

文章编号: 1001-0920(2008)11-1272-05

一种改进的 T-S 模糊系统稳定性分析方法

张松涛, 白世贞

(哈尔滨商业大学 物流学院, 哈尔滨 150076)

摘要: 提出一种改进的方法以降低 T-S 模糊系统稳定性判定方法的保守性. 通过定义有效最大交叠规则组 (EMORG), 提出一个改进的充分条件以保证模糊模型全局二次渐近稳定. 此条件仅需在每个有效最大交叠规则组内分别寻找一个局部公共正定矩阵. 以往的稳定性判定方法作为特例被包含在所提出方法中. 仿真结果验证了该方法的有效性.

关键词: T-S 模糊系统; 稳定性; Lyapunov 函数; 正定矩阵

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** A

Improved approach on stability analysis of T-S fuzzy system

ZHANG Song-tao, BAI Shi-zhen

(School of Logistics, Harbin University of Commerce, Harbin 150076, China. Correspondent: ZHANG Song-tao, E-mail: zst0626@163.com)

Abstract: This paper proposes an approach to improve the conservatism of those stability conditions of T-S fuzzy system. By using the concept of the efficient maximal overlapped-rules group (EMORG), an improved sufficient condition is derived to guarantee the quadratic stability of the fuzzy model globally, which only requires finding a local common positive definite matrix in each EMORG. Moreover, the proposed stability condition includes previous results as special cases. Simulation results show the effectiveness of the proposed stability condition.

Key words: T-S fuzzy system; Stability; Lyapunov function; Positive definite matrix

1 引言

自从 Tanaka 和 Sugeno^[1] 提出了在所有子系统寻找一个公共正定矩阵 P 来判定模糊系统的稳定性以来, 众多学者^[2-8, 10] 一直致力于降低上述方法的保守性, 因为当规则数较大时, 寻找这个公共正定矩阵是非常困难的. 文献[8]提出了一个新的稳定性判别方法, 即对于输入变量均采用双交叠模糊划分的模糊系统, 仅需在每个最大交叠规则组中分别寻找一个局部公共正定矩阵 P_1, P_2, \dots, P_G 即可判别系统的稳定性, 这里 G 代表最大交叠规则组数, 并将这些理论应用于船舶减摇鳍的控制中. 但在文献[8]所提出的稳定性判据中, 除了 2^n 规则以外, 其他 T-S 模糊系统中的任一规则均被包含于一个以上的最大交叠规则组中, 并且被包含于一个以上最大交叠规则组中的任一规则必须满足一个以上 Lyapunov 不等式, 这里 n 代表输入变量数. 因此, 无论应用文献

[1] 提出的判别方法还是文献[8]提出的判别方法, 这些方法均具有保守性, 因为前者的方法中公共正定矩阵 P 需满足 r (规则数) 个 Lyapunov 不等式, 而后的方法中一组局部公共正定矩阵 P_1, P_2, \dots, P_G 需满足 $2^n \times G$ 个 Lyapunov 不等式. 对于文献[8]中的方法, 若能减少最大交叠规则组的数量, 则需满足的 Lyapunov 不等式数量和发现局部公共正定矩阵的个数均会大大减少, 相应地, 上面所提到的两个方法的保守性也会降低.

在本文中, 首先定义有效最大交叠规则组集和有效最大交叠规则组的概念; 然后针对连续 T-S 模糊系统, 提出了一个改进的稳定性判据, 该判据仅需在每个有效最大交叠规则组中分别寻找一个局部公共正定矩阵.

2 T-S 模糊系统模型及稳定性分析基本理论

T-S 模糊系统的第 i 条模糊规则可描述如下:

收稿日期: 2007-09-05; 修回日期: 2007-12-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70471087); 国家科技支撑计划重大项目(2006BAH02A06); 中国博士后科学基金项目(2008043029); 辽宁省教育厅科研项目(20060106).

作者简介: 张松涛(1972—), 男, 哈尔滨人, 讲师, 博士, 从事模糊控制、非线性控制的研究; 白世贞(1962—), 男, 山东招远人, 教授, 博士, 从事智能优化、物流管理的研究.

$$R^i: \text{if } x_1(t) \text{ is } F_1^i, \text{ and } \dots, \text{ and } x_n(t) \text{ is } F_n^i, \\ \text{then } \dot{x}(t) = A_i x(t), \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (1)$$

其中: r 为模糊规则数, $F_j^i (j = 1, 2, \dots, n)$ 为模糊集, n 为输入变量数, $x^T(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$ 为模糊系统的状态向量. 每条规则对应的线性状态方程称为子系统.

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

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i A_i x(t). \quad (2)$$

其中: $h_i = w_i / \sum_{i=1}^r w_i, w_i = \prod_{j=1}^n F_j^i(x_j(t))$ 是第 i 条规则的激活度.

文献 [2] 将传统的 Lyapunov 直接法中 Lyapunov 函数进一步放宽, 得到一个判定控制系统稳定性的充分条件.

引理 1 考虑系统 $\dot{x} = f(x), x \in R^n, f(x)$ 是 $n \times 1$ 的函数向量, 且 $f(0) = 0$. 若存在一个分段光滑的标量函数 $V(x)$ 满足

- 1) $V(0) = 0$;
- 2) 对于所有的 $x \neq 0, V(x) > 0$;
- 3) 当 $x \rightarrow 0$ 时, $V(x) \rightarrow 0$;
- 4) 对于所有的 $x \neq 0, \dot{V}(x) < 0$.

则系统的平衡状态 $x = 0$ 是大范围渐近稳定的, 且 $V(x)$ 是一个 Lyapunov 函数. 其中, 在 $V(x)$ 的间断点的左侧和右侧, $\dot{V}(x)$ 分别定义为 $V(x)$ 的左、右偏导数.

基于公共 Lyapunov 函数, Tanaka 和 Sugeno^[1] 提出的判定连续 T-S 模糊系统的稳定性判据如下.

引理 2 式 (2) 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 满足如下 Lyapunov 不等式:

$$A_i^T P + P A_i < 0, \quad i = 1, 2, \dots, r. \quad (3)$$

引理 2 显示了为判定 T-S 模糊系统的稳定性, 一个公共正定矩阵 P 必须满足 r 个不等式 (3). 若规则数 r 较大, 则很难找到这个公共正定矩阵 P . 这种问题的出现是稳定判据具有较大的保守性所致.

为了降低该判据的保守性, 文献 [8] 在定义了双交叠模糊分划和最大交叠规则组的概念后, 提出一个新的稳定性判据.

引理 3 对于式 (2) 所描述的 T-S 模糊系统, 若输入变量均采用双交叠模糊分划, 则模糊系统在平衡点大范围渐近稳定的充分条件是: 在第 l 个最大交叠规则组中存在一个局部公共正定矩阵 P_l 满足

$$A_i^T P_l + P_l A_i < 0, \quad l = 1, 2, \dots, G. \quad (4)$$

其中: $i \in \{ \text{包含在第 } l \text{ 个最大交叠规则组中的规则}$

序号}; G 代表最大交叠规则组的数目, 且 $G = \sum_{j=1}^n (m_j - 1)$; m_j 是第 j 个输入变量的模糊分划数.

注 1 当 $P_1 = P_2 = \dots = P_G = P$ 成立时, 引理 2 是引理 3 的一个特例. 在引理 3 中, 仅有 2^n 个规则被分别包含在一个最大交叠规则组中, 而除了这 2^n 个规则外, 其他的任一规则需满足一个以上 Lyapunov 不等式.

引理 3 在一定程度上降低了引理 2 的保守性. 然而, 若能减少最大交叠规则组的个数, 则那些需满足的 Lyapunov 不等式个数会大大减少. 相应地, 一组被减少个数的局部公共正定矩阵也较容易找到.

3 主要结果

本节的主要目的是, 通过修改引理 3 减少满足不等式 (4) 的数量, 而 T-S 模糊系统的稳定性仍将保证.

定义 1 一个最大交叠规则组的集合被称为一个有效最大交叠规则组集, 若该集合由最少的最大交叠规则组组成, 而这些最少的最大交叠规则组包含 T-S 模糊系统的所有规则, 则被包含在一个有效最大交叠规则组集的每个最大交叠规则组被称为有效最大交叠规则组 (EMORG).

定理 1 对于式 (2) 所描述的 T-S 模糊系统, 若输入变量均采用双交叠模糊分划, 则模糊系统在平衡点大范围渐近稳定的充分条件是: 在第 l 个有效最大交叠规则组中存在一个局部公共正定矩阵 P_l 满足

$$A_i^T P_l + P_l A_i < 0, \quad l = 1, 2, \dots, g. \quad (5)$$

其中: $i \in \{ \text{包含在第 } l \text{ 个有效最大交叠规则组中的规则序号} \}$; g 代表有效最大交叠规则组的数目, 有

$$g = \begin{cases} \sum_{j=1}^n \binom{m_j+1}{2}, & m_j \text{ 奇数集}; \\ \sum_{j=1}^n \binom{m_j}{2}, & m_j \text{ 偶数集}; \\ \sum_{m_j \text{ 偶数集}} \binom{m_j}{2} + \sum_{m_j \text{ 奇数集}} \binom{m_j+1}{2}, & \\ j, j \in \{1, 2, \dots, n\}, & \text{其他}; \end{cases}$$

这里 m_j 是第 j 个输入变量的模糊分划数.

证明 假定系统状态输入为 $x^T(t) = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]$, 系统共有 q 个交叠规则组, $c_l = \{ \text{第 } l \text{ 个交叠规则组包含的规则序号} \}$, 各交叠规则组的作用域为 $S_l (l = 1, 2, \dots, q)$.

在第 l 个交叠规则组作用域 S_l 内的系统局部模型为

$$\dot{x} = \sum_{i \in c_l} h_i A_i x. \quad (6)$$

若在 S_l 上存在一个公共正定矩阵 P_l 满足

$$A_l^T P_l + P_l A_l < 0, \quad i = c_l, \quad (7)$$

选择 $V_l(x) = x^T P_l x$ 作为 S_l 上的一个 Lyapunov 函数, 则容易验证 $V_l(x)$ 在 S_l 上满足引理 1 中的条件 1) ~ 3).

对于 $x = 0$, 由式(6), (7) 和 $h_i > 0$ 可知

$$\begin{aligned} \dot{V}_l(x) &= \lim_0^+ \frac{1}{\Delta t} ((V_l(x(t+\Delta t))) - V_l(x(t))) = \\ & \dot{x}^T P_l x + x^T P_l \dot{x} = \\ & \left(\sum_{i=c_l} h_i A_i x \right)^T P_l x + x^T P_l \left(\sum_{i=c_l} h_i A_i x \right) = \\ & \sum_{i=c_l} h_i (x^T (A_i^T P_l + P_l A_i) x) < 0. \end{aligned} \quad (8)$$

因此, $V_l(x)$ 在 S_l 上也满足引理 1 中的条件 4).

在各交叠规则组的作用域上定义特征函数

$$f_l(x) = \begin{cases} 1, & x \in S_l; \\ 0, & \text{其他}; \end{cases} \quad f_l(x) = 1.$$

模糊系统在输入论域上的总模型为

$$\dot{x} = \sum_{l=1}^q f_l(x) \left(\sum_{i=c_l} h_i A_i x \right).$$

令 $P = \sum_{l=1}^q f_l P_l$, 在整个输入论域上构造 Lyapunov 函数 $V(x) = x^T P x$, 则有 $V(x) = x^T \sum_{l=1}^q f_l P_l x = \sum_{l=1}^q f_l x^T P_l x = \sum_{l=1}^q f_l V_l(x)$. 容易验证 $V(x)$ 满足引理 1 中的条件 1) ~ 3). $V(x)$ 是一个分段连续函数, 因此, 在间断点左侧和右侧的导数分别取左导数和右导数. 由导数定义和式(8)可知, 当 $x = 0$ 时, 有

$$\dot{V}(x) = dV/dt =$$

$$\begin{aligned} & \lim_0^+ \frac{1}{\Delta t} (V(x(t+\Delta t))) - V(x(t))) = \\ & \lim_0^+ \frac{1}{\Delta t} \left(\sum_{l=1}^q f_l V_l(x(t+\Delta t))) - \sum_{l=1}^q f_l V_l(x(t)) \right) = \\ & \sum_{l=1}^q \left(\lim_0^+ \frac{1}{\Delta t} (V_l(x(t+\Delta t))) - V_l(x(t))) \right) = \\ & \sum_{l=1}^q \dot{V}_l < 0 \end{aligned}$$

满足引理 1 中的条件 4). 因此, $V(x)$ 是式(2) 的一个分段 Lyapunov 函数.

综上所述, 若输入变量均采用双交叠模糊划分, 在式(4) 模糊控制系统的每个交叠规则组内分别存在一个公共正定矩阵 P_l 满足式(7), 则系统在平衡状态是大范围渐近稳定的.

由文献[8]的性质 2 可知, 只要在各最大交叠规则组内分别存在一个公共正定矩阵 P_l 满足 $A_l^T P_l + P_l A_l < 0$ 即可判定系统稳定.

又由本文中的定义 1 可知, 包含在最大交叠规则组中的任一规则, 一定也包含在有效最大交叠规则组中. 所以, 稳定性判据可简化为只需在各有效最大交叠规则组内分别存在一个公共正定矩阵 P_l 满足式(5), 即可判定系统稳定.

注 2 当 $P_1 = P_2 = \dots = P_g = P$ 成立时, 引理 2 仅是定理 1 的特例. 而且, 在引理 3 中的局部公共正定矩阵 P_1, P_2, \dots, P_G 所需满足的 Lyapunov 不等式可由定理 1 中的这组局部公共正定矩阵 P_1, P_2, \dots, P_g 所需满足的 Lyapunov 不等式来表示. 因此, 引理 3 也是定理 1 中的一个特例. 引理 2, 引理 3 和定理 1 三者之间的关系如图 1 所示.

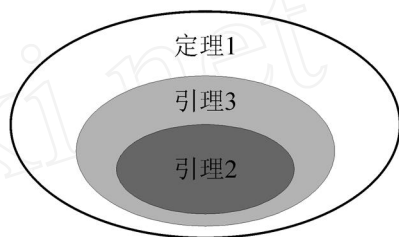


图 1 定理 1 与引理 2, 引理 3 之间的关系

注 3 对于 m_j 属于偶数集的情况, 仅存在一个有效最大交叠规则组集; 而对于 m_j 不属于偶数集并且对任意 $m_j > 3$ 的情况, 有效最大交叠规则组集的个数大于 1. 这种情况下, 可选用任一有效最大交叠规则组集判别模糊系统的稳定性.

定理 1 与引理 3 之间保守性的比较结果如表 1 所示.

表 1 定理 1 与引理 3 之间保守性的比较

n	m_1	m_2	m_3	r				
1	4	0	0	4	3	2	6	4
1	5	0	0	5	4	3	8	6
2	4	4	0	16	9	4	36	16
2	4	5	0	20	12	6	48	24
2	5	5	0	25	16	9	64	36
2	5	6	0	30	20	9	80	36
3	4	4	4	64	27	8	216	64
3	4	4	5	80	36	12	288	96
3	4	5	6	120	60	18	480	144
3	5	5	5	125	64	27	512	216

表 1 中: n 为输入变量数, $m_j (j = 1, 2, 3)$ 为第 j 个输入变量的模糊划分数, r 为模糊系统的规则数, 和 分别为在引理 3 和定理 1 中需找到的局部公共正定矩阵的个数, 和 分别为在引理 3 和定理 1 中需满足的 Lyapunov 不等式的个数.

通过表 1 可知, 定理 1 无论是在所需寻找的局部公共正定矩阵个数方面, 还是在需求解 Lyapunov 不等式的个数方面, 均大大低于引理 3 中所需求的

个数.由此可见,定理 1 降低了引理 3 的保守性.

4 仿真分析

在本节中,仅针对 m_j 偶数集的情况进行稳定性分析.

考虑如下 T-S 模糊系统:

$$R^i: \text{if } x_1(t) \text{ is } F_1^i \text{ and } x_2(t) \text{ is } F_2^i, \\ \text{then } \dot{x}(t) = A_i x(t). \quad (9)$$

其中: $i = 1, 2, \dots, 16$; 两个输入变量 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$ 的模糊划分分别为 $F_{1m}(x_1(t)) (m = 1, 2, \dots, 4)$ 和 $F_{2s}(x_2(t)) (s = 1, 2, \dots, 4)$, 并满足双交叠模糊划分的条件,如图 2 所示.

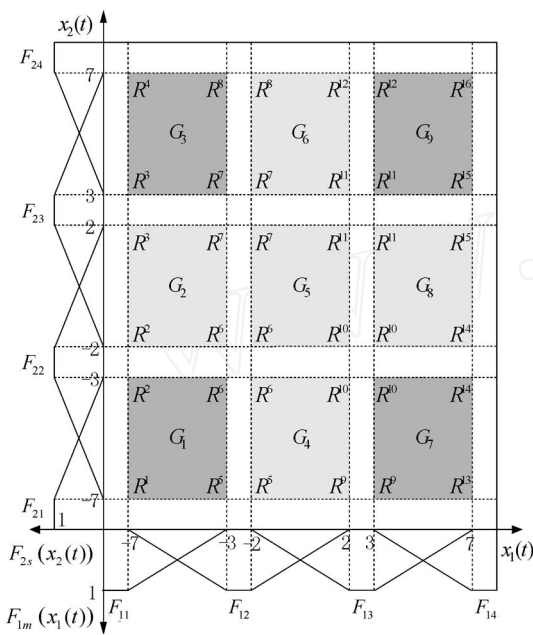


图 2 $m_1 = m_2 = 4$ 时的模糊划分平面图

模糊集和系统参数如下:

$$F_1^1 = F_1^2 = F_1^3 = F_1^4 = F_{11}, \\ F_1^5 = F_1^6 = F_1^7 = F_1^8 = F_{12}, \\ F_1^9 = F_1^{10} = F_1^{11} = F_1^{12} = F_{13}, \\ F_1^{13} = F_1^{14} = F_1^{15} = F_1^{16} = F_{14}, \\ F_2^1 = F_2^5 = F_2^9 = F_2^{13} = F_{21}, \\ F_2^2 = F_2^6 = F_2^{10} = F_2^{14} = F_{22}, \\ F_2^3 = F_2^7 = F_2^{11} = F_2^{15} = F_{23}, \\ F_2^4 = F_2^8 = F_2^{12} = F_2^{16} = F_{24}.$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.01 & 0.3 \\ 0 & -3.26 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -2 & 3 \\ 1 & -4 \end{bmatrix}, \\ A_3 = \begin{bmatrix} -2 & 2 \\ 0 & -4 \end{bmatrix}, A_4 = \begin{bmatrix} -0.01 & 3 \\ 0 & -3 \end{bmatrix}, \\ A_5 = \begin{bmatrix} -1 & 1.99 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}, A_6 = \begin{bmatrix} -2 & 1.99 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}, \\ A_7 = \begin{bmatrix} -0.01 & 3 \\ 0 & -3.26 \end{bmatrix}, A_8 = \begin{bmatrix} -1 & 3 \\ 1 & -4 \end{bmatrix},$$

$$A_9 = \begin{bmatrix} -20 & 3 \\ 1 & -4 \end{bmatrix}, A_{10} = \begin{bmatrix} -0.01 & 3 \\ 0 & -3 \end{bmatrix}, \\ A_{11} = \begin{bmatrix} -1.2 & 1.99 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}, A_{12} = \begin{bmatrix} -1 & 1.99 \\ 0 & -2 \end{bmatrix}, \\ A_{13} = \begin{bmatrix} -0.01 & 2 \\ 0 & -3.26 \end{bmatrix}, A_{14} = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 1 & -4 \end{bmatrix}, \\ A_{15} = \begin{bmatrix} -2 & 3 \\ -1 & -4 \end{bmatrix}, A_{16} = \begin{bmatrix} -10.01 & 3 \\ 0 & -30 \end{bmatrix}.$$

此模糊系统由 16 个规则组成,对于引理 2,1 个公共正定矩阵 P 必须满足 16 个 Lyapunov 不等式(3);对于引理 3,局部公共正定矩阵 $P_1 \sim P_9$ 必须分别满足 9 个最大交叠规则组 ($G_1 \sim G_9$) 所包含规则所组成的 Lyapunov 不等式.通过应用线性矩阵不等式(LMI)方法^[9],均未找到公共正定矩阵 P 和这组局部公共正定矩阵 $P_1 \sim P_9$,因此,引理 2 和引理 3 均不能判定此模糊系统稳定.

由图 2 可知,此模糊系统仅有一个有效最大交叠规则组集,并且它包含 4 个有效最大交叠规则组 (G_1, G_3, G_7, G_9).当 $P_1 = P_3 = P_7 = P_9 = P$ 成立时,引理 2 作为一个特例包含于定理 1 中.引理 3 中的这组局部公共正定矩阵 $P_1 \sim P_9$ 所需满足的 Lyapunov 不等式可由定理 1 中的一组局部公共正定矩阵 P_1, P_3, P_7, P_9 所需满足的 Lyapunov 不等式来表示.例如,引理 3 中 P_2 所满足的 Lyapunov 不等式 ($A_2^T P_2 + P_2 A_2 < 0, A_3^T P_2 + P_2 A_3 < 0, A_6^T P_2 + P_2 A_6 < 0, A_7^T P_2 + P_2 A_7 < 0$) 可由定理 1 中的 P_1 所需满足的不等式 ($A_2^T P_1 + P_1 A_2 < 0, A_6^T P_1 + P_1 A_6 < 0$) 和 P_3 所需满足的不等式 ($A_3^T P_3 + P_3 A_3 < 0, A_7^T P_3 + P_3 A_7 < 0$) 来表示.因此,定理 1 也将引理 3 作为自己的一个特例.

在所有的规则中,仅存在于一个最大交叠规则组的规则为: R^1 仅被包含于最大交叠规则组 G_1 ; R^4 仅被包含于最大交叠规则组 G_3 ; R^{13} 仅被包含于最大交叠规则组 G_7 ; R^{16} 仅被包含于最大交叠规则组 G_9 .

除了 R^1, R^4, R^{13} 和 R^{16} ,其余的 12 个规则分别被包含于一个以上的最大交叠规则组中.例如, R^2 既存在于 G_1 中,又存在于 G_2 中,因此应用引理 3.要想判定系统的稳定性,仅对于 R^2 ,就必须满足两个 Lyapunov 不等式 ($A_2^T P_1 + P_1 A_2 < 0$ 和 $A_2^T P_2 + P_2 A_2 < 0$).因此需判定此系统的稳定性,应用引理 3,就必须求解 36 个 Lyapunov 不等式(4).

利用定理 1 判别上述模糊系统的稳定性,仅需求解 16 个 Lyapunov 不等式,并且找到满足不等式(5)的 4 个局部公共正定矩阵 P_1, P_3, P_7, P_9 ,即

$$P_1 = \begin{bmatrix} 0.9815 & 0.1378 \\ 0.1378 & 1.7612 \end{bmatrix},$$

$$P_3 = \begin{bmatrix} 2.2942 & 2.1614 \\ 2.1614 & 3.2057 \end{bmatrix},$$

$$P_7 = \begin{bmatrix} 0.4567 & 0.4060 \\ 0.4060 & 1.1983 \end{bmatrix},$$

$$P_9 = \begin{bmatrix} 0.3184 & 0.1340 \\ 0.1340 & 0.5222 \end{bmatrix}.$$

因此由定理 1 可判定此模糊系统稳定.

为了验证此系统是否真正稳定,在初值为 $x(0) = [-1 \quad -3]^T$ 的情况下,对系统进行仿真研究,如图 3 所示.由图 3 可知,系统渐近稳定.

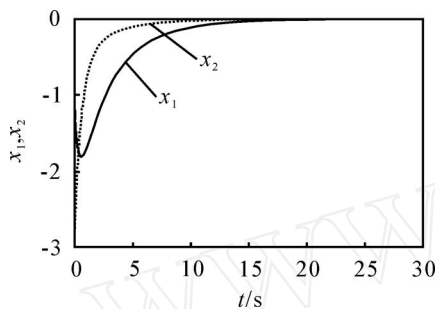


图 3 系统状态响应曲线

5 结 论

本文首先给出了连续 T-S 模糊模型的表达形式,介绍了两种基本的判定连续 T-S 模糊系统的方法;然后,定义了有效最大交叠规则组的概念,并提出了一个判定连续 T-S 模糊系统稳定的方法.此方法不仅降低了引理 2 和引理 3 的保守性,而且二者作为特例被包含其中.对于规则数较大的 T-S 模糊系统而言,所提出的方法不仅能大大降低求解 Lyapunov 不等式的个数,而且能很大程度上节省解模糊进程所消耗的时间.

参考文献(References)

- [1] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control system [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1992, 45(2): 135-156.
- [2] Cao S G, Rees N W, Feng G. Quadratic stability analysis and design of continuous-time fuzzy control systems [J]. Int J of Systems Science, 1996, 27(2):

193-203.

- [3] Luoh L. New stability analysis of T-S fuzzy system with robust approach [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2002, 59(4): 335-340.
- [4] Tanaka K, Hori T, Wang H O. A multiple Lyapunov function approach to stabilization of fuzzy control systems[J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2003, 11(4): 582-589.
- [5] Wang W J, Sun C H. A relaxed stability criterion for T-S fuzzy discrete systems[J]. IEEE Trans on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics, 2004, 34(5): 2155-2158.
- [6] 张松涛,任光. 离散 T-S 模糊控制系统的稳定性分析与系统化设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 113-117.
(Zhang S T, Ren G. Stability analysis and systematic design of discrete T-S fuzzy control systems[J]. Proc of the CSEE, 2006, 26(7): 113-117.)
- [7] 张松涛,任光. 基于分段模糊 Lyapunov 方法的离散模糊系统分析与设计[J]. 自动化学报, 2006, 32(5): 813-818.
(Zhang S T, Ren G. Analysis and design of discrete fuzzy system based on piecewise fuzzy Lyapunov approach[J]. Acta Automatica Sinica, 2006, 32(5): 813-818.)
- [8] 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.)
- [9] Park J, Kim J S, Park D. LMFbased design of stabilizing fuzzy controllers for nonlinear systems described by Takagi-Sugeno fuzzy model[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2001, 122(1): 73-82.
- [10] 丁宝苍,雷兆明,邹涛. 采用双交叠模糊划分的 T-S 模糊系统的稳定性分析[J]. 控制与决策, 2007, 22(4): 457-461.
(Ding B C, Lei Z M, Zou T. Stability analysis of T-S fuzzy systems with two-overlapped fuzzy partition[J]. Control and Decision, 2007, 22(4): 457-461.)