第 22 卷 第 3 期 Vol. 22 No. 3
控 制 与 决 策 Control and Decision
2007 年 3 月 Mar. 2007

文章编号: 1001-0920(2007)03-0333-04

一类具有变时滞不确定分布参数系统的滑动模控制

邢海龙[1], 高存臣[1], 曾宪武[2], 李延波[1]
(1. 中国海洋大学 数学系, 山东 青岛 266071; 2. 青岛科技大学 信息学院, 山东 青岛 266042)

摘 要: 研究一类不确定变时滞分布参数系统的滑动模控制问题. 首先设计一种无记忆功能的变结构控制器; 然后分析了在滑动模切换面上滑动模控制系统关于不确定量的不变性特征; 最后给出了从任意初始位置出发的轨线到达滑动模态区的时间估计. 研究表明, 所设计的控制器结构简单, 容易实现.

关键词: 不确定分布参数系统; 滑动模控制; 变时滞
中图分类号: TM711 **文献标识码**: A

Sliding mode control for a class of uncertain distributed parameter systems with time-varying delay

XING Hai-long[1], *GAO Cun-chen*[1], *ZENG Xian-wu*[2], *LI Yan-bo*[1]
(1. Department of Mathematics, Ocean University in China, Qingdao 266071, China; 2. College of Information, Qingdao University of Science Technology, Qingdao 266042, China. Correspondent: XING Hai-long, E-mail: xhl905212@sina.com)

Abstract: The sliding mode control problems of a class of uncertain distributed parameter systems with time-varying delay are investigated. A non-memory variable structure controller is designed. The invariant characteristic about uncertainties of the sliding mode control system on the sliding surface is analysed and the approximate time estimate from any initial state to sliding manifolds is obtained. Experimental results show the simple stucture and the feasibility of the proposed controller.

Key words: Uncertain distributed parameter systems; Sliding mode control; Time-varying delay

1 引 言

变结构控制理论及应用研究在近 20 年来, 受到国内外控制界的普遍重视. 由于它具有滑动模的不变性, 即系统一旦进入滑动模运动, 在一定条件下, 就对外界干扰及系统参数变化具有不变性[1-3], 已广泛应用于机器人、飞行器、电力动力系统过程控制等许多领域, 成为研究不确定控制对象的一个重要手段. 自 20 世纪 80 年代, Orlov 等[4]提出热加工过程中的抛物型系统的控制模型, 并设计了变结构控制器以来, 分布参数系统的变结构控制研究受到了众多学者的关注. 1998 年, 刘永清等[5]对一类滞后分布参数系统给出了变结构控制器的设计方案. 近年来, 崔宝同等[6,7]又对直接由偏微分方程所描述的时滞分布参数系统滑动模控制进行了研究. 然而, 关于直接由偏微分方程所描述的不确定时滞分布参数系统滑动模控制的研究工作甚少. 文献[8]研究了一类常时滞不确定分布参数系统的变结构控制问题, 设计了包含有时滞项的变结构控制器. 含有时滞项的控制器通常会给实际的工程设计带来难度, 增加设计成本, 同时, 实际控制系统的时滞问题大多是时变的, 因此, 本文研究一类较为一般的变时滞不确定分布参数系统的变结构控制问题. 首先设计了无记忆功能的变结构控制器; 然后分析了在滑动模切换面上, 滑动模控制系统关于不确定量的不变性特征; 最后给出了从任意初始位置出发的轨线到达滑动模态区的时间估计.

2 系统模型的描述及主要引理

本文考虑不确定时滞分布参数控制系统

$$\frac{\partial w(x,t)}{\partial t} = D\Delta w(x,t) + (A+\delta A(t))w(x,t) + Gw(x,t-\tau(t)) + Bu(x,t) \tag{1}$$

收稿日期: 2005-11-22; 修回日期: 2006-02-20.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60574005); 青岛市自然科学基金项目(04-2-32-98).
作者简介: 邢海龙(1969—), 男, 黑龙江桦川人, 博士生, 从事控制理论与应用研究; 高存臣(1956—), 男, 山东莱阳人, 教授, 博士生导师, 从事控制系统理论与应用研究.

的变结构控制问题. 这里 $(x,t)\in\Omega\times R^{+}$, $D\geq 0$, $0<\tau(t)<\tau$; A, G 和 B 是已知的具有相应阶数的常数矩阵; 矩阵 B 是列满秩的; $\delta A(x,t)$ 为不确定项; $\Omega=\{x, \|x\|<l<\infty\}\in R^{m}$ 是具有光滑边界 $\partial\Omega$ 的有界区域; $w(x,t)\in R^{n}$, $u(x,t)\in R^{m}$ 分别是状态函数和控制函数; $\Delta=\sum_{i=1}^{m}\frac{\partial^{2}}{\partial x_{i}^{2}}$ 为 Ω 上的 Laplace 扩散算子.

考虑初边值条件

$$w(x,t)=\phi(x,t),(x,t)\in\Omega\times[-\tau,0], \tag{2}$$

$$w(x,t)=0,(x,t)\in\partial\Omega\times[-\tau,+\infty), \tag{3a}$$

$$\frac{\partial w(x,t)}{\partial N}=0,(x,t)\in\partial\Omega\times[-\tau,+\infty). \tag{3b}$$

其中: N 是 $\partial\Omega$ 上的单位外法向量, $\phi(x,t)$ 是适当的光滑函数.

根据已知条件, 可设 $\det(B_2)\neq 0$, 其中 $B=\begin{bmatrix}B_1\\B_2\end{bmatrix}$, $B_1\in R^{(n-m)\times m}$, $B_2\in R^{m\times m}$. 对系统(1) 作非奇异线性变换 $Tp(x,t)=w(x,t)$, 其中

$$T^{-1}=\begin{bmatrix}I_{n-m} & -B_1B_2^{-1}\\ 0 & I_m\end{bmatrix}.$$

显然 $T^{-1}B=\begin{bmatrix}0\\B_2\end{bmatrix}$, 于是状态方程转化为

$$\begin{aligned}\frac{\partial p(x,t)}{\partial t}=&\bar{D}\Delta p(x,t)+\bar{A}p(x,t)+\\&\bar{G}p(x,t-\tau(t))+\\&\delta\bar{A}(t)p(x,t)+\bar{B}u(x,t).\end{aligned} \tag{4}$$

其中

$$\bar{D}=T^{-1}DT=D,\ \bar{A}=T^{-1}AT,$$
$$\bar{G}=T^{-1}GT,\ \delta\bar{A}(t)=T^{-1}\delta A(t)T,$$
$$\bar{B}=T^{-1}B=(0\quad B_2)^{\mathrm{T}}.$$

再记

$$\bar{A}=\begin{bmatrix}A_{11} & A_{12}\\A_{21} & A_{22}\end{bmatrix},\ \bar{G}=\begin{bmatrix}G_{11} & G_{12}\\G_{21} & G_{22}\end{bmatrix},$$

$$\delta\bar{A}(t)=\begin{bmatrix}\delta A_1(t)\\\delta A_2(t)\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\delta A_{11}(t) & \delta A_{12}(t)\\\delta A_{21}(t) & \delta A_{22}(t)\end{bmatrix}.$$

其中

$$A_{11},G_{11},\delta A_{11}(t)\in R^{(n-m)\times(n-m)},$$
$$A_{12},G_{12},\delta A_{12}(t)\in R^{(n-m)\times m},$$
$$\delta A_1(t)\in R^{(n-m)\times n},\delta A_2(t)\in R^{m\times n},$$
$$A_{21},G_{21},\delta A_{21}(t)\in R^{m\times(n-m)},$$
$$A_{22},G_{22},\delta A_{22}\in R^{m\times m}.$$

这样系统(4) 可转化为

$$\begin{aligned}\frac{\partial p_1(x,t)}{\partial t}=&D\Delta p_1(x,t)+A_{11}p_1(x,t)+\\&A_{12}p_2(x,t)+G_{11}p_1(x,t-\tau(t))+\\&G_{12}p_2(x,t-\tau(x))+\\&\delta A_1(t)p(x,t),\\ \frac{\partial p_2(x,t)}{\partial t}=&D\Delta p_2(x,t)+A_{21}p_1(x,t)+\\&A_{22}p_2(x,t)+G_{21}p_1(x,t-\tau(t))+\\&G_{22}p_2(x,t-\tau(t))+\\&\delta A_2(t)p(x,t)+B_2u(x,t).\end{aligned} \tag{5}$$

其中: $p_1(x,t)\in R^{n-m}$, $p_2(x,t)\in R^{m}$. 由文献[6] 易知, $\delta A_2(t)$ 满足下面引理中的匹配条件:

引理 1 对于时变不确定矩阵 $\delta A_2(t)$, 总存在矩阵 $\zeta(t)\in R^{m\times n}$, 满足匹配条件

$$\delta A_2(t)=B_2\zeta(t). \tag{6}$$

由此, 可设 $\|\zeta(t)p(x,t)\|\leq\gamma$. 并假设时变不确定矩阵具有如下结构:

$$\delta A_1(t)=HF(t)E. \tag{7}$$

其中: H, E 为常数矩阵, 不确定矩阵 $F(t)\in R^{r_1\times r_2}$, 满足关系式 $F^{\mathrm{T}}(t)F(t)\leq I$. 这里 I 为具有相应阶数的单位矩阵, 要求 E 的秩满足

$$\mathrm{rank}(E)=\max\{\mathrm{rank}(\delta A_1(t))\},$$

而且 H 和 $F(t)$ 没有零行向量和零列向量. 本文将用到下面的引理:

引理 2 假设 $X,Y\in R^{n}$. 如果 $F^{\mathrm{T}}(t)F(t)\leq I$, 则有

$$2X^{\mathrm{T}}F(t)Y<X^{\mathrm{T}}X+Y^{\mathrm{T}}Y.$$

设切换函数为

$$S(x,t)=Cp(x,t)=C_1p_1(x,t)+C_2p_2(x,t), \tag{8}$$

其中: $C_1\in R^{m\times(n-m)}$, $C_2\in R^{m\times m}$ 皆为待定矩阵. 于是, 切换面为

$$S_0=Cp(x,t)=C_1p(x,t)+C_2p(x,t)=0. \tag{9}$$

当选取 C_2 为可逆矩阵时, 则有 $p_2(x,t)=-C_2^{-1}C_1p_1(x,t)$. 代入式(5), 可得滑动模方程为

$$\begin{aligned}\partial p_1(x,t)/\partial t=&\\ &D\Delta p_1(x,t)+A_{11}p_1(x,t)-\\&A_{12}C_2^{-1}C_1p_1(x,t)+G_{11}p_1(x,t-\tau(t))-\\&G_{12}C_2^{-1}C_1p_1(x,t-\tau(x))+\\&\delta A_{11}(t)p_1(x,t)-\delta A_{12}(t)C_2^{-1}C_1p_1(x,t).\end{aligned} \tag{10}$$

3 滑动模控制器的设计

定理 1 假设系统(1) 的不确定项满足匹配条件(6), 如果存在矩阵 C, 使得滑动系数匹配条件

$$\mathrm{rank}(C^{\mathrm{T}})=\mathrm{rank}(C^{\mathrm{T}}\mid E^{\mathrm{T}}) \tag{11}$$

成立, 并且矩阵 C_2B_2 是可逆的, 则选取无记忆功能的滑动模控制器为

$$\begin{aligned}u(x,t)=&\\&-(C_2B_2)^{-1}C_1(A_{11}p_1(x,t)+A_{12}p_2(x,t))-\end{aligned}$$

$$(C_2B_2)^{-1}C_2(A_{21}p_1(x,t)+A_{22}P_2(x,t))-0.5(C_2B_2)^{-1}(C_1HH^{\mathrm T}C_1^{\mathrm T}S(x,t)+\bar E^{\mathrm T}\bar ES(x,t))-\alpha(C_2B_2)^{-1}S(x,t)+(C_2B_2)^{-1}u_m(x,t)-(C_2B_2)^{-1}\rho\frac{S(x,t)}{\|S(x,t)\|^{\sigma}}\tag{12}$$

时,整个切换面 S_0 为滑动模态区. 其中

$$u_m(x,t)=-\gamma\frac{B_2^{\mathrm T}C_2^{\mathrm T}S(x,t)}{\|B_2^{\mathrm T}C_2^{\mathrm T}S(x,t)\|},\tag{13}$$

$$\alpha-D\ge\|C\bar G\bar C\|,\tag{14}$$

$$E=\bar EC,\ \bar CC=I,\tag{15}$$

$$\rho>0,\sigma>0.$$

证明　令

$$\Phi(x,t)=S^{\mathrm T}(x,t)\Delta S(x,t)-S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t),\quad x\in\Omega,$$

由式(5)～(8),对 $S(x,t)\ne0$,有

$$S^{\mathrm T}(x,t)\frac{\partial S(x,t)}{\partial t}=S^{\mathrm T}(x,t)\Big(C_1\frac{\partial p_1(x,t)}{\partial t}+C_2\frac{\partial p_2(x,t)}{\partial t}\Big)=DS^{\mathrm T}(x,t)\Delta C_1p(x,t)+S^{\mathrm T}(x,t)C_1[A_{11}p_1(x,t)+A_{12}p_2(x,t)]+C_1G_{11}p_1(x,t-\tau(t))+S^{\mathrm T}(x,t)C_1G_{12}p_2(x,t-\tau(t))+S^{\mathrm T}(x,t)C_1HF(t)Ep(x,t)+DS^{\mathrm T}(x,t)\Delta C_2p_2(x,t)+DS^{\mathrm T}(x,t)\Delta C_2p_2(x,t)+S^{\mathrm T}(x,t)C_2[A_{21}p_1(x,t)+A_{22}p_2(x,t)]+S^{\mathrm T}(x,t)C_2G_{21}p_1(x,t-\tau(t))+S^{\mathrm T}(x,t)C_2G_{22}p_2(x,t-\tau(t))+S^{\mathrm T}(x,t)C_2B_2\zeta(t)p(x,t)+S^{\mathrm T}(x,t)C_2B_2(x,t).$$

由式(13)及 $\|\zeta(x,t)p(x,t)\|\le\gamma$,当 $S(x,t)\ne0$ 时,有 $S^{\mathrm T}(x,t)[C_2B_2\zeta(t)p(x,t)+C_2B_2u_m]\le0$. 从而,由式(15),(12)并利用引理 2,得到

$$\frac{S^{\mathrm T}(x,t)\partial S(x,t)}{\partial t}\le D\Phi(x,t)-(\alpha-D)S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t)+S^{\mathrm T}(x,t)C\bar G\bar CS(x,t-\tau(t)).\tag{16}$$

下面证明对任意 $x\in\Omega$,有 $\Phi(x,t)\le0$. 为此,引入辅助函数

$$V(x,t)=S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t)+\|C\bar G\bar C\|\int_0^tS^{\mathrm T}(x,s)S(x,s)\mathrm ds-\|C\bar G\bar C\|\int_0^tS^{\mathrm T}(x,s-\tau(s))S(x,s-\tau(s))\mathrm ds.\tag{17}$$

沿式(16)对上式求导,则有

$$\frac{\partial}{\partial t}V(x,t)=2S^{\mathrm T}(x,t)\frac{\partial}{\partial t}S(x,t)+\|C\bar G\bar C\|S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t)-\|C\bar G\bar C\|S^{\mathrm T}(x,t-\tau(t))S(x,t-\tau(t))\le2D\Phi(x,t)-2(\alpha-D)S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t)+2\|C\bar G\bar C\|S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t).\tag{18}$$

记　$\Omega_1=\{x\mid\Phi(x,t)>0,x\in\Omega\}$,
　　$\Omega_2=\{x\mid\Phi(x,t)\le0,x\in\Omega\}$.

假设 Ω_1 是非空的,显然有 $\Phi(x,t)=0,x\in\partial\Omega_1$,$\partial\Omega_1=(\partial\Omega\cap\partial\Omega_1)\cup(\Omega\cap\partial\Omega_1)$. 于是有

$$0<\int_{\Omega_1}\Phi(x,t)\mathrm dt=\int_{\Omega_1}S^{\mathrm T}(x,t)\Delta S(x,t)\mathrm dx-\int_{\Omega_1}S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t)\mathrm dx=S^{\mathrm T}(x,t)\nabla S(x,t)\mid_{\partial\Omega_1}-\int_{\Omega_1}\nabla S^{\mathrm T}(x,t)\nabla S(x,t)\mathrm ds-\int_{\Omega_1}S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t)\mathrm ds.\tag{19}$$

对任意 $x\in\partial\Omega_1=(\partial\Omega\cap\partial\Omega_1)\cup(\Omega\cap\partial\Omega_1)$,显然 $x\in\partial\Omega\cap\partial\Omega_1$,或者 $x\in\Omega\cap\partial\Omega_1$.

1) 若 $x\in\partial\Omega\cap\partial\Omega_1$,则 $x\in\partial\Omega$. 于是,利用边值条件(3a)可得 $S^{\mathrm T}(x,t)\nabla S(x,t)\mid_{\Omega_1}=0$,这与式(19)矛盾.

2) 若 $x\in\Omega\cap\partial\Omega_1$,则 $x\in\partial\Omega_1$. 由于 $\Phi(x,t)=0(x\in\partial\Omega_1)$,则从 $\Phi(x,t)$ 的定义,得 $\Delta S(x,t)=S(x,t),x\in\partial\Omega_1$,将其代入式(18),得

$$\frac{\partial}{\partial t}V(x,t)\le-2(\alpha-D)S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t)+2\|C\bar G\bar C\|S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t),\ x\in\partial\Omega_1.\tag{20}$$

记 $Y(x,t)=S^{\mathrm T}(x,t)S(x,t),x\in\partial\Omega_1,t\in[-\tau,+\infty)$. 因此,结合式(16)与(19),对任意 $x\in\partial\Omega_1$,$t\ge0$,有

$$Y(x,t)\le Y(x,0)\exp\{-[2(\alpha-D)-\|C\bar G\bar C\|]t\}+\|C\bar G\bar C\|\int_0^t\exp\{-[2(\alpha-D)-\|C\bar G\bar C\|(t-s)]\}Y(x,s-\tau(s))\mathrm ds.\tag{21}$$

由式(14)得

$$\frac{\|C\bar G\bar C\|}{2(\alpha-D)-\|C\bar G\bar C\|}<1,$$

于是存在 $k > 0$,使得函数

$$g(t) = 1 - \frac{\| C\bar{G}\bar{C} \| e^{\tau t}}{2(\alpha - D) - \| C\bar{G}\bar{C} \| - t}$$

在区间 $[0, k)$ 上连续,并且 $0 < g(t) < 1$. 现在取定一个 $q \in (0, k)$,使得

$$2(\alpha - D) - \| C\bar{G}\bar{C} \| - q > 0.$$

式(21) 两端同乘以 e^{qt},当 $x \in \partial\Omega_1$, $t \geq 0$ 时,有

$$Y(x,t)e^{qt} \leq$$
$$Y(x,0) + (1 - g(q)) \sup_{-\tau\leq s\leq t}\{ Y(x,s)e^{qs} \}, \quad (22)$$

于是,由函数 $\sup_{-\tau\leq s\leq t}\{ Y(x,s)e^{qs} \}$ 的性质,有

$$\sup_{-\tau\leq s\leq t}\{ Y(x,s)e^{qs} \} \leq$$
$$2 \sup_{-\tau\leq s\leq 0}\{ Y(x,s)e^{qs} \} +$$
$$(1 - g(q)) \sup_{-\tau\leq s\leq t}\{ Y(x,s)e^{qs} \} \leq$$
$$\frac{2}{g(q)} \sup_{-\tau\leq s\leq 0}\{ Y(x,s)e^{qs} \}. \quad (23)$$

从而,当 $x \in \partial\Omega_1$, $t \geq 0$ 时,有

$$Y(x,t) \leq \frac{2e^{-qt}}{g(q)} \sup_{-\tau\leq s\leq 0}\{ Y(x,s)e^{qs} \}. \quad (24)$$

所以 $\lim_{t\to+\infty} Y(x,t) = 0$, $x \in \partial\Omega_1$. 又因为 $\Delta S(x,t) = S(x,t)$, $x \in \partial\Omega_1$,故有

$$\lim_{t\to+\infty} \| \Delta S(s,t) \| = \lim_{t\to+\infty} \| S(x,t) \| = 0,$$
$$x \in \partial\Omega_1.$$

因此,当 $x \in \partial\Omega_1$,且 t 充分大时, $\| \Delta S(x,t) \|$ 是充分小的. 从而 $\nabla S(x,t)$ 在 $x \in \partial\Omega_1 \times [0, +\infty)$ 上是有界的. 于是,当 t 充分大时, $S^{\mathrm{T}}(x,t) \nabla S(x,t) |_{\partial\Omega_1}$ 可以充分小. 这与式(18) 矛盾. 所以集合 Ω_1 是空集. 这就证明了对任意的 $x \in \Omega$,有 $\Phi(x,t) \leq 0$.

对于 $s(x,t) \neq 0$,注意到对任意的 $x \in \Omega$,有 $\Phi(x,t) \leq 0$,则由式(16) 可得

$$\frac{S^{\mathrm{T}}(x,t)\partial S(x,t)}{\partial t} \leq$$
$$(\alpha - D) \| S(x,t) \| \Big(\frac{\| C\bar{G}\bar{C} \|}{\alpha - D} \| S(x,t -$$
$$\tau(t)) \| - \| S(x,t) \| \Big). \quad (25)$$

另外,结合式(24),当 $x \in \Omega$, $t \geq 0$ 时,有

$$\| S(x,t - \tau(t)) \|^2 = Y(x,t - \tau(t)) \leq$$
$$\frac{2e^{-\tau q}}{g(q)} \sup_{-\tau\leq s\leq 0}\{ Y(x,s)e^{qs} \} \equiv (H(x))^2.$$

又由式(25),当 $x \in \Omega$, $t \geq 0$ 时,可得 $\| S(x,t) \| \leq H(x)$. 取 $r = \| C\bar{G}\bar{C} \| / (\alpha - D)$,由定理的已知条件可知 $0 < r < 1$. 进而可得

$$\frac{1}{\alpha - D} \| C\bar{G}\bar{C} \| \| S(x,t - \tau(t)) \| \leq rH(x). \quad (26)$$

以下与文献[5] 类似,采用递推方法,不难证明:当 $\| S(x,t) \| > 0$ 时,有 $S^{\mathrm{T}}(x,t) \frac{\partial S(x,t)}{\partial t} < 0$. 限于篇幅,不作详细证明. 从而整个切换面 S_0 为滑动模态区. □

4 滑动模控制系统的不变性特征

定理 2 设变时滞不确定分布参数控制系统(4) 的不确定项满足匹配条件(6) 和滑模系数匹配条件(11),则在滑动模切换面 S_0 上,滑动模控制系统(4) 关于不确定量具有不变性.

证明 参照文献[7] 的方法,此定理即可类似得证. 详细过程略. □

上述分析表明,在定理 2 的条件下,滑动模方程变为

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = D\Delta p_1(x,t) +$$
$$(A_{11} - A_{12} C_2^{-1} C_1) p_1(x,t) +$$
$$(G_{11} - G_{12} C_2^{-1} C_1) p_1(x, t - \tau(t)). \quad (27)$$

显然,此时滑动模方程(27) 与不确定量无关. 滑动模方程(27) 的渐近稳定性分析见文献[6].

5 到达滑动模态区的时间估计

定理 3 从任意初始位置 $p(x,0)$ 出发的轨线 $p(x,t)$ 均于有限时间 T 内到达滑动模态区 S_0 上,且时间 T 有如下估计:

$$T < \frac{1}{\varphi} \| C_1 P_1(x,0) + C_2 P_2(x,0) \|^{\sigma}.$$

证明 参照文献[5] 的方法,此定理即可类似得证. 详细过程略. □

6 结 论

本文利用辅助函数方法,研究了一类变时滞不确定分布参数控制系统的变结构控制器问题. 设计了无记忆功能的滑动模控制器,分析了在滑动模切换面上,滑动模控制系统关于不确定量具有不变性特征,给出了从任意初始状态出发的轨线于有限时间内到达滑动模态的时间估计. 相对文献[8]而言,所研究的系统具有一般性,设计的控制器结构简单、容易实现.

参考文献(References)

[1] Slotine J E, Li W. Applied non-linear control[M]. NJ: Prentice-Hall, 1991.

[2] Tang Y. Terminal sliding mode control for rigid robots [J]. Automatica, 1998, 34(1): 51-56.

[3] Utkin V I. Sliding modes in control[C]. Optimization. Berlin: Springer, 1992.

[4] Orlov Y V, Utkin V I. Sliding mode control in indefinite dimensional systems[J]. Automatica, 1987, 23(6): 753-757.

(下转第 348 页)

[2] Krishna K B, Kabore P. On the design of integral and proportional integral observers [C]. Proc of the American Control Conferrence. Chicago, 2000: 3725-3729.

[3] Duan G R, Pattoton R J. Robust fault detection using Luenberger-type unknown input observers: A parametric approach[J]. Int J System Science, 2001, 32(4): 533-540.

[4] Shafai B, Nork S. Simutaneous disturbance attenuation and fault detection using proportional integral obsevers [C]. Proc of the American Control Conf. Alaska, 2002: 1647-1649.

[5] Chu D L. Disturbance decoupled observer design for linear time-invariant systems: A matrix pencil approach [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45(8): 1569-1575.

[6] Magham P G. Model refinement using eigensystem assignment[J]. J of Guidance, Control and Dynamics, 2000, 23(4): 683-692.

[7] Duan G R, Wang G S, Liu G P. Eigenstructure assignment in a class of second-order linear systems: A complete parametric approach [C]. Proc of the CACSCUK. Manchester, 2002: 89-96.

[8] Wang G S, Duan G R. Robust pole assignment via P-D feedback in a class of second-order dynamic systems [C]. Int Conf of Automation, Robots and Computer Vision. Kunming, 2004: 1152-1156.

[9] Wang G S, Liang B, Duan G R. Reconfiguring second-order dynamic systems via state feedback eigenstructure assignment[J]. Int J of Control, Automation, and Systems, 2005, 3(1): 109-116.

[10] Duan G R, Wang G S. Two analytical general solutions of equation $EVJ^2 - AVJ - CV = BW$[J]. J of Harbin Institute of Technology, 2005, 37(1): 1-4.

[11] Duan G R, Wang G S. Eigenstructure assignment in a class of second-order descriptor linear systems: A complete parametric approach[J]. Int J of Automation and Computing, 2005, 2(1): 1-5.

(上接第 336 页)

[5] 刘永清, 谢胜利. 滞后分布参数系统的稳定与变结构控制[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998.
(Liu Y Q, Xie S L. Stability and variable structure control of distributed parameter systems with time delay [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1998.)

[6] 崔宝同, 邓飞其. 时滞分布参数系统的指数渐近稳定性[J]. 系统工程与电子技术, 2003, 25(5): 579-583.
(Cui B T, Deng F Q. Exponential asymptotical stability for distributed parameter systems with time delays[J]. Systems Engineering and Electronics, 2003, 25(5): 579-583.)

[7] 崔宝同, 邓飞其. 不确定时滞分布参数系统的滑动模控制[J]. 计算技术与自动化, 2003, 122(12): 21-24.
(Cui B T, Deng F Q. Sliding mode control for uncertain distributed parameter systems with delays [J]. Computing Technology and Automation, 2003, 122(12): 21-24.)

[8] 周国鹏, 邓飞其. 一类时滞分布参数系统的指数渐近稳定性[J]. 武汉科技大学学报, 2004, 27(2): 211-213.
(Zhou G P, Deng F Q. Exponential asymptotical stability for a class of distributed parameter systems with time delays[J]. J of Wuhan University of Science and Technology, 2004, 27(2): 211-213.)

(上接第 340 页)

[10] Hafeez K, Zhang Y B, Malak N. Core competence for sustainable competitive advantage: A structured methodology for identifying core competence[J]. IEEE Trans on Engineering Management, 2002, 49(1): 28-35.

[11] 朱剑英. 智能系统非经典数学方法[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
(Zhu J Y. Non-classical mathematics for intelligent systems[M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2001.)

(上接第 344 页)

[6] 苏玉鑫, 段宝岩. 一种新型非线性 PID 控制器[J]. 控制与决策, 2003, 18(1): 126-128.
(Su Y X, Duan B Y. A new class of nonlinear PID controller[J]. Control and Decision, 2003, 18(1): 126-128.)

[7] 鄂加强. 铜精炼炉操作优化与智能控制应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
(E J Q. Application and study on operation optimum and intelligent control of the copper refining anode furnace [D]. Changsha: Central South University, 2004.)