2012 年 1 月　　重庆师范大学学报(自然科学版)　　Jan. 2012
第 29 卷 第 1 期　　Journal of Chongqing Normal University(Natural Science)　　Vol. 29 No. 1

DOI :10. 3969/J. ISSN. 1672-6693. 2012. 01. 010

含非线性扰动的退化时滞系统的滑模控制*

方　园

(阜阳师范学院 数学与计算科学学院, 安徽 阜阳 236037)

摘要:文章主要讨论了含有非线性扰动的退化时滞系统的滑模控制问题。与已有文献不同之处在于系统中同时含有匹配的和不匹配的不确定项 $G(x(t),t)$ 以及 $F(x(t-\tau(t)),t)$,且不匹配项中存在时滞 $\tau(t)$,其中 $0\leqslant\tau(t)\leqslant h$。文章首先基于强能控退化系统的等价变换,将系统化为一等价系统。之后,再利用有效的控制器 $u=-M\dot{x}_2(t)+u_e$ 的设计,使得系统能快速到达滑模面 $S=-Kx_1+x_2=0$ 上并保持在滑模面上运动。最后,在条件 $2\|x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1\|\delta(x(t-\tau(t)),t)\leqslant 2x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1x_1(t-\tau(t))$ 之下,利用 Lyapunov 泛函 V 的构造得出此类系统渐近稳定的充分条件 — 线性矩阵不等式 $\Xi<0$。文中的数值例子说明了结论的有效性。

关键词:退化;时滞系统;匹配的;不匹配的;滑模控制;镇定

中图分类号:O231.2　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1672-6693(2012)01-0056-05

在非线性控制系统理论中,典型的研究方法是滑模变结构控制(Sliding mode control)。目前,采用滑模控制的方法非常普遍,理论也趋于系统化,有关滑动变结构控制的理论研究国内外已有许多成果[1-5]。其中一部分文献仅对含有匹配扰动的系统进行研究[2-5]。不过近来有文章针对同时含匹配与不匹配非线性扰动的系统,采用滑模控制方法进行研究,在文献[1]中,文章利用非奇异坐标变换将系统分解为含有控制和不含控制项的两个子系统,再利用设计巧妙的滑模面和控制器使得系统能够在有限时间内到达滑模面,最终实现滑模控制。

退化现象在现实系统中常常存在,有学者针对含非线性扰动的退化时滞系统进行滑模控制研究[2]。但文献[2]中只考虑含匹配的且无时滞不确定项的情况,设计了滑模面,并采用滑模控制方法对系统进行研究。时滞现象在系统中也较为普遍,本文主要建立在文献[2]基础上,同时考虑依赖于时滞的非线性不匹配项,利用滑模控制方法对系统进行镇定研究。在文章最后将系统的稳定性条件转化为线性矩阵不等式(LMI)的形式,易于验证和求解。

1 系统描述

考虑如下退化时滞不确定系统

$$\begin{cases}E\dot{x}(t)=Ax(t)+A_dx(t-\tau(t))+B(u(t)+G(x(t),t))+F(x(t-\tau(t)),t)\\ x(t)=\varphi(t)\end{cases}\tag{1}$$

rank $E=r<n$,A,A_d,B 为具有相应适当维数的常数矩阵,系统初始函数为 $\varphi(t)$,时滞 $\tau(t)$ 为关于时间 t 连续函数,且满足 $0\leqslant\tau(t)\leqslant h$,$G(x(t),t)$,$F(x(t-\tau(t)),t)$ 分别为系统匹配的和不匹配的不确定项。

假设在原点邻域内存在连续函数 ϕ,δ,且对 $\forall t\in\mathbf{R}^+$ 有下式成立

$$\|G(x(t),t)\|\leqslant\phi(x(t),t);\ \|F(x(t-\tau(t)),t)\|\leqslant\delta(x(t-\tau(t)),t)\tag{2}$$

且对 $\forall t\in\mathbf{R}^+$ 有 $\phi(0,t)=\delta(0,t)=0$。

* 收稿日期:2011-06-20　修回日期:2011-09-12　网络出版时间:2012-01-15 18:09:00

资助项目:教育部财政部第四批高等学校特色专业建设点(No. TS11496)

作者简介:方园,女,助教,硕士,研究方向为控制理论。

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20120115.1809.201201.56_010.html

为得到本文相关结果,下面给出几个假设条件和文章必须的引理。

假设 1　$\forall \lambda \in \mathbf{R}$,$\det(\lambda E - A) \neq 0$。即系统(1)式正则。

假设 2　$\mathrm{rank}(E,B) = n$,且 B 是列满秩的。

在假设 2 条件下,系统 (E,A,A_d,B) 受限等价于如下结构

$$\begin{pmatrix} I_{n-m} & 0 \\ 0 & E_1 \end{pmatrix},\begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix},\begin{pmatrix} A_{d11} & A_{d12} \\ A_{d21} & A_{d22} \end{pmatrix},\begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \end{pmatrix}$$

其中 $A_{11},A_{d11} \in \mathbf{R}^{(n-m)\times(n-m)}$,$B_2 \in \mathbf{R}^{m\times m}$,$B_2$ 非奇异,且(A_{11},A_{12})能控,存在 K 使得 $A_{11}+A_{12}K$ 稳定,且使 $A_{d11}+A_{d12}K$ 可逆,则下列 Lyapunov 方程

$$T(A_{11}+A_{12}K)+(A_{11}+A_{12}K)^{\mathrm{T}}T = -I-(A_{d11}+A_{d12}K)^{\mathrm{T}}(A_{d11}+A_{d12}K) \tag{3}$$

一定有唯一正定解 T。

引理 1　若系统 (E,A,B) 强能控,且满足假设条件 2,则存在非奇异矩阵 P,Q 使得系统(1)式受限等价于如下系统

$$\begin{cases} \bar{E}\dot{x}(t) = \bar{A}x(t)+\bar{A}_d x(t-\tau(t))+\bar{B}(u(t)+G(x(t),t))+\bar{F}(x(t-\tau(t)),t) \\ x(t) = \varphi(t) \end{cases} \tag{4}$$

其中
$$\bar{E} = PEQ = \begin{pmatrix} I_{n-m} & 0 \\ 0 & E_1 \end{pmatrix},\bar{A} = PAQ = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix},\bar{A}_d = PA_dQ = \begin{pmatrix} A_{d11} & A_{d12} \\ A_{d21} & A_{d22} \end{pmatrix}$$

$$\bar{B} = PB = \begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \end{pmatrix},\bar{F} = PF = \begin{pmatrix} P_1 \\ P_2 \end{pmatrix}F$$

且 (A_{11},A_{12}) 能控。

证明　由 (E,A,B) 强能控知,$\mathrm{rank}(\lambda E - A) = n$,$\mathrm{rank}(E,B) = n$,且 B 列满秩。可以令 $B = \begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix}$,其中 B_2 可逆。$\bar{P} = \begin{pmatrix} I_{n-m} & -B_1B_2^{-1} \\ 0 & I \end{pmatrix}$。则有

$$\bar{P}B = \begin{pmatrix} I_{n-m} & -B_1B_2^{-1} \\ 0 & I \end{pmatrix}\times\begin{pmatrix} B_1 \\ B_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \end{pmatrix},\bar{P}E = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} \\ \bar{E}_{21} & \bar{E}_{22} \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{rank}(E,B) = \mathrm{rank}(\bar{P}E,\bar{P}B) = \mathrm{rank}\begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} & 0 \\ \bar{E}_{21} & \bar{E}_{22} & B_2 \end{pmatrix} = \mathrm{rank}(\bar{E}_{11},\bar{E}_{12})+m = n$$

故 $\mathrm{rank}(\bar{E}_{11},\bar{E}_{12}) = n-m$,所以存在矩阵 $W = (W_1,W_2)$,$W_1 \in \mathbf{R}^{m\times(n-m)}$ 和 $W_2 \in \mathbf{R}^{m\times m}$ 使得$\begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} \\ W_1 & W_2 \end{pmatrix}$是可逆的,再取 $Q = \begin{pmatrix} \bar{E}_{11} & \bar{E}_{12} \\ W_1 & W_2 \end{pmatrix}^{-1}$,则有 $\bar{P}EQ = \begin{pmatrix} I & 0 \\ \bar{\bar{E}}_{221} & \bar{\bar{E}}_{22} \end{pmatrix}$,$\bar{P}AQ = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ \bar{\bar{A}}_{21} & \bar{\bar{A}}_{22} \end{pmatrix}$,$\bar{P}A_dQ = \begin{pmatrix} A_{d11} & A_{d12} \\ \bar{\bar{A}}_{d21} & \bar{\bar{A}}_{d22} \end{pmatrix}$。最后再取 $P = \begin{pmatrix} I_{n-m} & 0 \\ -\bar{\bar{E}}_{21} & I_m \end{pmatrix}\bar{P}$,于是有

$$PEQ = \begin{pmatrix} I_{n-m} & 0 \\ 0 & E_1 \end{pmatrix},PAQ = \begin{pmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{pmatrix},PA_dQ = \begin{pmatrix} A_{d11} & A_{d12} \\ A_{d21} & A_{d22} \end{pmatrix},PB = \begin{pmatrix} 0 \\ B_2 \end{pmatrix}$$

其中 $E_1 = \bar{\bar{E}}_{22}$,$A_{21} = \bar{\bar{A}}_{21}-\bar{\bar{E}}_{21}A_{11}$,$A_{22} = \bar{\bar{A}}_{22}-\bar{\bar{E}}_{21}A_{12}$,$A_{d21} = \bar{\bar{A}}_{d21}-\bar{\bar{E}}_{21}A_{d11}$,$A_{d22} = \bar{\bar{A}}_{d22}-\bar{\bar{E}}_{21}A_{d12}$。最后

$$\mathrm{rank}(\lambda E - A,B) = \mathrm{rank}(\lambda PEQ - PAQ,PB) = \mathrm{rank}\begin{pmatrix} \lambda I_{n-m} & -A_{12} & 0 \\ -A_{21} & \lambda I_m - A_{22} & B_2 \end{pmatrix} =$$

$$\mathrm{rank}\,(\lambda I_{n-m} - A_{11}, A_{12}) + m = n$$

故 $\mathrm{rank}\,(\lambda I_{n-m} - A_{11}, A_{12}) = n - m$,故由文献[8]中的PBH判据可知$(A_{11}, A_{12})$能控。 证毕

2 主要结论

由引理1可知系统(1)式等价于如下系统

$$\begin{cases}\dot{x}_1(t) = A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + A_{d11}x_1(t-\tau(t)) + A_{d12}x_2(t-\tau(t)) + P_1F(x(t-\tau(t)),t)\\ E_1\dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + A_{d21}x_1(t-\tau(t)) + A_{d22}x_2(t-\tau(t)) + B_2(u + G(x(t),t)) + \\ \qquad P_2F(x(t-\tau(t)),t)\\ x(t) = \varphi(t), \forall t \in [-h, 0]\end{cases} \tag{5}$$

定义滑模面

$$S = -Kx_1 + x_2 = 0\ (\text{即 } x_2 = Kx_1) \tag{6}$$

将等式 $x_2 = Kx_1$ 代入系统(5)式中的第一式可得

$$\dot{x}_1(t) = (A_{11} + KA_{12})x_1(t) + (A_{d11} + KA_{d12})x_1(t-\tau(t)) + P_1F(x(t-\tau(t)),t) \tag{7}$$

对系统(5)式中 E_1,必定存在矩阵 M 使得 $|E_1 + M| \neq 0$,再令系统(5)式中的控制

$$u = -M\dot{x}_2(t) + u_e \tag{8}$$

u_e 为另外一个控制输入。将(8)式代入系统(5)式中第二式可得

$$\begin{aligned}(E_1 + B_2M)\dot{x}_2(t) = A_{21}x_1(t) + A_{22}x_2(t) + A_{d21}x_1(t-\tau(t)) + \\ A_{d22}x_2(t-\tau(t)) + B_2G(x(t),t) + P_2F(x(t-\tau(t)),t) + B_2u_e\end{aligned} \tag{9}$$

再令 $N = (E_1 + B_2M)^{-1}$,将(9)式两边同时左乘以 N,可以得到下式

$$\begin{aligned}\dot{x}_2(t) = NA_{21}x_1(t) + NA_{22}x_2(t) + NA_{d21}x_1(t-\tau(t)) + NA_{d22}x_2(t-\tau(t)) + \\ NB_2G(x(t),t) + NP_2F(x(t-\tau(t)),t) + NB_2u_e\end{aligned} \tag{10}$$

又由(6)式可得

$$\dot{S} = -K\dot{x}_1 + \dot{x}_2 \tag{11}$$

再令

$$\begin{aligned}u_e = -B_2^{-1}N^{-1}[(NA_{21} - KA_{11})x_1(t) + (NA_{22} - KA_{12})x_2(t) + (NA_{d21} - KA_{d11}) \times \\ x_1(t-\tau(t)) + (NA_{d22} - KA_{d12})x_2(t-\tau(t)) + (NP_2 - KP_1)F + m]\end{aligned} \tag{12}$$

通过上述分析,即由系统(5)式中的第一式以及(6)(12)式可以总结出以下定理。

定理1 若控制器(12)式中函数 m 满足 $m \geqslant \|N\|\,\|B_2\|\,\phi(x(t),t) + \beta$,其中 $\beta > 0$,则在假设1、2条件下,控制器(8)、(12)式可保证系统(1)式在有限时间内达到滑模面 $S = -Kx_1 + x_2 = 0$,并在达到之后,可保持在滑模面上运动。

证明 将(5)、(10)式代入(11)式可得

$$\begin{aligned}\dot{S} = -K[A_{11}x_1(t) + A_{12}x_2(t) + A_{d11}x_1(t-\tau(t)) + A_{d12}x_2(t-\tau(t)) + P_1F(x(t-\tau(t)),t)] + \\ NA_{21}x_1(t) + NA_{22}x_2(t) + NA_{d21}x_1(t-\tau(t)) + NA_{d22}x_2(t-\tau(t)) + \\ NB_2G(x(t),t) + NP_2F(x(t-\tau(t)),t) + NB_2u_e = \\ (NA_{21} - KA_{11})x_1(t) + (NA_{22} - KA_{12})x_2(t) + (NA_{d21} - KA_{d11})x_1(t-\tau(t)) + \\ (NA_{d22} - KA_{d12})x_2(t-\tau(t)) + NB_2G(x(t),t) + (NP_2 - KP_1)F(x(t-\tau(t)),t) + NB_2u_e\end{aligned}$$

最后由(12)式可得

$$\dot{S} = NB_2G(x(t),t) - m \leqslant \|N\|\,\|B_2\|\,\phi(x(t),t) - m \leqslant -\beta$$

故

$$S^{\mathrm{T}}\dot{S} \leqslant -\beta\|S\|$$

证毕

注 在控制器(8)、(12)式作用下,系统(1)式能够在有限时间内到达滑模面(6)式,并保持在滑模面上运动,由于滑动运动与控制 u 无关,这时仅需讨论状态方程(7)式的稳定性问题。

定理 2　对于满足假设条件 1,2 的系统(1)式,若在原点邻域内满足不等式

$$2\|x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1\|\delta(x(t-\tau(t)),t)\leqslant 2x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1x_1(t-\tau(t))$$

P_1 满足引理 1,T 满足(3)式,且存在正定矩阵 R,使得线性矩阵不等式 $\Xi<0$(即 Ξ 为负定矩阵),则状态方程(7)式在控制器(8)、(12)式作用下是渐近稳定的(即系统(1)式稳定)。

证明　构造 Lyapunov 泛函

$$V=x_1^{\mathrm{T}}(t)Tx_1(t)+\int_{t-\tau(t)}^{t}x_1^{\mathrm{T}}(s)Rx_1(s)\mathrm{d}s,R>0 \tag{13}$$

T 满足式 $T(A_{11}+A_{12}K)+(A_{11}+A_{12}K)^{\mathrm{T}}T=-I-(A_{d11}+A_{d12}K)^{\mathrm{T}}(A_{d11}+A_{d12}K)$。

将 V 沿着方程(7)式求导可得

$$\begin{aligned}\dot V=&2_1^{\mathrm{T}}(t)T\dot x_1(t)+x_1^{\mathrm{T}}(t)Rx_1(t)-(1-\dot\tau(t))x_1^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))Rx_1(t-\tau(t))=\\&2x_1^{\mathrm{T}}(t)T[(A_{11}+KA_{12})x_1(t)+(A_{d11}+KA_{d12})x_1(t-\tau(t))+P_1F(x(t-\tau(t)),t)]+\\&x_1^{\mathrm{T}}(t)Rx_1(t)-(1-\dot\tau(t))x_1^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))Rx_1(t-\tau(t))\leqslant\\&x_1^{\mathrm{T}}(t)[T(A_{11}+KA_{12})+(A_{11}+KA_{12})^{\mathrm{T}}T]x_1(t)+2x_1^{\mathrm{T}}(t)T(A_{d11}+KA_{d12})x_1(t-\tau(t))+\\&2x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1F(x(t-\tau(t)),t)+x_1^{\mathrm{T}}(t)Rx_1(t)-x_1^{\mathrm{T}}(t-\tau(t))Rx_1(t-\tau(t))\end{aligned}$$

又因为

$$\begin{aligned}&2x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1F(x(t-\tau(t)),t)\leqslant 2\|x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1\|\,\|F(x(t-\tau(t)),t)\|\leqslant\\&2\|x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1\|\delta(x(t-\tau(t)),t)\leqslant 2x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1x_1(t-\tau(t))\end{aligned}$$

综上可得 V 沿方程(7)式的导数为 $\dot V\leqslant\eta^T\Xi\eta$,其中

$$\Xi=\begin{pmatrix}\Xi_1&\Xi_2\\ *&\Xi_3\end{pmatrix},\Xi_1=T(A_{11}+A_{12}K)+(A_{11}+A_{12}K)^{\mathrm{T}}T+R$$

$$\Xi_2=T(P_1+A_{d11}+A_{d12}K),\Xi_3=-R,\eta=col\{x_1(t),x_1(t-\tau(t))\}$$

故当 $\Xi<0$ 时,滑模方程(7)式是渐近稳定的。　　证毕

3 数值例子

为说明上文结果的有效性,考虑与系统(1)式相符的三阶退化时滞系统

$$\begin{pmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&0\end{pmatrix}\dot x(t)=\begin{pmatrix}1&1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}x(t)+\begin{pmatrix}2&0&3\\-1&1&1\\1&1&0\end{pmatrix}x(t-\tau(t))+$$
$$\begin{pmatrix}1\\-1\\-1\end{pmatrix}(u(t)+G(x(t),t))+F(x(t-\tau(t)),t))$$

其中 $\|G(x(t),t)\|\leqslant x(t)\mathrm{e}^{-x(t)}$,$\|F(x(t-\tau(t)),t)\|\leqslant 3x^2(t-\tau(t))\mathrm{e}^{-2x(t-\tau(t))}$ 容易验证,定理条件均满足。

可以取 $P=\begin{pmatrix}1&1&0\\0&1&-1\\0&0&1\end{pmatrix}$,$Q=\begin{pmatrix}1&-1&0\\0&1&0\\0&0&1\end{pmatrix}$。根据引理 1 可知,系统等价于如下形式

$$\dot x_1(t)=\begin{pmatrix}1&1\\0&1\end{pmatrix}x_1(t)+\begin{pmatrix}0\\-1\end{pmatrix}x_2(t)+\begin{pmatrix}1&0\\-2&2\end{pmatrix}x_1(t-\tau(t))+\begin{pmatrix}4\\1\end{pmatrix}x_2(t-\tau(t))+F_1(x(t-\tau(t)),t)$$

$$0=x_2(t)+(1\quad 0)x_1(t-\tau(t))-(u+G(x(t),t))+F_2(x(t-\tau(t)),t)$$

其中 $F_1=P_1F$,$F_2=P_2F$,$x_1(t)=\begin{pmatrix}x_{11}(t)\\x_{12}(t)\end{pmatrix}$,取 $K=(12\quad 8)$,可以得到 $A_{11}+A_{12}K=\begin{pmatrix}1&1\\-12&-7\end{pmatrix}$ 稳定(即 $\sigma(A_{11}$

$+A_{12}K)\subset C^{-}$),且 $A_{d11}+A_{d12}K=\begin{pmatrix}49 & 32\\ 10 & 10\end{pmatrix}$ 可逆,再取 $M=-1$,则可得定理 1 结果。且易证系统在控制作用下渐近稳定。此时

$$u=\dot{x}_2(t)-12x_{11}(t)-20x_{12}(t)+9x_2(t)+5x_{11}(t-\tau)-16x_{12}(t-\tau)-56x_2(t-\tau)+x(t)\mathrm{e}^{-x(t)}+9x_2^2(t-\tau)\mathrm{e}^{-2x_2(t-\tau)}-12x_{11}^2(t-\tau)\mathrm{e}^{-2x_{11}(t-\tau)}-20x_{12}^2(t-\tau)\mathrm{e}^{-2x_{12}(t-\tau)}+m$$

4 结语

文章讨论了同时含有非线性匹配与依赖时滞的不匹配扰动项的线性退化时滞系统的滑模控制问题,利用退化时滞系统的等价形式及有效滑模面的设计,得到了该类系统渐近稳定的充分条件。将结论以线性矩阵不等式的形式给出,易于求解和验证。数值例子也说明了结论的有效性。

参考文献:

[1] Yan X G, Spurgeon S K, Edwards C. On discontinuous static output feedback control for linear systems with nonlinear disturances[J]. Systems and Control Letters, 2009, 58: 314-319.

[2] 卜春霞,侯小丽,程桂芳. 奇异不确定时滞系统的滑动模态控制[J]. 河南科学, 2004, 22(2): 159-162.

[3] Gouaisbaut F, Dambrine M, Prichard J P. Robust control of delay systems: a sliding mode control design via LMI[J]. Systems and Control Letters, 2002, 46: 219-230.

[4] Chan M L, Tao C W, Lee T T. Sliding mode controller for linear systems with mismatched time-varing uncertainties[J]. Journal of The Franklin Institute, 2000, 337: 105-115.

[5] Roh Y H, Oh J H. Robust stabilization of uncertain input-delay systems by sliding mode control with delay compensation[J]. Technical Communique, 1999, 35: 1861-1865.

[6] Dai L L. Singular Control Systems[M]. Berlin, Heidellberg: Springer-Verlag, 1989.

[7] 许可康. 广义状态空间系统的强能控性和强能观性[J]. 控制理论与应用, 1985, 2(2): 82-91.

[8] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.

Sliding Mode Control for Time-Delay Degenerate Systems with Nonlinear Perturbations

FANG Yuan

(School of Mathematics and Computational Science, Fuyang Teachers College, Fuyang Anhui 236037, China)

Abstract: This paper discusses sliding mode control for degenerate time lag systems. It's different from other article that systems in this paper with both matched and mismatched nonlinear disturbances $G(x(t),t)$ and $F(x(t-\tau(t)),t)$ which contain delay $\tau(t)$, $0\leqslant\tau(t)\leqslant h$. Based on strong controllable degenerate systems equivalent transformation, the system is transformed to an equivalent form. After that, valid controller $u=-M\dot{x}_2(t)+u_e$ drives system to the sliding surface $S=-Kx_1+x_2=0$ and maintains motion on it quickly. At last, under the condition $2\parallel x_1^t(t)\mathrm{T}P_1\parallel\delta(x(t-\tau(t)),t)\leqslant 2x_1^{\mathrm{T}}(t)TP_1x_1(t-\tau(t))$, and via Lyapunov functions V. we obtained sufficient conditions of stabilization which LMI $\Xi<0$. Numerical examples demonstrate the efficiency of the result in this article.

Key words: degenerate; time lag system; matched; mismatched; sliding mode control; stabilization

(责任编辑 黄 颖)