

文章编号: 1001-0920(2008)04-0455-05

# 不确定多变量系统的高阶滑模控制

王艳敏, 冯 勇, 韩向伟

(哈尔滨工业大学 电气工程系, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 针对一类系统矩阵和输入矩阵存在不确定性的多变量系统, 结合微分估计器技术和极点配置技术, 提出一种二阶非奇异终端滑模分解控制方法. 所提方法适用于维数较高系统, 可简化控制器设计, 消除控制信号的高频抖动, 实现系统的鲁棒递阶控制. 仿真结果验证了所提方法的有效性.

**关键词:** 多变量系统; 终端滑模控制; 零动态系统; 鲁棒控制

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## High-order sliding mode control of uncertain multivariable systems

WANG Yan-min, FENG Yong, HAN Xiang-wei

(Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: WANG Yan-min, E-mail: amywanghebsz@yahoo.com.cn)

**Abstract:** Based on a derivative estimator and eigenvalue configuration, a second-order nonsingular terminal sliding mode decomposed control method is proposed for a class of multivariable systems with uncertain systemic matrix and input matrix. The proposed method is suitable for high-dimensional multivariable systems, which can simplify the design of controller, eliminate the chattering phenomenon and realize robust hierarchical control. The simulation results show the effectiveness of the design method.

**Key words:** Multivariable systems; Terminal sliding mode; Zero-dynamics system; Robust control

### 1 引 言

抖振问题一直是制约滑模控制理论在实际系统应用中的突出问题. 以往的解决方法是用平滑函数或饱和函数取代符号函数, 但降低了系统的控制性能<sup>[1,2]</sup>. 近年来, 如何研究一种既能保证系统的鲁棒性, 又能实现连续控制的高阶滑模控制方法, 成为一个研究热点<sup>[3-6]</sup>. 文献[3]利用螺旋切换算法和微分估计技术设计了任意阶高阶滑模控制器, [4]利用时间最优技术提出一种二阶滑模控制律, [5]基于 Lyapunov 稳定性理论提出一种高阶滑模控制方法, [6]利用滤波器技术构造了一种二阶滑模控制器.

本文针对一类系统矩阵和输入矩阵存在不确定性的多变量系统, 通过状态变换和去耦合处理, 将系统简化为解耦能控标准型, 并结合微分估计器技术和极点配置技术, 提出一种二阶非奇异终端滑模分解控制方法. 仿真结果表明, 所提方法适用于高维多变量系统, 可简化控制器设计, 提高系统的动态响应速度, 实现系统鲁棒递阶控制, 并有效消除高频抖

振.

### 2 系统描述与模型分解

考虑下面一类系统矩阵和输入矩阵存在不确定性的多变量系统:

$$\dot{x}(t) = (A + A_{per}(t))x(t) + (B + B_{per}(t))u(t). \quad (1)$$

其中:  $x \in R^n$ ,  $u \in R^m$ , 且  $1 \leq m < n$ ; 标称阵  $A \in R^{n \times n}$ ,  $B \in R^{n \times m}$  为常数阵, 且  $(A, B)$  能控; 假设不确定项  $A_{per} \in R^{n \times n}$ ,  $B_{per} \in R^{n \times m}$  满足如下匹配条件:

$$A_{per}(t) = B d_1(t), B_{per}(t) = B d_2(t). \quad (2)$$

$d_1(t) \in R^{m \times n}$ ,  $d_2(t) \in R^{m \times m}$  为有界时变函数, 且满足  $d_1(t) \leq l_{d_1}$ ,  $\dot{d}_1(t) \leq l_{\dot{d}_1}$ ,  $d_2(t) \leq l_{d_2}$ .

控制目标: 设计适当控制策略, 使得不确定多变量系统(1)由任意初始状态  $x(0) \neq 0$  收敛到零.

#### 2.1 块能控标准型

为将不确定多变量系统(1)转换为块能控标准型, 作如下非奇异状态变换<sup>[7]</sup>:

收稿日期: 2007-01-16; 修回日期: 2007-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60474016); 教育部留学回国人员科研基金项目.

作者简介: 王艳敏(1979—), 女, 山东青岛人, 博士生, 从事变结构控制的研究; 冯勇(1962—), 男, 南京人, 教授, 博士生导师, 从事变结构控制、鲁棒控制等研究.

$$y = Fx, \tag{3}$$

其中  $y \in R^n$ . 则系统(1) 变换为

$$\dot{y}(t) = (A + A(t))y(t) + (B + B(t))u(t). \tag{4}$$

其中

$$A = FA F^{-1}, B = FB = [0 \ B_{1,0}^T J^T, \\ A(t) = B d_1(t) F^{-1}, B(t) = B d_2(t),$$

$B_{1,0} \in R^{r \times m}$ , 且  $r \geq m, \text{rank } B_{1,0} = r$ .  $B_{1,0}$  的伪逆阵表示为  $B_{1,0}^+ = B_{1,0}^T [B_{1,0} B_{1,0}^T]^{-1}$ .

将变换后的系统(4) 写成分块的形式为

$$\begin{cases} \dot{y}_i(t) = \sum_{j=i}^r A_{i,j} y_j(t) + B_{i,i-1} y_{i-1}(t), \\ \quad i = 2, 3, \dots, r; \\ \dot{y}_1(t) = \sum_{j=1}^r A_{1,j} y_j(t) + B_{1,0} d_1(t) x(t) + \\ \quad (B_{1,0} + B_{1,0} d_2(t)) u(t). \end{cases} \tag{5}$$

其中:  $y = [y_1^T \dots y_r^T]^T, y_i \in R^{n_i}, i = 1, 2, \dots, r$ , 矩阵  $B_{i,i-1}$  行满秩,  $y_{i-1}$  可视为第  $i$  层状态方程的虚拟控制量.

### 2.2 解耦块能控标准型

为消除块能控标准型(5) 中的状态耦合, 利用文献[8] 的去耦合处理方法, 作如下非奇异状态变换:

$$y = Fz, \tag{6}$$

其中  $z \in R^n$ . 则系统(5) 转换为解耦块能控标准型

$$\dot{z}(t) = (A + A(t))z(t) + (B + B(t))u(t). \tag{7}$$

其中

$$A = (F)^{-1} A F, B = (F)^{-1} B = [0 \ B_{1,0}^T J^T, \\ A(t) = B d_1(t) F^{-1} F, B(t) = B d_2(t).$$

将式(7) 写成分块的形式为

$$\begin{cases} \dot{z}_i(t) = N_i z_i(t) + B_{i,i-1} z_{i-1}(t), \\ \quad i = 2, 3, \dots, r; \\ \dot{z}_1(t) = \sum_{i=1}^r \bar{A}_{1,i} z_i(t) + B_{1,0} d_1(t) x(t) + \\ \quad (B_{1,0} + B_{1,0} d_2(t)) u(t). \end{cases} \tag{8}$$

其中:  $z = [z_1^T \dots z_r^T]^T, z_i \in R^{n_i}; N_i (i = 2, 3, \dots, r)$  为设计矩阵. 本文设计  $N_i = -i I_{n_i}, -2 < -3 < \dots < -r < 0$ .  $N_i$  确定后, 状态变换阵  $F$  即可算出,

$$F = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -K_{r-1,r} & I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -K_{r-2,r} & -K_{r-2,r-1} & I & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots & \dots \\ -K_{1,r} & -K_{1,r-1} & -K_{1,r-2} & \dots & I & 0 \\ -K_{1,r} & -K_{1,r-1} & -K_{1,r-2} & \dots & -K_{1,2} & I \end{bmatrix}. \tag{9}$$

其中  $K_{i,j} (i = 1, 2, \dots, r-1, j = 2, 3, \dots, r)$  计算公式推导如下:

$$K_{i,i+1} = B_{i+1,i}^+ (K_{i+1,i+2} B_{i+2,i+1} + A_{i+1,i+1} - N_{i+1}), \\ i = 1, 2, \dots, r-1; \tag{10}$$

$$K_{i,j} = B_{i+1,i}^+ (K_{i+1,j} N_j + A_{i+1,j} + \\ \sum_{k=j-1}^{i+1} K_{i+1,j+1} B_{j+1,j} - A_{i+1,k} K_{k,j}), \\ i = 1, 2, \dots, r-2, j = i+2, i+3, \dots, r. \tag{11}$$

当  $i \notin [1, 2, \dots, r-1], j \notin [2, 3, \dots, r]$  时,  $K_{i,j} = 0$ ;  $i \notin [1, 2, \dots, r], j \notin [0, 1, \dots, r-1]$  时,  $B_{i,j} = 0$ .

将  $F$  代入式(7), 则解耦块能控标准型可确定下来, 从而大大简化了控制器设计.

### 3 二阶非奇异终端滑模控制

对于解耦块能控标准型(7) 的输入输出子系统, 不确定项  $B_{per} \in R^{n \times m}$  难以直接设计二阶滑模控制律, 为此引入辅助系统. 从而, 输入输出子系统的二阶滑模控制问题转换为两步设计: 设计控制律  $u(t)$ , 使得输入输出子系统尽快跟踪上辅助系统; 设计辅助控制律, 使辅助系统状态收敛到零, 即意味着输入输出子系统状态也收敛到零.

#### 3.1 输入输出子系统的跟踪控制

针对式(7) 的输入输出子系统, 设计辅助系统为

$$\dot{w}(t) = \sum_{i=1}^r \bar{A}_{1,i} z_i(t) - m B_{1,0} u(t) + w(t). \tag{12}$$

其中:  $R^{n_1}$ , 设计参数  $m \gg l_{d_2}, w(t)$  为辅助控制律.

定义  $e = z_1 - w$ , 由式(7) 和(12), 则偏差系统为

$$\dot{e}(t) = B_{1,0} d_1(t) x(t) + (m+1) B_{1,0} (I_m + \\ \frac{d_2(t)}{m+1}) u(t) - w(t). \tag{13}$$

由于  $m \gg l_{d_2}, d_2(t)/(m+1) \ll 1$ , 意味着  $I_m + d_2(t)/(m+1) \approx I_m$ , 则式(13) 近似为

$$\dot{e}(t) = B_{1,0} d_1(t) x(t) + \\ (m+1) B_{1,0} u(t) - w(t). \tag{14}$$

针对偏差系统(14), 设计滑模面  $k(t)$  为

$$k(t) = e + c_1 e^{p/q}. \tag{15}$$

其中:  $k \in R^{n_1}; c_1 = \text{diag}(c_{11}, \dots, c_{1n_1}), c_{1i} > 0, i = 1, 2, \dots, n_1; p$  和  $q$  为奇数, 且  $p > q > 0, 1 < p/q < 2$ .

**定理 1** 对于偏差系统(14), 选取滑模面(15), 若采取如下控制策略, 则状态  $e$  和  $\dot{e}$  将在有限时间内收敛到零:

$$u(t) = u_0(t) + u_1(t), \tag{16}$$

$$u_0(t) = \frac{1}{m+1} B_{1,0}^+ w(t), \tag{17}$$

$$u_1(t) = \int_0^t v(t) dt. \tag{18}$$

其中

$$v(t) = v_{eq}(t) + v_n(t), \tag{19}$$

$$v_{eq}(t) = - \frac{q}{(m+1)p} B_{1,0}^+ c_1^{-1} e^{2-p/q}, \tag{20}$$

$$v_n(t) = - \frac{1}{m+1} B_{1,0}^+ [ B_{1,0} (l_{d_1} \dot{x} + \dots) + \dots ] \text{sgn}(k), \tag{21}$$

$\rho_1 > 0$  为设计参数.

证明 取 Lyapunov 函数  $V(t) = 0.5k^T k$ , 则  $V(t)$  对时间的一阶导数为

$$\begin{aligned} \dot{V}(t) &= k^T \dot{k} = \\ &k^T [ pc_1 \text{diag}(e^{p/q-1})/q ] [ B_{1,0} (d_1(t)x(t)) + \\ &(m+1)B_{1,0}\dot{u}(t) - \dot{w}(t) + pc_1^{-1}e^{2-p/q}/q ]. \end{aligned}$$

代入控制律(16) ~ (20), 有

$$\dot{V}(t) = - k^T [ \frac{p}{q} c_1 \text{diag}(e^{p/q-1}) ] \text{sgn}(k).$$

针对上述二次型不等式, 文献[9]已详细证明  $\dot{V}(t) < 0$ , 且  $\dot{V}(t) = 0$  这种状态不会一直保持. 根据 Lyapunov 稳定性理论, 由式(15), 可算出  $e$  与  $\dot{e}$  在有限时间  $t_s$  内收敛到滑模面  $k(t) = 0$ , 定理 1 得证.

$$t_s = \frac{p}{p-q} \max_{i=1, \dots, n_1} (c_i e_i(0)^{\frac{p-q}{p}}). \tag{22}$$

### 3.2 辅助系统的二阶滑模控制

当输入输出子系统(7)跟踪上辅助系统(12)后, 在  $u(t)$  的等效控制作用下, 辅助系统变为

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= \sum_{i=1}^r \bar{A}_i z(t) - \frac{m}{m+1} B_{1,0} d_1(t)x(t) + \\ &\frac{1}{m+1} w(t). \end{aligned} \tag{23}$$

针对上述辅助系统(23), 设计滑模面  $l(t)$  为

$$l(t) = z + \int_0^t e^{-\rho_1 \tau} d_1^{-1} p^{1/q} d_1(\tau) x(\tau) d\tau. \tag{24}$$

其中:  $\rho_1 \in R^{n_1}$ ;  $d_1 = \text{diag}(\rho_{1,1}, \rho_{1,2}, \dots, \rho_{1,n_1})$ ,  $\rho_{1,i} > 0, i = 1, 2, \dots, n_1$ .

定理 2 对于辅助系统(23), 选取滑模面(24), 若采取如下控制策略, 则状态  $z$  和  $\dot{z}$  有限时间收敛到零:

$$w(t) = w_0(t) + w_1(t), \tag{25}$$

$$w_0(t) = - (m+1) \sum_{i=1}^r \bar{A}_i z(t), \tag{26}$$

$$w_1(t) = \int_0^t d_1(\tau) d\tau. \tag{27}$$

其中

$$\dot{z}(t) = \dot{z}_{eq}(t) + \dot{z}_n(t), \tag{28}$$

$$z_{eq}(t) = - \frac{q}{p} (m+1) e^{2-p/q}, \tag{29}$$

$$\dot{z}_n(t) = - [ m B_{1,0} (l_{d_1} \dot{x} + \dots) + \dots ] \text{sgn}(l), \tag{30}$$

$\rho_2 > 0$  为设计参数.

证明 与定理 1 证明类似, 这里不再详细推导. 由式(24), 与  $\dot{z}$  在  $t_w$  内, 从  $l(t_s)$  收敛到  $l(t_w) = 0$ , 定理 2 得证.

$$t_w = t_s + \frac{p}{(p-q)} \max_{i=1, \dots, n_1} (e_i(t_s)^{\frac{p}{p-q}}). \tag{31}$$

当  $z$  收敛到零后, 意味着  $z_1$  也收敛到零. 由于零动态子系统渐近稳定, 从而能控标准型(7)渐近稳定. 因为从  $x$  到  $z$  变换为线性, 所以不确定多变量系统(1)的状态  $x$  也将渐近稳定.

注 1 本文利用如下微分估计器<sup>[3]</sup>, 获取状态  $e$  和  $\dot{e}$  的微分估计值  $\hat{e}$  和  $\hat{\dot{e}}$ , 设计滑模面  $k(t)$  和  $l(t)$ :

$$\begin{cases} \dot{\hat{e}}_i(t) = v_{0i}(t), \\ v_{0i}(t) = v_{1i}(t) - \rho_{0i} / \hat{e}_i(t) - \\ \quad e_i(t) / |e_i(t)|^{1/2} \text{sgn}(\hat{e}_i(t) - \phi_i(t)), \\ \dot{v}_{1i} = - \rho_{1i} \text{sgn}(v_{1i} - v_{0i}), \\ \hat{\phi}_i = v_{1i}, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m_1.$$

其中:  $\phi_i(t)$  为微分估计器输入信号,  $\hat{\phi}_i(t)$  为输出的微分估计值,  $\rho_{0i}$  和  $\rho_{1i}$  为设计参数.

### 4 仿真实例

对不确定系统(1)进行仿真研究, 其中

$$A = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 3 & 2 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A_{per}(t) = \sin(2t) \times$$

$$\begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 & 0.1 & 0.1 & 0.2 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.1 & 0.3 \\ -0.1 & 0 & 0 & -0.1 & 0 & 0 & -0.1 \\ 0.1 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0.1 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$B_{per}(t) = \sin(2t) \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.2 & 0.1 & 0.1 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 \\ 0.3 & 0.2 & 0.1 \\ -0.1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0.1 \\ 0.1 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

系统初始状态  $x(0) = [-5.178, -7.953, -10.155, -19.686, -6.327, 5.73, 3.1770]^T$ .

首先,利用式(3),将系统(1)变换为块能控标准型(5),状态变换阵可计算得

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & -0.5 & -0.5 & -0.5 & -0.5 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & -2 & 1 & 0 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

为进一步将系统(5)化为解耦块能控标准型,设计矩阵

$$N_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, N_3 = -0.6.$$

由式(9)~(11),计算得到变换矩阵

$$F = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5.2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -6.72 & -3 & 2.5 & 4.1 & 1 & 0 & 0 \\ 8.32 & 0 & 0 & -4.6 & 0 & 1 & 0 \\ 4.16 & 0 & -1.5 & 2.3 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

继而解耦块能控标准型(8)可以确定.其中

$$\bar{A}_{11} = \begin{bmatrix} 7.2 & 2.6 & 1.6 \\ -7.4 & -1.2 & -8.2 \\ 6.2 & 2.6 & 5.6 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{12} = \begin{bmatrix} -1.16 & 3.5 & -1.5 \\ 35.92 & 3 & -9 \\ -17.96 & -1 & 3 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A}_{13} = \begin{bmatrix} -13.52 \\ -13.52 \\ 6.76 \end{bmatrix}.$$

滑模面  $k(t)$  和  $l(t)$  设计参数为:  $p = 5, q = 3$ ;  $c_1 = \text{diag}(0.7, 1.1, 1.3)$ ;  $\quad = \text{diag}(0.8, 1, 1.2)$ . 控制律  $u(t)$  和  $w(t)$  的设计参数为:  $m = 10, \quad_1 = 0.1, \quad_2 = 1$ .

求取  $\hat{e}_1, \hat{e}_2$  和  $\hat{e}$  时,微分估计器设计参数为:  $\quad_01 = 2.16, \quad_{11} = 4.54; \quad_02 = 8.21, \quad_{12} = 6.02; \quad_03 = 7.03, \quad_{13} = 5.16$ . 求取  $\hat{\zeta}_1, \hat{\zeta}_2$  和  $\hat{\zeta}_3$  时,设计参数  $\quad_01 = 8.21, \quad_{11} = 6.02; \quad_02 = 7.03, \quad_{12} = 5.16; \quad_03 = 6.36, \quad_{13} = 4.67$ .

仿真结果如图1~图5所示.图1和图2分别为  $e(t)$  与  $\hat{e}(t)$ ,  $\zeta(t)$  与  $\hat{\zeta}(t)$  的相平面,可见  $e(t)$  和  $\zeta(t)$  均有限时间内收敛到零.图3和图4分别为控制信号  $u(t)$  和  $w(t)$ ,可见高频抖振已被消除.图5为系统状态  $x(t)$ ,可见其递阶渐近收敛到零.由仿真结果

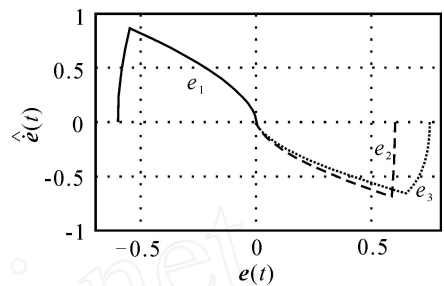


图1  $e(t)$  和  $\hat{e}$  相平面

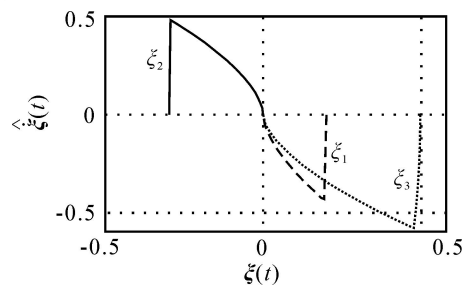


图2  $\zeta(t)$  和  $\hat{\zeta}$  相平面

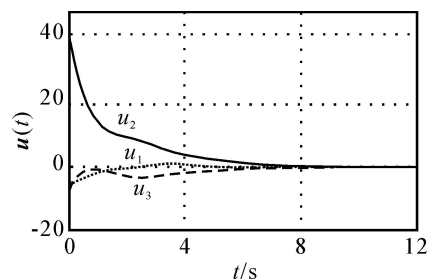


图3 控制信号  $u(t)$

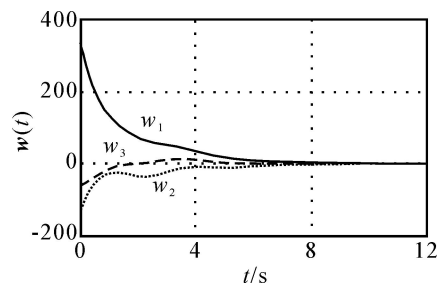


图4 控制信号  $w(t)$

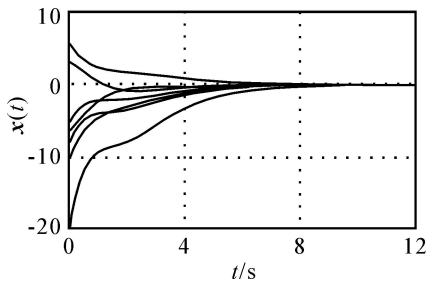


图 5 系统状态  $x(t)$

可见,系统达到设计要求.

### 5 结 论

本文针对一类系统矩阵和输入矩阵存在不确定性的多变量系统,基于终端滑模设计方法,利用微分估计器技术,提出一种二阶滑模控制方法.实现了无抖振滑模控制,提高了系统的动态响应速度,并实现系统鲁棒递阶控制.仿真结果表明了所提方法的有效性.

### 参考文献(References)

[1] Erbatur K, Kawamura A. Chattering elimination via fuzzy boundary layer tuning[J]. IECON, 2002, 3(3): 2131-2136.  
 [2] Xu J X, Lee T H, Pan YJ. On the sliding mode control for DC servo mechanisms in the presence of unmodeled

dynamics[J]. Mechatronics, 2003, 13(7): 755-770.  
 [3] Levant A. Higher-order sliding modes, differentiation and output-feedback control[J]. Int J of Control, 2003, 76(9): 924-941.  
 [4] Bartolini G, Ferrara A, Usai E. Applications of a suboptimal discontinuous control algorithm for uncertain second order systems[J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 1997, 7(4): 299-319.  
 [5] Chiacchiarini H G, Desages A C. Variable structure control with a second-order sliding condition: Application to a steam generator [J]. Automatica, 1995, 131(8): 1157-1168.  
 [6] Elmali H, Olgac N. Implementation of sliding model control with perturbation estimation[J]. IEEE Trans on Control Systems Technology, 1996, 4(1): 79-85.  
 [7] Lukyanov A G, Utkin V I. Optimal linear systems with degenerate criteria [C]. Proc of the American Control Conf. Philadelphia, 1998: 2884-2888.  
 [8] Wolfram Research. Advanced numerical method document [EB/OL]. <http://documents.wolfram.com/applicans/anm/BlockHessenbergForms/41.html>. 2003.  
 [9] Feng Y, Yu X H, Man Z H. Non-singular adaptive terminal sliding mode control of rigid manipulators[J]. Automatica, 2002, 38(12): 2159-2167.

(上接第 454 页)

[3] 袁基伟, 史忠科. 一种基于灰色预测模型 GM(1,1)的运动车辆跟踪方法[J]. 控制与决策, 2006, 21(3): 300-304.  
 (Yuan Ji-wei, Shi Zhong-ke. A method of vehicle tracking based on GM(1,1) [J]. Control and Decision, 2006, 21(3): 300-304.)  
 [4] Albert W L Yao, Chi S C, Chen J H. An improved Grey-based approach for electricity demand forecasting [J]. Electric Power Systems Research, 2003, (67): 217-224.  
 [5] 常玉清, 邹伟, 王福利, 等. 基于支持向量机的软测量方法研究[J]. 控制与决策, 2005, 20(11): 1307-1310.  
 (Chang Yu-qing, Zou Wei, Wang Fu-li, et al. Research on soft sensing method based on support vector machines [J]. Control and Decision, 2005, 20(11): 1307-1310.)  
 [6] 董辉, 傅鹤林, 冷伍明. 支持向量机的时间序列回归与预测 [J]. 系统仿真学报, 2006, 18(7): 1785-1788.

(Dong Hui, Fu He-lin, Leng Wu-ming. Support vector machines for time series regression and prediction[J]. J of System Simulation, 2006, 18(7): 1785-1788.)  
 [7] 陈华友, 侯定丕. 基于预测有效度的优性组合预测模型研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2002, 32(2): 172-180.  
 (Chen Hua-you, Hou Ding-pi. Research on superior combination forecasting model based on forecasting effective measure [J]. J of University of Science and Technology of China, 2002, 32(2): 172-180.)  
 [8] 陈晓方, 桂卫华, 王雅琳, 等. 基于智能集成策略的烧结块残硫软测量模型[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(1): 75-80.  
 (Chen Xiao-fang, Gui Wei-hua, Wang Ya-lin, et al. Soft-sensing model of sulfur content in agglomerate based on intelligent integrated strategy [J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(1): 75-80.)