文章编号: 1000-8152(2005)03-0495-04

一类非线性系统的Terminal滑模控制

胡剑波[1], 时满宏[1], 庄开宇[2], 褚 健[2], 苏宏业[2]
(1.空军工程大学 工程学院,陕西 西安 310078; 2.浙江大学 先进控制研究所,浙江 杭州 310027)

摘要: 首先结合Terminal滑模控制的基本思想,即突破以往的线性滑动面,将非线性项引入到滑动面设计中,使得系统处于滑动模态阶段时,状态变量能够在"有限时间内"收敛至平衡点,给出了适用于高阶非线性系统的Terminal滑动面设计方法,基于Lyapunov稳定性理论得出了相应的控制器.进一步考虑系统参数摄动和外界扰动等不确定性因素上界的未知性,用Lyapunov稳定性方法给出了一个带有未知性上界参数估计的自适应Terminal滑模控制器.

关键词: Terminal滑动模态控制; 非线性控制; Lyapunov稳定性
中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Terminal sliding mode control for a class of nonlinear systems

HU Jian-bo[1], SHI Man-hong[1], ZHUANG Kai-yu[2], CHU Jian[2], SU Hong-ye[2]
(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an Shaanxi 710038, China;
2. Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: Combined with the basic idea of terminal sliding mode control, which supervises the normal linear sliding mode control, the nonlinear term is introduced into the design of the sliding mode such that the state variable of the sliding mode tends to zero in the finite time in the phase of sliding mode motion. A high-order nonlinear terminal sliding mode surface is derived, which is described by a series of mathematical statements. The controller is obtained based on the theory of Lyapunov stability. Considering the uncertainties, such as parameter variation and disturbances, the terminal sliding mode control with a simple parameter adaptive law is derived on the basis of the theory of Lyapunov stability.

Key words: terminal sliding mode control; nonlinear system; Lyapunov stability

1 引言(Introduction)

滑模变结构控制的基本原理就是使用一个不连续的高频切换控制器迫使闭环系统的运动到达预先选定的滑动面或者它的一个很小的领域上,通过控制器结构的改变以使系统达到良好的动态性能.滑模控制对参数摄动和扰动具有不敏感性.一般情况下,选择线性的滑动超平面是变结构控制理论中最为常见的情形.这个线性的滑动超平面能够确保系统轨迹在到达滑动模态阶段以后,滑动模态的运动是渐近稳定的或者说跟踪误差渐近地收敛到零,并且渐近收敛的速度可以通过选择滑动面参数矩阵来任意调节,但状态跟踪误差仍然不会在有限时间内收敛至零.

实际上,在滑动超平面中恰当地引入非线性项对改进控制性能是有好处的.有限时间机理—Terminal滑动模态就是在这种背景下形成并发展起来的一种新型变结构控制控制思想.变结构控制理论中引入Terminal滑动模态的最直接的原因就是:Terminal滑模可以使系统的状态在"有限时间内"收敛至平衡点[1~4].

Terminal滑模控制策略的实质在于:在滑动超平面的设计中引入了非线性函数.非线性函数的引入使得在滑动面上跟踪误差能够在有限时间内收敛到零,而且相对于线性滑动面,得到的控制器增益也相对地降低了.然而,这种控制器在实现起来比较复杂,且控制器设计的计算量大[5,6].

文中则结合文献[6]和文献[10]的研究结果,利用文献[8]中提出的自适应思想,研究带有未知系统参数摄动和外界扰动等不确定性因素上界的自适应Terminal滑模控制策略.

收稿日期:2003-07-16; 收修改稿日期:2004-06-14.
基金项目:国防预研项目和空军科研项目.

2 系统描述(Problem formulation)

考虑如下一类 n 阶多输入多输出非线性系统

$$y^{(n)} = f(y^{(n-1)},\cdots,\dot{y},y,t) + \Delta f(y^{(n-1)},\cdots,\dot{y},y,t) + b(y^{(n-1)},\cdots,\dot{y},y,t)u + d(t). \quad (1)$$

式中:$y \in \mathbb{R}^m$ 是输出向量,$u \in \mathbb{R}^m$ 为控制输入向量;$f \in \mathbb{R}^m$ 和 $b \in \mathbb{R}^{m\times m}$ 是已知的系统状态非线性函数矩阵,$\mathrm{rank}(b) = m$;Δf 和 $d(t)$ 则分别为未知的被控对象不确定性和外部扰动.

为了方便系统(1)的控制器设计,令 $x_1 = y,\cdots,x_n = y^{(n-1)}$,则系统(1)可写成如下形式:

$$\begin{cases}\dot{x}_1 = x_2,\\ \quad\vdots\\ \dot{x}_n = f(X,t) + \Delta f(X,t) + b(X,t)u + d(t),\end{cases} \quad (2)$$

式中

$$X = [x_1^{\mathrm T}\ x_2^{\mathrm T} \cdots\ x_n^{\mathrm T}]^{\mathrm T} = [x_1^{\mathrm T}\ \dot{x}_1^{\mathrm T} \cdots\ x_1^{(n-1)\mathrm T}]^{\mathrm T}.$$

3 高阶非线性系统的Terminal滑模控制(High-order nonlinear terminal sliding mode control)

3.1 Terminal滑动面的设计(Design of the terminal sliding mode surface)

考虑系统跟踪问题,要设计一个有限的控制律使系统的状态 $X = [x_1^{\mathrm T} \cdots\ x_n^{\mathrm T}]^{\mathrm T} = [x_1^{\mathrm T} \cdots\ x_1^{(n-1)\mathrm T}]^{\mathrm T}$ 在有限时间内达到对期望状态的 $X_{\mathrm d} = [x_{1d}^{\mathrm T} \cdots\ x_{nd}^{\mathrm T}]^{\mathrm T} = [x_{1d}^{\mathrm T} \cdots\ x_{1d}^{(n-1)\mathrm T}]^{\mathrm T} \in \mathbb{C}^1[t_0,\infty)$ 完全跟踪.这里定义误差向量为

$$E = X - X_d = [e^{\mathrm T}\ \dot{e}^{\mathrm T} \cdots\ e^{(n-1)\mathrm T}]^{\mathrm T}. \quad (3)$$

式中 $e = x_1 - x_{1d} = [e_1\ e_2 \cdots\ e_m]^{\mathrm T}$.这样,设计滑动面方程为

$$\sigma(X,t) = CE - W(t). \quad (4)$$

其中:$C = [C_1\quad C_2\quad \cdots\quad C_n]$ 是一个矩阵,$C_i = \mathrm{diag}\{c_{i1},c_{i2},\cdots,c_{im}\}$,而 $c_{ij}(i = 1,2,\cdots,n;j = 1,2,\cdots,m)$ 是正常数;$W(t) = CP(t)$,$P(t) = [p(t)^{\mathrm T}\ \dot{p}(t)^{\mathrm T} \cdots\ p^{(n-1)}(t)^{\mathrm T}]^{\mathrm T}$,令 $p(t) = [p_1\ p_2 \cdots\ p_m]^{\mathrm T}$,并且选取 $p_i(t)(i = 1,\cdots,m)$ 满足下面的假设条件.

假设 1 $p_i(t)$: $\mathbb{R}_+ \to \mathbb{R}$,$p_i(t) \in \mathbb{C}^n[0,\infty)$,$\dot{p}_i,\cdots,p_i^{(n)} \in L^\infty$,对于某个常数 $T > 0$,$p_i(t)$ 是在时间段 $[0,T]$ 上的有界函数.并且 $p_i(0) = e_i(0)$,$\dot{p}_i(0) = \dot{e}_i(0),\cdots,p_i^{(n)}(0) = e_i^{(n)}(0)$,而 $C^n[0,\infty)$ 则表示定义在 $[0,\infty)$ 的所有 n 阶可微的连续函数 $i = 1,2,\cdots,m$.

这里选取函数 $p_i(t)$ 为

$$p_i(t) = \begin{cases}\displaystyle\sum_{k=0}^{n}\frac{1}{k!}e_i(0)^{(k)}t^k + \sum_{j=0}^{n}\Big(\sum_{l=0}^{n}\frac{a_{jl}}{(T)^{j-l+n+1}}e_i(0)^{(l)}\Big)t^{j+n+1}, & \text{if } 0 \leqslant t \leqslant T,\\ 0, & \text{if } t > T.\end{cases} \quad (5)$$

其中参数 a_{jl} 可以通过假设1中的条件求得.根据文献[6,10],当 $n = 3$ 时,函数 $p_i(t)$ 可写为如下形式:

$$p_i(t) = \begin{cases} e_i(0) + \dot{e}_i(0)t + \frac{1}{2}\ddot{e}_i(0)t^2 + \frac{1}{6}\dddot{e}_i(0)t^3 + \Big[\frac{a_{00}}{T^4}e_i(0) + \frac{a_{01}}{T^3}\dot{e}_i(0) + \frac{a_{02}}{T^2}\ddot{e}_i(0) + \frac{a_{03}}{T}\dddot{e}_i(0)\Big]t^4 + \\ \Big[\frac{a_{10}}{T^5}e_i(0) + \frac{a_{11}}{T^4}\dot{e}_i(0) + \frac{a_{12}}{T^3}\ddot{e}_i(0) + \frac{a_{13}}{T^2}\dddot{e}_i(0)\Big]t^5 + \Big[\frac{a_{20}}{T^6}e_i(0) + \frac{a_{21}}{T^5}\dot{e}_i(0) + \frac{a_{22}}{T^4}\ddot{e}_i(0) + \frac{a_{23}}{T^3}\dddot{e}_i(0)\Big]t^6 + \\ \Big[\frac{a_{30}}{T^7}e_i(0) + \frac{a_{31}}{T^6}\dot{e}_i(0) + \frac{a_{32}}{T^5}\ddot{e}_i(0) + \frac{a_{33}}{T^4}\dddot{e}_i(0)\Big]t^7, \quad \text{if } 0 \leqslant t \leqslant T,\\ 0, \quad \text{if } t > T.\end{cases} \quad (6)$$

容易解出参数 $a_{jl}(j = 0,1,2,3;l = 0,1,2,3)$ 的值:

$$\begin{cases}a_{00} = -35,\\ a_{10} = 84,\\ a_{20} = -70,\\ a_{30} = 20;\end{cases}\ \begin{cases}a_{01} = -20,\\ a_{11} = 45,\\ a_{21} = -36,\\ a_{31} = 10;\end{cases}\ \begin{cases}a_{02} = -5,\\ a_{12} = 10,\\ a_{22} = -\frac{15}{2},\\ a_{32} = 2;\end{cases}\ \begin{cases}a_{03} = -\frac{2}{3},\\ a_{13} = 1,\\ a_{23} = -\frac{2}{3},\\ a_{33} = \frac{1}{6}.\end{cases}$$

同样道理,也可以得到 n 阶系统相应的参数 a_{jl},从而确定相应的Terminal滑动面.确定了Terminal滑动面以后,下一阶段就是设计一个滑模控制器,以保证滑动模态阶段的存在性.

3.2 Terminal滑模控制器的设计(Design of terminal sliding mode controller)

在滑模控制中,控制输入应该能够迫使系统的所有状态轨迹都收敛到 $\sigma(X,t) = 0$ 的滑动面上,从

而保证滑模阶段的存在.滑动模态的行为等价于在滑动面上的状态轨迹的稳定性.换句话说,控制律应该能保证跟踪误差从任意状态收敛到零.

由式(2),(3),(4),可以得到

$$\dot{\sigma}(X,t)=C_n\{f(X,t)+\Delta f(X,t)+b(X,t)u+d(t)-x_{1d}^{(n)}-p(t)^{(n)}\}+\sum_{k=1}^{n-1}C_k\{e^{(k)}-p(t)^{(k)}\}. \tag{7}$$

假设 2　不确定性 $\Delta f(X,t)$ 和外部扰动 $d(t)$ 满足下面的不等式

$$\|\Delta f(X,t)\|\leqslant F(X,t),\ \|d(t)\|\leqslant D(t). \tag{8}$$

而 $F(X,t)$ 和 $D(t)$ 是两个非负的函数.

根据文献[9,10],当选择控制输入 $u(t)$ 为下式

$$u(t)=-b(X,t)^{-1}\{f(X,t)-x_{1d}^{(n)}-p(t)^{(n)}+C_n^{-1}\sum_{k=1}^{n-1}C_k(e^{(k)}-p(t)^{(k)})\}-b(X,t)^{-1}\frac{C^{\mathrm{T}}\sigma}{\|C_n^{\mathrm{T}}\sigma\|}\cdot\{F(X,t)+D(t)+K\}, \tag{9}$$

其中 K 为正常数,闭环系统具有全局鲁棒性和稳定性,且确保滑动阶段的存在性.

定理 1[10]　对于一类高阶非线性系统(10),在满足假设 1,2 的条件下,取 Terminal 滑动面切换函数式(4),并采用式(9)构成的滑模变结构控制策略,可以确保闭环系统的输出跟踪误差能够在任意的有限时间 T 内收敛至零.

对于得到的控制器式(9),由于不连续的函数向量 $C_n^{\mathrm{T}}\sigma/\|C_n^{\mathrm{T}}\sigma\|$ 的原因,闭环系统会出现抖动现象.这种不期望的高频抖动可能会激发系统的未建模动态,影响控制性能,严重时还会导致系统不稳定.为了降低抖动的影响,可以采用一个连续函数向量来代替符号函数.

$$S_\mu=\begin{bmatrix}\dfrac{1-\exp(-\mu s_1)}{1+\exp(-\mu s_1)}\\ \dfrac{1-\exp(-\mu s_2)}{1+\exp(-\mu s_2)}\\ \vdots\\ \dfrac{1-\exp(-\mu s_m)}{1+\exp(-\mu s_m)}\end{bmatrix},$$

$$C_n^{\mathrm{T}}\sigma=[s_1\quad s_2\quad\cdots\quad s_m]^{\mathrm{T}}, \tag{10}$$

来代替 $C_n^{\mathrm{T}}\sigma/\|C_n^{\mathrm{T}}\sigma\|$,抖动现象能够被大大地降低.

4 自适应 Terminal 滑模控制器的设计(Design of terminal sliding mode controller with the simple parameter adaptive law)

在一般的变结构控制系统中,均需已知系统不确定性的界,并由此构造出具有继电控制项的控制律,保证系统进入滑动模态.这些界往往很难获得,若控制律中的这些数据取得太大,会影响控制效率,取得太小,将不能保证滑动模态的存在.自适应控制方法为我们提供了另一种解决系统不确定性问题的有效方法,可以得到已知不确定性结构的未知参数估计.因此这里将结合变结构和自适应控制的各自优点,并应用 Terminal 滑模变结构控制思想,来综合一种新型的自适应 Terminal 滑模控制算法[9].

此时系统(2)的不确定 $\Delta f(X,t)$ 和 $d(t)$ 不再满足假设 2,即不确定性的界未知,为此给出下面假设.

假设 3　不确定性 $\Delta f(X,t)$ 和外部扰动 $d(t)$ 满足下面的不等式

$$\|\Delta f(X,t)+d(t)\|\leqslant r_0+r_1\|X\|, \tag{11}$$

而 r_0,r_1 是两个非负的未知常数.

这里为了估计不确定性 $\Delta f(X,t)$ 和外部扰动 $d(t)$,给出如下的简单自适应律

$$\dot{\tilde{r}}_0(t,X)=q_0^{-1}\|C_n^{\mathrm{T}}\sigma\|, \tag{12}$$

$$\dot{\tilde{r}}_1(t,X)=q_1^{-1}\|C_n^{\mathrm{T}}\sigma\|\cdot\|X\|.$$

其中　$\tilde{r}_0(t,X)=\bar{r}_0(t,X)-r_0$,

和　$\tilde{r}_1(t,X)=\bar{r}_1(t,X)-r_1$

是自适应参数误差,q_0 和 q_1 分别为各自的正常数自适应增益.而 $\bar{r}_0(t,X)$ 和 $\bar{c}_1(t,X)$ 即为未知参数 r_0 和 r_1 的自适应参数估计.由于参数 r_0 和 r_1 为常数,所以式(12)的自适应律也可写为

$$\dot{\bar{r}}_0(t,X)=q_0^{-1}\|C_n^{\mathrm{T}}\sigma\|,$$

$$\dot{\bar{r}}_1(t,X)=q_1^{-1}\|C_n^{\mathrm{T}}\sigma\|\cdot\|X\|.$$

考虑 Lyapunov 函数为

$$2V(\sigma,\tilde{r}_0,\tilde{r}_1)=\sigma^{\mathrm{T}}\sigma+q_0\tilde{r}_0^2+q_1\tilde{r}_1^2,$$

对时间 t 的微分为

$$\dot{V}(\sigma,\tilde{r}_0,\tilde{r}_1)=\sigma^{\mathrm{T}}\dot{\sigma}+q_0\tilde{r}_0\dot{\tilde{r}}_0+q_1\tilde{r}_1\dot{\tilde{r}}_1=\sigma^{\mathrm{T}}C_n\{f(X,t)-x_{1d}^{(n)}-p(t)^{(n)}+C_n^{-1}\sum_{k=1}^{n-1}C_k(e^{(k)}-p(t)^{(k)})\}+\sigma^{\mathrm{T}}C_nb(X,t)u+\sigma^{\mathrm{T}}C_n\{\Delta f(X,t)+$$

$$d(t)\} + q_0\tilde{r}_0\dot{\tilde{r}}_0 + q_1\tilde{r}_1\dot{\tilde{r}}_1 \leqslant$$

$$\sigma^{\mathrm T}C_n\{f(X,t) - x_{1d}^{(n)} - p(t)^{(n)} + C_n^{-1}\sum_{k=1}^{n-1}C_k(e^{(k)} - p(t)^{(k)})\} + \sigma^{\mathrm T}C_nb(X,t)u + \|\sigma^{\mathrm T}C_n\|\cdot (r_0 + r_1\|X\|) + q_0\tilde{r}_0\dot{\tilde{r}}_0 + q_1\tilde{r}_1\dot{\tilde{r}}_1. \quad (13)$$

选择控制输入 $u(t)$ 为下式

$$u(t) = -b(X,t)^{-1}\{f(X,t) - x_{1d}^{(n)} - p(t)^{(n)} + C_n^{-1}\sum_{k=1}^{n-1}C_k(e^{(k)} - p(t)^{(k)})\} - b(X,t)^{-1}\frac{C_n^{\mathrm T}\sigma}{\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|}\cdot\{(\bar{r}_0 + \bar{r}_1\|X\|) + K\}. \quad (14)$$

其中 K 为正常数.得

$$\dot V(\sigma,\tilde r_1,\tilde r_1) \leqslant -\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\cdot(\bar r_0+\bar r_1\|X\|+K)+\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\cdot(r_0 + r_1\|X\|) + q_0\tilde{r}_0\dot{\tilde{r}}_0 + q_1\tilde{r}_1\dot{\tilde{r}}_1 = -K\|C_n^{\mathrm T}\sigma\| + \tilde r_0(q_0\dot{\tilde r}_0 - \|C_n^{\mathrm T}\sigma\|) + \tilde r(q_1\dot{\tilde r}_1 - \|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\cdot\|X\|). \quad (15)$$

将式(13)的自适应律代入上式可得

$$\dot V(\sigma,\tilde r_0,\tilde r_1) \leqslant -K\|C_n^{\mathrm T}\sigma\| < 0. \quad (16)$$

由于常数 $K > 0$,所以系统可以保证全局一致渐近收敛至 $\sigma = 0$ (Slotine et al., 1991).下面讨论一下滑动面向量 σ 的收敛率问题,根据式(16)和(13)可得:

$$\dot V(\sigma,\tilde r_0,\tilde r_1) = \sigma^{\mathrm T}\dot\sigma + q_0\tilde{r}_0\dot{\tilde{r}}_0 + q_1\tilde{r}_1\dot{\tilde{r}}_1 \leqslant -K\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|$$

或

$$\sigma^{\mathrm T}\dot\sigma + q_0\tilde r_0 q_0^{-1}\|C_n^{\mathrm T}\sigma\| + q_1\tilde r_1 q_1^{-1}\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\cdot\|X\| \leqslant -K\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|$$

或

$$-\sigma^{\mathrm T}\dot\sigma \geqslant \tilde r_0\|C_n^{\mathrm T}\sigma\| + \tilde r_1\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\cdot\|X\| + K\|C_n^{\mathrm T}\sigma\| \geqslant 0$$

或

$$\|\sigma\|\cdot\|\dot\sigma\| \geqslant \tilde r_0\|C_n^{\mathrm T}\sigma\| + \tilde r_1\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\cdot\|X\| + K\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|,$$

则

$$\|\dot\sigma\| \geqslant \frac{\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|(\tilde r_0 + \tilde r_1\cdot\|X\| + K)}{\|\sigma\|},\ \text{当}\|\sigma\|\neq 0. \quad (17)$$

对自适应律式(12)积分易得

$$\tilde r_0 = \tilde r_0(0,X) + \int_0^t q_0^{-1}\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\mathrm dt - r_0, \quad (18)$$

$$\tilde r_1 = \tilde r_1(0,X) + \int_0^t q_1^{-1}\|C_n^{\mathrm T}\sigma\|\cdot\|X\|\mathrm dt - r_1. \quad (19)$$

此外,不失一般性,可令矩阵 $C_n = I$, 则可以得到下式

$$\|\dot\sigma\| = \frac{\|\sigma\|\cdot(\tilde r_0 + \tilde r_1\cdot\|X\| + K)}{\|\sigma\|} = \tilde r_0 + \tilde r_1\cdot\|X\| + K \quad > K,\ \text{当}\|\sigma\|\neq 0. \quad (20)$$

由于常数 $K > 0$,从而式(20)可以表明滑动面 σ 能够在有限时间内收敛至零.

定理 2 对于一类高阶非线性系统(2),在满足假设 1 和 3 的条件下,取 Terminal 滑动面切换函数式(4),并采用式(14)的变结构控制策略以及式(18),(19)的自适应律,可以确保闭环系统的输出跟踪误差能够在任意的有限时间 T 内收敛至零.

5 小结(Conclusions)

本文在对原有 Terminal 滑模控制研究的基础上,针对一类高阶非线性系统,提出基于 Lyapunov 稳定性理论,分别得出了相应的滑模控制器及其带有自适应律的自适应 Terminal 滑模控制器.

参考文献(References)

[1] MAN Z H, PAPLINSKI A P, WU H R. A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robotic manipulators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1994, 39(12): 2464 – 2469.

[2] YU X, MAN Z H, WU Y Q. Terminal sliding mode with fast transient performance [C]// *Proc of the 36th Conf on Decision and Control*. San Diego, USA: [s. n.], 1997, 962 – 963.

[3] WU Y Q, YU X, MAN Z H. Terminal sliding mode control design for uncertain dynamic systems [J]. *Systems and Control Letters*, 1998, 34 (2): 281 – 287.

[4] PARK K B, LEE J J. Comments on' A robust MIMO terminal sliding mode control scheme for rigid robot manipulators' [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(4): 761 – 762.

[5] PARK K B, TERUO T. Terminal sliding mode control of second-order nonlinear uncertain systems [J]. *Int J of Robust Nonlinear Control*, 1999, 9(4): 769 – 780.

[6] CHERN T L, WU Y C. Design of integral variable structure controller and application to electro-hydraulic velocity servo-systems [J]. *IEE Proceedings – D*, 1993, 138(5): 439 – 444.

[7] SLOTINE J J E, LI W. *Applied Nonlinear Control* [M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1991.

[8] 胡剑波,褚健.变结构控制和增益调度控制[D].杭州:浙江大学,2001.
(HU Jianbo, CHU Jian. *Variable structure control and gain-scheduling control* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.)

[9] 庄开宇,褚健,苏宏业.变结构控制理论若干问题研究及其应用[D].杭州:浙江大学,2002.
(ZHUANG Kaiyu. Chu Jian, SU Hongye. *Variable structure control theory study and applications* [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2002.

[11] 庄开宇,张克勤,苏宏业,等.高阶非线性系统的 Terminal 滑模控制[J].浙江大学学报(工学版),2002,36(5):482 – 485,439.

(下转第 502 页)

systems with time-delay feedback controllers [J]. *Information and Control*, 2001, 30(2): 155 - 158.)

[6] 冯俊涛,年晓红.控制系统的鲁棒绝对稳定性—LMI方法[J].长沙铁道学院学报,2002,20(2):37 - 42.

(FENG Juntao, NIAN Xiaohong. Robust absolute stability of uncertain time-delay Lurie control systems—LMI approach [J]. *J of Changsha Railway University*, 2002, 20(2): 37 - 42.)

[7] 年晓红.Lurie控制系统绝对稳定的时滞相关条件[J].自动化学报,1999,25(4):564 - 566.

(NIAN Xiaohong. Delay dependent conditions for absolute stability of Lurie type control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(4): 564 - 566.)

[8] 年晓红,樊晓平.具有时滞的不确定鲁里叶控制系统的鲁棒稳定性[J].控制理论与应用,2001,18(6):925 - 928.

(NIAN Xiaohong, FAN Xiaoping. Robust stability for uncertain Lurie control systems with time-delay [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(6): 925 - 928.)

[9] 徐炳吉,廖晓昕.Lurie控制系统的时滞相关绝对稳定性判据[J].自动化学报,2002,28(2):317 - 320.

(XU Bingji, LIAO Xiaoxin. Absolute stability criteria of delay-dependent for Lurie control systems [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(2): 317 - 320.)

[10] MOON Y S, PARK P, KWON W H, et al. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems [J]. *Int J Control*, 2001, 74(14): 1447 - 1455.

作者简介:

陈东彦 (1964—),女,哈尔滨理工大学信息与计算科学系教授,1985年、1988年和2000年分别获东北师范大学理学学士学位、吉林大学理学硕士学位和哈尔滨工业大学工学博士学位,主要研究方向为时滞系统鲁棒控制,E-mail: dychen_2004@yahoo.com.cn;

刘伟华 (1971—),女,1994年、1997年分别获得哈尔滨师范大学理学学士学位和黑龙江大学理学硕士学位,现为哈尔滨理工大学信息与计算科学系讲师,研究方向为时滞系统鲁棒控制.

(上接第498页)

(ZHUANG Kaiyu, ZHANG Keqin, SU Hongye. et al. The Terminal sliding mode control of high-order nonlinear systems [J]. *J of Zhejiang University*. 2002, 36(5): 482 - 485, 439.)

作者简介:

胡剑波 (1965—),男,空军工程大学工程学院训练部副部长、空军上校、博士,主要从事装备信息化、控制理论及其应用研究,E-mail: autosys@vip.sina.com;

时满宏 (1976—),男,空军工程大学工程学院硕士研究生,上尉,主要从事航空装备技术保障和专家控制研究;

庄开宇 (1970—),男,浙江大学博士,主要从事企业信息化、控制理论及其应用研究;

褚 健 (1963—),男,浙江大学先进控制研究所所长、教授、首批国家长江学者计划特聘教授,主要从事企业综合自动化、控制理论和应用研究;

苏宏业 (1969—),男,浙江大学先进控制研究所副所长、教授,主要从事企业综合自动化、控制理论和应用研究.