

DOI:10.3969/j.issn.1673-4785.201303034

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/CNKI:23-1538/TP.20131101.1720.007.html>

一种离散直接自适应模糊滑模控制

张晓宇¹ 刘彬博²

(1. 华北科技学院 电子信息工程学院, 北京 101601; 2. 中央新影集团 CCTV 证券资讯频道, 北京 100080)

摘要: 为获得离散非线性系统的无抖振滑模控制, 基于自适应模糊逻辑系统 (AFLS) 构建自适应模糊滑模控制。先通过在线自适应律调节 AFLS 的参数, 使 AFLS 输出逼近所设计的滑模控制 (SMC); 然后用 Lyapunov 方法证明了逼近误差的收敛以及滑模的可达。对倒立摆系统的应用仿真研究结果证明了所提出方法的有效性, 因此设计的离散控制器能保证滑模到达, 并具有较强鲁棒性能。

关键词: 离散系统; 模糊逻辑系统; 滑模控制; 自适应控制; 非线性系统; 鲁棒控制; 变结构控制; 抖振

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-4785(2014)02-0197-07

中文引用格式: 张晓宇, 刘彬博. 一种离散直接自适应模糊滑模控制[J]. 智能系统学报, 2014, 9(2): 197-203.

英文引用格式: ZHANG Xiaoyu, LIU Binbo. A direct adaptive fuzzy sliding mode control method for discrete nonlinear systems[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2014, 9(2): 197-203.

A direct adaptive fuzzy sliding mode control method for discrete nonlinear systems

ZHANG Xiaoyu¹, LIU Binbo²

(1. Department of Electronics and Information Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China; 2. CCTV Securities Information Channel, Beijing 100080, China)

Abstract: In order to obtain chatter-free sliding mode control for a class of discrete nonlinear systems, an adaptive fuzzy sliding mode control (FSMC) is constructed on the basis of the adaptive fuzzy logic system (AFLS). Firstly, the online adaptive law is applied to regulate the parameters of the AFLS, in order to make the output of the AFLS approximate to the pre-designed sliding mode control (SMC); then the convergence of the approximation errors and the reachability of the SMC are proofed by using the Lyapunov method. The simulation results of the inverted pendulum system verify the effectiveness of the presented design. Therefore, the proposed discrete controller drives the system state onto the sliding mode, and its robustness is enhanced.

Keywords: discrete system; fuzzy logic system; sliding mode control; adaptive control; nonlinear systems; robust control; variable structure control; chattering

模糊、自适应等方法在连续系统控制问题中已经显示出成功的运用^[1-25]。但目前模糊直接、间接自适应等方法在离散系统中的运用研究尚不深入, 有大量待研究、发展的问题。在离散系统中, 由于系

统的离散化以及系统的理想滑动模态根本不能到达, 所以准滑动模态的降阶特性不再存在。这给系统的稳定性分析造成了困难。滑模控制的分步设计法虽然可以实施, 但是不能保证较好的鲁棒稳定性。离散系统的采样时间对于模糊逻辑系统的逼近能力产生很大影响, 对于自适应机构的自适应能力、速度也同样产生较大影响。因而离散系统中模糊自适应方法在滑模控制中的应用对于消除滑模控制的抖振作用较之连续系统大大减弱。

收稿日期: 2013-03-18. 网络出版日期: 2013-11-01.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61304024); 河北省青年科学基金资助项目 (F2013508110); 中央高校基本科研业务费资助项目 (3142013055); 河北省教育厅科技计划资助项目 (Z2012089).

通信作者: 张晓宇. E-mail: yszuxy@aliyun.com.

本文从自适应模糊逻辑系统出发用离散动态自适应模糊逻辑系统逼近滑模控制律,给出逼近误差收敛的自适应机构和构建方法;通过 AFLS 动态的参数设计形成较好的滤波效果,用以消除抖振。

1 离散非线性系统的 SMC

考虑如下离散非线性系统,

$$\begin{cases} x_i(k+1) = x_{i+1}(k), i = 1, 2, \dots, n-1 \\ x_n(k+1) = f(x_i(k)) + g(x_i(k))u(k) \\ i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $f(x_i(k))$ 、 $g(x_i(k))$ 满足

$$\begin{aligned} |f(x_i(k))| &\leq \bar{f}(x_i(k)) \\ g(x_i(k)) &= g + \Delta g(x_i(k)) \end{aligned}$$

式中: $0 < \Delta g(x_i(k)) \leq \Delta \bar{g}$ 是系统非线性控制增益的不确定性, $\bar{f}(x_i(k))$ 是系统非线性函数的上界函数并且对 $x_i(k)$ 具有连续二阶导数, $g > 0$ 、 $\Delta \bar{g} > 0$ 均为已知常数。设被跟踪状态为 x_d 轨迹模型满足

$$\begin{cases} x_{di}(k+1) = x_{d(i+1)}(k), i = 1, 2, \dots, n-1 \\ x_{dn}(k+1) = \sum_{i=1}^n a_{i-1}x_{di}(k) + r(k) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $r(k)$ 是一有界参考输入信号, $a_{i-1}(i = 1, 2, \dots, n)$ 是 Hurwitz 多项式系数。则跟踪误差 $e(k) = [e_1(k) \ \dots \ e_n(k)]^T$, $e_i(k) = x_i(k) - x_{di}(k)$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。依据式(1)、(2), 误差方程为

$$\begin{cases} e_i(k+1) = e_{i+1}(k), i = 1, 2, \dots, n-1 \\ e_n(k+1) = f(x_i(k)) + g(x_i(k))u(k) - \sum_{i=1}^n a_{i-1}x_{di}(k) - r(k) \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} [\Delta s_{k+1}]^2 &= [f(x_i(k)) + \Delta g u_{sk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k]^2 + \\ &\quad s_k^2 - 2s_k[f(x_i(k)) + \Delta g u_{sk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k] \end{aligned} \quad (8)$$

若要使得到达条件(6)满足,将式(7)、(8)代入式(6)得

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2}s_k^2 &< -\frac{1}{2}[f(x_i(k)) + \Delta g u_{sk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k]^2 \\ s_k^2 &> [f(x_i(k)) + \Delta g u_{sk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k]^2 \\ |s_k| &> |f(x_i(k)) + \Delta g g^{-1}[\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1}(k) - \sum_1^n a_{i-1}x_{di}(k) - r(k)]| + \\ &\quad (1 + \Delta g g^{-1})|(qT_1 - 1)s_k| + (1 + \Delta g g^{-1})k_2 \end{aligned} \quad (9)$$

依据式(5)式(9)等价为

$$[(1 + \Delta \bar{g} g^{-1})qT_1 - \Delta \bar{g} g^{-1}]|s_k| > (2 + \Delta \bar{g} g^{-1})k_2$$

可见在边界 Δ 外到达条件(6)成立。证毕。

定理1虽然得到了系统(3)的一个 SMC,但是这个 SMC 使得滑模到达切换带是很宽的,而且宽度随着系统不确定性的变化而变化。这在实际上会形成很大的抖振。因此本文寻求其模糊自适应 SMC

设滑模 $s(k) = C^T e(k)$, $C = [c_1 \ c_2 \ \dots \ c_{n-1} \ 1]^T \in R^n$ 是 Hurwitz 多项式的系数。对于上述线性不确定离散系统提出以下定理。

定理1 对于非线性系统(1),若取准滑模控制律

$$u_s(k) = -g^{-1}[\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1}(k) - \sum_1^n a_{i-1}x_{di}(k) - r(k) + (qT_1 - 1)s(k) + k_2 \text{sgns}(k)] \quad (4)$$

式中: T_1 为准滑模控制器的采样周期。设计参数 q 、 k_2 满足

$$\begin{cases} \frac{\Delta \bar{g} g^{-1}}{(1 + \Delta \bar{g} g^{-1})T_1} < q < \frac{1}{T_1} \\ k_2 \geq \bar{f}(x_i(k)) + \Delta \bar{g} g^{-1} \left| \sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1}(k) - \sum_1^n a_{i-1}x_{di}(k) - r(k) \right| \end{cases} \quad (5)$$

则系统滑模 $s(k)$ 将于有限时间内到达 $s(k) = 0$ 的邻域 $s^A = \{s(k) | -\Delta \leq s(k) \leq \Delta\}$, 其中滑模邻域宽度为 $\Delta = (2 + \Delta \bar{g} g^{-1})k_2$ 。

证明 考虑不等式离散到达条件

$$s_k \Delta s_{k+1} < -\frac{1}{2}(\Delta s_{k+1})^2 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \Delta s_{k+1} &= s_{k+1} - s_k = f(x_i(k)) + \Delta g u_{sk} - \\ &\quad (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k - s_k \\ s_k \Delta s_{k+1} &= -s_k^2 + s_k[f(x_i(k)) + \Delta g u_{sk} - \\ &\quad (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k] \end{aligned} \quad (7)$$

以消除抖振。

2 模糊自适应 SMC

对于定理1准滑模控制率,引入滑模边界层参数 $\lambda > 0$,当系统滑模到达边界层内施加模糊逻辑(FLC)控制律 $u_f(k)$,停止准滑模控制率 $u_s(k)$ 。即

$$u_s(k) = \begin{cases} -g^{-1} \left[\sum_{i=1}^{n-1} c_i e_{i+1}(k) - \sum_1^n a_{i-1} x_{di}(k) - r(k) + (qT_1 - 1)s(k) + k_2 \text{sgns}(k) \right], & |s(k)| \geq \lambda \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$u_f(k) = \begin{cases} u_{nc}, & |s(k)| \leq \lambda \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

$$u(k) = u_s(k) + u_f(k)$$

式中: u_{nc} 是模糊逻辑系统的输出, Δ 是准滑动模态区的宽度, 因此 $\lambda \geq \Delta$ 。

边界层厚度参数 λ 的范围与系统不确定动态非线性函数的上界有直接关系。非线性系统的不确定性越大, 准滑动模态区宽度越大, 参数 λ 选择范围越大。实验证明 λ 对每个具体非线性系统有一个最佳值。可以通过以下方法选择: 已知状态的初始值, 代入非线性函数上界得到 Δ 值。一般 $\lambda \in [\Delta, 3\Delta]$ 效果较好。

2.1 自适应模糊逻辑系统

对于系统(1)用 AFLS 来逼近滑模控制律。所采用的 AFLS 与文献[17]中相同, 后件参数采用梯度优化自校正的方法进行。

选择滑模 $s(k)$ 以及 $\Delta s(k)$ 为输入变量, 构造具有 2 个输入变量、1 个输出变量的 FBF 型 AFLS。其中的前件参数由设计者调节, 后件参数由自适应机构校正。模糊控制规则为

$$R^i: \text{If } s(k) \text{ is } s_i \text{ and } \Delta s(k) \text{ is } \Delta s_i \text{ then } u_f(j) \text{ is } \theta_i(j) \\ i = 1, 2, \dots, m$$

式中: α 为滑模 $s(k)$ 的划分参数, β 为滑模变化率, $\Delta s(k)$ 的划分参数, j 是 AFLS 的采样步长, $\theta_i(j)$ 是待校正的后件参数, m 是规则总数。采用单点模糊化、乘积推理、加权平均解模糊方法滑模控制的模糊逼近输出为

$$u_f(j) = \theta(j)^T \mathbf{p} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{p} = [p_1 \ p_2 \ \dots \ p_m]^T$ 是模糊基函数向量, $\theta(j)^T = [\theta_1 \ \theta_2 \ \dots \ \theta_m]^T$ 是待校正的后件参数向量, 并且

$$p_i = \frac{\mu_s^i(s) \mu_{\Delta s}^i(\Delta s)}{\sum_{i=1}^m \mu_s^i(s) \mu_{\Delta s}^i(\Delta s)}, i = 1, 2, \dots, m$$

式中: μ_s^i 和 $\mu_{\Delta s}^i$ 分别是滑模及其变化率的隶属度。

2.2 自适应率

定义自适应模糊逻辑系统(AFLS)逼近滑模控制律(4)的误差目标函数为

$$J(\theta(j), \mathbf{e}(k)) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l (u(i) - u_f(j))^2$$

这样 AFLS 逼近控制律(4)的问题就转化为目标函

数 $J(\theta, x)$ 的优化问题。即

$$J(\theta(j), \mathbf{e}(k)) = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l (u(i) - u_f(j))^2$$

求目标函数沿参数 θ 方向的梯度得

$$\frac{\partial J}{\partial \theta} = -\mathbf{p} \sum_{i=0}^k \sum_{j=0}^l (u(i) - \theta^T(j) \mathbf{p})^2$$

参数 θ 自校正的方向应该沿着目标函数对其梯度的负方向, 由式(11)确定 θ 的校正方向,

$$\theta(j+1) - \theta(j) = \mathbf{p}(u(k) - \theta^T(j) \mathbf{p}) \quad (11)$$

2.3 DAFLS 逼近滑模控制

先考虑 $T_1 = lT_2$, $l \in \mathbb{Z}$ 的情况下, AFLS 输出(10)逼近普通离散 SMC 的误差。

定理 2 对于准滑模控制(4), 若 AFLS 以式(11)为自适应机构且其采样周期 T_2 远比准滑模控制(4)的采样周期 T_1 小, 则 AFLS(10)逼近准滑模控制(4)的误差渐近收敛。

证明 在自适应律(11)下选取逼近误差的 Lyapunov 函数为

$$v(j) = \frac{1}{2} (u(k) - \theta(j)^T \mathbf{p})^2 \quad (12)$$

若 AFLS 的采样周期远比控制器 $u(k)$ 的采样周期小则对式(12)有

$$\Delta v(j) = \frac{1}{2} [\theta(j+1)^T \mathbf{p}]^2 -$$

$$\frac{1}{2} ([\theta(j)^T \mathbf{p}]^2 + u(k) [\theta(j) - \theta(j+1)]^T \mathbf{p})$$

利用式(11)有

$$\Delta v(j) = \frac{1}{2} (\mathbf{p}^T \mathbf{p})^2 (u(k) - \theta(j)^T \mathbf{p})^2 + \\ \mathbf{p}^T \mathbf{p} (u(k) - \theta(j)^T \mathbf{p}) \theta(j)^T \mathbf{p} - \mathbf{p}^T \mathbf{p} (u(k) - \theta(j)^T \mathbf{p}) \cdot \\ u(k) = \frac{1}{2} (\mathbf{p}^T \mathbf{p})^2 (u(k) - \theta(j)^T \mathbf{p})^2 - \\ \mathbf{p}^T \mathbf{p} (u(k) - \theta(j)^T \mathbf{p})^2 \quad (13)$$

因为 \mathbf{p} 是模糊基函数向量, 所以 $0 < \mathbf{p}^T \mathbf{p} \leq 1$ 。则由式(13)可得

$$\Delta v(j) = v(j+1) - v(j) < 0$$

证毕。

接着, 为进一步加强滤波效果以消除抖振, 在 AFLS 基础上引入动态自适应模糊逻辑系统(dynamic adaptive fuzzy logic system, DAFLS)。

考虑 n 阶连续 DAFLS, 则

$$v^{(n)} + d_{n-1}v^{(n-1)} + \cdots + d_1\dot{v} + d_0 = \gamma \theta^T p \quad (14)$$

式中: $d_i (i=0, 1, \cdots, n-1)$ 、 γ 均为 DAFLS 的动态参数。

假设(14)的动态形成低通滤波。将其离散化得到离散的 DAFLS,

$$v(k) [r_0 + r_1 z^{-1} + \cdots + r_n z^{-n}] = \omega \theta^T p \quad (15)$$

式中: $r_i (i=0, 1, \cdots, n)$ 、 ω 是导出的参数。运用 DAFLS 逼近滑模控制式(4)。

将滤波器(式(14))看作一个子系统,可以通过选择状态变量,将式(15)变为状态空间模型,

$$\begin{cases} \eta(j+1) = A\eta(j) + b \theta^T(j)p \\ v(j) = C\eta(j) \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\theta^T p$ 看作是子系统(16)的输入, $v(j)$ 是这个子系统的输出。定理2已经证明如果没有引入滤波器动态, AFLS 逼近滑模控制的误差是收敛的。现在选取新的关于其输出 $v(j)$ 与滑模控制之间误差的正定 Lyapunov 函数, 其一阶差分负定, 则 DAFLS 的输出 $v(j)$ 在适当的自适应律下逼近滑模控制的误差仍然收敛。DAFLS 中的动态滤波器可以看作是线性系统(16)。

3 主要结果

3.1 动态 AFLS 的逼近误差

定理3 对于准滑模控制(4), 若 DAFLS(16)以(11)为自适应机构且其参数满足: $A^T C^T C A$ 半负定, $Cb = 1$, 采样周期 T_2 远比准滑模控制(4)的采样周期 T_1 小, 则 DAFLS(16)逼近准滑模控制(4)的误差渐近收敛。

$$\begin{aligned} \Delta V(j) &= \frac{1}{2} \{ [CA\eta(j)]^2 - [\theta^T(j)p]^2 - [C\eta(j)]^2 \} + C\eta(j) \theta^T(j)p - p^T p (u_s(k) - \\ &\quad \theta^T(j)p) CA\eta(j) + \left[\frac{3}{2} (p^T p)^2 - 2 p^T p \right] [u_s(k) - \theta^T(j)p]^2 \\ \Delta V(j) &= [CA\eta(j)]^2 - \frac{1}{2} [CA\eta(j) + p^T p (u_s(k) - \theta^T(j)p)]^2 - \\ &\quad \frac{1}{2} [C\eta(j) - \theta^T(j)p]^2 + 2[(p^T p)^2 - p^T p] [u_s(k) - \theta^T(j)p]^2 \end{aligned}$$

若矩阵 A 、 C 满足 Lyapunov 方程

$$A^T C^T C A - C^T C = -Q$$

其中 $Q = Q^T, Q > 0$ 。则有 $[CA\eta(j)]^2 \leq [C\eta(j)]^2$ 则

$$\Delta V(j) \leq 2[(p^T p)^2 - p^T p] [u_s(k) - \theta^T(j)p]^2$$

又因为 p 是模糊基向量则 $p^T p \leq 1$ 。因此有 $\Delta V(j) \leq 0$ 成立。若 $\Delta V(j) = 0$ 成立则有

证明 选取逼近误差的 Lyapunov 函数为

$$V(j) = \frac{1}{2} (v(j) - \theta^T(j)p)^2 + (u_s(k) - \theta^T(j)p)^2$$

其一阶差分为

$$\begin{aligned} \Delta V(j) &= 1/2 \{ [CA\eta(j)]^2 + [Cb \theta^T(j)p]^2 - \\ &\quad [C\eta(j)]^2 + 2CA\eta(j) Cb \theta^T(j)p \} + \\ &\quad C\eta(j) \theta^T(j)p - \theta^T(j+1)p CA\eta(j) - \\ &\quad \theta^T(j+1)p Cb \theta^T(j)p + \\ &\quad 1/2 \{ [\theta^T(j+1)p]^2 - [\theta^T(j)p]^2 \} + \\ &\quad [\theta^T(j+1)p]^2 - [\theta^T(j)p]^2 + \\ &\quad 2u_s(k) [\theta(j) - \theta(j+1)]^T p = \\ &\quad 1/2 \{ [CA\eta(j)]^2 + [Cb \theta^T(j)p]^2 - \\ &\quad [C\eta(j)]^2 \} + CA\eta(j) Cb \theta^T(j)p + C\eta(j) \theta^T(j)p - \\ &\quad \theta^T(j+1)p CA\eta(j) - \theta^T(j+1)p Cb \theta^T(j)p + \\ &\quad \frac{3}{2} ([\theta^T(j+1)p])^2 - \frac{3}{2} ([\theta^T(j)p])^2 + \\ &\quad 2u_s(k) [\theta(j) - \theta(j+1)]^T p \end{aligned}$$

若代入 $\theta(j+1) - \theta(j) = p(u(k) - \theta^T(j)p)$, 有

$$\begin{aligned} \Delta V(j) &= \frac{1}{2} \{ [CA\eta(j)]^2 + [Cb \theta^T(j)p]^2 - \\ &\quad [C\eta(j)]^2 \} + C\eta(j) \theta^T(j)p - \\ &\quad [\theta^T(j)p]^2 Cb - \theta^T(j)p CA\eta(j) (1 - Cb) - \\ &\quad p^T p (u_s(k) - \theta^T(j)p) \cdot (CA\eta(j) + Cb \theta^T(j)p) + \\ &\quad \frac{3}{2} ([u_s(k) - \theta^T(j)p])^2 (p^T p)^2 + \\ &\quad 3 \theta^T(j)p [u_s(k) - \theta^T(j)p] p^T p - \\ &\quad 2u_s(k) [u_s(k) - \theta^T(j)p] p^T p \end{aligned} \quad (17)$$

若 $Cb = 1$, 式(17)变为

$$v(j) = u_s(k) = \theta^T(j)p$$

成立。根据 Lyapunov 理论逼近误差收敛。证毕。

3.2 近似逼近下的滑模可达性

定理4 对于准滑模控制(4), 若 DAFLS(16)以(11)为自适应机构且其参数且满足定理2内容, 则滑模到达条件(6)能够得到满足。

证明 考虑不等式离散到达条件,

$$s_k \Delta s_{k+1} < -\frac{1}{2} (\Delta s_{k+1})^2$$
$$\Delta s_{k+1} = s_{k+1} - s_k = \Delta f + \Delta g u_{fk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k + g(u_{fk} - u_{sk}) - s_k$$
$$s_k \Delta s_{k+1} = -s_k^2 + s_k [\Delta f + \Delta g u_{fk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k + g(u_{fk} - u_{sk})]$$
$$\begin{cases} -\frac{1}{2}s_k^2 < -\frac{1}{2}[\Delta f + \Delta g u_{fk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k + g(u_{fk} - u_{sk})]^2 \\ s_k^2 > [\Delta f + \Delta g u_{fk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k + g(u_{fk} - u_{sk})]^2 \\ |s_k| > |\Delta f + \Delta g u_{fk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k + g(u_{fk} - u_{sk})| \end{cases}$$

$$[\Delta s_{k+1}]^2 = [\Delta f + \Delta g u_{fk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k + g(u_{fk} - u_{sk})]^2 + s_k^2 - 2s_k [\Delta f + \Delta g u_{fk} - (qT_1 - 1)s_k - k_2 \text{sgns}_k + g(u_{fk} - u_{sk})]$$

若要使得到达条件满足,将 $s_k \Delta s_{k+1}$ 、 $[\Delta s_{k+1}]^2$ 代入得

(18)

由式(18)可见,只要 u_{fk} 逼近 u_{sk} 误差为零则与(9)是等同的。证毕。

4 倒立摆系统应用仿真

一阶倒立摆系统的离散模型如下:

$$\theta(k+2) = \frac{2}{T_s^2} \theta(k+1) - \frac{1}{T_s^2} \theta(k) + \frac{(m_0 + m_1)g \sin \theta(k) - \frac{m_1 l_1}{2T_s^2} [\theta(k+1) - \theta(k)]^2 \sin 2\theta(k)}{m_0 l_1 + m_1 l_1 \sin^2 \theta(k)} - \frac{G_0 \cos \theta(k) u(k)}{m_0 l_1 + m_1 l_1 \sin^2 \theta(k)}$$

式中: $\theta(k)$ 是摆角位移, $u(k)$ 是小车控制电压。

当应用普通 SMC 方法控制和应用本文提出的控制方法时得到摆角位移曲线对比如图 1 所示,控制电压曲线对比如图 2 所示。

通过图 1、2 可以得出,普通离散 SMC 稳态抖动很大,而本文提出的 DAFLSMC 消除了抖动。比较 DAFLSMC 控制电压曲线与在同等条件下实施普通 SMC 的控制电压曲线,如图 2。因为设计的 DAFLS 逼近 SMC 的采样时间是 0.01 s 而被控对象及普通 SMC 采样时间是 0.1 s。因此 DAFLS 输出的控制电压更加光滑。

为了观察 DAFLS 的滤波效果把滤波前后的控制电压曲线作对比如图 3 所示。从图 3 中可见加入了动态滤波的 DAFLS 后控制信号的高频抖动部分被滤掉了。

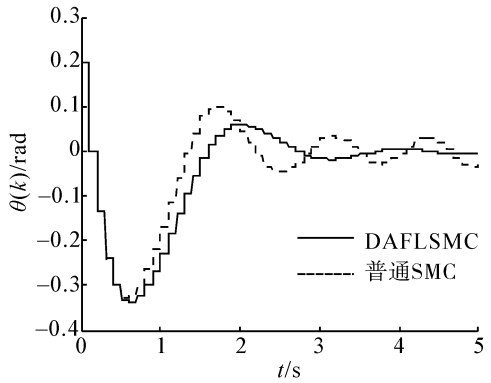


图 1 SMC 和 DAFLSMC 控制下摆角位移曲线对比
Fig.1 Angle displacement contract curves of pendulum for SMC and DAFLSMC

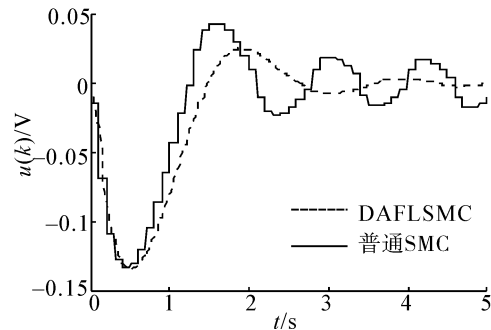


图 2 SMC 和 DAFLSMC 控制下电压曲线对比
Fig.2 Control voltage contract curves for SMC and DAFLSMC

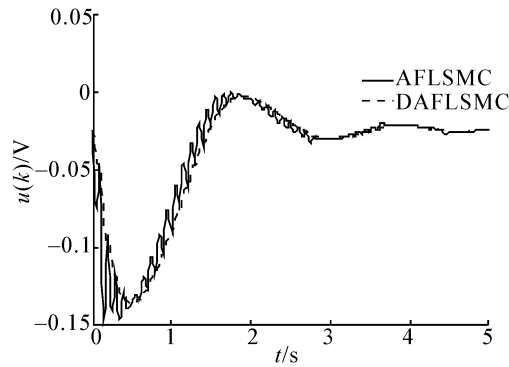


图 3 滤波器前后的控制电压曲线对比
Fig.3 Control voltage comparison of AFLSMC and DAFLSMC

为验证本文所提出方法的鲁棒性能,保持控制器参数不变的情况下,在仿真 $t = 10$ s 时,给摆角位移施加幅度为 0.3 rad 的脉冲干扰,系统控制效果如图 4、

图5所示。可见,在较强干扰施加给摆角时,系统仍然能够稳定回到原点,稳态性能不变。说明本文提出方法的确保留了普通离散 SMC 的鲁棒性。

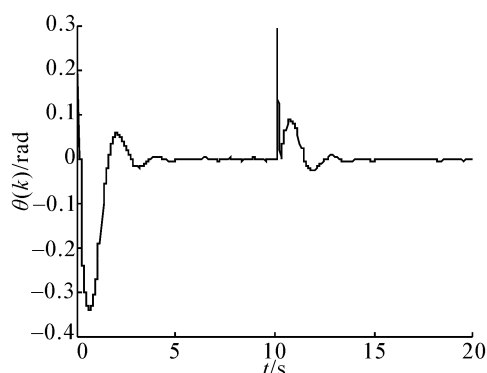


图4 DAFLS 控制下摆角位移受扰曲线

Fig.4 The angle excursion curve when disturbed under DAFLSMC control

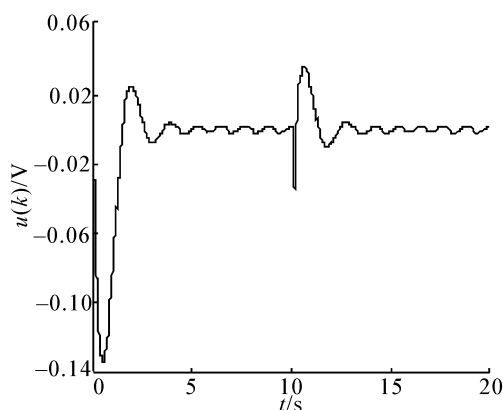


图5 DAFLS 控制下受扰时控制电压曲线

Fig.5 The control volt curve when disturbed under DAFLSMC control

5 结束语

提出了一种离散直接自适应模糊滑模控制方法。通过用 AFLS 逼近离散滑模控制,消除了 SMC 的抖振。逼近 SMC 的 AFLS 中必须引入动态,才能实现滤波功能,而且,动态 AFLS 采样时间要比系统采样时间小。通过与普通离散 SMC 的应用仿真对比,证明了该方法通过适当参数设置,不但保证了滑模到达,消除了 SMC 的抖振,还保留了 SMC 很强的鲁棒性能。该方法对离散 SMC 的应用具有一定价值,需进一步加强其在实际控制系统中的应用研究。

参考文献:

[1] 李继超,管萍,刘小河.间接自适应模糊滑模控制在电弧炉中的应用[J].系统仿真学报,2009,21(2):542-546.

LI Jichao, GUAN Ping, LIU Xiaohe. Application of indirect adaptive fuzzy sliding mode control in arc furnace[J]. Journal of System Simulation, 2009, 21(2): 542-546.

[2] 刘姗姗,马迁,陈贤顺,等.自适应模糊滑模控制在 PMSM 中的应用[J].微电机,2009,42(5):43-46,87.

LIU Shanmei, MA Qian, CHEN Xianshun, et al. Application of adaptive fuzzy sliding mode controller in PMSM[J]. Micromotors, 2009, 42(5): 43-46, 87.

[3] 张向文,王飞跃.汽车 ABS 自适应模糊滑模控制算法研究[J].汽车技术,2009,40(10):25-30.

ZHANG Xiangwen, WANG Feiyue. Study on adaptive fuzzy sliding mode control algorithm for the vehicle ABS[J]. Automobile Technology, 2009, 40(10): 25-30.

[4] 董小闵,余森,廖昌荣,等.具有非线性时滞的汽车磁流变悬架系统自适应模糊滑模控制[J].振动与冲击,2009,28(11):55-60,203.

DONG Xiaomin, YU Miao, LIAO Changrong, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control for magneto-rheological suspension system considering nonlinearity and time delay[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(11): 55-60, 203.

[5] 高文达,方一鸣,张文亮,等.自适应模糊滑模控制在伺服电动机系统中的应用[J].微特电机,2009,37(11):32-36.

GAO Wenda, FANG Yiming, ZHANG Wenliang, et al. Application of adaptive fuzzy sliding mode control to servomotor system[J]. Micromotors, 2009, 37(11): 32-36.

[6] 张金萍,刘阔,林剑峰,等.挖掘机的 4 自由度自适应模糊滑模控制[J].机械工程学报,2010,46(21):87-92.

ZHANG Jinping, LIU Kuo, LIN Jianfeng, et al. 4-DOF adaptive fuzzy sliding mode control of excavator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(21): 87-92.

[7] 王宏伟,井元伟,于驰.基于自适应模糊滑模控制的主动队列管理算法[J].系统仿真学报,2008,20(23):6330-6332,6342.

WANG Hongwei, JING Yuanwei, YU Chi. Active queue management algorithm based on adaptive fuzzy sliding mode control[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(23): 6330-6332, 6342.

[8] 赵红超,徐君明,王东.变质心弹头的自适应模糊滑模控制[J].清华大学学报:自然科学版,2008,48(S2):1733-1736.

ZHAO Hongchao, XU Junming, WANG Dong. Adaptive fuzzy sliding mode control for mass motion warhead[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2008, 48(S2): 1733-1736.

[9] 彭亚为,陈娟,刘占富,等.自适应模糊滑模控制在化工过程中的应用[J].化工学报,2012,63(9):2843-2850.

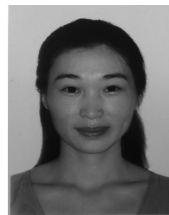
PENG Yawei, CHEN Juan, LIU Zhanfu, et al. Adaptive sliding mode control in chemical process application[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2012, 63

- (9): 2843-2850.
- [10] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 32-36.
- [11] GUO Liping, HUNG J Y, NELMS R M, et al. Comparative evaluation of sliding mode fuzzy controller and PID controller for a boost converter[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(1): 99-106.
- [12] POURSAMAD A, DAVAIE-MARKAZI A H. Robust adaptive fuzzy control of unknown chaotic systems[J]. Applied Soft Computing, 2009, 9(3): 970-976.
- [13] HSU C F, CHUNG I F, LIN C M, et al. Self-regulating fuzzy control for forward DC-DC converters using an 8-bit microcontroller[J]. IET Power Electronics, 2009, 2(1): 1-13.
- [14] TU K Y, LEE T T, WANG W J. Design of a multi-layer fuzzy logic controller for multi-input multi-output systems[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2000, 111(2): 199-214.
- [15] LIN W S, CHEN C S. Sliding-mode-based direct adaptive fuzzy controller design for a class of uncertain multivariable nonlinear systems[C]//Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, Alaska, USA, 2002: 2955-2960.
- [16] WAI R J, LIN C M, HSU F. Self-organizing fuzzy control for motor-toggle servomechanism via sliding mode technique[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2002, 131(2): 235-249.
- [17] ZHANG X Y, SU H Y, CHU J. Adaptive sliding mode-like fuzzy logic control for high-order nonlinear systems[C]//Proceedings of the 2003 IEEE International Symposium on Intelligent Control. Houston, Texas, USA, 2003: 788-792.
- [18] HWANG C L, WU H M, SHIH C L, et al. Fuzzy sliding-mode underactuated control for autonomous dynamic balance of an electrical bicycle[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2009, 17(3): 658-670.
- [19] WANG W, LIU X D. Fuzzy sliding mode control for a class of piezoelectric system with a sliding mode state estimator[J]. Mechatronics, 2010, 20(6): 712-719.
- [20] HO T H, AHN K. Speed control of a hydraulic pressure coupling drive using an adaptive fuzzy sliding-mode control[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(5): 976-986.
- [21] YAU H T, WANG C C, HSIEH C T, et al. Nonlinear analysis and control of the uncertain micro-electro-mechanical system by using a fuzzy sliding mode control design[J]. Computers and Mathematics with Applications, 2011, 61(8): 1912-1916.
- [22] ZHU M C, LI Y C. Decentralized adaptive fuzzy sliding mode control for reconfigurable modular manipulators[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2010, 20(4): 472-488.
- [23] SHAHRAZ A, BOOZARJOMEHRY R B. A fuzzy sliding mode control approach for nonlinear chemical processes[J]. Control Engineering Practice, 2009, 17(5): 541-550.
- [24] HO H F, WONG Y K, RAD A B, et al. Adaptive fuzzy sliding mode control with chattering elimination for nonlinear SISO systems[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2009, 17(7): 1199-1210.
- [25] PALM R. Sliding mode fuzzy control[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Fuzzy Systems. San Diego, CA, USA, 1992: 519-526.

作者简介:



张晓宇,男,1978年生,副教授,博士,主要研究方向为滑模变结构控制、非线性系统智能自适应控制、复杂动态系统。主持国家自然科学基金青年基金项目1项,纵向科研项目3项、横向科研项目3项,参与科研项目8项。发表学术论文30余篇,其中10余篇被SCI、EI检索。



刘彬,女,1985年生,工程师,主要研究方向为智能系统、随机系统、数理统计。