

文章编号: 1001-0920(2007)01-0095-05

滞后离散广义不确定系统的变结构控制

郭继峰^{1,2}, 高存臣¹

(1. 中国海洋大学 数学系, 山东 青岛 266071; 2. 青岛理工大学 理学院, 山东 青岛 266520)

摘要: 首先引入一种新的受限系统等价分解形式, 将所给的系统分解成两个低维的子系统. 其次设计了带有差分补偿器的切换函数, 使得系统在准切换流形上的运动渐近稳定. 然后在不确定项有界的条件下设计了离散变结构控制律, 使得在控制的作用下, 系统的解的轨迹于有限步内进入准切换流形的一个邻域内, 并最终收敛于原点邻域内的一个小的抖振. 最后给出了数值仿真曲线, 以说明该综合设计方法的可行性和有效性.

关键词: 离散广义系统; 不确定系统; 多时滞; 变结构控制

中图分类号: TP13; TP273 **文献标识码:** A

Variable structure control of discrete uncertain singular systems with multiple time-delays

GUO Ji-feng^{1,2}, GAO Cun-chen¹

(1. Department of Mathematics, Ocean University of China, Qingdao 266071, China; 2. School of Science, Qingdao Technological University, Qingdao 266520, China. Correspondent: GUO Ji-feng, E-mail: guo1215@qtech.edu.cn)

Abstract: A new restricted system equivalent form is developed and the system is decomposed into two lower dimensional subsystems. A switching function with a difference compensator is designed, which guarantees that the movement of the system is asymptotically stable in the quasi-switching manifold. Then, a discrete variable structure controller is designed, which can force the solution trajectory of the system to enter into a small neighborhood of the quasi-switching manifold in finite steps and ultimately converge to a small chattering in the neighborhood. Finally, a numerical simulation covers demonstrates feasibility and validity of the design method.

Key words: Discrete singular system; Uncertain system; Multiple time-delays; Variable structure control

1 引言

变结构控制在众多工业领域具有广泛的应用. 如应用于跟踪控制^[1]、受限机器人^[2]、水下推进器^[3]、神经网络控制^[4]等. 但其输出响应对于输入时间的滞后会使得变结构控制产生抖振. 为此, 文献[5]等利用变结构控制的优点研究了时滞控制系统的镇定问题. 为满足近代科学技术的发展以及大型工程技术的需要, 人们提出了非传统数学模型描述的广义系统. 刘永清等对广义系统的变结构控制进行研究, 设计了适用于广义系统的带有积分补偿器的切换函数和变结构控制律^[6].

滞后是客观世界和工程实际中普遍存在的现象, 广义系统中也包含大量带有滞后的广义系统. 特别是随着计算机技术的广泛应用, 许多领域出现了滞后离散广义系统. 在实际系统建模过程中不可避

免地存在误差, 系统模型中往往带有不确定项. 因此, 对离散滞后广义不确定系统的变结构控制的研究具有重要的实际意义. 但目前该课题的研究成果还很少见, 且研究的系统是带有单时滞的系统^[7].

本文研究如下多时滞离散广义不确定系统的准滑模变结构控制:

$$\begin{cases} Ex(k+1) = \\ Ax(k) + \sum_{i=1}^m B_i x(k-i) + Cu(k) + \\ f(k, x(k), x(k-1), \dots, x(k-m), p), \\ x(k) = (k), k \in \{-m, -m+1, \dots, 0\}. \end{cases} \quad (1)$$

其中: $E, A, B_i (1 \leq i \leq m) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为常数矩阵, $\text{rank}(E) = r < n$; $C \in \mathbf{R}^{n \times (n-r)}$ 为常数矩阵; $x \in \mathbf{R}^n$ 为状态向量, $x_k(s) = x(k+s), s \in \{-m, -m+1, \dots, 0\}$; $u \in \mathbf{R}^r$ 为控制输入; 函数 $f(k, x(k), x(k-$

收稿日期: 2005-09-13; 修回日期: 2006-02-05.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60574005).

作者简介: 郭继峰(1969-), 男, 山东郯城人, 博士生, 从事微分方程、变结构控制等研究; 高存臣(1956-), 男, 山东莱阳人, 教授, 博士生导师, 从事大系统、变结构控制等研究.

1), ..., x(k - m), p) : $\mathbf{R} \times \mathbf{R}^m \times \dots \times \mathbf{R}^m \times \mathbf{R}^l$ \mathbf{R}^r 为系统(1)的不确定项, $p \in \mathbf{R}^l$ 为系统的不确定参数; $\{ -m, -m+1, \dots, 0 \} \subset \mathbf{R}^l$ 为系统(1)的相容初始函数.

2 准备知识

定义 1^[8] 对于系统 $E x(k+1) = A x(k)$, 称矩阵对 (E, A) 为强稳定的, 如果 $\deg(\det(E - A)) = \text{rank}(E)$, 且系统的每个广义特征值满足 $|\lambda| < 1$.

定理 1 在系统(1)中, 假设 $\text{rank}(E, C) = n$. 对于任意的 $k \in \mathbf{Z}^+$, $\text{rank}(C \bar{f}) = \text{rank}(C)$, 则存在可逆矩阵 P 和 Q , 使得系统(1)受限系统等价于

$$\begin{cases} x_1(k+1) = A_{11} x_1(k) + A_{12} x_2(k) + \sum_{i=1}^m [B_{i11} x_1(k-i) + B_{i12} x_2(k-i)], \\ 0 = A_{21} x_1(k) + A_{22} x_2(k) + \sum_{i=1}^m [B_{i21} x_1(k-i) + B_{i22} x_2(k-i)] + C_2 u(k) + f_2(k, x(k), x(k-1), \dots, x(k-m), p), \\ \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}, \\ k \in \{ -m, -m+1, \dots, -1, 0 \}. \end{cases} \quad (2)$$

其中: $x_1(k) \in \mathbf{R}^r, x_2(k) \in \mathbf{R}^{n-r}, C_2 \in \mathbf{R}^{(n-r) \times (n-r)}$ 可逆, $f_2 \in \mathbf{R}^{n-r}, A_{st}$ 和 $B_{ist} (s, t = 1, 2, i = 1, 2, \dots, m)$ 具有相容的维数.

证明 因为 $\text{rank} E = r$, 所以存在可逆矩阵 P 和 Q_1 , 使得 $Q_1 E P = \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$. 令

$$Q_1 C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix}, Q_1 A P = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix}, Q_1 B_i P = \begin{bmatrix} \bar{B}_{i11} & \bar{B}_{i12} \\ \bar{B}_{i21} & \bar{B}_{i22} \end{bmatrix}, Q_1 \bar{f} = \begin{bmatrix} f^{(1)} \\ f^{(2)} \end{bmatrix}.$$

其中: $C_2 \in \mathbf{R}^{(n-r) \times (n-r)}, f^{(2)} \in \mathbf{R}^{n-r}, \bar{A}_{st}$ 和 $\bar{B}_{ist} (s, t = 1, 2, i = 1, 2, \dots, m)$ 具有相容的维数. 因为

$$\text{rank}(E, C) = \text{rank}(Q_1 E P, Q_1 C) = \text{rank} \begin{bmatrix} I_r & 0 & C_1 \\ 0 & 0 & C_2 \end{bmatrix} = n,$$

所以 $\text{rank} C_2 = n - r$, 从而 C_2 可逆. 由于 $\text{rank}(C \bar{f}) = \text{rank} C$, 则存在 \bar{f} 使 $\bar{f} = C \bar{f}$. 令

$$Q_2 = \begin{bmatrix} I_r & -C_1 C_2^{-1} \\ 0 & I_{n-r} \end{bmatrix}, Q = Q_2 Q_1,$$

于是

$$Q \bar{f} = Q_2 Q_1 C \bar{f} = \begin{bmatrix} I_r & -C_1 C_2^{-1} \\ 0 & I_{n-r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \bar{f} =$$

$$\begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \bar{f} \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ f_2 \end{bmatrix}, Q E P = \begin{bmatrix} I_r & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, Q A P = \begin{bmatrix} \bar{A}_{11} & \bar{A}_{12} \\ \bar{A}_{21} & \bar{A}_{22} \end{bmatrix}, Q B_i P = \begin{bmatrix} \bar{B}_{i11} & \bar{B}_{i12} \\ \bar{B}_{i21} & \bar{B}_{i22} \end{bmatrix}, Q C = \begin{bmatrix} 0 \\ C_2 \end{bmatrix}.$$

其中: $\bar{A}_{11} = \bar{A}_{11} - C_1 C_2^{-1} \bar{A}_{21}, \bar{A}_{12} = \bar{A}_{12} - C_1 C_2^{-1} \bar{A}_{22}, \bar{A}_{21} = \bar{A}_{21}, \bar{A}_{22} = \bar{A}_{22}, \bar{B}_{i11} = \bar{B}_{i11} - C_1 C_2^{-1} \bar{B}_{i21}, \bar{B}_{i12} = \bar{B}_{i12} - C_1 C_2^{-1} \bar{B}_{i22}, \bar{B}_{i21} = \bar{B}_{i21}, \bar{B}_{i22} = \bar{B}_{i22}$. 从而在系统(1)两边左乘以矩阵 Q , 并进行坐标变换 $x(k) = P \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix}$, 可知系统(1)受限系统等价于系统(2).

不失一般性, 不妨假设系统(1)的系数矩阵具有系统(2)的系数矩阵的形式, 进一步假设 \bar{A}_{22} 非奇异. 下面用记号 $|A|$ 表示矩阵 A 的模态矩阵, $\lambda(A)$ 表示矩阵 A 的一个特征值, $\|A\| = [\max(A^T A)]^{1/2}$ 表示矩阵 A 的诱导范数. 对于矩阵 $M_1 = (m_{ij}^{(1)}), M_2 = (m_{ij}^{(2)})$, 若 $m_{ij}^{(1)} m_{ij}^{(2)}$ 对所有的 i 和 j 成立, 则记 $M_1 \sim M_2$. 令 $G_i(z) = (zI_r - \bar{A}_{11})^{-1} \bar{A}_{11} = A_{11} - A_{12} A_{22}^{-1} A_{21}, \lambda = \sqrt{-1}$. 考虑如下系统:

$$\begin{cases} x_1(k+1) = A_{11} x_1(k) + A_{12} x_2(k) + \sum_{i=1}^m [B_{i11} x_1(k-i) + B_{i12} x_2(k-i)], \\ 0 = A_{21} x_1(k) + A_{22} x_2(k) + \sum_{i=1}^m [B_{i21} x_1(k-i) + B_{i22} x_2(k-i)]. \end{cases} \quad (3)$$

引理 1^[9] 系统(3)的零解是渐近稳定的, 如果矩阵对 (E, A) 是强稳定的, 并且下面两个条件之一成立:

- 1) $\{ (v_1 \quad H \quad v_2 \quad + \quad v_3) \times \sum_{i=1}^m B_i \} \triangleq l < 1$.
- 2) 当 $l = 1$ 时, 有

$$|s(v_1 G_i(z) v_2 + v_3) \sum_{i=1}^m B_i z^{-i+1}| < 1,$$

其中

$$v_1 = \begin{bmatrix} I_r \\ -A_{22}^{-1} A_{21} \end{bmatrix}, v_2 = (I_r \quad -A_{12} A_{22}^{-1}), v_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -A_{22}^{-1} \end{bmatrix}, s = 1, 2, \dots, n;$$

$H \triangleq \{ H(k) \mid \{ H(k) \} \text{ 为 } G_i(z) \text{ 的脉冲响应序}$
 $\text{列, } z \text{ 的取值范围为 } z = \bar{\lambda} \exp(\dots) \text{ 和 } z = \lambda \exp(\dots),$
 $0 < \lambda < 2.$

3 主要结果

下面讨论系统(1)的变结构控制设计问题.

第 1 步 确定切换函数 $s(k)$, 使得系统(1)在准切换流形 $s(k) = 0$ 上的运动渐近稳定. 取带有补偿器的切换函数

$$\begin{cases} s(k) = Dx_1(k) - A_{22}x_2(k-1) + f_2(k), \\ s(k+1) = \\ \dots \\ [F_i x_1(k-i) + G_i x_2(k-i)]. \end{cases} \quad (4)$$

其中: $s \in \mathbf{R}^{n-r}; D, F_i, G_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 为待定的常数矩阵, 且具有相应的维数.

注 1 $s(k)$ 的在线计算方法为: 首先任给补偿器初值 $s(k_0)$, 由 $s(k_0), x_1(k_0)$ 和 $x_2(k_0 - 1)$ 算出该步的切换函数值 $s(k_0)$, 并算出 $s(k_0 + 1)$ 的值, 以便计算下一步 $s(k_0 + 1)$. 其余依次类推.

因为准切换流形中 $s(k+1) = s(k) = 0$, 故由

$$s(k+1) = Dx_1(k+1) - A_{22}x_2(k) + f_2(k+1) = (DA_{11} + A_{21})x_1(k) + DA_{12}x_2(k) + \sum_{i=1}^m (DB_{i1} + B_{21} + F_i)x_1(k-i) + \sum_{i=1}^m (DB_{i2} + B_{22} + G_i)x_2(k-i) + f_2 + C_2 u(k) = 0,$$

得等效控制

$$u_{eq}(k) = -C_2^{-1} [(DA_{11} + A_{21})x_1(k) + DA_{12}x_2(k) + \sum_{i=1}^m (DB_{i1} + B_{21} + F_i)x_1(k-i) + \sum_{i=1}^m (DB_{i2} + B_{22} + G_i)x_2(k-i) + f_2].$$

$u_{eq}(k)$ 代入系统(1), 得准滑动模方程

$$\begin{cases} x_1(k-1) = \\ A_{11}x_1(k) + A_{12}x_2(k) + \sum_{i=1}^m [B_{i1}x_1(k-i) + B_{i2}x_2(k-i)], \\ 0 = \\ -DA_{11}x_1(k) + (A_{22} - DA_{12})x_2(k) - \\ \dots \\ (DB_{i1} + F_i)x_1(k-i) - \\ \dots \\ (DB_{i2} + G_i)x_2(k-i). \end{cases} \quad (5)$$

令

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ -DA_{11} & A_{22} - DA_{12} \end{bmatrix},$$

$$\bar{B}_i = \begin{bmatrix} B_{i1} & B_{i2} \\ -(DB_{i1} + F_i) & -(DB_{i2} + G_i) \end{bmatrix}.$$

根据引理 1 有如下定理:

定理 2 准滑动模(5)的零解是渐近稳定的, 如果矩阵对 (E, \bar{A}) 强稳定, 且可选取矩阵 $D, F_i, G_i (i = 1, 2, \dots, m)$, 使得矩阵 $A_{22} - DA_{12}$ 可逆, 且下面两个条件之一成立:

- 1) $\{ (\bar{v}_1 \quad \bar{H} \quad \bar{v}_2 \quad + \quad \bar{v}_3) \times \sum_{i=1}^m \bar{B}_i \} \triangleq \bar{l} < 1.$
- 2) 当 $\bar{l} = 1$ 时, 有

$$\left| s(\bar{v}_1 \bar{G}_i(z) \bar{v}_2 + \bar{v}_3) \sum_{i=1}^m \bar{B}_i z^{-i+1} \right| < 1, \quad s = 1, 2, \dots, n.$$

其中

$$\bar{v}_1 = \begin{bmatrix} I_r \\ (A_{22} - DA_{12})^{-1} DA_{11} \end{bmatrix},$$

$$\bar{v}_2 = [I_r \quad -A_{12}(A_{22} - DA_{12})^{-1}],$$

$$\bar{v}_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -(A_{22} - DA_{12})^{-1} \end{bmatrix},$$

$$\bar{H} = \{ \bar{H}(k) \mid \bar{H}(k) = \dots \}$$

$\{ \bar{H}(k) \}$ 为 $\bar{G}_i(z) = (zI_r - A_{11})^{-1}$ 的脉冲响应序列, $A_{11} = A_{11} + A_{12}(A_{22} - DA_{12})^{-1}DA_{11}$. z 的取值范围为 $z = \bar{\lambda} \exp(\dots)$ 和 $z = \lambda \exp(\dots), 0 < \lambda < 2.$

注 2 对于稳定的方阵 A_{11} , $\bar{G}_i(z) = (zI_r - A_{11})^{-1}$ 的脉冲响应序列 $\bar{H}(k)$ 可由下列方程得到:

$$\bar{H}(k) = A_{11}^{k-1}, \bar{H}(0) = 0, k = 1, 2, \dots.$$

第 2 步 设计离散变结构控制律 $u(k)$, 使得在 $u(k)$ 的作用下, 系统(1)从状态空间中任意一点出发的解的轨迹在有限步内进入准切换流形的一个较小的邻域内, 并最终收敛于原点附近的某个小的抖振. 假设系统(1)的不确定项 f_2 具有确定的上下界,

不妨设 $f_2 \leq f_2 \leq f_2$. 令 $\bar{f} = \frac{1}{2}(f_2 + f_2)$, $\tilde{f} = \frac{1}{2}(f_2 - f_2) = (f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2n-r})^T$, $\tilde{f} = \text{diag}(f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2n-r})$, 则有

$$f_2 \begin{cases} \bar{f} + \tilde{f} \text{sgn } s(k), s(k) > 0; \\ \bar{f} - \tilde{f} \text{sgn } s(k), s(k) < 0. \end{cases} \quad (6)$$

取离散变结构控制律

$$u(k) = -C_2^{-1} [(DA_{11} + A_{21})x_1(k) + DA_{12}x_2(k) + \dots]$$

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^m (DB_{i1} + B_{21} + F_i) x_1(k-i) + \\ & \sum_{i=1}^m (DB_{i2} + B_{22} + G_i) x_2(k-i) + \tilde{f} + \\ & \tilde{f} \operatorname{sgn} s(k) + T \operatorname{sgn} s(k) + (qT - I_{n-r}) s(k) \end{aligned} \quad (7)$$

其中: I_{n-r} 为单位矩阵; $\tilde{f} = \operatorname{diag}(f_1, f_2, \dots, f_{n-r})$; $\operatorname{sgn}(\cdot)$ 为符号函数; $\operatorname{sgn} s(k) = (\operatorname{sgn} s_1(k); \operatorname{sgn} s_2(k), \dots, \operatorname{sgn} s_{n-r}(k))^T$; $q = \operatorname{diag}(q_1, q_2, \dots, q_{n-r})$; $i, q_i (i = 1, 2, \dots, n-r)$ 为正常数, T 为采样周期; $0 < q_i < 1, 0 < q_i T < 1$. 从而有

$$\begin{aligned} s(k+1) - s(k) = & \\ & D x_1(k+1) - A_{22} x_2(k) + \sum_{i=1}^m [F_i x_1(k-i) + G_i x_2(k-i)] - s(k) = \\ & f_2 - \tilde{f} - \tilde{f} \operatorname{sgn} s(k) - T \operatorname{sgn} s(k) - qT s(k). \end{aligned}$$

由式(6)知

$$\begin{cases} s(k+1) - s(k) \\ - T \operatorname{sgn} s(k) - qT s(k), s(k) > 0_{n-r}; \\ - T \operatorname{sgn} s(k) - qT s(k), s(k) < 0_{n-r}. \end{cases}$$

由文献[10]知,在变结构控制律(8)的作用下,从状态空间中任意一点出发的解的轨迹,将于有限步内到达切换带 $s = \{x \in \mathbf{R}^n : |s(x(k))| < \delta\}$, 其中 $\delta = T$. 特别地,若存在某个时刻 k_0 , 使得 $|s(k_0)| < \delta = \frac{T}{1-qT}$, 则从 $k_0 + 1$ 时刻起,系统的运动将在准切换流形 $s(k) = 0$ 上渐近趋向零点,但运动轨迹恰好到达状态空间中超平面 $|s(k)| = \frac{T}{1-qT}$ 的概率为零. 一般而言,系统的状态轨迹只能收敛于原点邻域内的某个抖振,而不能期望原点的稳定性.

4 数值例子

考虑系统(1). 其中

$$\begin{aligned} E &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \\ A &= \begin{bmatrix} 0.400 & 0.010 & 0.200 \\ 0.280 & 0.620 & -0.600 \\ -0.100 & 0.200 & 0.601 \end{bmatrix}, \\ B_1 &= \begin{bmatrix} 0.040 & 0.120 & 0.000 \\ -0.020 & 0.060 & 0.030 \\ 0.010 & -0.040 & 0.080 \end{bmatrix}, \\ B_2 &= \begin{bmatrix} 0.060 & 0.100 & 0.030 \\ 0.040 & -0.150 & -0.070 \\ 0.030 & 0.100 & 0.200 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2 \end{bmatrix}, f = \begin{bmatrix} 0 \\ f_2 \end{bmatrix}.$$

式中: 为实参数, $f_2 \in \mathbf{R}^1$ 表示系统的不确定部分且 $|f_2| < 2$. 选取式(4)为切换函数, 其中 $D = (0.163 \ 1, \dots, -0.114 \ 2)$, $F_1 = (-0.059 \ 4, \dots, 0.303 \ 7)$, $G_1 = 0.083 \ 4$, $F_2 = (-0.005 \ 2, \dots, -0.313 \ 4)$, $G_2 = -0.572 \ 9$. 则准滑动模方程为

$$\begin{cases} \bar{E}x(k+1) = \\ \bar{A}x(k) + \bar{B}_1 x_1(k-1) + \bar{B}_2 x_2(k-2), \\ s(k) = 0. \end{cases} \quad (8)$$

其中

$$\begin{aligned} \bar{E} &= E, \\ \bar{A} &= \begin{bmatrix} 0.400 & 0.010 & 0.200 \\ 0.280 & 0.620 & -0.600 \\ 0.000 & -0.100 & 0.500 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_1 &= \begin{bmatrix} 0.040 & 0.120 & 0.000 \\ -0.020 & 0.060 & 0.030 \\ 0.050 & -0.320 & -0.080 \end{bmatrix}, \\ \bar{B}_2 &= \begin{bmatrix} 0.060 & 0.100 & 0.030 \\ 0.040 & -0.150 & -0.070 \\ 0.000 & 0.280 & 0.560 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

由引理1知

$$\bar{A}_{11} = \begin{bmatrix} 0.400 & 0.050 \\ 0.280 & 0.500 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{H} = \lim_{k \rightarrow \infty} |\bar{A}_{11}|^{k-1} = \begin{bmatrix} 1.748 \ 3 & 0.174 \ 8 \\ 0.979 \ 0 & 2.097 \ 9 \end{bmatrix}.$$

此外, $\deg(\det(\bar{E} - \bar{A})) = \operatorname{rank}(\bar{E}) = 2$, 且系统 $\bar{E}x(k+1) = \bar{A}x(k)$ 的广义特征值为 0.321 5 和 0.578 5. 所以 (\bar{E}, \bar{A}) 为强稳定的. 经过直接计算可知, 当 $|f_2| < 0.160 \ 4$ 时, 引理1的条件1) 满足; 当 $0.160 \ 4 < |f_2| < 0.245 \ 0$ 时, 引理1的条件2) 满足. 所以当实参数 f_2 在上述范围内变化时, 滑动模(8)是渐近稳定的. 按式(7)取离散变结构控制律

$$\begin{aligned} u(k) = & \\ & - \frac{1}{2} [-0.066 \ 8 x_1(k) + 0.130 \ 8 x_2(k) + \\ & 0.101 \ 1 x_3(k) - 0.040 \ 6 x_1(k-1) + \\ & 0.280 x_2(k-1) + 0.160 x_3(k-1) + \\ & 0.030 x_1(k-2) - 0.180 x_2(k-2) - \\ & 0.360 x_3(k-2) + 2 \operatorname{sgn} s(k) + \\ & T \operatorname{sgn} s(k) + (qT - 1) s(k)]. \end{aligned}$$

其中: δ 和 q 为正常数, T 为采样周期, $0 < qT < 1$. 根据本文的讨论可知, 在 $u(k)$ 的作用下, 从状态空间中任意一点出发的解的轨迹, 将于有限步内进入准切换流形的小邻域内, 并在该邻域内作步步穿

越准切换流形的运动，其趋近准切换流形的速度以及准切换流形邻域的大小取决于 λ, q, T 的选取。取 $\lambda = 0.1, \mu = 1, T = 0.08, q = 1, f_2 = 1$ ，利用 Matlab 作出的仿真曲线如图 1 所示。

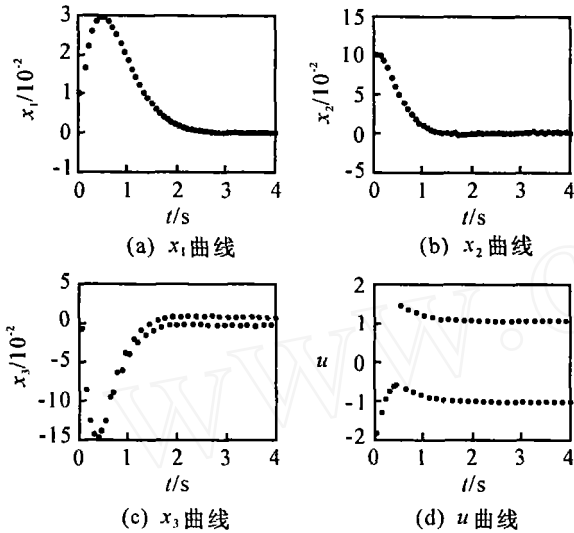


图 1 数据例子仿真结果

5 结 论

本文在不确定项满足匹配条件的前提下，设计了带有差分补偿器的切换函数和离散变结构控制律，使得闭环系统渐近稳定或收敛于原点邻域内的一个小的抖振。最后给出了数值例子及仿真曲线，用以说明该设计方法的可行性和有效性。

参考文献(References)

[1] Andrea B, Antonio B. Necessary and sufficient conditions for robust perfect tracking under variable structure control [J]. Int J of Robust and Nonlinear Control, 2003, 13(1) :141-151.

[2] Letizia C M, Leo T, Orlando G. Experimental testing of a discrete-time sliding mode controller for trajectory tracking of a wheeled mobile robot in the presence of skidding effects[J]. J of Robotics Systems, 2002, 19(4) : 177-188.

[3] Healey A J, Lienard D. Multivariable sliding mode control for autonomous diving and steering of unmanned

underwater vehicles[J]. IEEE J of oceanic engineering, 1993, 18(3) :327-339.

[4] Fang Y, Tommy W S C. Synthesis of the sliding mode neural network controller for unknown nonlinear discrete-time systems [J]. Int J of System Sciences, 2000, 31(3) :401-408.

[5] 高存臣,袁付顺,肖会敏.时滞变结构控制系统[M].北京:科学出版社,2004.
(Gao C C, Yuan F S, Xiao H M. Variable structure control systems with time-delays[M]. Beijing: Science Press, 2004.)

[6] 刘永清,温香彩.大型动力系统的理论与应用(卷6):广义系统的变结构控制[M].广州:华南理工大学出版社,1997.
(Liu Y Q, Wen X C. Theory and application of large-scale dynamic system (Vol 6): Variable structure control for singular systems [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1997.)

[7] 刘永清,王伟,李远清.大型动力系统的理论与应用(卷7):滞后广义系统解的基本理论与应用[M].广州:华南理工大学出版社,1997.
(Liu Y Q, Wang W, Li Y Q. Theory and application of large-scale dynamic system (Vol 7): Theory and application on solution of time-delay singular systems [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1997.)

[8] Wang R L, Liu Y Q. Robust stability for discrete uncertain singular systems with multiple time-delays[J]. Control Theory and Application, 2000, 17(3) :461-464.

[9] 王汝凉,刘永清.多时滞离散广义系统的渐近稳定性判据[J].系统工程与电子技术,2000,22(10):17-19.
(Wang R L, Liu Y Q. Asymptotic stability criterion for multiple time-delays discrete singular systems [J]. System Engineering and Electronics Technology, 2000, 22(10) :17-19.)

[10] 高为炳.变结构控制的理论及设计方法[M].北京:科学出版社,1996:296-297.
(Gao W B. Theory and design method of variable structure control [M]. Beijing: Science Press, 1996: 296-297.)

(上接第 94 页)

[10] 北京飞机维修工程有限公司. 发动机滑油监控研究 [R]. 北京:北京飞机维修工程有限公司,2000,7: 86-105.
(Beijing Aircraft Maintenance and Engineering

Corporation. Research on the aircraft engine lubricating oil monitoring[R]. Beijing: Beijing Aircraft Maintenance and Engineering Corporation, 2000, 7: 86-105.)