

文章编号: 1001-0920(2007)04-0457-05

采用双交叠模糊分划的 T-S 模糊系统的稳定性分析

丁宝苍¹, 雷兆明¹, 邹涛²

(1. 河北工业大学 电气与自动化学院, 天津 300130; 2. 上海交通大学 自动化研究所, 上海 200240)

摘要: 研究前件变量采用双交叠模糊分划的 T-S 模糊系统的稳定性问题. 首先针对自由系统, 将连续时间系统的、基于最大交叠规则组的稳定性分析方法推广应用于离散时间系统, 并采用模糊 Lyapunov 方法得到了稳定性的新结论. 采用非并行分布补偿控制律, 针对受控系统也得到了相应的结论. 这些结论比已有的结果更加宽松. 仿真例子验证了该稳定性结论.

关键词: T-S 模糊系统; 稳定性; 模糊分划; 模糊 Lyapunov 方法

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Stability analysis of T-S fuzzy systems with two-overlapped fuzzy partition

DING Baocang¹, LEI Zhaoming¹, ZOU Tao²

(1. School of Electricity and Automation, Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China. Correspondent: DING Bao-cang, E-mail: baocang.ding@gmail.com)

Abstract: The stability is studied for fuzzy systems with their premise variables employing two-overlapped fuzzy partition. For autonomous systems, the stability analysis method of continuous systems is generalized to discrete time systems based on the maximal overlapped-rule group, and the fuzzy Lyapunov method is applied to obtain new stability results. By applying the non-parallel distributed compensation law, the corresponding results are obtained for controlled systems. The results are less conservative than existing ones. A simulation example shows the stability results.

Key words: T-S fuzzy system; Stability; Fuzzy partition; Fuzzy Lyapunov method

1 引言

在模糊系统研究中, T-S 模糊系统占有重要的地位^[1-3]. 关于 T-S 模糊系统早期的稳定性研究(如文献[4-6]等)给出针对模型集中所有模型的公共 Lyapunov 函数, 具有较大的保守性. 文献[1, 3, 7]针对连续型模糊系统^[7]和离散模糊系统^[1, 3]采用了模糊 Lyapunov 函数. 如果公共 Lyapunov 函数为一个二次型函数, 对应的模糊 Lyapunov 函数则是一组二次型函数的特殊凸组合, 组合系数是时变的且由隶属度计算确定. 对连续型模糊系统, 文献[2]研究了前件变量采用双交叠模糊分划(TFP)时的性质, 提出了一个 T-S 模糊系统稳定的充分条件, 即在各个最大交叠规则组内分别存在公共的正定矩阵. 该

结果较公共 Lyapunov 函数方法更加宽松.

为进一步研究离散模糊系统的稳定性, 本文考虑前件变量采用 TFP 的系统, 将文献[2]的方法推广应用到离散时间系统. 对自由系统, 结合模糊 Lyapunov 方法可得到新的结果, 即在每个最大交叠规则组内构造模糊 Lyapunov 函数. 对受控系统, 以非二次型 Lyapunov 函数(其构造也与隶属度直接相关)和非并行分布补偿控制律为例, 也得到了相应的结论. 这些结论均比已有的结果更加宽松.

2 T-S 模糊系统及其双交叠模糊分划

考虑 T-S 模糊系统, 其规则的形式如下:

$$R_{i_1 i_2 \dots i_p} :$$

收稿日期: 2005-12-09; 修回日期: 2006-05-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(60504013); 河北省教育厅自然科学基金重点项目(ZH2006008); 河北省科学技术研究与发展指导计划(06213545).

作者简介: 丁宝苍(1972—), 男, 河北隆化人, 副教授, 博士, 从事预测控制、模糊控制等研究; 雷兆明(1974—), 男, 河北沧州人, 博士生, 从事电机控制、网络控制等研究.

If $z_1(t)$ is F_1^1 , $z_2(t)$ is F_2^2 ,
 ..., and $z_p(t)$ is F_p^p ,

Then

$$x(t+1) = A_{i_1 i_2 \dots i_p} x(t) + B_{i_1 i_2 \dots i_p} u(t). \tag{1}$$

其中: $F_l^i (i \in \{1, 2, \dots, r\}, l \in \{1, 2, \dots, p\})$ 为模糊集; $z_l (l \in \{1, 2, \dots, p\})$ 为系统的前件变量, 记 $z = [z_1, z_2, \dots, z_p]^T$; $x \in \mathbf{R}^x$ 为可测状态; $u \in \mathbf{R}^u$ 为输入; $i_1 i_2 \dots i_p$ 为规则序号. 显然, 模糊规则总数为 $r^p = \prod_{l=1}^p r_l$.

采用单点模糊法, Sum-Product 推理和重心法去模糊, 模糊系统总体模型为

$$x(t+1) = \sum_{i_l=1:l \in \{1, 2, \dots, p\}}^{r_l} h_{i_1 i_2 \dots i_p}(t) (A_{i_1 i_2 \dots i_p} x(t) + B_{i_1 i_2 \dots i_p} u(t)) = A_z x(t) + B_z u(t). \tag{2}$$

其中: 对矩阵 X , 有

$$X_z = \sum_{i_l=1:l \in \{1, 2, \dots, p\}}^{r_l} h_{i_1 i_2 \dots i_p}(t) X_{i_1 i_2 \dots i_p},$$

且

$$h_{i_1 i_2 \dots i_p}(t) \geq 0, \forall i_l \in \{1, 2, \dots, r_l\}, l \in \{1, 2, \dots, p\}, \sum_{i_l=1:l \in \{1, 2, \dots, p\}}^{r_l} h_{i_1 i_2 \dots i_p}(t) = 1; \tag{3a}$$

$$h_{i_1 i_2 \dots i_p}(t) = \prod_{i_l=1:l \in \{1, 2, \dots, p\}}^{r_l} f_{i_l}^{i_l}(z_l(t)). \tag{3b}$$

而 $f_{i_l}^{i_l}(z_l(t))$ 代表序号为 $i_1 i_2 \dots i_p$ 的规则的激活度, 有

$$f_{i_l}^{i_l}(z_l(t)) = \prod_{i_l=1:l \in \{1, 2, \dots, p\}}^{r_l} F_l^{i_l}(z_l(t)),$$

$F_l^{i_l}(z_l(t))$ 为“ $z_l(t)$ is $F_l^{i_l}$ ”的隶属度函数.

首先考虑与式(2)对应的自由 T-S 模糊系统

$$x(t+1) = \sum_{i_l=1:l \in \{1, 2, \dots, p\}}^{r_l} h_{i_1 i_2 \dots i_p}(t) A_{i_1 i_2 \dots i_p} x(t). \tag{4}$$

对该系统, 早期的稳定性研究都采用公共二次型 Lyapunov 函数, 典型的结果如下:

引理 1^[6] 如果存在一个公共的正定对称矩阵 P 使得

$$A_{i_1 i_2 \dots i_p}^T P A_{i_1 i_2 \dots i_p} - P < 0, \forall i_l \in \{1, 2, \dots, r_l\}, l \in \{1, 2, \dots, p\}, \tag{5}$$

则系统(4)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

寻找公共的正定对称矩阵 P 往往比较困难, 因此引理 1 具有较大的保守性. 文献[1]等利用模糊 Lyapunov 函数, 进一步给出稳定性结果, 典型的如下:

引理 2 如果存在正定对称矩阵 $P_{i_1 i_2 \dots i_p}$ 使得

$$A_{i_1 i_2 \dots i_p}^T P_{j_1 j_2 \dots j_p} A_{i_1 i_2 \dots i_p} - P_{i_1 i_2 \dots i_p} < 0, \forall j_l, i_l \in \{1, 2, \dots, r_l\}, l \in \{1, 2, \dots, p\}, \tag{6}$$

则系统(4)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

注 1 令 $P_{j_1 j_2 \dots j_p} = P$, 则由式(6)得到式(5), 故引理 2 包含引理 1. 引理 2 通过引入更多的线性矩阵不等式(LMI) 变量使得稳定条件更加宽松; 同时, 由于引入更多的自由参数, 使得 LMI 数量由引理 1 的 $N_{L1} = \prod_{l=1}^p r_l$ 个增加到引理 2 的 $N_{L2} =$

$$\left(\prod_{l=1}^p r_l \right)^2 \text{ 个.}$$

下面考虑一类常见的系统, 即采用 TFP 的系统.

定义 1^[2] 称模糊集组 $\{F_i, i = 1, 2, \dots, r\}$ 为论域 Z_l 的一个 TFP, 如果 F_i 在论域 Z_l 上是两两交叠的. 称数值 r_l 为论域 Z_l 的模糊分划数. 显然在系统(1)~(4)中, 对于 z_l , 模糊分划数为 $r_l, l \in \{1, 2, \dots, p\}$.

定义 2 对于系统的某一 $z(t)$, 所有激活度 $f_{i_1 i_2 \dots i_p}(t) > 0$ 的规则构成了一个交叠规则组. 该 $z(t)$ 称为此交叠规则组的一个作用点, 所有作用点的集合称为该交叠规则组的作用域.

定义 3 在所有交叠规则组中, 包含规则数最多的称为最大交叠规则组.

采用 TFP 的系统具有重要的性质^[2]: 其最大交叠规则组共有 $M = \prod_{l=1}^p (r_l - 1)$ 个, 每个最大交叠规则组中包含的规则数为 2^p ; 任一交叠规则组中所包含的规则均包含于最大交叠规则组.

对采用 TFP 的连续时间系统, 文献[2]得到了一个结果. 该结果可直接用于离散时间系统:

定理 1 假设各前件变量均采用 TFP. 如果在各最大交叠规则组中, 分别存在一个公共的正定对称矩阵 $P_m, m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 使得

$$A_{i_1^m i_2^m \dots i_p^m}^T P_m A_{i_1^m i_2^m \dots i_p^m} - P_m < 0, \forall i_1^m i_2^m \dots i_p^m \in s_m, m \in \{1, 2, \dots, M\}, \tag{7}$$

其中 $s_m = \{$ 第 m 个最大交叠规则组中包含的规则序号 $\}$, 则系统(4)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

证明 只需将文献[2]中定理 3 的证明对偶地用于离散时间系统即可.

与引理 1 相比,定理 1 增加了自由 LMI 变量,因此稳定的条件更加宽松. 根据最大交叠规则组的性质可知,定理 1 中包含的 LMI 的个数为 $N_{T1} = M \times \sum_{l=1}^p 2(r_l - 1)$. 随着 p 和 r_l 的增加,定理 1 中的 LMI 变量数和 LMI 个数的增加都比引理 2 慢得多. 然而,定理 1 在每个最大交叠规则组中仍然采用了公共的正定矩阵. 本文下一节将针对采用 TFP 的系统,基于模糊型 Lyapunov 方法给出两个新的结论.

3 自由 T-S 模糊系统稳定性的新结论

定理 2 假设各前件变量均采用 TFP. 如果存在正定对称矩阵 $P_{i_1 i_2 \dots i_p}, i_l \in \{1, 2, \dots, r_l\}, l \in \{1, 2, \dots, p\}$, 使得

$$A_{i_1 i_2 \dots i_p}^T P_{j_1 j_2 \dots j_p} A_{i_1 i_2 \dots i_p} - P_{i_1 i_2 \dots i_p} < 0, \quad \forall i_1^m, i_2^m, \dots, i_p^m, j_1^m, j_2^m, \dots, j_p^m \in S_m, \quad m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (8)$$

则系统(4)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

证明 是文献[2]中定理 3 证明的推广.

注 2 对定理 2, 需注意以下 4 点:

- 1) 所取正定矩阵数量与引理 2 相同;
- 2) 一般来说,总的无重复 LMI 的个数 $N_{T2} < M$

$\times (2^p)^2 = \sum_{l=1}^p 4(r_l - 1)$, 这是因为对不同的最大交叠规则组可能存在完全相同的 LMI;

3) $N_{L1} = N_{T2} = N_{L2}$, 不难看出,式(8)是(6)的一部分,因此定理 2 较引理 2 更加宽松;

4) 尽管推广应用了定理 1 的证明方法,定理 2 的意义却有很大不同,主要在于正定矩阵不是特别针对最大交叠规则组选取的.

定理 3 假设各前件变量均采用 TFP. 如果在各最大交叠规则组中,存在正定对称矩阵 $P_{i_1 i_2 \dots i_p}^m$ 使得

$$A_{i_1 i_2 \dots i_p}^T P_{j_1 j_2 \dots j_p}^m A_{i_1 i_2 \dots i_p}^m - P_{i_1 i_2 \dots i_p}^m < 0, \quad \forall i_1^m, i_2^m, \dots, i_p^m, j_1^m, j_2^m, \dots, j_p^m \in S_m, \quad m \in \{1, 2, \dots, M\}, \quad (9)$$

则系统(4)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

证明 考虑定理 1 的结果,只需在每个交叠规则组内部,采用模糊型 Lyapunov 方法对定理 1 进行推广即可(就象引理 2 是对引理 1 的推广一样).

注 3 对定理 3, 需注意以下 4 点:

1) LMI 变量的个数为 $\sum_{l=1}^p 2(r_l - 1)$, 即等于定理 1 对应的 LMI 个数;

2) LMI 的个数 $N_{T3} = M \times \sum_{l=1}^p 4(r_l - 1)$;

3) 若令 $P_{i_1 i_2 \dots i_p}^{m_1} = P_{i_1 i_2 \dots i_p}^m$, 则不难看出定理 3 较定理 2 更加宽松;

4) 若令 $P_{i_1 i_2 \dots i_p}^{m_1} = P_m$, 则不难看出定理 3 较定理 1 更加宽松.

4 考虑控制器后的新结论

有了定理 2 和定理 3 后,可进一步考虑引入控制器后的相应结论. 为方便起见,本节的符号表达采用一些简化形式,如数学公式中的 $(*)$ 表示对称矩阵中的对称元, $i_1 i_2 \dots i_p$ 简化为 i , $i_1^m i_2^m \dots i_p^m$ 简化为 i_m 等. 考虑受控系统(2), 并采用如下形式的控制器:

$$u(t) = \begin{pmatrix} r \\ i=1 \end{pmatrix} h_i(z(t)) Y_i \begin{pmatrix} r \\ i=1 \end{pmatrix} h_i(z(t)) G_i^{-1} x(t) = Y_z G_z^{-1} x(t), \quad (10)$$

其中 Y_i 和 G_i 待定. 针对式(2)和(10),文献[8]研究了闭环系统的稳定性,得到如下结果(见其“ Theorem 5 ”):

引理 3 如果存在矩阵 Y_i, G_i 和对称矩阵 $P_i > 0, Q_i^k > 0, Q_{ij}^k, j > i$, 使得

$$Q_{ii}^k > Q_i^k, \quad i, k \in \{1, \dots, r\}, \quad (11)$$

$$Q_{ij}^k + Q_{ji}^k > Q_{ij}^k, \quad j > i, \quad i, j, k \in \{1, \dots, r\}, \quad (12)$$

$$k = \begin{bmatrix} 2Q_i^k & (*) & \dots & (*) \\ Q_{i2}^k & 2Q_i^k & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \ddots & (*) \\ Q_{1r}^k & \dots & Q_{(r-1)r}^k & 2Q_i^k \end{bmatrix} > 0, \quad k \in \{1, \dots, r\}. \quad (13)$$

其中

$$Q_{ij}^k = \begin{bmatrix} P_i & (*) \\ A_i G_j + B_i Y_j & G_k + G_k^T - P_k \end{bmatrix}, \quad i, j, k \in \{1, \dots, r\}. \quad (14)$$

则采用控制器(10)后,受控系统(2)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

引理 3 中, Q_i^k 和 Q_{ij}^k 都是松弛矩阵变量,因为它们为零阵并去掉式(13)时,将得到更加保守的稳定性结论. 将定理 2 和定理 3 分别与引理 3 结合,可得到如下两个结论.

定理 4 假设各前件变量均采用 TFP. 如果存在矩阵 Y_i, G_i 和对称矩阵 $P_i > 0, Q_i^k > 0, Q_{ij}^k, j > i$, 使得

$$Q_{m_m}^k > Q_m^k, \quad i_m, k_m \in S_m, \quad (15)$$

$$Q_{m_m}^k + Q_{m_i}^k > Q_{m_m}^k, \quad j_m > i_m, \quad i_m, j_m, k_m \in S_m, \quad (16)$$

$$Q_{m_m}^k > 0, \quad k_m \in S_m. \quad (17)$$

其中

$$k_{i_m j_m} = \begin{bmatrix} P_{i_m} & (*) \\ A_{i_m} G_{j_m} + B_{i_m} Y_{j_m} & G_{k_m} + G_{k_m}^T - P_{k_m} \end{bmatrix},$$

$$i_m, j_m, k_m \in S_m; \quad (18)$$

$$k_{m^k} = k \text{ 去掉所有下标 } i, j \notin S_m \text{ 的 } Q \text{ 分块.} \quad (19)$$

则采用控制器(10)后,受控系统(2)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

证明略.

注 4 对定理 4,需注意以下 3 点:

- 1) LMI 变量的个数与引理 3 相同,但 LMI 的数量一般比引理 3 少;
- 2) 由于每个最大交叠规则组中包含的规则数为 2^p , k_{m^k} 总是具有 $2^p \times 2^p$ 个 Q 分块,与引理 3 的 k 相比, k_{m^k} 一般具有更小的维数;
- 3) 定理 4 的条件是引理 3 的一部分,因此定理 4 较引理 3 更加宽松.

定理 5 假设各前件变量均采用 TFP. 如果存在矩阵 Y_i, G_i , 且在第 m 个最大交叠规则组中存在对称矩阵 $P_{i_m}^m > 0, Q_{i_m^k m^k}^m > 0, Q_{i_m^k m^k}^m, j_m > i_m$, 使得

$$k_{i_m^k j_m^k}^m > Q_{i_m^k m^k}^m, \quad i_m, k_m \in S_m, \quad (20)$$

$$k_{i_m^k j_m^k}^m + k_{j_m^k i_m^k}^m > Q_{i_m^k m^k}^m,$$

$$j_m > i_m, \quad i_m, j_m, k_m \in S_m, \quad (21)$$

$$k_{m^k} = \begin{bmatrix} 2Q_{i_m^k m^k}^m & (*) & \dots & (*) \\ Q_{i_m^k m^k}^m & 2Q_{j_m^k m^k}^m & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \ddots & (*) \\ Q_{i_m^k m^k}^m & \dots & Q_{i_m^k m^k}^m & 2Q_{j_m^k m^k}^m \end{bmatrix} > 0,$$

$$k_m \in S_m. \quad (22)$$

其中

$$k_{i_m^k j_m^k}^m = \begin{bmatrix} P_{i_m}^m & (*) \\ A_{i_m} G_{j_m} + B_{i_m} Y_{j_m} & G_{k_m} + (G_{k_m})^T - P_{k_m} \end{bmatrix},$$

$$i_m, j_m, k_m \in S_m; \quad (23)$$

$\{i_m^1, i_m^2, \dots, i_m^{2^p}\}$ 组成与 S_m 对应的 Q 分块的下标集. (24)

则采用控制器(10)后,受控系统(2)的平衡点 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的.

如果在定理 5 中,用 $\{P_{i_m}^m, Q_{i_m^k m^k}^m, Q_{j_m^k m^k}^m\}$ 代替 $\{P_{i_m}^m, Q_{i_m^k m^k}^m, Q_{j_m^k m^k}^m\}$, 则得到定理 4. 故定理 5 是比定理 4 更加宽松的稳定性结论.

5 仿真比较

考虑一个具有两个前件变量的 T-S 模糊控制系统,其规则的形式如下:

$R_{ij} : \text{If } z_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } z_2(t) \text{ is } F_2^j,$

$$\text{Then } x(t+1) = A_{ij}x(t) + B_{ij}u(t),$$

$$i \in \{1, 2, 3\}, j \in \{1, 2\}. \quad (25)$$

其中: $z_1 = x_1$ 的模糊分划为 $\{F_1^i, i = 1, 2, 3\}$, $z_2 = x_2$ 的模糊分划为 $\{F_2^j, j = 1, 2\}$, F_1^i, F_2^j 均采用梯形隶属度函数,符合双交叠模糊分划的条件. 系统前件变量平面上的示意图 1. 系统一共有 15 个交叠规则组, M_{ij} 为只包含规则 R_{ij} 的单规则组的作用域; S_1, S_2 为两个最大交叠规则组的作用域, S_1 包含了 $R_{11}, R_{12}, R_{21}, R_{22}$ 四条规则, S_2 包含了 $R_{21}, R_{22}, R_{31}, R_{32}$ 四条规则;其余 7 个交叠规则组均只包含 2 条规则.

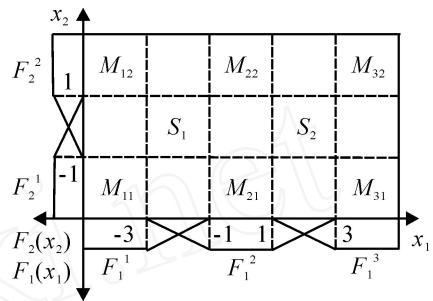


图 1 两前件变量模糊系统的模糊分划平面示意图 为方便说明问题,仅考虑如下特殊情形:

$$A_{11} = A_{12} = \begin{bmatrix} 1 & - \\ -1 & -0.5 \end{bmatrix},$$

$$A_{21} = A_{22} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & -0.5 \end{bmatrix},$$

$$A_{31} = A_{32} = \begin{bmatrix} 1 & - \\ -1 & -0.5 \end{bmatrix},$$

$$B_{11} = B_{12} = \begin{bmatrix} 5 + \\ 2 \end{bmatrix},$$

$$B_{21} = B_{22} = \begin{bmatrix} 5 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$B_{31} = B_{32} = \begin{bmatrix} 5 - \\ -2 \end{bmatrix}.$$

采用引理 3 和定理 4(定理 5), 则存在可行解的条件分别为 1.766 60 和 1.796 67(1.796 78). 采用文献[8]的 Theorem 3 ~ Theorem 5 时, 存在可行解的条件是 1.756 6, 1.761 36 和 1.766 60. 因此相比较而言, 本文的定理 4 对结论的改进是比较显著的(在文献[8]中 Theorem 4 和 Theorem 5 作为主要结论, 是对 Theorem 3 的改进).

取 $\gamma = 1.796$, 采用定理 4 得到如下可行解:

$$Y_{11} = Y_{12} = [-131.3 \quad 1354],$$

$$G_{11} = G_{12} = \begin{bmatrix} 2030.7 & 1032.1 \\ 453.5 & 5633.7 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned}
 Y_{21} &= Y_{22} = [-466.7 \quad 96.2], \\
 G_{21} &= G_{22} = \begin{bmatrix} 2140.3 & -1000.3 \\ 552.2 & 4601.8 \end{bmatrix}, \\
 Y_{31} &= Y_{32} = [-1337.4 \quad -1355.8], \\
 G_{31} &= G_{32} = \begin{bmatrix} 3634 & 505.7 \\ 624 & 3013.6 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

取 $x(0) = [5 \quad -5]^T$, 采用控制律(10)后的闭环状态响应如图 2 虚线所示.

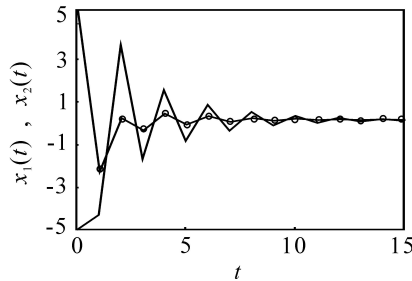


图 2 闭环状态响应曲线

采用定理 5 得到如下可行解:

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= Y_{12} = [-0.0979 \quad 1.0283], \\
 G_{11} &= G_{12} = \begin{bmatrix} 1.5390 & 0.7527 \\ 0.3267 & 4.2733 \end{bmatrix}, \\
 Y_{21} &= Y_{22} = [-0.3415 \quad 0.0637], \\
 G_{21} &= G_{22} = \begin{bmatrix} 1.5579 & -0.7475 \\ 0.3746 & 3.4073 \end{bmatrix}, \\
 Y_{31} &= Y_{32} = [-0.9810 \quad -0.9951], \\
 G_{31} &= G_{32} = \begin{bmatrix} 2.6589 & 0.3993 \\ 0.4618 & 2.1855 \end{bmatrix}.
 \end{aligned}$$

取 $x(0) = [5 \quad -5]^T$, 采用控制律(10)后的闭环状态响应如图 2 实线所示. 注意实线和虚线几乎重合, 是因为二者基于同样的控制律.

需要指出, 本文仿真采用的是 Matlab 5.3 LMI 工具箱中的 FEASP(LMIS, OPTIONS), 其中 OPTIONS 选择为 $[0 \ 100 \ 1e9 \ 10 \ 0]$, 其他的求解方法可能给出不同的仿真结果.

6 结 语

本文考虑前件变量采用双交叠模糊分划的 T-S 模糊系统, 采用参数 Lyapunov 函数给出了新的稳定性结论. 这些结论比已有的结果更加宽松, 因此适用范围更加宽一些. 在判断可行性所涉及的计算量方面, 一般来说本文的定理 2 比已有结论引理 2 更小; 定理 4 比已有结论引理 3 更小. 除引理 3 以外, 其他已有的关于离散 T-S 模糊系统稳定性的结果 (见文献[3, 9, 10]等) 都可以应用于采用 TFP 的系统, 得到对应的结论. 不仅如此, 本文提供的方法可作为进一步分析双交叠模糊分划 T-S 模糊系统的

基础.

参考文献(References)

- [1] 王岩, 张庆灵, 孙增圻, 等. 离散模糊系统分析与设计的模糊 Lyapunov 方法[J]. 自动化学报, 2004, 30(2): 255-260.
(Wang Y, Zhang Q L, Sun Z Q, et al. Analysis and design of discrete fuzzy system with fuzzy Lyapunov approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(2): 255-260.)
- [2] 修智宏, 任光. T-S 模糊控制系统的稳定性分析及系统化设计[J]. 自动化学报, 2004, 30(5): 731-741.
(Xiu Z H, Ren G. Stability analysis and systematic design of T-S fuzzy control systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(5): 731-741.)
- [3] Ding B, Sun H, Qiao Y. Stability analysis of T-S fuzzy control systems based on parameter-dependent Lyapunov function[J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(4): 651-654.
- [4] Lee K R, Jeung E T, Park H B. Robust fuzzy H control for uncertain nonlinear systems via state feedback: An LMI approach [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 120(1): 123-134.
- [5] Yoneyama J, Masahiro N, Hitoshi K, et al. H control for Takagi-Sugeno fuzzy systems [J]. Int J of Systems Science, 2001, 32(7): 915-924.
- [6] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2): 135-156.
- [7] Tanaka K, Hori T, Wang H O. A fuzzy Lyapunov approach to fuzzy control system design[C]. Proc ACC. Arlington, 2001: 4790-4795.
- [8] Guerra T M, Vermeiren L. LMF based relaxed nonquadratic stabilization conditions for nonlinear systems in the Takagi-Sugeno's form[J]. Automatica, 2004, 40(7): 823-829.
- [9] Teixeira M C M, Assuncao E, Avellar R G. On relaxed LMF based design for fuzzy controllers[C]. Proc IEEE-Fuzzy. Melbourne, 2001: 704-707.
- [10] Ding B, Sun H, Yang P. Further studies on LMF based relaxed stabilization conditions for nonlinear systems in Takagi-Sugeno's form [J]. Automatica, 2006, 42(3): 503-508.