文章编号: 1001-0920(2005)01-0046-05

不确定 T-S 模型的 D-域极点约束鲁棒控制

周武能[1,2], 苏宏业[1], 褚 健[1]
(1. 工业控制技术国家重点实验室, 浙江大学 先进控制研究所, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江师范大学 数学研究所, 浙江 金华 321004)

摘 要: 对于具有两类不确定性的 Takagi-Sugeno 模糊非线性模型, 运用二次稳定思想, 提出使闭环系统的极点在各种允许的不确定性下始终在复平面上某个二次矩阵不等式区域 D 中的一个充分条件. 基于这一条件和并行分布补偿技术, 用线性矩阵不等式方法, 设计全局鲁棒 D-稳定控制器. 最后通过质量弹簧阻尼系统给出了所述设计方法的仿真示例.

关键词: T-S 模糊系统; D-稳定性; 不确定非线性系统; 鲁棒控制; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Robust control for uncertain T-S systems with D-region pole constraints

ZHOU Wu-neng[1,2], *SU Hong-ye*[1], *CHU Jian*[1]
(1. National Laboratory of Industrial Control Technology, Institute of Advanced Process Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Mathematics Institute, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China. Correspondent: ZHOU Wu-neng, E-mail: wnzhou@zjnu.cn)

Abstract: For a class of uncertain Takagi-Sugeno fuzzy nonlinear models, a sufficient condition for the existence of state feedback control law which assigns the closed-loop poles in a quadratic matrix inequality region D in the complex plane was derived. Based on the sufficient condition and the technique of parallel distributed compensator, a global controller ensuring the closed-loop system to be robust D-stable was designed by means of linear matrix inequality technique. An example of mass spring damper shows the obtained results.

Key words: T-S fuzzy model; D-stability; uncertain nonlinear systems; robust control; LMI

1 引 言

自从美国控制论专家 Zadeh 建立模糊集合论以来[1], 针对模糊理论与模糊应用的研究方兴未艾, 并取得了丰硕的成果. 特别是模糊控制技术以其简洁而有效的特点, 已在实际生产的各个领域得到了越来越广泛的应用. 然而, 从控制系统分析和设计的角度看, 一般的模糊控制技术尚缺乏系统的分析和设计理论. 特别是满足某种性能指标的模糊控制器的设计方法还不成熟. Takagit 和 Sugeno 在文献[2]中建立了 Takagi-Sugeno (T-S) 模糊模型, 并进行了全局稳定性分析和控制器设计. 这一模型既包含近似推理规则, 又包含局部解析模型, 而且许多动态系统可提升为 T-S 模型, 因而 T-S 模型具有一定的广泛性和实用性[3]. 近年来, 并行分布补偿(PDC)技术结合线性矩阵不等式(LMI)方法, 使得模糊控制器设计更加系统化和易于求解[4]. 而 T-S 模糊模型的鲁棒 D-稳定性的研究不论从理论上还是从实际应用都具有重要的意义. 但目前涉及系统暂态响

收稿日期: 2004-03-16; **修回日期**: 2004-06-24.
基金项目: 国家自然科学基金项目(10371106); 国家杰出青年基金项目(60025308); 国家高等学校优秀青年教师教学和科研奖励基金项目.
作者简介: 周武能(1959—), 男, 湖北洪湖人, 教授, 博士, 从事鲁棒控制、模糊系统等研究; 苏宏业(1969—), 男, 江苏武进人, 教授, 博士生导师, 从事时滞系统控制、非线性控制等研究.

应和极点配置的文献却很少. 文献[5]对LMI区域 D[6]给出了 T-S 模糊模型 D -镇定研究. 在文献[5]的基础上, 文献[7]得到了该模型全局鲁棒 D 稳定的充分条件, 并利用 PDC 技术和LMI技术给出了 T-S 系统全局鲁棒 D 镇定的控制器设计方法.

本文考虑的 D -域是复平面上的二次矩阵不等式区域, 它是LMI区域的广泛形式. 对具有范数有界不确定性的 T-S 模糊非线性模型, 给出了全局鲁棒 D 稳定的一个充分必要条件. 基于这一条件, 利用 PDC 技术和LMI技术得到了 T-S 系统全局鲁棒 D -镇定的控制器设计方法. 与文献[7]相比, 控制器的设计基于一个充分必要条件, 而且减少了一些限制, 因此本文结果具有较小的保守性.

2　T-S 模糊模型及问题描述

T-S 模型是表达动态系统模糊模型的有效形式, 特点是使用了各子系统规则之间的线性输入输出关系. 其第 i 个动态子系统用 If-Then 规则表示如下:

Plant rule i : $i = 1, 2, \cdots, r$,

If $x_1(t)$ is μ_{1i}, $\cdots$, and $x_n(t)$ is μ_{in}, Then

$$\dot{x}(t) = (A_i + \Delta A_i(t))x(t) + (B_i + \Delta B_i(t))u(t). \tag{1}$$

其中: $x(t) \in R^n$ 为状态向量, $u(t) \in R^m$ 为控制输入向量, μ_{ij} 表示对应各分量 $x_j(t)$ $(j = 1, 2, \cdots, n)$ 的模糊集合, r 为模糊规则数目, A_i 和 B_i 为具有适当维数的常矩阵, $\Delta A_i(t)$ 和 $\Delta B_i(t)$ 为时变参数不确定性矩阵, 且满足范数有界条件

$$\begin{aligned}&[\Delta A_i(t)\quad \Delta B_i(t)] = \\ &H_iF(t)[E_{A_i}\quad E_{B_i}],\ i = 1, \cdots, r; \\ &F^{\mathrm T}(t)F(t) \le I.\end{aligned} \tag{2}$$

其中: H_i, E_{A_i} 和 E_{B_i} $(i = 1, 2, \cdots, r)$ 为适当维数的实矩阵; $F(t)$ 为未知有界的时变矩阵; I 为适当维数的单位矩阵.

上述 T-S 模型中第 i 条规则的隶属函数 μ_i 是各状态分量的隶属函数 μ_{ij} 的乘积. 将隶属度函数归一化, 得

$$h_i(x(t)) = \mu_i(x(t)) \Big/ \sum_{i=1}^{r}\mu_i(x(t)).$$

为叙述简化, 以下将变量中的时间 t 略去. 一般假设 $\mu_i(x) \ge 0, \forall t$, 故 $\sum_{i=1}^{r}\mu_i(x) > 0$. 显然有

$$h_i(x) \ge 0, \forall t,\ i = 1, 2, \cdots, r; \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^{r} h_i(x) = 1. \tag{4}$$

以重心法逆模糊化, 得如下 T-S 模型:

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^{r} h_i(x)[(A_i + \Delta A_i)x + (B_i + \Delta B_i)u]. \tag{5}$$

采用 PDC 方法设计控制器, 相应于 T-S 模糊模型(1), 基于状态反馈的控制器规则为

Control rule i : $i = 1, 2, \cdots, r$,

If $x_1(t)$ is μ_{i1}, $\cdots$, and $x_n(t)$ is μ_{in}, Then

$$u = K_i x. \tag{6}$$

相应地, 全局模糊控制器为

$$u = \sum_{i=1}^{r} h_i(x)K_i x. \tag{7}$$

将式(7) 代入(5), 得闭环系统为

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^{r} h_i(x)\Big\{(A_i + H_iFE_{A_i})x + (B_i + H_iFE_{B_i})\sum_{j=1}^{r} h_j(x)K_j x\Big\}. \tag{8}$$

再由式(4), 上述闭环系统可化为

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(x)h_j(x)\hat{A}_{ij}x. \tag{9}$$

其中 $\hat{A}_{ij} = A_i + B_iK_j + H_iF(E_{A_i} + E_{B_i}K_j)$.

对上述 T-S 模型, 本文考虑的二次矩阵不等式区域 D 是满足如下复平面上的复点之集[8~10]:

$$D = \{z \in C^2 : R_{11} + R_{12}z + R_{12}^{\mathrm T}z^* + R_{22}zz^* < 0\}. \tag{10}$$

其中: $R_{11}, R_{12}, R_{22} \in M^{d\times d}$; R_{11}, R_{22} 为对称矩阵; $R_{22} = LL^{\mathrm T}$ 为半正定矩阵; d 称为区域 D 的秩. 令

$$R_D = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} \\ R_{12}^{\mathrm T} & R_{22}\end{bmatrix},$$

可见 D 是关于实轴对称的凸区域. 当 $L = 0$ 时, 区域 D 即为文献[7]所取的LMI区域.

注 1　用于稳定性分析的典型区域有左半开复平面 $D(\alpha) = \{z \in C^2 : \mathrm{Re}(z) < -\alpha\}$ $(\alpha \ge 0)$ (称为连续时间系统) 和圆盘 $D(c, r) = \{z \in C^2 : |z + c| < r\}$ (称为离散时间系统), 其区域矩阵分别为

$$R_{D(\alpha)} = \begin{bmatrix} 2\alpha & 1 \\ 1 & 0\end{bmatrix},\ R_{D(c,r)} = \begin{bmatrix} c^2 - r^2 & c \\ c & 1\end{bmatrix},$$

其秩均为 1.

定义 1　矩阵 A 称为 D - 稳定的, 如果 A 的特征值位于复平面上的区域 D 中.

矩阵的 D - 稳定性可用线性矩阵不等式来刻画.

引理 1[9,10]　$A \in C^{n\times n}$ 是 D - 稳定的当且仅当存在一个对称正定矩阵 $P \in C^{n\times n}$, 使得

$$\begin{aligned}&\Omega_D(P, A) \triangleq \\ &R_{11}\otimes P + R_{12}\otimes(PA) + \\ &R_{12}^{\mathrm T}\otimes(A^{\mathrm T}P) + R_{22}\otimes(A^{\mathrm T}PA) < 0.\end{aligned} \tag{11}$$

其中 $\otimes$ 表示两矩阵的 Kronecker 乘积[9,10], 即

$$A \otimes B = [A_{ij}B]_{m\times n}, A = [A_{ij}]_{m\times n}.$$

由引理1, 给出如下定义零输入T-S系统(5)的鲁棒D-稳定性和二次D-稳定性概念.

定义2 零输入不确定T-S系统(5)称为鲁棒D-稳定的, 如果对任意$t \geq 0$, 存在一个对称正定矩阵$P(t)$, 使得

$$\Omega_D(P(t), \hat{A}) < 0, \tag{12}$$

其中$\hat{A} = \sum_{i=1}^{r} h_i(x)(A_i + \Delta A_i)$.

定义3 零输入不确定T-S系统(5)称为二次D-稳定的, 如果对任意$t \geq 0$, 存在一个对称正定矩阵P, 使得

$$\Omega_D(P, \hat{A}) < 0. \tag{13}$$

显然, 系统的二次D-稳定性蕴含鲁棒D-稳定性.

本文旨在设计T-S模糊系统的一个全局状态反馈模糊控制器(7), 使闭环系统(9)鲁棒D-稳定. 此时称T-S模糊系统(1)是可鲁棒D-镇定的.

为证明主要结论, 引入下述引理.

引理2[11] 设Y, H, E, F是具有适当维数的常矩阵, 且Y是对称矩阵, 则对任意满足$F^{\mathrm{T}}F \leq I$的矩阵F, $Y + HFE + E^{\mathrm{T}}F^{\mathrm{T}}H^{\mathrm{T}} < 0$的充分必要条件是存在常数$\epsilon > 0$, 使得

$$Y + \epsilon HH^{\mathrm{T}} + \epsilon^{-1}E^{\mathrm{T}}E < 0.$$

3 主要结果

本节研究具有范数有界不确定性的T-S模糊模型的鲁棒D-镇定问题. 首先给出如下引理.

引理3 对满足$k_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^{r} k_i = 1$的任意r个数k_i, 系统$\dot{x} = \sum_{i=1}^{r} k_i A_i x$二次$D$-稳定的充分必要条件是存在一个对称正定矩阵$P \in C^{n\times n}$, 使得对任意$i\,(i = 1, \cdots, r)$, $\Omega(P, A_i) < 0$.

证明 若系统$\dot{x} = \sum_{i=1}^{r} k_i A_i x$二次$D$-稳定, 则存在对称正定矩阵$P$, 使得$\Omega\left(P, \sum_{i=1}^{r} k_i A_i\right) < 0$对满足$k_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^{r} k_i = 1$的任意r个数k_i成立. 在这r个数中取$k_i = 1$, 其余取0, 即得$\Omega(P, A_i) < 0$. 反之, 若存在对称正定矩阵P, 使得对任意$i\,(i = 1, \cdots, r)$, $\Omega(P, A_i) < 0$, 则由$k_i \geq 0$, $\sum_{i=1}^{r} k_i = 1$及矩阵的Kronecker乘积的性质[8]容易验证

$$\Omega\left(P, \sum_{i=1}^{r} k_i A_i\right) < 0. \qquad \square$$

根据引理3, 可以证明下述主要结果.

定理1 T-S模糊系统(1)可鲁棒D-镇定, 如果存在一个对称正定矩阵X, 一组矩阵Y_j及常数$\lambda > 0$, 使得

$$\begin{bmatrix} \Theta_{11} & * & * \\ \Theta_{21} & \Theta_{22} & 0 \\ \Theta_{31} & 0 & -\lambda I \end{bmatrix} < 0, \tag{14}$$

对任意$1 \leq i \leq r$, $1 \leq j \leq r$成立, 其中

$$\begin{aligned}
&\Theta_{11} = \\
&R_{11} \otimes X + R_{12} \otimes (A_iX + B_iY_j) + \\
&[R_{12} \otimes (A_iX + B_iY_j)]^{\mathrm{T}} + \\
&\lambda(R_{12}R_{12}^{\mathrm{T}}) \otimes (H_iH_i^{\mathrm{T}}), \\
&\Theta_{21} = \\
&L^{\mathrm{T}} \otimes (A_iX + B_iY_j) + \lambda(L^{\mathrm{T}}R_{12}^{\mathrm{T}}) \otimes \\
&(H_iH_i^{\mathrm{T}}), \\
&\Theta_{22} = -I_d \otimes X + \lambda(L^{\mathrm{T}}L) \otimes (H_iH_i^{\mathrm{T}}), \\
&\Theta_{31} = I_d \otimes (E_{A_i}X + E_{B_i}Y_j).
\end{aligned}$$

如果LMI组(14)关于X, Y_j, ϵ是可解的, 则各子系统的控制器增益矩阵为$K_j = Y_jX^{-1}$.

证明 由定义3知, 对满足式(3)和(4)的$h_i(x)$, 闭环系统(9)是二次D-稳定的, 如果存在一个对称正定矩阵P, 使得

$$\Omega_D\left(P, \sum_{i=1}^{r}\sum_{j=1}^{r} h_i(x)h_j(x)\hat{A}_{ij}\right) < 0$$

对任意$i, j \in \{1, 2, \cdots, r\}$成立. 又由引理3知, 如果存在一个对称正定矩阵$P$, 使得$\Omega_D(P, \hat{A}_{ij}) < 0$对任意$i, j \in \{1, 2, \cdots, r\}$成立, 则闭环系统(9)是二次$D$-稳定的, 从而更是鲁棒$D$-稳定的. 由Schur补引理, $\Omega_D(P, \hat{A}_{ij}) < 0$等价于

$$\begin{bmatrix} R_{11} \otimes P + R_{12} \otimes (P\hat{A}_{ij}) + \\ R_{12}^{\mathrm{T}} \otimes (\hat{A}_{ij}^{\mathrm{T}}P) & * \\ L^{\mathrm{T}} \otimes (P\hat{A}_{ij}) & -I_d \otimes P \end{bmatrix} < 0. \tag{15}$$

由矩阵的Kronecker乘积的性质[8], 式(15)可化为

$$\begin{aligned}
&\begin{bmatrix} R_{11} \otimes P + R_{12} \otimes (P(A_i + \\ B_iK_j)) + R_{12}^{\mathrm{T}} \otimes & * \\ ((A_i + B_iK_j)^{\mathrm{T}}P) & \\ L^{\mathrm{T}} \otimes (P(A_i + B_iK_j)) & -I_d \otimes P \end{bmatrix} + \\
&\begin{bmatrix} R_{12} \otimes (PH_i) \\ L^{\mathrm{T}} \otimes (PH_i) \end{bmatrix} (I_d \otimes \\
&F)[I_d \otimes (E_{A_i} + E_{B_i}K_j) \quad 0] + \\
&\left(\begin{bmatrix} R_{12} \otimes (PH_i) \\ L^{\mathrm{T}} \otimes (PH_i) \end{bmatrix} (I_d \otimes \right. \\
&\left. F)[I_d \otimes (E_{A_i} + E_{B_i}K_j) \quad 0]\right)^{\mathrm{T}} < 0.
\end{aligned} \tag{16}$$

由引理2及Schur补引理, 式(16)等价于

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11} & * & * \\ \Phi_{21} & \Phi_{22} & 0 \\ I_d \otimes (E_{A_i} + E_{B_i}K_j) & 0 & -\lambda I \end{bmatrix} < 0. \quad (17)$$

其中

$$\Phi_{11} =$$
$$R_{11} \otimes P + R_{12} \otimes (P(A_i + B_i K_j)) +$$
$$[R_{12} \otimes (P(A_i X + B_i K_j))]^{\mathrm{T}} +$$
$$\lambda(R_{12}R_{12}^{\mathrm{T}}) \otimes (PH_i H_i^{\mathrm{T}} P),$$
$$\Phi_{21} = L^{\mathrm{T}} \otimes (P(A_i + B_i K_j)) +$$
$$\lambda(L^{\mathrm{T}}R_{12}^{\mathrm{T}}) \otimes (PH_i H_i^{\mathrm{T}} P),$$
$$\Phi_{22} = -I_d \otimes P + \lambda(L^{\mathrm{T}}L) \otimes (PH_i H_i^{\mathrm{T}} P).$$

上式两端左乘和右乘 $\mathrm{diag}\{I_d \otimes P^{-1}, I_d \otimes P^{-1}, I\}$，并令 $P^{-1} = X, K_j P^{-1} = Y_j$，即得不等式(14). □

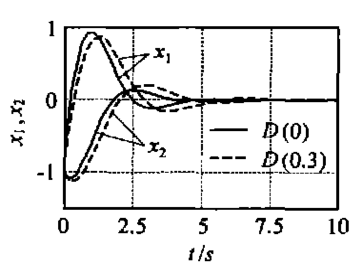
注 2　本文所述的 D-域是文献[7]中 D-域的广泛形式，所以文献[7]的定理 2 是本文结果的特例. 另外，本文结果基于一个充分必要条件，并没有文献[7]中条件 $I - \epsilon H_i H_i^{\mathrm{T}} > 0$ 的限制，因而具有较小的保守性.

4　仿真示例

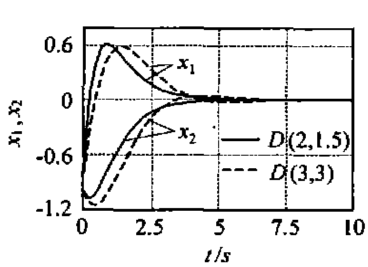
考虑如下质量弹簧阻尼系统模型[3,7]：

$$\ddot{y} = -\dot{y}(t) - c(t)y(t) + (1 + 0.13\dot{y}^3(t))u(t),$$

其中不确定项 $c(t) \in [0.5, 1.81]$，并进一步限定 $y \in [-1.5, 1.5]$，$\dot{y} \in [-1.5, 1.5]$. 下面用本文方法设计状态反馈控制器，使系统在 D-域内保持平衡. 根据文献[3,7]的方法，可将上述非线性模型化为两规则 T-S 模糊模型(1)，其中



(a)　D 域为左半开复平面时的状态响应曲线



(b)　D 域为左半开复平面圆盘时的状态响应曲线

图 1　D-域响应曲线

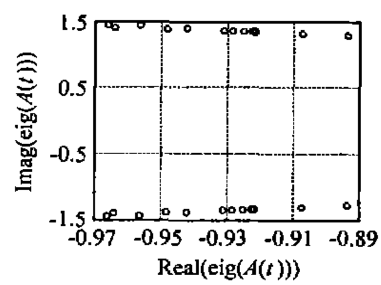
$$x(t) = [x_1 \quad x_2]^{\mathrm{T}} = [\dot{y}(t) \quad y(t)]^{\mathrm{T}},$$

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} -1.0 & -1.155 \\ 1 & 0 \end{bmatrix},$$

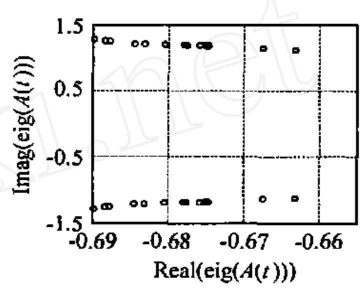
$$B_1 = \begin{bmatrix} 1.4387 \\ 0 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 0.5613 \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$H_1 = H_2 = [1 \quad 0]^{\mathrm{T}}, E_{B_1} = E_{B_2} = 0,$$

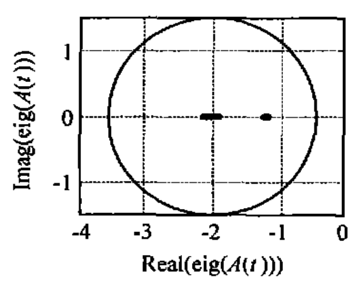
$$E_{A_1} = [0 \quad -0.655], E_{A_2} = [0 \quad 0.655].$$



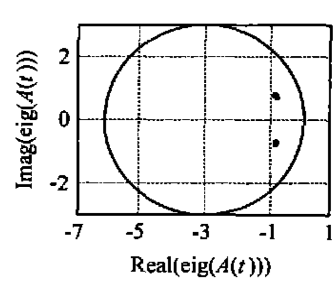
(a)　D 域为 $D(0)$ 时闭环系统的极点分布



(b)　D 域为 $D(0.3)$ 时闭环系统的极点分布



(c)　D 域为 $D(2,1.5)$ 时闭环系统的极点分布



(d)　D 域为 $D(3,3)$ 时闭环系统的极点分布

图 2　D-域极点分布

规则 1 和规则 2 的隶属度函数分别为

$$\mu_1(\mathring{y}(t)) = 0.5 + \frac{\mathring{y}^3(t)}{6.75},$$

$$\mu_2(\mathring{y}(t)) = 0.5 - \frac{\mathring{y}^3(t)}{6.75}.$$

若D-域为左半开复平面$D(0)$和$D(0.3)$,则根据定理 1,相应子系统的控制器增益矩阵分别为

$$K_1 = K_2 = [-0.843\,2 \quad -1.495\,1],$$

$$K_1 = K_2 = [-0.349\,4 \quad -0.683\,5].$$

若D-域为左半开复平面中圆域$D(2, 1.5)$和$D(3, 3)$,则根据定理 1,相应子系统的控制器增益矩阵分别为

$$K_1 = K_2 = [-2.262\,0 \quad -1.339\,9]$$

$$K_1 = K_2 = [-0.650\,9 \quad -0.115\,3].$$

设系统不确定性为

$$c(t) = 1.155 + 0.655\sin(6.28t),$$

系统初始条件设为$x_1(0) = -0.8, x_2(0) = -1.0$. 则闭环系统相应于上述 4 种$D$-域的响应曲线如图 1 所示. 另外,闭环系统相应于上述 4 种D-域的极点分布如图 2 所示.

5 结 语

对二次矩阵不等式区域D,本文提出了具有范数有界不确定性的 T-S 模糊非线性模型的鲁棒D-镇定问题,给出了该系统二次D-稳定的一个充分必要条件,并利用并行分布补偿技术和线性矩阵不等式技术设计出全局鲁棒D稳定控制器. 最后以仿真实例说明了本文设计方法的可行性和有效性.

参考文献(References)

[1] Zadeh L A. Fuzzy Sets[J]. *Information and Control*, 1965, 8(3): 338-353.

[2] Takagi T, Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control [J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics*, 1985, 15(1): 116-132.

[3] Tanaka K, Sugeno M. Stability analysis and design of fuzzy control systems[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1992, 45(2): 135-156.

[4] Tanaka K, Ikeda T, Wang H O. Robust stabilization for a class of uncertain nonlinear systems via fuzzy control: Quadratic stabilizality, H_∞ control theory and linear matrix inequalities[J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 1996, 4(1): 1-13.

[5] Joh J, Langari R, Jeung E T, et al. A new design method for continuous Takagi-Sugeno fuzzy controller with pole placement constraints: An LMI approach [A]. *Proc IEEE Int Conf on Systems, Man and Cybernetics*[C]. Orlando, 1997: 2969-2974.

[6] Chilali M, Gahinet P. H_∞ design with pole placement constraints: An LMI approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41(3): 358-367.

[7] 刘飞, 苏宏业, 褚健. 基于模糊模型的不确定非线性系统鲁棒D镇定[J]. *控制与决策*, 2002, 17(5): 532-535. (Liu F, Su H Y, Chu J. Robust D-stabilization for uncertain nonlinear systems based on fuzzy models [J]. *Control and Decision*, 2002, 17(5): 532-535.)

[8] Chilali M, Gahinet P, Apkarian P. Robust pole placement in LMI regions [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(12): 2257-2270.

[9] Peaucelle D, Arzelier D, Bachelier O, et al. A new robust D-stability condition for real convex polytopic uncertainty[J]. *Systems and Control Letters*, 2000, 40(1): 21-30.

[10] Valter J, Leite S, Pedro L, et al. An improved LMI condition for robust D-stability of uncertain polytopic systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2003, 48(3): 500-504.

[11] Xie L. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty [J]. *Int J Control*, 1996, 63(4): 741-750.

(上接第 45 页)

[5] Zhang Q L, Lam J. Robust elimination of impulse of descriptor systems [J]. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems*, 2002, 9(1): 13-28.

[6] Cheng C W, Wu Q, Alexander T T. Decentralized robust controller design for uncertain large-scale systems with control delays[J]. *Int J of Systems Science*, 2000, 32(1): 33-41.

[7] Dai L. *Singular Control Systems*[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989: 102-128.

[8] Petersen I R. A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems [J]. *Systems and Control Letters*, 1987, 8(5): 351-357.

[9] Xie L, Soh Y C. Robust Kalman filtering for uncertain systems[J]. *Systems and Control Letters*, 1994, 22(2): 123-129.

[10] 张庆灵. *广义大系统的分散控制与鲁棒控制*[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997.

[11] Newcomb R W. The semistate description of nonlinear time variable circuits[J]. *IEEE Trans Circuits and Systems*, 1981, CAS-28(1): 62-71.