第20卷 第9期 控 制 与 决 策 2005年9月
Vol 20 No. 9 Control and Decision Sept. 2005

文章编号: 1001-0920(2005)09-1056-05

一类非线性离散系统模糊控制器的分析和设计

唐毅谦, 王建辉, 顾树生
(东北大学 信息科学与工程学院, 沈阳 110004)

摘 要: 针对一类非线性离散不确定系统,在系统状态不可测的情况下,以T-S模型描述不同状态空间的局部动态区域,并通过中心平均反模糊化、乘积推理、单点模糊化方法得到全局模糊系统模型. 基于李亚普诺夫理论和线性矩阵不等式,设计了一种基于观测器的鲁棒控制器,并对离散状态下的此类系统进行了稳定分析. 最后通过MATLAB仿真,证明了该方法的有效性.

关键词: 非线性系统; 模糊控制器; 模糊观测器
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Analysis and Design of Fuzzy Controller for a Class of Nonlinear Discrete Systems

TANG Yi-qian, WANG Jian-hui, GU Shu-sheng
(Information Science and Engineering School of Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: TANG Yi-qian, E-mail: yqt111@tom.com)

Abstract: Fuzzy adaptive robust control method based on the observer is proposed for a class of uncertain nonlinear discrete systems. A fuzzy controller is designed to stabilize the uncertain nonlinear systems whose states are unobservable. The uncertain nonlinear discrete systems are represented by Takigi-Sugeno (T-S) fuzzy models, and local dynamics in different state-space regions are represented by nonlinear models with uncertainty. The overall model of the systems is achieved by fuzzy blending of these uncertain nonlinear models by using weighted average defuzzifier, fuzzy inference and a singleness fuzzifier. The concept of parallel and distributed compensation is employed to design fuzzy robust observer and fuzzy robust controller. Stability conditions are deprived from Lyapunov method and linear matrix inequality. Finally MATLAB is applied to simulation to show the effectiveness of the proposed control scheme.

Key words: Nonlinear system; Fuzzy controller; Fuzzy observer

1 引 言

在非线性系统的设计中,稳定性问题已经得到广泛研究[1~4]. 文献[5]讨论了对于一系列不确定非线性系统的稳定性分析和模糊控制器的设计方法,但它仅考虑了模糊模型的不确定性,而未考虑系统状态不可测的问题; [6]阐述了含有模糊控制器和模糊观测器的单输入单输出线性反馈系统的稳定性问题,但它仅考虑了系统状态不可测,而未考虑模型不确定. 而在控制系统中,观测器设计和鲁棒控制是问题的关键. 本文对一类不确定离散非线性系统进行了稳定性分析,并提出了模糊鲁棒控制器、观测器的设计方法. 在此不仅考虑了系统状态不可测问题,而且考虑了模糊模型的不确定问题. 由T-S模型对不确定非线性离散系统建模,不确定的非线性模型描述不同状态空间的局部动态区域. 这些不确定的非线性模糊模型通过中心平均反模糊化、乘积推理、单点模糊化方法得到了全局模糊模型. 模糊鲁棒控制器和观测器的设计是在并行分布补偿的基础上实现

收稿日期: 2004-09-20; **修回日期**: 2005-03-10.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60274024).
作者简介: 唐毅谦(1964—),男,辽宁北镇人,教授,博士生,从事自适应控制、模糊控制研究; 王建辉(1957—),女,山东蓬莱人,教授,博士生导师,从事智能控制理论及应用等研究.

的, 针对每一个局部不确定非线性模型设计一个模糊观测器和模糊反馈控制器. 最后的观测器和控制器总体上是非线性的, 是又一次单个非线性观测器和控制器的模糊组合. 同时, 保证了系统鲁棒稳定性问题.

2　模糊鲁棒观测器的设计

实际上, 系统状态通常是不可测的, 必须设计一个模糊观测器, T-S 模型建模的离散非线性不确定系统为

规则 i: if X_1 is $M_{i1}\cdots X_n$ is M_{in} then

$$X(k+1)=A_iX(k)+f_i(X,k)+B_i[u(k)+g_i(X,u(k),k)],$$
$$Y(k)=C_iX. \tag{1}$$

其中: $i=1,2,\cdots,r$, M_{ij} 为模糊集合; X 为状态向量, $u(k)$ 为输入向量; $X\in R^n$, $u(k)\in R^n$, $Y(k)\in R^r$, $A_i\in R^{n\times n}$, $B_i\in R^{n\times m}$, $C_i\in R^{l\times n}$; f_i 和 g_i 为 n 维和 m 维可测函数向量, 可描述不确定性; r 为模糊规则数; $X_1\cdots X_n$ 为前提变量. 给定一对 $(x(k),u(k))$ 通过中心平均反模糊化、乘积推理、单点模糊化方法[7] 可得到全局模糊系统模型为

$$X(k+1)=\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)[A_iX+B_iu(k)]+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)f_i(X,k)+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)B_ig_i(X,u(k),k), \tag{2}$$

$$Y(k)=\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)C_iX. \tag{3}$$

这里

$$X=[X_1,\cdots,X_n],$$
$$\omega(X)=\prod_{j=1}^{n}M_{ij}(X_j),$$
$$\mu_i(X)=\omega(X)\Big/\sum_{i=1}^{n}\omega(X).$$

其中 $M_{ij}(X_j(k))$ 为 M_{ij} 中 $X_j(k)$ 的隶属度, 在此假设

$$\omega(X)>0,\ \sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)>0,\ \sum_{i=1}^{n}\omega(X)>0.$$

定义 1　如果 (A_i,B_i) 是可控的, 则模糊系统 (1) 就是局部可控的.

定义 2　如果 (A_i,C_i) $(i=1,2,\cdots,r)$ 是可观的, 模糊系统 (1) 就是局部可观的.

假设 1　存在常数矩阵 F_i 和函数矩阵 $h_i(X,K)$ $(i=1,2,\cdots,r)$ 如下:

$$B_i^{\mathrm T}P=F_iC_i,\ f_i(X,k)=B_ih_i(X,k),$$
$$i=1,2,\cdots,r.$$

假设 2　存在连续 $K_i>0$, $\alpha_i>0$, $\beta_i>0$, 有如下不等式存在:

$$\|h_i(X,k)\|\le K_i\|Y_i(k)\|,$$
$$\|g_i(X,u(k),k)\|\le\alpha_i\|Y_i(k)\|+\beta_i\|u(k)\|.$$

对于模糊鲁棒观测器设计, 假设模糊系统 (1) 是局部可观的. 基于并行分布补偿的概念, 局部状态观测器设计如下:

if X_1 is $M_{i1}\cdots X_n$ is M_{in}, then

$$\hat X(k+1)=A_i\hat X(k)+B_iu(k)+G_i[Y(k)-\hat Y(k)]+\Delta_{1i}+\Delta_{2i}$$
$$Y(k)=C_iX(k). \tag{4}$$

其中 G_i $(i=1,2,\cdots,r)$ 为观测误差矩阵.

$$\Delta_{1i}=\begin{cases}\dfrac{P^{-1}C_i^{\mathrm T}F_i^{\mathrm T}F_iC_i(X-\hat X)}{\|F_iC_i(X-\hat X)\|}K_i\|Y_i(k)\|, & W_i\ne 0;\\ 0, & W_i=0.\end{cases}$$

$$\Delta_{2i}=\begin{cases}\dfrac{P^{-1}C_i^{\mathrm T}F_i^{\mathrm T}F_iC_i(X-\hat X)}{\|F_iC_i(X(k)-\hat X(k))\|}\times[\alpha_i\|Y_i(k)\|+\beta_i\|u(k)\|], & W_i\ne 0;\\ 0, & W_i=0.\end{cases}$$

其中: $W_i=F_iC_i(X-\hat X)$, Δ_{1i} 和 Δ_{2i} 用于补偿处理 $f_i(X)$ 和 $g_i(X,u(k),k)$ 的不确定项. 模糊观测器的最终估计状态和最终输出是

$$\hat X(k+1)=\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)[A_i\hat X+B_iu(k)]+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)G_i[Y(k)-\hat Y(k)]+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{1i}+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{2i}, \tag{5}$$

$$\hat Y(k)=\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)C_i\hat X. \tag{6}$$

令 $\hat e(K)=X(k)-\hat X(k)$, 式 (2) 减式 (5), 可得

$$\hat e(k+1)=\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)[A_i-G_iC_i]\hat e(k)-\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{1i}+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)B_ig_i(X,u(k),k)+\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)f_i(X,k)-\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{2i}. \tag{7}$$

定理 1　如果存在一个共同的正定矩阵 P 使

$$(A_i-G_iC_i)^{\mathrm T}P(A_i-G_iC_i)-P<0, \tag{8}$$

其中 $i=1,2,\cdots,r$ 即为所有的子系统. 则由式 (7) 所描述的离散模糊系统是大范围渐近稳定的, 且 $\lim_{k\to\infty}\hat e(k)=0$.

证明　考虑到李亚普诺夫函数如下:

$$V(\hat{e}(k)) = \hat{e}^{\mathrm{T}}(k)P\hat{e}(k), \tag{9}$$

$$\Delta V(\hat{e}(k)) = V(\hat{e}(k+1)) - V(\hat{e}(k)) =$$
$$\sum_{i=1}^{r}\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)[(A_i - G_iC_i)^{\mathrm{T}}P(A_i - G_iC_i) - P]\hat{e}(k) +$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}Pf_i(X,k) + \sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}PB_ig_i(X,u,k) -$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}P\Delta_{1i} - \sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}P\Delta_{2i}. \tag{10}$$

从假设 1 和假设 2 可得

$$\Delta V' =$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}Pf_i(X,k) + \sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)PB_ig_i(X,u,k) -$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}P\Delta_{1i} - \sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}P\Delta_{2i} =$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)C_i^{\mathrm{T}}F_i^{\mathrm{T}}h_i(X,k) +$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)C_i^{\mathrm{T}}F_i^{\mathrm{T}}g_i(X,u,k) -$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)P\Delta_{1i}(k) - \sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)P\Delta_{2i}(k), \tag{11}$$

$$\Delta V' \le$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\|F_iC_i\hat{e}(k)\|\|K_i\|\|Y_i\| +$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\|F_iC_i\hat{e}(k)\|[\alpha_i\|Y_i\| + \beta_i\|u\|] -$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\|F_iC_i\hat{e}(k)\|\|K_i\|\|Y_i\| -$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\|F_iC_i\hat{e}(k)\|[\alpha_i\|Y_i\| + \beta_i\|u\|] = 0. \tag{12}$$

所以 $\Delta V(\hat{e}(k)) < 0$. □

3 模糊鲁棒控制器的设计

在假设模糊系统(1) 是局部可控的前提下设计模糊控制器. 利用并行分布补偿的概念, 局部状态反馈控制器设计如下:

控制规则 i:

if $X_1(k)$ is $M_{i1}\cdots X_n(k)$ is M_{in} then

$$u(k) = -K_i\hat{X}, \tag{13}$$

模糊控制器的最终结果是

$$u(k) = \sum_{i=1}^{r} -\mu_iK_i\hat{X}. \tag{14}$$

为保证闭环的稳定性, 引进参数 λ 如下:

$$M_{ij} = \begin{cases}\lambda_{ij}, M_{ij}(X_i) < \lambda_{ij};\\ M_{ij}(X_i), M_{ij}(X_i) \ge \lambda_{ij}.\end{cases}$$

通过中心平均反模糊化、乘积推理和单点模糊化得到 μ_i, 很容易得出存在常数 $\lambda_i > 0$ 使 $\mu_i \ge \lambda_i$, $i = 1, 2, \cdots, r$, 将式(14) 代入式(2) 和式(5) 中, 可得

$$X(k+1) =$$
$$\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\mu_i(X)\mu_j(X)A_iX - \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\mu_i\mu_jB_iK_j\hat{X} +$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)f_i(X,k) + \sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)B_ig_i(X,u(k),k), \tag{15}$$

$$\hat{X}(k+1) =$$
$$\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\mu_i(X)\mu_j(X)(A_i - B_iK_j)\hat{X} +$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)G_iC_i\hat{e}(k) + \sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{1i} + \sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{2i}. \tag{16}$$

从式(15) 和(16), 可得

$$\hat{e}(k+1) =$$
$$\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\mu_i(X)\mu_j(X)(A_i - G_iC_i)\hat{e}(k) +$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)f_i(X,k) + \sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)B_ig_i(X,u(k),k) -$$
$$\sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{1i} - \sum_{i=1}^{r}\mu_i(X)\Delta_{2i}. \tag{17}$$

定理 2 如果存在两个共同的正定矩阵 P,Q 使

$$(A_i - B_iK_i)^{\mathrm{T}}P(A_i - B_iK_i) - P + a_iI < 0,$$
$$(A_i - G_iC_i)^{\mathrm{T}}Q(A_i - G_iC_i) - Q + I < 0,$$

其中 $i = 1, 2, \cdots, r$.

$$\left(\frac{A_i - B_iK_j + A_j - B_jK_i}{2}\right)^{\mathrm{T}} \times$$
$$P\left(\frac{A_i - B_iK_j + A_j - B_jK_i}{2}\right) - P < 0,$$
$$\left(\frac{A_i - G_iC_j + A_j - G_jC_i}{2}\right)^{\mathrm{T}} \times$$
$$Q\left(\frac{A_i - G_iC_j + A_j - G_jC_i}{2}\right) - Q < 0,$$
$$i < j \le 1, 2, \cdots, r.$$

由式(15) 和(16) 所得出的离散模糊系统是大范围渐近稳定的, 并且 $\lim\limits_{k\to\infty} x(k) = 0$, $\lim\limits_{k\to\infty}\hat{e}(k) = 0$.

证明 取李亚普诺夫函数如下:

$$V(k) = V_1(k) + V_2(k). \tag{18}$$

其中

$$V_1(k) = \hat{X}^{\mathrm{T}}(k)P\hat{X}(k),$$
$$V_2(k) = \hat{e}^{\mathrm{T}}(k)Q\hat{e}(k).$$

当 k 取值不同时 $V_1(k)$ 不同, 由式(16) 得

$$\Delta V_1(k) =$$
$$\hat{X}^{\mathrm{T}}(k+1)P\hat{X}(k+1) - \hat{X}^{\mathrm{T}}(k)P\hat{X} =$$
$$\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\mu_i\mu_j\hat{X}^{\mathrm{T}}[(A_i - B_iK_j)^{\mathrm{T}}P(A_i -$$

$$B_iK_j)-P]\hat{X}+\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{X}^{\mathrm{T}}PG_iC_i\hat{e}(k)-\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{X}^{\mathrm{T}}P\Delta_{1i}-\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{X}^{\mathrm{T}}P\Delta_{2i}. \tag{19}$$

因为 $\mu_i \geq \lambda_i$, 从假设 2 可得

$$\begin{aligned}\Delta V_1 \leq\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\hat{X}^{\mathrm{T}}[(A_i-B_iK_i)^{\mathrm{T}}P(A_i-B_iK_i)-P]\hat{X}+\sum_{i<j}^{r}2\mu_i\mu_j\hat{X}^{\mathrm{T}}[H_{ij}^{\mathrm{T}}PH_{ij}-P]\hat{X}+\\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\frac{2}{\lambda_i}\|PG_iC_i\|\ \|\hat{X}(t)\|\ \|\hat{e}(k)\|+\\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\frac{k_i}{\lambda_i}\|PQ^{-1}C_iF_i\|\ \|C_i\|\ \|\hat{X}\|^2+\\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\frac{2}{\lambda_i}\|PQ^{-1}C_iF_i\|[\alpha_i\|C_i\|+\beta_i\|K_i\|]\|\hat{X}\|^2.\end{aligned}$$

令

$$H_{ij}=\frac{A_i-B_iK_j+A_j-B_jK_i}{2},$$

$$a_i=\sqrt{\frac{\|PG_iC_i\|}{\lambda_i}}+\frac{k_i}{\lambda_i}\|PQ^{-1}C_iF_i\|\ \|C_i\|+\frac{2}{\lambda_i}\|PQ^{-1}C_iF_i\|[(k_i+\alpha_i)\|C_i\|+\beta_i\|K_i\|],$$

则得出

$$\begin{aligned}\Delta V_1 \leq\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\hat{X}^{\mathrm{T}}(k)[(A_i-B_iK_i)^{\mathrm{T}}P(A_i-B_iK_i)-P]\hat{X}+\sum_{i<j}^{r}2\mu_i\mu_j\hat{X}^{\mathrm{T}}[H_{ij}^{\mathrm{T}}PH_{ij}-P]\hat{X}+\\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2 a_i\|\hat{X}\|^2+\sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\|\hat{e}(k)\|^2.\end{aligned} \tag{20}$$

k 取值不同 $V_2(k)$ 不同, 由式(17) 得出

$$\begin{aligned}\Delta V_2 =\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)[(A_i-G_iC_i)^{\mathrm{T}}Q(A_i-G_iC_i)-Q]\hat{e}(k)+\sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r}\mu_i\mu_j\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)[L_{ij}^{\mathrm{T}}QL_{ij}-Q]\hat{e}(k)+\\ & \sum_{i<j}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)Qf_i(X,k)+\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)QB_ig_i(X,u,k)-\\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)Q\Delta_{1i}-\sum_{i=1}^{r}\mu_i 2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)Q\Delta_{2i},\end{aligned} \tag{21}$$

这里 $L_{ij}=\left(\dfrac{A_i-G_iC_j+A_j-G_jC_i}{2}\right)$.

从定理 1 的证明过程, 可得

$$\begin{aligned}\Delta V_2 \leq\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)[(A_i-G_iC_i)^{\mathrm{T}}Q(A_i-G_iC_i)-Q+I]\hat{e}(k)+\sum_{i<j}^{r}2\mu_i\mu_j e^{\mathrm{T}}(k)[L_{ij}^{\mathrm{T}}QL_{ij}-Q]\hat{e}(k).\end{aligned} \tag{22}$$

由式(20) 和(22) 可得

$$\begin{aligned}\Delta V = \Delta V_1+\Delta V_2 \leq\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\hat{X}^{\mathrm{T}}(k)[(A_i-B_iK_i)^{\mathrm{T}}P(A_i-B_iK_i)-P+\alpha_i I]\hat{X}(k)+\sum_{i<j}^{r}2\mu_i\mu_j\hat{X}^{\mathrm{T}}[H_{ij}^{\mathrm{T}}PH_{ij}-P]\hat{X}(k)+\\ & \sum_{i=1}^{r}\mu_i^2\hat{e}^{\mathrm{T}}(k)[(A_i-G_iC_i)^{\mathrm{T}}Q(A_i-G_iC_i)^{\mathrm{T}}-Q+I]\hat{e}(k)+\\ & \sum_{i<j}^{r}2\mu_i\mu_j e^{\mathrm{T}}(k)[L_{ij}^{\mathrm{T}}QL_{ij}-Q]\hat{e}(k).\end{aligned} \tag{23}$$

如果定理 2 中的方程成立, 则有 $\Delta V < 0$. 这样, 模糊系统是大范围渐近稳定的

$$\lim_{k\to\infty}x(k)=0,\quad \lim_{k\to\infty}\hat{e}(k)=0. \quad \square$$

4　仿　　真

给定非线性系统模型为

$$\begin{aligned}X(k+1) &= A_iX(k)+f_i(X(k),k)+B_i[u(k)+g_i(X(k),u(k),k)],\\ Y(k) &= C_iX(k).\end{aligned}$$

对以上的非线性系统, 利用模糊 T-S 模型制定规则如下:

if $x_1(k)$ is M_1 then

$$x_1(k+1)=A_1x_1(k)+f_1(x_1(k),k)+B_1[u(k)+g_1(u(k),x(k),k)],$$

if $x_2(k)$ is M_2 then

$$x_2(k+1)=A_2x_2(k)+f_2(x_2(k),k)+B_2[u(k)+g_2(u(k),x(k),k)],$$

$$A_1=\begin{bmatrix}0.53 & 0.2\\ 0.69 & 0\end{bmatrix},\ A_2=\begin{bmatrix}0.33 & 0\\ 0 & 0.41\end{bmatrix},$$

$$B_1=\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix},\ B_2=\begin{bmatrix}-2\\ 1\end{bmatrix},$$

$$f_1=\begin{bmatrix}\xi x_1(k)\\ \xi x_2(k)\end{bmatrix},\ f_2=\begin{bmatrix}0.4\xi x_1(k)\\ \xi\sin(\omega t)x_2(k)\end{bmatrix},$$

$$g_1=0,\ g_2=0.145\sin(\omega t)u(k),$$

$$C_{11}=C_{21}=[1\quad 0].$$

其中 η 为[-1, 1] 上的随机数, $\xi=0.01\eta$ 为非线性系统的不确定参数.

系统在控制器作用下的闭环状态响应曲线及输入控制曲线如图 1～ 图 3 所示.

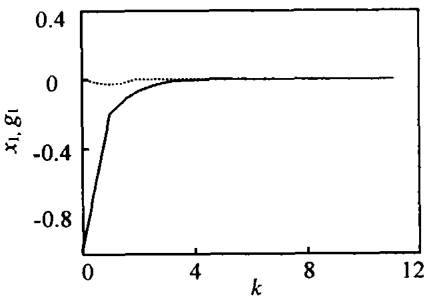

图 1　$x_1(k)$ 的状态响应

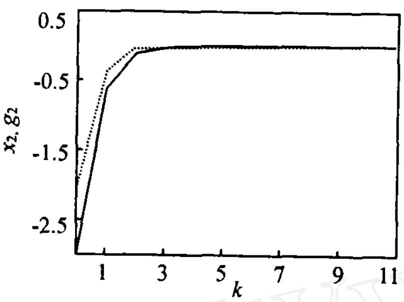

图 2　$x_2(k)$ 的状态响应

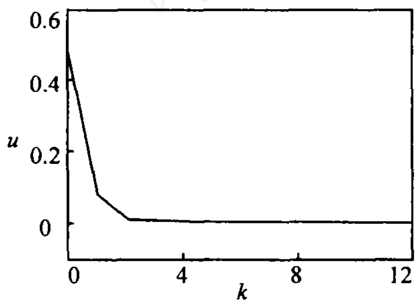

图 3　控制输入曲线 u

5　结　　语

本文利用T-S 模型描述一类不确定离散非线性系统, 基于李亚普诺夫理论和线性矩阵不等式, 进行了稳定性分析并提出了模糊鲁棒控制器、观测器的设计方法. 该方法不仅考虑了系统状态不完全直接可测问题, 而且考虑了模糊模型的不确定性问题, 为离散非线性系统的控制提供了一条有效途径.

参考文献(References)

[1] Tseng C S, Chen B S. H_∞ Decentralized Fuzzy Model Reference Tracking Control Design for Nonlinear Interconnected Systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(6): 795-809.

[2] Zhang H G, Bien Z N. Adaptive Fuzzy Control Based on MIMO Nonlinear Systems [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2000, 115(2): 191-204.

[3] Wu S J, Lin C T. Optimal Fuzzy Controller Design[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(2): 171-185.

[4] Tseng C S, Chen B S, Uang H J. Fuzzy Tracking Control Design for Nonlinear Dynamic Systems Via T-S Fuzzy Model[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(3): 381-392.

[5] Lee Hao Jae, et al. Robust Fuzzy Control of Nonlinear Systems with Parametric Uncertainties [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(2): 369-379.

[6] Hyeongcheol Lee, Masayoshi Tomizuka. Robust Adaptive Control Using a Universal Approximator for SISO Nonlinear Systems [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2000, 8(1): 95-106.

[7] 张化光, 何希勤. *模糊自适应控制理论及其应用*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002: 244-247.
(Zhang H, He X Q. *The Theories and Applications of Adaptive Fuzzy Control* [M]. Beijing: University of Aviation and Aerospace Press, 2002: 244-247.)

(上接第 1055 页)

[7] Shi Y, Eberhart R. Parameter Selection In Particle Swarm Optimization[A]. *Proc of the 7th Annual Conf on Evolutionary Programming* [C]. New York, 1998: 591- 600.

[8] Shi Y. Krohling R A. Co-evolutionary Particle Swarm Optimization to Solve Min-max Problems[A]. *Proc of the IEEE Cong on Evolutionary Computation* [C]. Honolulu, 2002: 1682-1687.