

一类复杂控制系统分散自适应鲁棒控制器设计

王文庆^{1,2}, 佟明安¹

(1. 西北工业大学 电子工程系, 陕西 西安 710072; 2. 西安邮电学院 信息与管理工程系, 陕西 西安, 710061)

摘要: 基于模糊逻辑系统具有充分利用语言信息和逼近连续函数性质的思想, 分析研究了一类非线性不确定复杂系统的自适应控制问题. 利用系统的数学模型和模糊逻辑系统对不确定性的输出信息, 设计出了复杂系统的分散自适应鲁棒控制器和模糊逻辑系统参数估计的自适应律, 在较弱的假设条件下, 证明了这种控制器使被控系统的状态及参数估计误差一致终极有界. 仿真实例表明, 所提出的方法是有效的.

关键词: 复杂系统; 分散控制; 模糊逻辑系统; 自适应律; 一致终极有界

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Decentralized adaptive robust controller design for a class of complex systems

WANG Wen-qing^{1,2}, TONG Ming'an¹

(1. Department of Electronic Engineering, Northwestern Polytechnical University, Shanxi Xi'an 710072, China;

2. Department of Information and Management Engineering, Xian Institute of Posts & Telecoms, Shanxi Xi'an 710061, China)

Abstract: Based on fuzzy logic system with the properties of fully utilizing linguistic information and approximating any nonlinear continuous function, the decentralized adaptive robust control laws of nonlinear complex systems with uncertainties was discussed. By using the model of the complex systems and output information coming from the fuzzy logic system about uncertain factors, the decentralized adaptive robust controller and adaptive laws of parameter estimate of fuzzy logic system were constructed. Under some simple conditions, the laws and controller made the states of systems controlled and parameter estimate errors uniformly ultimately bounded (UUB). Finally, the computer simulation showed the validity of the approach.

Key words: complex systems; decentralized control; fuzzy logic system; adaptive law; UUB

1 引言(Introduction)

复杂系统控制问题的研究是当前控制界研究的一个重要课题, 考虑由子系统构成的复杂系统的反馈镇定控制是其中的一个重要研究方向. 值得注意的是, 在以往的研究中, 复杂系统鲁棒性的获得总是在假设系统的不确定性(或干扰)满足所谓的“匹配条件”或“广义 Riccati 方程有解”或“已知其精确的上界”的情况下进行的^[1-4]. 这些假设降低了研究结论的工程实用性. 这是因为, 一方面系统的结构(或所受干扰)机理很难得到, 另一方面, 对具有非线性、变系数等特征的系统, 还没有一套完整实用的设计理论. 现实系统很难用基于物理学、化学等规律导出其精确的数学模型, 即使某些简单的动力学模型可以得到, 其中的某些参数因受周围环境和测量部件精度的影响也难以精确化. 所以, 从工程应用的角度出发, 研究较弱条件下的分散反馈鲁棒控

制是非常有意义的.

模糊逻辑系统具有系统而有效地利用语言信息的功能, 在系统鲁棒控制中的应用已经取得了许多有价值的成果^[5-8]. 但是, 这些研究成果大多数是建立在仿真基础上, 缺少严密的数学推理. 本文将利用模糊逻辑系统研究复杂系统的分散自适应鲁棒镇定问题, 发挥模糊逻辑系统能够充分利用语言信息的功能, 不需要知道不确定性的精确上界, 避免了严格的数学假定, 所得到的控制器和自适应律都是分散的, 有利于复杂系统中各个子系统根据自己的实际情况采取控制策略, 避免了子系统间信息传递过程各种干扰的影响.

2 系统描述(Problem formulation and preliminary)

考虑如下具有不确定性的非线性复杂控制系统

$$\dot{x}_i = A_i x_i + \Delta f_i(x_i, t) + B_i(u_i + \Delta g_i(x_i, t)) + \sum_{j=1}^N \Delta H_{ij}(x), \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

其中,第 i 个子系统的状态向量 $x_i \in U_i \subseteq \mathbb{R}^n, U_i$ 是 \mathbb{R}^n 中的有界闭集; $U = \prod_{i=1}^N U_i$; 第 i 个子系统的输入 $u_i \in \mathbb{R}^r; A_i, B_i$ 是合适维数的实矩阵; $\Delta f_i(x_i, t)$ 是第 i 个子系统的系统结构不确定性或干扰; $\Delta g_i(x_i, t)$ 是第 i 个子系统的输入通道上的不确定性或干扰; $\sum_{j=1}^N \Delta H_{ij}(x)$ 是第 i 个子系统与其它子系统间的不确定互联项。

上述系统在实际工程中有广泛应用背景,其中状态向量 x_i 的取值一般不能无限大,而是限定在某个有界的范围内.因此,上述系统中的 U_i 是使 x_i 有意义的有界闭集.

假定 1 矩阵对 (A_i, B_i) 是可稳的.

假定 2 系统(1)中的不确定性满足下列条件

- 1) $\|\Delta f_i(x_i, t)\| \leq \zeta_i(x_i), x_i \in U_i;$
- 2) $\|\Delta g_i(x_i, t)\| \leq \eta_i(x_i), x_i \in U_i;$
- 3) $\|\Delta H_{ij}(x, t)\| \leq \varphi_{ij}(x_i), x_i \in U_i.$

其中, $\zeta_i(x_i), \eta_i(x_i), \varphi_{ij}(x_i)$ 是未知的非负连续函数; $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数.

若假定 1 成立,则知存在一个线性反馈 $u_i = K_i x_i$ 使对任意给定的正定对称矩阵 Q_i , 下列 Lyapunov 方程存在唯一正定矩阵解 P_i ,

$$(A_i + B_i K_i)^T P_i + P_i (A_i + B_i K_i) = -Q_i. \quad (2)$$

本文利用模糊逻辑系统的有关研究结果,构造与系统(1)中的子系统数目相同的 N 个模糊逻辑系统来分别逼近系统(1)中各个子系统的确定性(或干扰),以实现分散控制的目的.构造模糊逻辑系统时采用单点模糊化、乘积推理、中心解模糊和如下模糊规则^[5]:

$$\begin{aligned} R^j: & \text{IF } x_1 \text{ is } A_1^j \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^j \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } A_n^j \\ & \text{THEN } y \text{ is } B^j, \quad j = 1, 2, \dots, N. \end{aligned} \quad (3)$$

其输出为

$$F(x) = \theta^T E(x). \quad (4)$$

其中

$$\begin{aligned} \theta &= (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_N)^T, \\ E(x) &= (e_1(x), e_2(x), \dots, e_N(x))^T, \\ \theta_j &= \max_{y \in Y} B^j(y) \quad (1 \leq j \leq N) \end{aligned}$$

是常数,

$$e_j(x) = \frac{\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)}{\sum_{j=1}^N [\prod_{i=1}^n A_i^j(x_i)]},$$

$A_i^j(x_i)$ 是模糊集 A_i^j 的隶属函数.

容易看出 $0 \leq e_j(x) \leq 1$, 所以

$$\|E(x)\| \leq \sqrt{e_1^2(x) + \dots + e_N^2(x)} \leq 1.$$

当所有的隶属函数采用 Gaussian 型函数时,由文献[5,6]可知,形如(3)和(4)的模糊逻辑系统具有充分利用语言信息任意逼近非线性连续函数的能力.

在本文中,首先对系统(1)中各子系统的确定性进行归一运算处理,即 $\zeta_i(x_i) + \|B_i\| \eta_i(x_i) + \sum_{j=1}^N \varphi_{ij}(x_i)$, 然后构造 N 个形如(3)和(4)的模糊逻辑系统来逼近各子系统的确定项,即有下式成立:

$$\sup_{x_i \in U_i} \|\zeta_i(x_i) + \|B_i\| \eta_i(x_i) + \sum_{j=1}^N \varphi_{ij}(x_i) - F_i(x_i)\| \leq \epsilon_i. \quad (5)$$

式中, ϵ_i 为任意给定的正数.

注 1 式(5)中的 ϵ_i 并不要求充分小,但它的大小直接影响最终收敛域的大小,反映着所构造的模糊逻辑系统对不确定项逼近的程度.

3 控制器和自适应律设计 (Design of controller and adaptive laws)

记 $\tilde{\theta}_i = \theta_i - \hat{\theta}_i, \tilde{\epsilon}_i = \epsilon_i - \hat{\epsilon}_i$. 其中 $\hat{\theta}_i, \hat{\epsilon}_i$ 分别为 θ_i, ϵ_i 的估计值. θ_i, ϵ_i 为满足式(5)的模糊逻辑系统的参数.

对于系统(1),本文设计如下非线性分散鲁棒控制器:

$$\begin{cases} u = (u_1^T, u_1^T, \dots, u_N^T), \\ u_i = u_i^a + u_i^b + u_i^c. \end{cases} \quad (6a)$$

其中

$$u_i^a = K_i x_i. \quad (6b)$$

K 由假定 1 确定.

$$u_i^b = \begin{cases} -\tau_i \frac{B_i^T P_i x_i}{\|x_i^T P_i B_i\|} \hat{\theta}_i^T E_i(x_i), & B_i^T P_i x_i \neq 0, \\ 0, & B_i^T P_i x_i = 0, \end{cases} \quad (6c)$$

$$u_i^c = -\frac{\tau_i^2 - 1}{\alpha_i} B_i^T P_i x_i. \quad (6d)$$

其中 $\tau_i > 0$ 是可调的增益参数,它的选取应根据实际情况中增益大小的限制来选取; α_i 的意义同下面自适应律(7a). P_i 由 Lyapunov 方程(2)确定, $E_i(x_i)$ 由满足式(5)的模糊逻辑系统确定. $\hat{\theta}_i$ 由下列自适应律确定.

对系统(1),采用如下分散自适应律:

$$\dot{\theta}_i = -\alpha_i \theta_i + 2\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\| E_i(x_i), \quad (7a)$$

$$\dot{\hat{\epsilon}}_i = -\beta_i \hat{\epsilon}_i + 2\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\|. \quad (7b)$$

其中, α_i, β_i 为可调正常数,满足:

$$\frac{1}{\beta_i} + \frac{(1 + \|B_i\|^2)}{\alpha_i} < \frac{\lambda_{\min}^i(Q_i)}{2\lambda_{\max}^i(P_i)}. \quad (8)$$

显然,如果取

$$\alpha_i = \beta_i > \frac{2[1 + (1 + \|B_i\|^2)]}{\lambda_{\min}^i(Q_i)} \lambda_{\max}^i(P_i),$$

则式(8)被满足.通过下面定理2的证明过程可以看出,应根据系统(1)的状态、自适应律、收敛速度及范围来选取 α_i, β_i .

利用控制器(6)和自适应律(7),得到如下定理.

定理 1 考虑组合系统(1),如果假定1,2成立,则在模糊逻辑系统(5)及非线性分散控制器(6)和自适应律(7)的共同作用下,组合系统(1)的状态一致终极有界,并保证估计误差 $\bar{\theta}_i, \bar{\epsilon}_i$ 有界.

证 考虑系统(1),如果假定1,2成立,取正定

函数 $V = \sum_{i=1}^N (x_i^T P_i x_i + \frac{1}{2} \bar{\theta}_i^T \bar{\theta}_i + \frac{1}{2} \bar{\epsilon}_i^T \bar{\epsilon}_i)$ 则由式(2)得 V 沿系统(1)与控制器(6)构成的闭环系统的时间导数为

$$\begin{aligned} \dot{V} = & \sum_{i=1}^N \{-x_i^T Q_i x_i + 2x_i^T P_i \Delta f_i(x_i, t) + \\ & 2x_i^T P_i B_i (u_i^b + \Delta g_i(x_i, t)) + \\ & 2x_i^T P_i B_i u_i^c + 2x_i^T P_i \sum_{j=1}^N \Delta H_{ij}(x) - \bar{\theta}_i^T \dot{\theta}_i - \bar{\epsilon}_i^T \dot{\epsilon}_i\}. \end{aligned} \quad (9)$$

由假定2及控制器(6c), (6d)可以得到

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^N \{-x_i^T Q_i x_i + 2\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\| \cdot [\zeta_i(x_i) + \\ & \|B_i\| \eta_i(x_i) + \sum_{j=1}^N \varphi_{ij}(x_i)] - \\ & \frac{2(\tau_i^2 - 1) \|x_i^T P_i B_i\|^2}{\alpha_i} - \end{aligned}$$

$$2\tau_i \|x_i^T P_i B_i\| \bar{\theta}_i^T E_i(x_i) - \bar{\theta}_i^T \dot{\theta}_i - \bar{\epsilon}_i^T \dot{\epsilon}_i\}. \quad (10)$$

选择满足式(5)的模糊逻辑系统,可得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^N \{-x_i^T Q_i x_i + 2\hat{\epsilon}_i \lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\| + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & 2[\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\| - \tau_i \|x_i^T P_i B_i\|] \bar{\theta}_i^T E_i(x_i) - \\ & \frac{2(\tau_i^2 - 1) \|x_i^T P_i B_i\|^2}{\alpha_i} - \\ & \bar{\theta}_i^T [\dot{\theta}_i + \alpha_i \bar{\theta}_i - 2\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\| E_i(x_i)] - \\ & \bar{\epsilon}_i [\dot{\epsilon}_i + \beta_i \bar{\epsilon}_i - 2\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\|] + \\ & \alpha_i \bar{\theta}_i \bar{\theta}_i^T + \beta_i \bar{\epsilon}_i \bar{\epsilon}_i^T. \end{aligned} \quad (11)$$

利用柯西-施瓦兹不等式和自适应律(7),并记

$$\begin{cases} z_i = \sqrt{\alpha_i} \|\bar{\theta}_i\|^2 + \beta_i \bar{\epsilon}_i^2, \\ \delta_i = \sqrt{\frac{\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\|^2 + (\lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\| - \tau_i \|x_i^T P_i B_i\|)^2 \|E_i(x_i)\|^2}{\beta_i} + \frac{2(\tau_i^2 - 1) \|x_i^T P_i B_i\|^2}{\alpha_i}}. \end{cases} \quad (12)$$

由式(11)和(12)得

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \sum_{i=1}^N \{-\lambda_{\min}^i(Q_i) \|x_i\|^2 + 2\delta_i z_i - \frac{1}{2} z_i^2 + \frac{\alpha_i}{2} \|\bar{\theta}_i\|^2 + \\ & \frac{\beta_i}{2} \bar{\epsilon}_i^2 - \frac{\alpha_i}{2} \|\bar{\theta}_i\|^2 - \frac{\beta_i}{2} \bar{\epsilon}_i^2 - \frac{2(\tau_i^2 - 1) \|x_i^T P_i B_i\|^2}{\alpha_i}\}. \end{aligned} \quad (13)$$

注意到 $\|E_i(x_i)\| \leq 1$ 及

$$x_i^T P_i x_i \leq \lambda_{\max}^i(P_i) \|x_i\|^2,$$

由式(13)得

$$\dot{V} \leq \sum_{i=1}^N \{-\lambda_0^i x_i^T P_i x_i - \frac{\alpha_i}{2} \|\bar{\theta}_i\|^2 - \frac{\beta_i}{2} \bar{\epsilon}_i^2\} + M. \quad (14)$$

其中

$$\begin{aligned} \lambda_0^i = & \frac{\lambda_{\min}^i(Q_i)}{\lambda_{\max}^i(P_i)} - 2\lambda_{\max}^i(P_i) \left(\frac{1}{\beta_i} + \frac{(1 + \|B_i\|^2)}{\alpha_i}\right), \\ M = & \sum_{i=1}^N \left(\frac{\alpha_i}{2} \|\bar{\theta}_i\|^2 + \frac{\beta_i}{2} \bar{\epsilon}_i^2\right) \end{aligned}$$

是常数.取 $\lambda = \min_i (\lambda_0^i, \alpha_i, \beta_i)$,若可调正常数 α_i, β_i 满足式(8),则知 $\lambda > 0$, 则由式(14)可得

$$\dot{V} \leq -\lambda V + M. \quad (15)$$

定理1得证.

注 2 从定理1的证明过程可知,模糊逻辑系统的选择及可调参数 α_i, β_i 的选取将直接影响状态和参数估计误差最终收敛域的大小和收敛速度.通常,模糊逻辑系统应由专家确定,在保证适当收敛速度的前提下,应尽可能选取较小的可调参数 α_i, β_i , 以使状态和估计误差最终收敛到尽可能小的邻域内.

4 仿真算例(Simulation)

考虑如下由3个子系统组成的复杂控制系统

$$\dot{x}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -3 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -2 \end{pmatrix} x_1 + \Delta f_1 + \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} (u_1 + \Delta g_1) + \Delta H_{12}(x) + \Delta H_{13}(x), \quad (16a)$$

$$\dot{x}_2 = \begin{pmatrix} -2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \end{pmatrix} x_2 + \Delta f_2 + \begin{pmatrix} 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} (u_2 + \Delta g_2) + \Delta H_{21}(x) + \Delta H_{23}(x), \quad (16b)$$

$$\dot{x}_3 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} x_3 + \Delta f_3 + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} (u_3 + \Delta g_3) + \Delta H_{31}(x) + \Delta H_{32}(x). \quad (16c)$$

其中

$$x_1 = (x_{11}, x_{12}, x_{13})^T,$$

$$x_2 = (x_{21}, x_{22}, x_{23})^T,$$

$$x_3 = (x_{31}, x_{32})^T.$$

取满足假定1的K矩阵为 $K_1 = [-6, -2, 3]$, $K_2 = [1, 2, 1]$, $K_3 = [-1, -2]$; $Q_i = 2I_i$ (单位矩阵); 不确定项、输入通道干扰和互联项为

$$\Delta f_1 = \begin{pmatrix} x_{11} e^{-x_{12}^2} \sin(t) \\ \sin(x_{11} x_{13}) \\ x_{11} \sin x_{12} \end{pmatrix},$$

$$\Delta f_2 = \begin{pmatrix} x_{21} \cos(t) \\ \sin(x_{22} x_{23}) \\ x_{21} \sin x_{22} \end{pmatrix},$$

$$\Delta f_3 = \begin{pmatrix} x_{32} \sin(x_{31}) \\ x_{31} \sin(x_{32}) \end{pmatrix};$$

$$\Delta H_{12}(x) + \Delta H_{13}(x) = \begin{pmatrix} x_{11} \sin x_{21} \\ x_{12} \sin x_{31} \\ x_{13} \sin x_{23} \end{pmatrix},$$

$$\Delta H_{21}(x) + \Delta H_{23}(x) = \begin{pmatrix} x_{21} \sin x_{32} \\ -x_{22} \sin x_{13} \\ x_{23} \sin x_{12} \end{pmatrix},$$

$$\Delta H_{31}(x) + \Delta H_{32}(x) = \begin{pmatrix} x_{32} \sin x_{11} \\ x_{31} \sin x_{21} \end{pmatrix},$$

$$\Delta g_1 = x_{13}, \Delta g_2 = \sin x_{22}, \Delta g_3 = x_{31}^2.$$

取可调参数

$$\alpha_i = \beta_i = c_i + \frac{2(2 + \|B\|^2)[\lambda_{\max}^i(P_i)]^2}{\lambda_{\min}^i(Q_i)},$$

$$i = 1, 2, 3,$$

$$c_1 = 4, c_2 = 6, c_3 = 8, \tau_1 = 100,$$

$$\tau_2 = 1, \tau_3 = 1.$$

针对系统(16)的3个子系统,选取形如(3)和(4)的各有5条规则组成的模糊逻辑系统,各子系统相应的隶属函数分别为:

$$A_{11}(x_{11}) = e^{-\frac{(x_{11}-j_{11})^2}{2}},$$

$$j_{11} = -2.5684, -1.3245, 0.2568, 1.2345, 2.6789;$$

$$A_{12}(x_{12}) = e^{-\frac{(x_{12}-j_{12})^2}{2}},$$

$$j_{12} = -2.3246, -1.7824, -0.9824, 1.5674, 2.4562;$$

$$A_{13}(x_{13}) = e^{-\frac{(x_{13}-j_{13})^2}{2}},$$

$$j_{13} = -2.5687, -1.3245, 0.2541, 1.3456, 2.5769;$$

$$A_{21}(x_{21}) = e^{-\frac{(x_{21}-j_{21})^2}{2}},$$

$$j_{21} = -2.3260, -1.2456, 0.2546, 1.2387, 2.2450;$$

$$A_{22}(x_{22}) = e^{-\frac{(x_{22}-j_{22})^2}{2}},$$

$$j_{22} = -2.6542, -1.3245, 0.6542, 1.2456, 2.2463;$$

$$A_{23}(x_{23}) = e^{-\frac{(x_{23}-j_{23})^2}{2}},$$

$$j_{23} = -2.2360, -1.2365, -0.1234, 1.2365, 2.4521;$$

$$A_{31}(x_{31}) = e^{-\frac{(x_{31}-j_{31})^2}{2}},$$

$$j_{31} = -9.2154, -4.2654, 0.01254, 4.2456, 9.9854;$$

$$A_{32}(x_{32}) = e^{-\frac{(x_{32}-j_{32})^2}{2}},$$

$$j_{32} = -10.9832, -5.2465, -0.093, 5.5642, 10.2461.$$

取初值

$$x_1(0) = (9 \quad -8 \quad 8)^T,$$

$$x_2(0) = (-7 \quad 7 \quad -6)^T,$$

$$x_3(0) = (2.5 \quad -2)^T.$$

作仿真如图1~3,其中图1为系统的状态响应曲线;图2为系统的估计参数误差 $\tilde{\epsilon}_1, \tilde{\epsilon}_2, \tilde{\epsilon}_3$ 响应曲线;图3为系统的估计参数误差 $\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \tilde{\theta}_3$ 响应曲线。

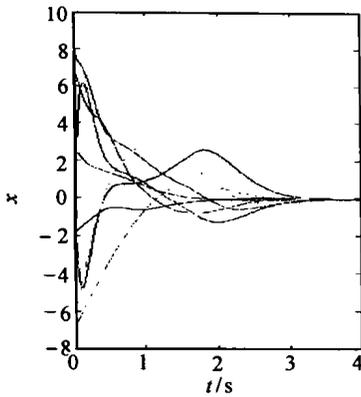


图1 系统状态响应曲线
Fig. 1 The state respond curve

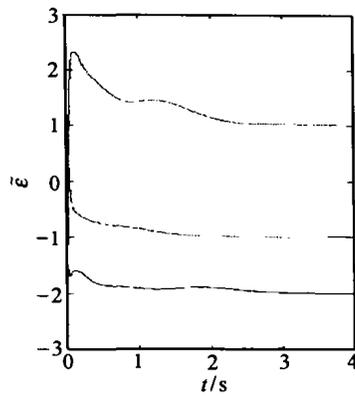


图2 $\tilde{\epsilon}$ 的估计误差曲线
Fig. 2 Estimate error curves of $\tilde{\epsilon}$

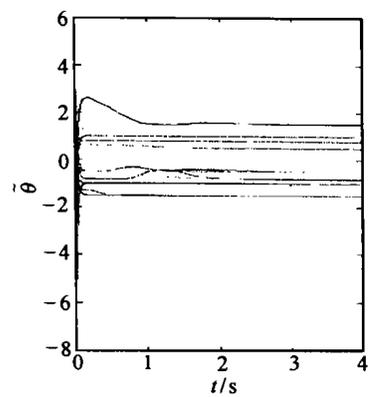


图3 $\tilde{\theta}$ 的估计误差曲线
Fig. 3 Estimate error curves of $\tilde{\theta}$

由上面的仿真结果可以看出本文所采用的方法是比较有效的。

参考文献(References):

- [1] 王耀青. 一类不确定参数系统鲁棒控制问题的研究[J]. 信息与控制, 1998, 27(3): 167-178.
(WANG Yaoqing. Study on the robust control for a class of uncertain systems [J]. *Information and Control*, 1998, 27(3): 167-178.)
- [2] 刘粉林, 黎阳生, 王银河, 等. 不确定相似组合系统的分散自适应输出反馈控制[J]. 信息与控制, 2000, 29(2): 97-101.
(LIU Fenlin, LI Yangsheng, WANG Yinhe, et al. Decentralized output feedback adaptive control of similar composite systems with uncertainty [J]. *Information and Control*, 2000, 29(2): 97-101.)
- [3] 谢永芳, 桂卫华, 吴敏, 等. 不确定性关联时滞大系统的分散鲁棒控制——LMI方法[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 263-269.
(XIE Yongfang, GUI Weihua, WU Min, et al. Decentralized robust control for large scale interconnected uncertain systems with time delay-LMI approach [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(2): 263-269.)
- [4] 杨益生, 贾欣乐. 不确定线性系统的鲁棒切换函数变结构控制[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 289-292.

(YANG Yansheng, JIA Xinle. Variable structure control strategy with robust sliding mode for uncertain linear systems [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(2): 289-292.)

- [5] WANG Li-xin. Fuzzy systems are universal approximations [A]. *Proc IEEE Int Conf on Fuzzy Systems* [C]. Piscataway: IEEE, 1992: 1163-1170.
- [6] WANG Li-xin. Stable adaptive fuzzy control of nonlinear systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1993, 1(2): 146-155.
- [7] TONG Shaocheng, LI Qingguo, CHAI Tianyou. Fuzzy adaptive control for a class of nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 101(1): 31-39.
- [8] CHAI Tianyou, TONG Shaocheng. Fuzzy direct adaptive control for a class of nonlinear systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1999, 103(3): 379-387.

作者简介:

王文庆 (1964—), 男, 副教授. 1993年毕业于西安建筑科技大学, 获工学硕士学位, 现在西北工业大学电子工程系攻读博士学位. 感兴趣的研究方向: 复杂系统的分析与控制. E-mail: wwq@xyou.edu.cn;

佟明安 (1937—), 男, 教授, 博士生导师. 中国航空学会理事, 《电光与控制》编委会副主任, 享受政府津贴. 航空火力指挥控制系统部级重点实验室主任. 现主要从事航空火力与指挥控制系统工程和自动控制理论及其应用的科研工作.