

# 基于分段模糊 Lyapunov 方法的离散模糊系统分析与设计<sup>1)</sup>

张松涛 任光

(大连海事大学轮机工程学院 大连 116026)  
(E-mail: zst0626@163.com)

**摘 要** 研究了基于分段模糊 Lyapunov 函数的离散 T-S 模糊控制系统稳定性分析及控制器设计问题. 首先, 在定义离散型分段模糊 Lyapunov 函数的基础上, 提出了一个新的判定开环离散 T-S 模糊系统稳定性的充分条件. 该条件仅需在每个最大交叠规则组内分别满足模糊 Lyapunov 方法中的条件, 从而降低了公共 Lyapunov 方法和模糊 Lyapunov 方法的保守性和难度. 然后, 利用并行分布补偿方法对闭环系统的稳定性进行了分析并设计了模糊控制器. 最后, 一个仿真示例说明了本文方法的有效性和优越性.

**关键词** 稳定性分析, T-S 模糊系统, 分段模糊 Lyapunov 函数  
**中图分类号** TP13

## Analysis and Design of Discrete Fuzzy System Based on Piecewise Fuzzy Lyapunov Approach

ZHANG Song-Tao REN Guang

(Marine Engineering College, Dalian Maritime University, Dalian 116026)  
(E-mail: zst0626@163.com)

**Abstract** Stability analysis and controller design of discrete T-S fuzzy control systems are studied based on piecewise fuzzy Lyapunov approach. Firstly, a new sufficient condition to check the stability of open-loop discrete T-S fuzzy systems is proposed after the definition of a discrete piecewise fuzzy Lyapunov function. This condition only needs to satisfy the condition of the fuzzy Lyapunov approach in each maximal overlapped-rule group. Therefore, the proposed condition is less conservative and less difficult than the common Lyapunov approach and the fuzzy Lyapunov approach. Then, by using the method of parallel distributed compensation, the stability of the closed-loop discrete T-S fuzzy system is analyzed and the fuzzy controller is designed. Finally, a simulation example shows the approach is effective and advantageous.

**Key words** Stability analysis, T-S fuzzy system, piecewise fuzzy Lyapunov function

## 1 引言

由于 T-S 模糊控制系统的模糊规则后件给出了确切的数学描述, 因此这为模糊控制的理论分析提供了方便. 近年来对 T-S 模糊控制系统稳定性分析的研究取得了诸多成果<sup>[1~4]</sup>.

1) 高等学校博士学科点专项科研基金 (20030151005) 和交通部交通应用基础研究基金项目 (200332922505) 资助  
Supported by Doctoral Foundation of Educational Committee (20030151005) and Ministry of Communication of P. R. China (200332922505)

收稿日期 2005-10-10 收修改稿日期 2006-1-4

Received October 10, 2005; in revised form January 4, 2006

文献 [1] 提出了用公共 Lyapunov 函数来研究 T-S 模糊系统稳定性的方法. 但对于规则数较大的模糊系统, 此方法很难找到满足所有规则的公共正定矩阵  $P$ . 为了降低公共 Lyapunov 函数方法的保守性, 文献 [2] 提出了用模糊 Lyapunov 函数来进行系统稳定性判定. 此方法在一定程度上降低了寻找公共正定矩阵  $P$  的保守性, 但是对于具有  $r$  个规则的模糊系统, 此方法必须找到  $r$  个正定矩阵满足  $r^2$  个 Lyapunov 不等式. 若  $r$  越大, 则需满足的不等式越多, 保守性也就越强. 最近, 文献 [3] 通过判别系统中两个连续状态最大距离的大小来减少模糊 Lyapunov 函数的稳定性判定方法的保守性. 但这个方法仅在某些特殊条件下才能少量减少所需满足不等式个数.

本文通过运用文献 [4] 所提出的双交叠模糊分划、最大交叠规则组等概念, 构造出离散型分段模糊 Lyapunov 函数, 进而提出判定离散 T-S 模糊控制系统稳定性的充分条件, 该条件仅需在每个最大交叠规则组内寻找正定矩阵来满足较少的 Lyapunov 不等式, 从而降低了上述稳定性判别方法的保守性和难度.

## 2 离散 T-S 模糊控制系统及其稳定性分析基本方法

对于一个多输入多输出离散非线性系统, 它的第  $i$  条模糊规则可描述如下:

$$R_i: \text{IF } x_1(k) \text{ is } M_1^i, \text{ and } \cdots, \text{ and } x_n(k) \text{ is } M_n^i \text{ THEN } \mathbf{x}(k+1) = A_i \mathbf{x}(k) + B_i \mathbf{u}(k), i = 1, 2, \cdots, r \quad (1)$$

其中  $r$  是模糊规则数,  $M_j^i (j = 1, \cdots, n)$  是模糊集,  $n$  为输入变量数,  $\mathbf{x}^T(k) = [x_1(k), x_2(k), \cdots, x_n(k)]$ ,  $\mathbf{x}(k)$  与  $\mathbf{u}(k)$  分别为模糊系统的状态向量和输入向量. 通过单点模糊化, 乘积推理和中心平均反模糊化方法, 模糊控制系统的总体模型为:

$$\mathbf{x}(k+1) = \sum_{i=1}^r h_i(k) (A_i \mathbf{x}(k) + B_i \mathbf{u}(k)) \quad (2)$$

其中,  $h_i(k) = \prod_{j=1}^n M_j^i(x_j(k)) / \sum_{i=1}^r \prod_{j=1}^n M_j^i(x_j(k))$ ,  $M_j^i(x_j(k))$  表示  $x_j(k)$  属于模糊集  $M_j^i$  的隶属度. 对于开环系统

$$\mathbf{x}(k+1) = \sum_{i=1}^r h_i(k) A_i \mathbf{x}(k) \quad (3)$$

由 Lyapunov 直接法, 判定离散控制系统稳定性的充分条件如下:

**定理 1.** 考虑离散系统  $\mathbf{x}(k+1) = f(\mathbf{x}(k))$ ,  $\mathbf{x}(k) \in R^n$ ,  $f(\mathbf{x}(k))$  是  $n \times 1$  的向量函数, 并且对于所有的  $k$  满足  $f(\mathbf{0}) = \mathbf{0}$ . 如果在  $\mathbf{x}(k)$  上连续的标量函数  $V(\mathbf{x}(k))$  满足: 1)  $V(\mathbf{0}) = 0$ ; 2) 对于所有的  $\mathbf{x}(k) \neq \mathbf{0}$ ,  $V(\mathbf{x}(k)) > 0$ ; 3) 当  $\|\mathbf{x}(k)\| \rightarrow \infty$  时,  $V(\mathbf{x}(k)) \rightarrow \infty$ ; 4) 对于所有的  $\mathbf{x}(k) \neq \mathbf{0}$ ,  $L = V(\mathbf{x}(k+1)) - V(\mathbf{x}(k)) < 0$ , 那么系统的平衡状态  $\mathbf{x}(k) = \mathbf{0}$  对所有的  $k$  是大范围渐近稳定的, 且  $V(\mathbf{x}(k))$  是 Lyapunov 函数.

基于公共 Lyapunov 函数, 文献 [1] 得出了判定离散 T-S 模糊系统稳定性的定理 2.

**定理 2.** 式 (3) 的模糊系统在平衡点大范围渐近稳定的充分条件是, 存在一个公共的正定矩阵  $P$  满足 Lyapunov 不等式  $A_i^T P A_i - P < 0$ ,  $i = 1, 2, \cdots, r$ .

为了降低定理 2 寻找公共正定矩阵  $P$  的保守性, 文献 [2] 提出了用形如  $V(\mathbf{x}(k)) = \sum_{i=1}^r h_i(k) \mathbf{x}^T(k) P_i \mathbf{x}(k)$  的模糊 Lyapunov 函数来判别系统稳定性的方法, 如定理 3 所示.

**定理 3.** 式 (3) 的模糊系统在平衡点大范围渐近稳定的充分条件是, 存在正定矩阵  $P_i$  (或  $P_l$ ) 满足 Lyapunov 不等式  $A_i^T P_l A_i - P_i < 0, i, l = 1, 2, \dots, r$ .

虽然定理 3 在一定程度上降低了寻找公共正定矩阵  $P$  的保守性, 但是必须求解  $r^2$  个 Lyapunov 不等式, 若  $r$  较大, 则求解较难. 最近, 文献 [3] 通过判别系统中两个连续状态最大距离的大小来减少定理 3 的保守性. 但是此方法仅在  $\delta = 1$  时可以少量减少求解 Lyapunov 不等式的个数.

本文通过研究文献 [4] 所提出的双交叠模糊分划等概念后, 得到如下结果.

### 3 离散 T-S 模糊控制系统的稳定性分析与设计

#### 3.1 开环模糊系统的稳定性分析

**定义 1.** 在输入采用双交叠模糊分划的模糊控制系统中, 若任意一个交叠规则组为  $g_c (c = 1, 2, \dots, f)$ , 则离散型分段模糊 Lyapunov 函数定义如下

$$V(\mathbf{x}(k)) = \mathbf{x}^T(k)P(k)\mathbf{x}(k), \quad P(k) = \sum_{c=1}^f \lambda_c P_c(k) \quad (4)$$

其中  $\lambda_c(\mathbf{x}(k)) = \begin{cases} 1, & \mathbf{x}(k) \in g_c \\ 0, & \mathbf{x}(k) \notin g_c \end{cases}$ ,  $\sum_{c=1}^f \lambda_c(\mathbf{x}(k)) = 1$ ,  $P_c(k) = \sum_{i \in L_c} h_i(k)P_i$ ,  $f$  为交叠规则组数,  $L_c = \{g_c \text{ 中包含的规则序号}\}$ .

**引理 1.** 设  $P, P_i$  和  $P_j$  均为  $n$  阶正定矩阵, 如果存在  $n$  阶方阵  $A$  和  $B$ , 使得  $A^T P A - P_i < 0$  和  $B^T P B - P_j < 0$ , 则  $A^T P B - P_i + B^T P A - P_j < 0$ .

**证明.** 对任意的  $n$  维实向量  $\mathbf{x} \neq \mathbf{0}$ , 有

$$\begin{aligned} \Gamma &= \mathbf{x}^T(A^T P B - P_i + B^T P A - P_j)\mathbf{x} = \mathbf{x}^T(-(A - B)^T P(A - B) + A^T P A + B^T P B - P_i - \\ &P_j)\mathbf{x} = -((A - B)\mathbf{x})^T P((A - B)\mathbf{x}) + \mathbf{x}^T(A^T P A - P_i)\mathbf{x} + \mathbf{x}^T(B^T P B - P_j)\mathbf{x} < 0 \quad \square \end{aligned}$$

**定理 4.** 对于输入采用双交叠模糊分划的开环离散 T-S 模糊系统 (3), 其在平衡点大范围渐近稳定的充分条件是, 在各最大交叠规则组中分别存在正定矩阵  $P_i$  (或  $P_l$ ) 满足

$$A_i^T P_l A_i - P_i < 0, \quad i, l \in \{G_q \text{ 中包含的规则序号}\}, \quad q = 1, 2, \dots, \prod_{j=1}^n (m_j - 1) \quad (5)$$

其中  $G_q$  为第  $q$  个最大交叠规则组,  $m_j$  为第  $j$  个输入变量模糊分划数.

**证明.** 若  $\mathbf{x}(k)$  与  $\mathbf{x}(k+1)$  在同一个交叠规则组, 则系统在第  $c$  个交叠规则组上的局部模型为  $\mathbf{x}(k+1) = \sum_{i \in L_c} h_i(k)A_i \mathbf{x}(k)$ . 如果存在正定矩阵  $P_i$  (或  $P_l$ ) 满足  $A_i^T P_l A_i - P_i < 0, i, l \in L_c$ , 则选择  $V_c(\mathbf{x}(k)) = \mathbf{x}^T(k) \sum_{i \in L_c} h_i(k)P_i \mathbf{x}(k)$  为该交叠规则组的一个 Lyapunov 函数, 容易验证  $V_c(\mathbf{x}(k))$  满足定理 1 的 1)、2) 和 3). 对所有的  $\mathbf{x}(k) \neq \mathbf{0}$ , 及  $h_i(k) > 0$  有

$$\begin{aligned} L_c &= V_c(\mathbf{x}(k+1)) - V_c(\mathbf{x}(k)) = \\ &\mathbf{x}^T(k) \left( \left( \sum_{i \in L_c} h_i(k)A_i^T \right) \left( \sum_{i \in L_c} h_i(k+1)P_i \right) \left( \sum_{i \in L_c} h_i(k)A_i \right) - \left( \sum_{i \in L_c} h_i(k)P_i \right) \right) \mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

对  $l, y \in L_c$ , 有  $\sum_{l \in L_c} \sum_{y \in L_c} h_l(k)h_y(k) = 1$ , 再由引理 1 可知

$$\begin{aligned} L_c &= \mathbf{x}^T(k) \left( \sum_{i \in L_c} \sum_{l \in L_c} \sum_{y \in L_c} h_i(k)h_l(k+1)h_y(k)(A_i^T P_l A_y - P_i) \right) \mathbf{x}(k) = \\ & \mathbf{x}^T(k) \sum_{l \in L_c} h_l(k+1) \left( \sum_{i \in L_c} h_i^2(k)(A_i^T P_l A_i - P_i) \right) \mathbf{x}(k) + \\ & \mathbf{x}^T(k) \sum_{l \in L_c} h_l(k+1) \left( \sum_{\substack{i < y \\ i, y \in L_c}} h_i(k)h_y(k)(A_i^T P_l A_y - P_i + A_y^T P_l A_i - P_y) \right) \mathbf{x}(k) < \\ & \mathbf{x}^T(k) \left( \sum_{l \in L_c} h_l(k+1) \sum_{i \in L_c} h_i^2(k)(A_i^T P_l A_i - P_i) \right) \mathbf{x}(k) < 0 \end{aligned}$$

因此  $V_c(\mathbf{x}(k))$  在第  $c$  个交叠规则组上满足定理 1 的 4).

若  $\mathbf{x}(k)$  与  $\mathbf{x}(k+1)$  不在同一个交叠规则组, 则模糊系统在整个输入论域上的总模型可表示为  $\mathbf{x}(k+1) = \sum_{c=1}^f \lambda_c(\mathbf{x}(k)) \left( \sum_{i \in L_c} h_i(k)A_i \mathbf{x}(k) \right)$ . 由式 (4) 的离散分段模糊 Lyapunov

函数有  $V(\mathbf{x}(k)) = \mathbf{x}^T(k)P(k)\mathbf{x}(k) = \mathbf{x}^T(k) \left( \sum_{c=1}^f \lambda_c P_c(k) \right) \mathbf{x}(k) = \sum_{c=1}^f \lambda_c \mathbf{x}^T(k)P_c(k)\mathbf{x}(k) = \sum_{c=1}^f \lambda_c V_c(\mathbf{x}(k))$ . 容易验证  $V(\mathbf{x}(k))$  满足定理 1 的 1)、2) 和 3), 并且有  $L = V(\mathbf{x}(k+1)) -$

$V(\mathbf{x}(k)) = \sum_{c=1}^f \lambda_c V_c(\mathbf{x}(k+1)) - \sum_{c=1}^f \lambda_c V_c(\mathbf{x}(k)) = \sum_{c=1}^f \lambda_c L_c < 0$ , 则  $V(\mathbf{x}(k))$  也满足定理 1 中的 4). 再由文献 [4] 的性质 2, 可知在各最大交叠规则组中存在正定矩阵  $P_i$  (或  $P_l$ ) 满足  $A_i^T P_l A_i - P_i < 0$ , 可使系统 (3) 在平衡点大范围渐近稳定.  $\square$

**注 1.** 在定理 4 中, 第  $i$  个规则不必满足不等式  $A_i^T P_{l'} A_i - P_i < 0$ , 其中  $l' \in \{ \text{第 } i \text{ 个规则所在的最大交叠规则组中不包含的规则序号} \}$ .

**注 2.** 定理 4 检验系统稳定性所需满足不等式的个数为  $(2^n)^2 \times \sum_{j=1}^n (m_j - 1)$ . 然而, 若有规则同时存在于一个以上的最大交叠规则组中, 则在这些不同的最大交叠规则组中会同时存在满足此规则的相同不等式. 所以, 定理 4 实际所需满足不等式的个数为  $\sum_{j=1}^n (3m_j - 2)$ ,

其小于等于  $(2^n)^2 \times \sum_{j=1}^n (m_j - 1)$ .

### 3.2 T-S 模糊控制器的设计

采用并行分布补偿模糊控制器来控制式 (1). 模糊控制器的全局模型为

$$\mathbf{u}(k) = - \sum_{i=1}^r h_i(k) K_i \mathbf{x}(k) \quad (6)$$

**定理 5.** 对于输入采用双交叠模糊分划的离散 T-S 模糊系统 (2), 如果采用式 (6) 所示的模糊控制器, 则系统在平衡点大范围渐近稳定的充分条件是, 在各最大交叠规则组中分

别存在正定矩阵  $P_i$  (或  $P_l$ ) 满足

$$G_{ik}^T P_l G_{ik} - P_i < 0, i, k, l \in \{G_q \text{中包含的规则序号}\}, q = 1, 2, \dots, \sum_{j=1}^n (m_j - 1) \quad (7)$$

其中  $G_{ik} = A_i - B_i K_k$ ,  $G_q$  为第  $q$  个最大交叠规则组,  $m_j$  为第  $j$  个输入变量模糊分划数.

**证明.** 该定理的证明方法与定理 4 的证明类似.

## 4 仿真示例

本节采用文献 [3] 中的一个开环离散 T-S 模糊系统例子进行仿真研究, 该系统为

$$R_i : \text{IF } x_1(k) \text{ is } M_1^i, \text{ and } x_2(k) \text{ is } M_2^j \text{ THEN } \mathbf{x}(k+1) = A_i \mathbf{x}(k), i = 1, 2, \dots, 16 \quad (8)$$

其中,  $x_1(k)$  与  $x_2(k)$  的模糊分划分别为  $F_1^t(x_1(k))$  和  $F_2^s(x_2(k))$  ( $t, s = 1, 2, 3, 4$ ), 如图 1 所示. 并且  $M_1^1 = M_1^2 = M_1^3 = M_1^4 = F_1^1$ ,  $M_1^5 = M_1^6 = M_1^7 = M_1^8 = F_1^2$ ,  $M_1^9 = M_1^{10} = M_1^{11} = M_1^{12} = F_1^3$ ,  $M_1^{13} = M_1^{14} = M_1^{15} = M_1^{16} = F_1^4$ ,  $M_2^1 = M_2^2 = M_2^3 = M_2^{13} = F_2^1$ ,  $M_2^4 = M_2^5 = M_2^6 = M_2^{10} = M_2^{14} = F_2^2$ ,  $M_2^7 = M_2^8 = M_2^{11} = M_2^{15} = F_2^3$ ,  $M_2^9 = M_2^{12} = M_2^{16} = F_2^4$ .

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} 0.86 & 0.22 \\ 0.06 & 0.86 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.14 \\ 0.05 & 0.86 \end{bmatrix}, A_3 = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.15 \\ 0.05 & 0.86 \end{bmatrix}, A_4 = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.11 \\ 0.05 & 0.86 \end{bmatrix} \\ A_5 &= \begin{bmatrix} 0.86 & 0.12 \\ 0.05 & 0.86 \end{bmatrix}, A_6 = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.05 \\ 0.05 & 0.85 \end{bmatrix}, A_7 = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.07 \\ 0.07 & 0.85 \end{bmatrix}, A_8 = \begin{bmatrix} 0.87 & 0.06 \\ 0.06 & 0.85 \end{bmatrix} \\ A_9 &= \begin{bmatrix} 0.85 & 0.07 \\ 0.06 & 0.85 \end{bmatrix}, A_{10} = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.06 \\ 0.06 & 0.85 \end{bmatrix}, A_{11} = \begin{bmatrix} 0.85 & 0.07 \\ 0.05 & 0.85 \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.05 \\ 0.14 & 0.86 \end{bmatrix} \\ A_{13} &= \begin{bmatrix} 0.86 & 0.06 \\ 0.14 & 0.87 \end{bmatrix}, A_{14} = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.06 \\ 0.15 & 0.87 \end{bmatrix}, A_{15} = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.06 \\ 0.17 & 0.87 \end{bmatrix}, A_{16} = \begin{bmatrix} 0.86 & 0.06 \\ 0.21 & 0.87 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

该系统共有 16 条模糊规则, 并满足双交叠模糊分划的条件. 基于 LMI 方法, 应用定理 2 和定理 3 分别求解 16 个及 256 个不等式来判定式 (8) 的稳定性, 但均未找到公共正定矩阵及 16 个正定矩阵, 所以定理 2 和定理 3 无法判别此系统是否稳定. 由图 1 可知, 系统共有 9 个最大交叠规则组. 通过 LMI 方法在最大交叠规则组中找到了 16 个正定矩阵, 所以由定理 4 可以判定式 (8) 的模糊系统是稳定的. 在理论上应用定理 4 须求解 144 个 Lyapunov 不等式, 但在这些不等式中, 有 44 个不等式与其它不等式相同, 因此应用本文所提出的方法只需求解 100 个不等式, 远少于文献 [3] 所需求解的 196 个不等式. 为了验证定理 4 的有效性, 对此模糊系统进行了仿真验证, 仿真结果证实了系统在各种初始条件下均稳定, 图 2 为初始条件  $\mathbf{x}_0(k) = [-0.5 \ 1.5]^T$  时系统的相平面图.

$$\begin{aligned} P_1 &= \begin{bmatrix} 0.7465 & 0.1580 \\ 0.1580 & 0.8377 \end{bmatrix}, P_2 = \begin{bmatrix} 0.7625 & 0.1209 \\ 0.1209 & 0.8194 \end{bmatrix}, P_3 = \begin{bmatrix} 0.7666 & 0.1256 \\ 0.1256 & 0.8158 \end{bmatrix} \\ P_4 &= \begin{bmatrix} 0.7758 & 0.1122 \\ 0.1122 & 0.7989 \end{bmatrix}, P_5 = \begin{bmatrix} 0.7682 & 0.1109 \\ 0.1109 & 0.8073 \end{bmatrix}, P_6 = \begin{bmatrix} 0.7734 & 0.0805 \\ 0.0805 & 0.7893 \end{bmatrix} \\ P_7 &= \begin{bmatrix} 0.7867 & 0.0993 \\ 0.0993 & 0.7857 \end{bmatrix}, P_8 = \begin{bmatrix} 0.8044 & 0.0939 \\ 0.0939 & 0.7777 \end{bmatrix}, P_9 = \begin{bmatrix} 0.7830 & 0.0919 \\ 0.0919 & 0.7679 \end{bmatrix} \\ P_{10} &= \begin{bmatrix} 0.7913 & 0.0865 \\ 0.0865 & 0.7660 \end{bmatrix}, P_{11} = \begin{bmatrix} 0.7988 & 0.0886 \\ 0.0886 & 0.7613 \end{bmatrix}, P_{12} = \begin{bmatrix} 0.8326 & 0.1271 \\ 0.1271 & 0.7661 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$P_{13} = \begin{bmatrix} 0.8086 & 0.1194 \\ 0.1194 & 0.7608 \end{bmatrix}, P_{14} = \begin{bmatrix} 0.8186 & 0.1252 \\ 0.1252 & 0.7611 \end{bmatrix}, P_{15} = \begin{bmatrix} 0.8252 & 0.1302 \\ 0.1302 & 0.7410 \end{bmatrix}$$

$$P_{16} = \begin{bmatrix} 0.8436 & 0.1558 \\ 0.1558 & 0.7390 \end{bmatrix}$$

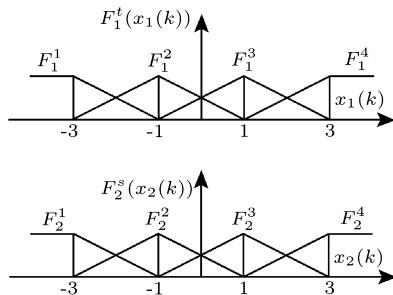
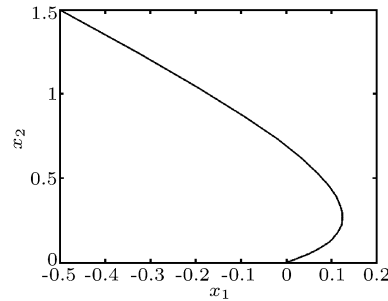


图 1 输入变量的隶属度函数

Fig. 1 The membership functions of input variables

图 2 初值为  $\mathbf{x}_0(k) = [-0.5 \ 1.5]^T$  状态相平面图Fig. 2 Phase portrait with  $\mathbf{x}_0(k) = [-0.5 \ 1.5]^T$ 

## 5 结束语

针对输入采用双交叠模糊分划的离散 T-S 模糊控制系统, 通过构造离散型分段模糊 Lyapunov 函数, 得到了新的判定 T-S 模糊系统稳定性的充分条件, 该条件仅需在每个最大交叠规则组中分别寻找正定矩阵, 减少了以往稳定性判定方法的保守性和难度. 仿真结果表明, 所得到的方法比文献 [1] 的条件更宽松, 需求解的 Lyapunov 不等式数量比文献 [2,3] 更少.

## References

- 1 Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, **45**(2): 135~156
- 2 Wang Y, Zhang Q L, Sun Z Q, Sun F C. Analysis and design of discrete fuzzy system with fuzzy Lyapunov approach. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(2): 255~260
- 3 Wang W J, Sun C H. A relaxed stability criterion for T-S fuzzy discrete systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 2004, **34**(5): 2155~2158
- 4 Xiu Z H, Ren G. Stability analysis and systematic design of T-S fuzzy control systems. *Acta Automatica Sinica*, 2004, **30**(5): 731~741

张松涛 博士研究生, 主要研究方向为模糊控制.

(ZHANG Song-Tao Ph. D. candidate. His research interest includes fuzzy control.)

任光 教授, 博士生导师. 主要研究方向为智能系统、船舶自动控制系统.

(REN Guang Professor. His research interests include intelligence system and marine automatic control systems.)