 0$.

2 滑模控制器设计

采用滑模控制策略, 定义滑模函数如下

$$S = \mathbf{c}^T \bar{\mathbf{e}}. \quad (3)$$

式中: $\mathbf{c} = [c_1 \ c_2 \ \cdots \ c_n]^T$, $\bar{\mathbf{e}} = [e \ \dot{e} \ \cdots \ e^{(n-1)}]^T$. c_1, c_2, \dots, c_n 是使 $c_n s^{n-1} + c_{n-1} s^{n-2} + \cdots + c_1$ 为 Hurwitz 多项式的正实数, 同时满足 $\mathbf{c}^T \mathbf{b} \neq 0$.

控制输入的选择条件是

$$\dot{S}S < 0. \quad (4)$$

边界层技术常用于解决传统滑模控制中存在的

抖动问题, 但是固定的控制增益与边界层宽度会导致跟踪精度降低. 因此, 本文利用自适应方法来克服系统控制输入抖动问题的同时又能保证准确跟踪误差的思想是非常有意义的.

假定系统(1)采用设定值控制, 令 $\mathbf{x}_d = 0$; 如果式(4)成立, 那么最终会使 $S \rightarrow 0$ 和 $e \rightarrow 0$. 在此条件下, 系统的自适应滑模控制律 u 可以描述为

$$u = -(\mathbf{c}^T \mathbf{b})^{-1}(\mathbf{c}^T \mathbf{f}_0(\mathbf{x}) + \mathbf{c}^T \mathbf{g}_0(\mathbf{x}(t-d)) + \lambda \phi(\alpha, S)). \quad (5)$$

式中: 自适应参数 λ 和 α 分别是控制增益参数和边界层参数, $\phi(\alpha, S)$ 是一个 S 形函数, 形式如下:

$$\phi(\alpha, S) = \frac{1 - \exp(-\alpha S)}{1 + \exp(-\alpha S)}. \quad (6)$$

显而易见, 参数 α 决定了连续函数 $\phi(\alpha, S)$ 的宽度, 通过调整边界层参数和控制增益可以使跟踪误差 $e \rightarrow 0$, 文献[3-6]已验证边界层技术和自适应参数辨识机理是削弱系统输入抖动的有效方法. 因此, 具备可变的边界层宽度与控制增益的滑模控制器可以更加有效地削弱输入抖动和消除系统稳态误差.

自适应律设计如下:

$$\dot{\alpha} = \gamma \mathbf{c}^T \mathbf{b} \operatorname{esgn}\left(\frac{\partial x_1}{\partial u}\right) S, \quad (7)$$

$$\dot{\lambda} = \varepsilon \mathbf{c}^T \mathbf{b} e \operatorname{sgn}\left(\frac{1 - \exp(-\alpha S)}{1 + \exp(-\alpha S)}\right). \quad (8)$$

式中: γ 和 ε 是用来调整自适应律的正实数.

定理 1 考虑满足条件(2)的不确定非线性时滞系统(1), 给定滑模函数(3), 设计控制律(5)、(6), 自调整律(7)、(8), 则闭环系统(1)渐进稳定, 且有效地消除了系统稳态误差.

证明 取系统(1)的 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{1}{2} e^2. \quad (9)$$

对式(9) Lyapunov 函数进行求导

$$\dot{V} = \dot{V}_1 + \dot{V}_2 = \frac{\partial V}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} +$$

$$\frac{\partial V}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t}.$$

$$\dot{V}_1 = \frac{\partial V}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda}{\partial t} =$$

$$e \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left\{ -(\mathbf{c}^T \mathbf{b})^{-1}(\mathbf{c}^T \mathbf{f}_0(\mathbf{x}) +$$

$$\mathbf{c}^T \mathbf{g}_0(\mathbf{x}(t-d)) + \lambda \phi(\alpha, S)) \right\} \frac{\partial \lambda}{\partial t} =$$

$$-e \frac{\partial x_1}{\partial u} (\mathbf{c}^T \mathbf{b})^{-1} \left(\frac{1 - \exp(-\alpha S)}{1 + \exp(-\alpha S)} \right) \dot{\lambda}. \quad (10)$$

把式(8)代入式(10)得

$$\dot{V}_1 = -\varepsilon e^2 \left| \frac{\partial x_1}{\partial u} \right| \left(\frac{1 - \exp(-\alpha S)}{1 + \exp(-\alpha S)} \right)^2 \leq 0$$

$$\dot{V}_2 = \frac{\partial V}{\partial e} \frac{\partial e}{\partial x_1} \frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial \alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial t} =$$

$$\frac{\partial x_1}{\partial u} \frac{\partial}{\partial \alpha} \left\{ -(\mathbf{c}^T \mathbf{b})^{-1} (\mathbf{c}^T \mathbf{f}_0(\mathbf{x}) +$$

$$\mathbf{c}^T \mathbf{g}_0(\mathbf{x}(t-d)) + \lambda \phi(\alpha, S) \right\} \frac{\partial \alpha}{\partial t} =$$

$$-e \frac{\partial x_1}{\partial u} (\mathbf{c}^T \mathbf{b})^{-1} \lambda \left(\frac{2S \exp(-\alpha S)}{(1 + \exp(-\alpha S))^2} \right) \dot{\alpha}.$$

把式(7)代入式(11)得

$$\dot{V}_2 = -\gamma e^2 \left| \frac{\partial x_1}{\partial u} \right| \frac{2 \exp(-\alpha S)}{(1 + \exp(-\alpha S))^2} \lambda S^2 \leq 0.$$

综上所述 $\dot{V} \leq 0$, $\dot{V} = 0$ 的条件是 $e = 0$ 或 $S = 0$, 两者任其一都会使 $e \rightarrow 0$; 当 $\dot{V} < 0$ 时, 可在有限时间内得到 $V \rightarrow 0$ 即 $e \rightarrow 0$, 因此可以最终消除系统跟踪误差. 证毕.

注: 本节利用可变的边界层宽度与控制增益自适应方法设计了一种新的滑模控制器, 并有效地实现了控制目标. 此种控制策略避免了符号函数直接作用于控制律, 而是把它转移到自适应律中, 并且可以通过调整自适应律中的参数来减弱符号函数的影响, 因此可以有效地削弱系统的输入抖动, 在下一节的仿真研究中充分验证了这一点.

3 系统仿真

对系统(1), 函数和参数选取如下

$$\mathbf{f}_0(\mathbf{x}) = [x_2 - x_1^2 - 1.5x_2]^T,$$

$$\mathbf{g}_0(\mathbf{x}(t-d)) = [0 \ x_2(t-d)]^T, \mathbf{b} = [0 \ 1]^T,$$

$$\Delta \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [0 \ -3 \sin tx_1^2 - 2 \cos tx_2]^T,$$

$$\Delta \mathbf{g}(\mathbf{x}(t-d)) = [0 \ 2 \cos(t-d)x_2(t-d)]^T,$$

$$d = 0.2, \mathbf{c} = [1 \ 1]^T, \lambda(0) = 2, \alpha(0) = 1$$

设定状态初始值 $\mathbf{x}(0) = [1 \ 0]^T$, 期望状态值为 $\mathbf{x}_d = [0, 0]^T$. 系统仿真结果如下

从仿真图中可看出: 闭环系统稳态误差在很短的时间内便趋于 0, 有效地实现了控制目标; 系统状态在有限的时间内能够到达滑模面, 达到稳定状态; 控制输入刚开始存在一定的抖动, 但在一段时间后抖动明显减小, 几乎不再存在抖动问题; 边界层宽度

和控制增益通过调整自适应律中的参数使其波动在很大程度上减弱, 进一步削弱了系统输入抖动. 仿真结果验证了本文研究方法的有效性和可行性.

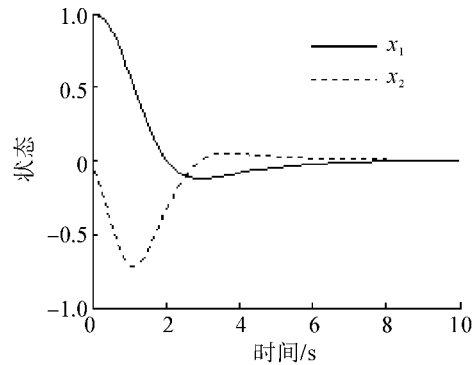


图1 系统的状态响应

Fig. 1 The response graph of system states

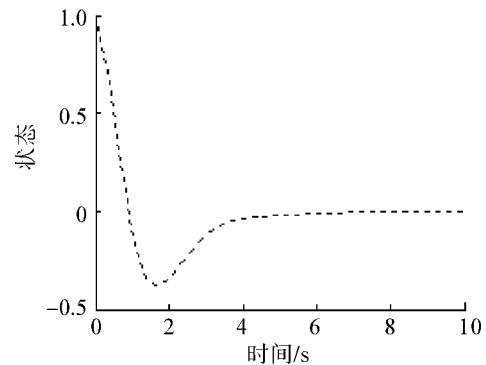


图2 滑模面响应曲线图

Fig. 2 The response graph of sliding mode

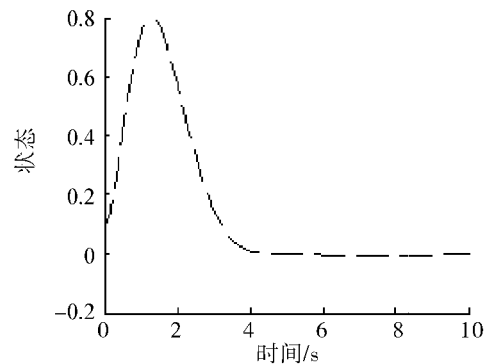


图3 控制输入 u

Fig. 3 Control input u

4 结束语

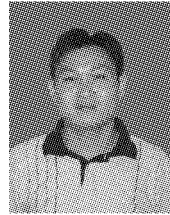
考虑实际系统运行过程中经常存在时滞和不确定性的情形, 针对一类具有时滞和不确定性的非线性系统, 研究了鲁棒滑模控制问题, 提出了一种新的自适应滑模控制方法, 此方法获得了较好的控制效果. 本文所用自适应方法具有以下特点: 此方法最终可以更加有效的削弱系统输入抖动, 同时保证了精确

的误差跟踪性能,并且使得边界层宽度和控制增益很快趋于它们的最终值,最后给出的仿真结果验证了该方法的有效性.

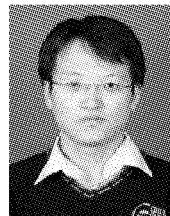
参考文献:

- [1] GU K, NICULESCU S I. Further remarks on additional dynamics in various model transformations of linear delay systems[J]. IEEE Trans Autom Contr, 2001, 46(3): 497-500.
- [2] HUANG Y J, KUO T C. Robust output tracking control for nonlinear time-varying robotic manipulators[J]. Electrical Engineering, 2005, 87(1): 47-55.
- [3] SLOTINE J-JE, LI W. Applied nonlinear control[M]. Englewood Cliffs(NJ): Prentice-Hall, 1991: 21-25.
- [4] HUANG Y J, KUO T C. Robust position control of DC servomechanism with output measurement noise[J]. Electrical Engineering, 2006, 88(3): 223-338.
- [5] FURUTA K. VSS type self-tuning control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1993, 40(1): 37-44.
- [6] LEE P M, OH J H. Improvements on VSS type self-tuning control for a tracking controller[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1998, 45(2): 319-325.
- [7] CHANG W D, HWANG R C, HSIEH J G. Application of an auto-tuning neuron to sliding mode control[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2002, 32(4): 517-529.
- [8] LHEE C G, PARK J S, AHN H S, KIM D H. Sliding mode-like fuzzy logic control with self-tuning the dead zone parameters[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Man, and Cybernetics, 2001, 9(2): 343-348.
- [9] LEE H, KIM E, KANG H J, PARK M. A new sliding-mode control with fuzzy boundary layer[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 120(1): 135-143.
- [10] KUO T C, HUANG Y J, CHANG S H. Sliding mode control with self-tuning law for uncertain nonlinear systems[J]. ISA Transactions, 2008, 47(2): 171-178.

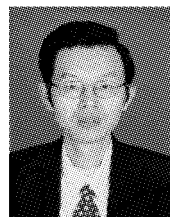
作者简介:



罗小元,男,1976年生,副教授,博士,主要研究方向为鲁棒控制、非线性控制、多智能体协调控制等.主持和参与国家自然科学基金4项、省部级基金3项,发表论文30余篇.



朱志浩,男,1984年生,硕士研究生,主要研究方向为非线性控制,参与国家自然科学基金1项,发表论文3篇.



关新平,男,1963年生,教授,博士生导师,主要研究方向为非线性控制、鲁棒控制、网络控制系统,无线网络及应用等.主持国家自然科学基金3项,省部级项目4项.发表论文160余篇.