文章编号：1001-0920(2009)11-1744-05

连续 T-S 模糊系统的严格二次型耗散控制

何希勤，陈 刚，张大庆
（辽宁科技大学 应用数学研究所，辽宁 鞍山 114051）

摘 要：研究一类连续 T-S 模糊系统的严格二次型耗散控制问题，给出了保证系统严格二次型耗散稳定的状态反馈控制器的设计方法. 控制器可通过求解一组线性矩阵不等式获得，所得结果不仅提供了解决 H_∞ 控制与正实控制的统一框架，而且提供了一种更灵活、保守性更小的控制器设计方法. 最后通过仿真说明了所提出方法的有效性、可行性和优越性.

关键词：T-S 模糊系统；状态反馈控制器；线性矩阵不等式；耗散控制
中图分类号：TP273 **文献标识码**：A

Strictly quadratic dissipative control for continuous T-S fuzzy systems

HE Xi-qin, *CHEN Gang*, *ZHANG Da-qing*
(Institute of Applied Mathematics, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China. Correspondent: CHEN Gang, E-mail: rencheng101923@163.com)

Abstract: The problem of strictly quadratic dissipative control for a class of continuous T-S fuzzy systems is studied. The state feedback controller is proposed to guarantee that the T-S fuzzy systems are strictly quadratic dissipative. The controller can be constructed based on the solution of linear matrix inequality. The result of this paper unifies the existing results on H_∞ and positive real control, and provides a more flexible and less conservative control design method. Finally, a simulation example shows the effectiveness, feasibility and superiority of the proposed methods.

Key words: T-S fuzzy systems; State feedback controller; Linear matrix inequality; Dissipative control

1 引 言

大多工业实际系统都存在由于系统模型复杂、元器件不精确及其磨损老化所造成的严重的非线性和不确定性. 对于非线性动态系统，对其进行控制与建模是控制系统理论中的一个具有挑战性的课题. 在过去的十几年中，为了解决非线性系统的建模及其参数化描述问题，人们提出了很多有效的方法，其中 Takagi-Sugeno(T-S)模糊控制方法是较为有效的方法之一. T-S 模糊模型是由一组 If-Then 规则表示的非线性系统，由于这种模型可以以任意精度逼近 R^n 中闭集上的连续函数而受到重视. 人们应用 T-S 模糊控制，得到了关于非线性系统稳定性分析和综合方面的很多成果[1-6].

耗散性是由 Willems 于 1972 年提出的，现已成为电路系统和控制理论中的一个十分重要的概念. 研究基于耗散性的理论，不仅可以提供解决 H_∞ 控制与正实控制的统一框架，使控制器设计方法更灵活，而且揭示了很多更深刻的内容，已引起了人们的广泛关注[5-11]. 然而，对于 T-S 模糊系统耗散性研究的文章并不多见. 最近，文献[5]研究了连续 T-S 模糊系统的状态反馈和基于状态观测器反馈的耗散控制问题，文献[6]研究了连续 T-S 模糊系统动态输出反馈的耗散控制问题，但文献[5,6]所研究的耗散控制实质上是无源控制.

本文研究基于严格二次型耗散稳定性一般情况下状态反馈的耗散控制问题，所得结论较文献[5,6]的耗散控制更具一般性，适用范围更广.

文中如果没有明确说明，所给矩阵都被认为是具有适当维数的矩阵；$X>0(X\geqslant 0, X<0, X\leqslant 0)$ 表示矩阵 X 是对称正定(半正定、负定、半负定) 矩

收稿日期：2008-11-18；**修回日期**：2009-04-20.
基金项目：辽宁省高等学校科研项目(2008332).
作者简介：何希勤(1965—)，男，安徽怀宁人，教授，博士，从事模糊控制、非线性系统理论等研究；陈刚(1977—)，男，山东济宁人，硕士，从事模糊控制、耗散控制的研究.

阵；$f \in L_2[0,\infty)$ 表示 f 是 $[0,\infty)$ 上的平方可积函数；I 代表适当维数的单位阵；$\langle u,v\rangle_T = \int_0^T u^{\mathrm{T}} v\mathrm{d}t$，$\forall T \geqslant 0$；$R^n$ 代表 n 维欧几里德空间；diag(•) 代表对角阵；* 代表矩阵中的对称结构部分.

2　连续 T-S 模糊系统的严格二次型耗散稳定性

考虑如下“If-Then” 模糊规则：

设 R_i 为第 i 条模糊规则，则 T-S 模糊系统模型描述为

R_i：If $z_1(t)$ is F_{i1} and … and $z_g(t)$ is F_{ig}；

Then

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + M_i w(t), \\ y(t) = C_i x(t) + E_i w(t), \end{cases} \quad i = 1,2,\cdots,r.$$

其中：F_{ij} 是模糊集，$j = 1,2,\cdots,p$；r 是模糊规则数；$x(t) \in R^n$ 是状态变量；$w(t) \in R^l$ 是扰动输入，且 $w(t) \in L_2[0,+\infty)$；$u(t) \in R^m$ 是控制输入；$y(t) \in R^q$ 是输出变量；$z(t) = [z_1(t), z_2(t),\cdots,z_g(t)]$ 是前件变量，并假设前件变量与输入和扰动相互独立；A_i，B_i，C_i，M_i 和 E_i 都是具有适当维数的矩阵.

由单点模糊化、乘积推理和加权平均解模糊化的推理方法，可得到全局 T-S 模糊模型如下：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \\ \sum_{i=1}^r h_i(z(t))[A_i x(t) + B_i u(t) + M_i w(t)], \\ y(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t))[C_i x(t) + E_i w(t)]. \end{cases} \tag{1}$$

其中

$$\theta_i(t) = \prod_{j=1}^g F_{ij}(z_j(t)),$$

$$h_i(z(t)) = \frac{\theta_i(z(t))}{\sum_{j=1}^r \theta_j(z(t))}.$$

$h_i(z(t))$ 是规范化的隶属度函数，并假设它是时间 t 的连续实值函数，且满足

$$\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1, h_i(z(t)) \geqslant 0,\ i = 1,2,\cdots,r.$$

为了方便，记

$$h_i = h_i(z(t)),\ \bar{A} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) A_i,$$

$$\bar{B} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) B_i,\ \bar{M} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) M_i,$$

$$\bar{C} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) C_i,\ \bar{E} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) E_i.$$

下面给出对于 T-S 模糊系统的状态反馈控制器的模糊模型：

控制器规则 i

If $z_1(t)$ is F_{i1} and … and $z_g(t)$ is F_{ig}；

Then $u(t) = -K_i x(t)$，$i = 1,2,\cdots,r$.

因此，全局的模糊控制器为

$$u(t) = -\sum_{i=1}^r h_i K_i x(t), \tag{2}$$

其中 K_i 是待定的常数控制器增益，$i = 1,2,\cdots,r$. 记

$$\bar{K} = \sum_{i=1}^r h_i K_i,$$

则系统(1) 在控制律(2) 的作用下，可以得到如下的闭环系统：

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (\bar{A} - \bar{B}\bar{K}) x(t) + \bar{M} w(t), \\ y(t) = \bar{C} x(t) + \bar{E} w(t). \end{cases} \tag{3}$$

下面将文献[8] 定义 2.1 推广到连续 T-S 模糊系统，可以得到下面的定义：

系统(3) 的二次能量供给函数 ϑ 定义为

$$\vartheta(w,y,T) = \langle y, Qy\rangle_T + 2\langle y, Sw\rangle_T + \langle w, Rw\rangle_T. \tag{4}$$

其中：Q，S，R 是适当维数的实矩阵，Q 和 R 是对称矩阵.

定义 1　在初始条件 $x(0) = x_0$ 下，称系统(3) 关于能量供给率 ϑ 是二次型耗散稳定的，如果对于某个实函数 $\beta(\cdot)$，且 $\beta(0) = 0$，均有

$$\vartheta(w,y,T) + \beta(x_0) \geqslant 0,\quad \forall w \in L_2[0,\infty), \forall T \geqslant 0. \tag{5}$$

进一步，如果存在常数 $\alpha > 0$，使得

$$\vartheta(w,y,T) + \beta(x_0) \geqslant \alpha\langle w, w\rangle_T,\quad \forall w \in L_2[0,\infty), \forall T \geqslant 0 \tag{6}$$

恒成立，则称连续 T-S 模糊系统(3) 是严格二次型耗散稳定的.

注 1　以上提到的严格二次型耗散控制问题，同时包含了 H_∞ 控制问题和无源控制问题：

1) 当 $Q = 0, S = I, R = 0$ 时，严格二次型耗散控制问题(6) 退化为无源控制问题；

2) 当 $Q = -I, S = 0, R = \gamma^2 I$ 时，严格二次型耗散控制问题(6) 退化为 H_∞ 控制问题；

3) 当 $Q = -\theta I, S = (1-\theta) I, R = \theta\gamma^2 I, \theta \in (0,1)$ 时，严格二次型耗散控制问题(6) 变为混合的 H_∞ 和正实控制；

4) 当

$$Q = -I,\ S = \frac{1}{2}(K_1 + K_2)^{\mathrm{T}},$$

$$R = -\frac{1}{2}(K_1^{\mathrm{T}} K_2 + K_2^{\mathrm{T}} K_1)$$

时，其中 K_1 和 K_2 是适当维数的常矩阵，严格二次型耗散控制问题(6) 变为扇区有界约束.

不失一般性，本文给出如下假设：

假设 1 $Q \leqslant 0$.

注 2 容易发现,在假设 $Q \leqslant 0$ 的前提下,严格二次型耗散控制问题依然包含注 1 的 4 种情况.

3 状态反馈的严格二次型耗散控制

引理 1(Schur 补引理)[12] 对于给定的对称矩阵

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix},$$

其中 S_{11} 是 $r \times r$ 维矩阵,以下 3 个条件等价:

1) $S < 0$;

2) $S_{11} < 0, S_{22} - S_{12}^{\mathrm{T}} S_{11}^{-1} S_{12} < 0$;

3) $S_{22} < 0, S_{11} - S_{12} S_{22}^{-1} S_{12}^{\mathrm{T}} < 0$.

定理 1 在假设 $Q \leqslant 0$ 的条件下,对于 T-S 模糊控制系统(1) 和给定的实矩阵 Q, S, R,且 Q 和 R 是对称矩阵,状态反馈控制器(2),如果存在矩阵 $P = P^{\mathrm{T}} > 0, K_i (i = 1, 2, \cdots, r)$ 和常数 $\alpha > 0$,使得下面的矩阵不等式成立:

$$\Psi_{ii} < 0,\ i = 1, 2, \cdots, r; \tag{7}$$

$$\Psi_{ij} + \Psi_{ji} < 0,\ 1 \leqslant i < j \leqslant r. \tag{8}$$

其中

$$\Psi_{ij} = \begin{bmatrix} M(i,j) & PM_i - C_i^{\mathrm{T}} S & C_i^{\mathrm{T}} G^{\mathrm{T}} \\ * & \alpha I - R - E_i^{\mathrm{T}} S - S^{\mathrm{T}} E_i & E_i^{\mathrm{T}} G^{\mathrm{T}} \\ * & * & -I \end{bmatrix},$$

$$M(i,j) = (A_i - B_i K_j)^{\mathrm{T}} P + P(A_i - B_i K_j),$$

$$G^{\mathrm{T}} G = -Q.$$

则状态反馈控制器(2) 使得 T-S 模糊系统(1) 是严格二次型耗散稳定的.

证明 由不等式(7) 和(8) 成立,可以得到

$$\sum_{i=1}^{r} h_i^2 \Psi_{ii} + \sum_{i=1}^{r} \sum_{i<j}^{r} h_i h_j (\Psi_{ij} + \Psi_{ji}) < 0. \tag{9}$$

不等式(9) 等价于

$$\begin{bmatrix} L_1 & P\overline{M} - \overline{C}^{\mathrm{T}} S & \overline{C}^{\mathrm{T}} G^{\mathrm{T}} \\ * & L_2 & \overline{E}^{\mathrm{T}} G^{\mathrm{T}} \\ * & * & -I \end{bmatrix} < 0, \tag{10}$$

其中

$$L_1 = (\overline{A} - \overline{BK})^{\mathrm{T}} P + P(\overline{A} - \overline{BK}),$$

$$L_2 = \alpha I - R - \overline{E}^{\mathrm{T}} S - S^{\mathrm{T}} \overline{E}.$$

因为 $G^{\mathrm{T}} G = -Q$,由引理 1 可以得到

$$\begin{bmatrix} L_1 & P\overline{M} - \overline{C}^{\mathrm{T}} S \\ * & L_2 \end{bmatrix} - [\overline{C} \quad \overline{E}]^{\mathrm{T}} Q [\overline{C} \quad \overline{E}] < 0. \tag{11}$$

设闭环系统(3) 的 Lyapunov 函数为

$$V(x(t)) = x^{\mathrm{T}}(t) P x(t),\ P > 0.$$

那么,可以得到

$$\dot{V} - \{ y^{\mathrm{T}} Q y + 2 y^{\mathrm{T}} S w + w^{\mathrm{T}} R w \} + \alpha w^{\mathrm{T}} w =$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} L_1 & P\overline{M} - \overline{C}^{\mathrm{T}} S \\ * & L_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} -$$

$$\begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} [\overline{C} \quad \overline{E}]^{\mathrm{T}} Q [\overline{C} \quad \overline{E}] \begin{bmatrix} x(t) \\ w(t) \end{bmatrix} < 0.$$

从而可得

$$\dot{V} - \{ y^{\mathrm{T}} Q y + 2 y^{\mathrm{T}} S w + w^{\mathrm{T}} R w \} + \alpha w^{\mathrm{T}} w < 0. \tag{12}$$

对式(12) 从 0 到 T 积分,可以得到

$$\int_0^T (\dot{V} - \{ y^{\mathrm{T}} Q y + 2 y^{\mathrm{T}} S w + w^{\mathrm{T}} R w \} + \alpha w^{\mathrm{T}} w) \mathrm{d}t < 0. \tag{13}$$

假设初始状态 $x(0) = x_0$,则可以得到

$$V(x(T)) - V(x(0)) - \vartheta(w, y, T) + \alpha \langle w, w \rangle_T < 0. \tag{14}$$

令 $\beta(x_0) = V(x_0)$,由于 $V(x(T)) \geqslant 0$,可以推出 $\vartheta(w, y, T) + \beta(x_0) \geqslant \alpha \langle w, w \rangle_T$. 从而状态反馈控制器(2) 使得连续 T-S 模糊系统(1) 是严格二次型耗散稳定的. □

定理 2 在假设 $Q \leqslant 0$ 的条件下,对于 T-S 模糊控制系统(1) 和给定的实矩阵 Q, S, R,且 Q 和 R 是对称矩阵,状态反馈控制器(2),如果存在矩阵 $X = X^{\mathrm{T}} > 0, Y_i (i = 1, 2, \cdots, r)$ 和常数 $\alpha > 0$,使得下面的矩阵不等式成立:

$$\Omega_{ii} < 0,\ i = 1, 2, \cdots, r; \tag{15}$$

$$\Omega_{ij} + \Omega_{ji} < 0,\ 1 \leqslant i < j \leqslant r. \tag{16}$$

其中

$$\Omega_{ij} = \begin{bmatrix} N(i,j) & M_i - X C_i^{\mathrm{T}} S & X C_i^{\mathrm{T}} G^{\mathrm{T}} \\ * & \alpha I - R - E_i^{\mathrm{T}} S - S^{\mathrm{T}} E_i & E_i^{\mathrm{T}} G^{\mathrm{T}} \\ * & * & -I \end{bmatrix},$$

$$N(i,j) = X A_i^{\mathrm{T}} + A_i X - Y_j^{\mathrm{T}} B_i^{\mathrm{T}} - B_i Y_j,$$

$$G^{\mathrm{T}} G = -Q.$$

则状态反馈控制器(2) 使得 T-S 模糊系统(1) 是严格二次型耗散稳定的,且状态反馈的增益为 $K_i = Y_i X^{-1}, i = 1, 2, \cdots, r$.

证明 对不等式(7) 和(8) 分别左乘和右乘 $\mathrm{diag}(P^{-1}, I, I)$,并且令 $X = P^{-1}, Y_i = K_i X, Y_j = K_j X$,则立即可以得到不等式(15) 和(16). □

定理 1 给出了在状态反馈控制器作用下,系统(1) 为耗散稳定的条件. 进一步,定理 2 将此条件转化为线性矩阵不等式约束条件. 由此可通过线性矩阵不等式求解工具,在 Matlab 环境中方便地为系统(1) 设计控制器.

注 3 值得指出的是,除要求矩阵 Q 为半负定外(此假设在大多数情况下是必要的),定理 2 中没

有其他过多的假设条件.因此,这里由耗散控制方法建立的 T-S 模糊系统(1) 的控制器设计方法具有较低的保守性.

注 4　如注 2 所述,定理 1 与定理 2 统一了 H_∞ 和正实控制等常见的控制方法.由定理 2,通过调整矩阵 Q,S,R,可以为 T-S 模糊系统(1) 设计各种控制器.这使得控制器设计方法更加灵活.仿真示例也表明,对于不同的控制器设计方案(选择不同的 Q,S,R 矩阵),会使系统的响应情况不同.在实际应用中,可以根据实际背景选择合适的参数来为系统设计控制器.

4　仿真研究

考虑如下 T-S 模糊系统：

If $x_1(t)$ is F_{i1}；

Then $\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) + M_i w(t)$,

$$y(t) = C_i x(t) + E_i w(t),\ i = 1,2.$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 3 \\ 1 & 2 \end{bmatrix},\ A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 2 \\ 2.5 & -5 \end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -2 \end{bmatrix},$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0.5 \end{bmatrix},\ E_2 = \begin{bmatrix} 0.5 & 0 \\ 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = I,\ E_1 = 0.2I,\ M_1 = M_2 = 0.7I.$$

其归一化的隶属度函数为

$$h_1(x_1(t)) = \frac{1 + \cos(x_1(t))}{2},$$

$$h_2(x_1(t)) = \frac{1 - \cos(x_1(t))}{2}.$$

应用定理 2(选取 $\alpha = 0.1$),下面选取不同的 Q,S 和 R 作为一般耗散控制的 4 种特殊情况.首先在 Matlab 环境下,使用 Yalmip 工具箱设计 4 个状态反馈控制器;然后使用 Matlab Simulink 进行仿真,分别做出这 4 种情况下的状态轨迹图.其中:初始状态为 $[1.3\quad 0.2]^{\mathrm{T}}$,外部扰动为

$$[\mathrm{e}^{-0.3t}\sin(6t);\mathrm{e}^{-0.3t}\sin(6t)].$$

1) $Q = -I, S = 0, R = I$,即 H_∞ 控制,可求得状态反馈控制器的参数为

$$K_1 = [-12.1819\quad -11.8314],$$

$$K_2 = [-6.0406\quad -2.1274],$$

状态轨迹如图 1 所示.

2) $Q = 0, S = I, R = 0$,即无源控制,可求得状态反馈控制器的参数为

$$K_1 = [-3.8890\quad -3.1398],$$

$$K_2 = [-2.3034\quad 2.0267],$$

状态轨迹如图 2 所示.

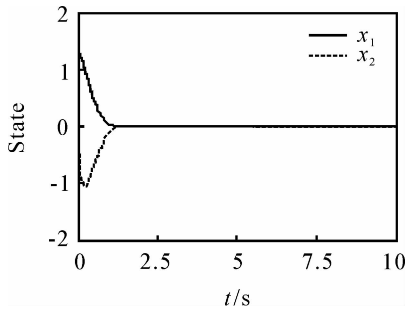

图 1　情况 1) 的状态轨迹图

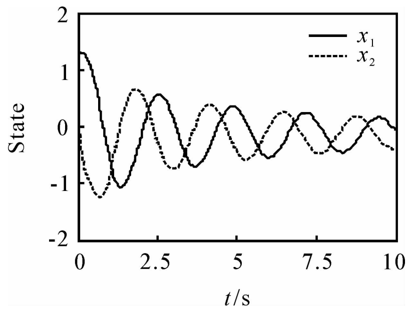

图 2　情况 2) 的状态轨迹图

3) $Q = -I, S = 0.75I, R = 2.5I$,即扇区有界约束,可求得状态反馈控制器的参数为

$$K_1 = [-5.4384\quad -6.1779],$$

$$K_2 = [-3.3550\quad 0.1010],$$

状态轨迹如图 3 所示.

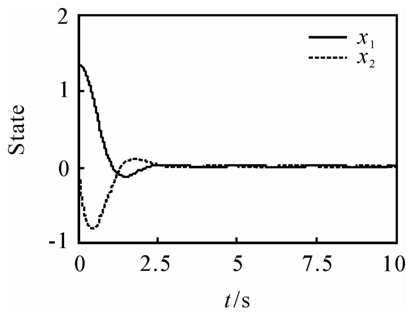

图 3　情况 3) 的状态轨迹图

4) $Q = -0.01I, S = 0, R = 2.5I$,即一般情况下的耗散控制,可求得状态反馈控制器的参数为

$$K_1 = [-2.6737\quad -4.4092],$$

$$K_2 = [-2.0520\quad 1.0025],$$

状态轨迹如图 4 所示.

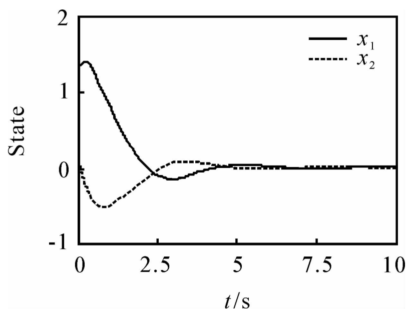

图 4　情况 4) 的状态轨迹图

从上述仿真结果可以明显看出,该耗散控制结论更一般、更具灵活性. 几种常见的控制,比如无源控制、H_∞ 控制、扇区有界约束,都是严格二次型耗散控制的特殊情况,这便为在实际控制中选取最好的控制效果提供了一种有效的途径.

5 结 论

本文基于严格二次型耗散稳定性理论,给出了一类 T-S 模糊系统基于状态反馈的耗散控制器的设计方法,并给出了耗散控制器存在的充分条件. 耗散控制本身兼顾了相位和增益信息,从而减少了控制器设计的保守性. 仿真结果表明了所提出方法的优越性.

参考文献(References)

[1] Feng G. A survey on analysis and design of model-based fuzzy control systems [J]. IEEE Trans on Fuzzy Systems, 2006, 14(5): 676-697.

[2] Tanaka K, Wang H O. Fuzzy control design and analysis: A linear matrix inequality approach[M]. New York: John Wiley & Sons, 2001.

[3] Zhang D Q, Zhang Q L, Zhang Y. Stabilization of T-S fuzzy systems: An SOS approach [J]. Int J of Innovative, Computing, Information and Control, 2008, 4(9): 2273-2283.

[4] 张大庆, 张庆灵, 胡跃冰. T-S 模糊系统稳定性的一个新的充分条件[J]. 自动化学报, 2007, 33(2): 222-224.
(Zhang D Q, Zhang Q L, Hu Y B. A new sufficient condition on the stability of T-S fuzzy systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(2): 222-224.)

[5] Uang H J. On the dissipativity of nonlinear systems: Fuzzy control approach[J]. Fuzzy Sets and Systems, 2005, 156(2):185-207.

[6] 张艳, 张庆灵, 杨冬梅. 基于 LMI 方法的 T-S 模糊系统的动态输出反馈耗散控制器设计[J]. 控制与决策, 2007, 22 (7): 760-764.
(Zhang Y, Zhang Q L, Yang D M. Dynamic output feedback controller designs on the dissipative for T-S fuzzy systems via LMI[J]. Control and Decision, 2007, 22 (7): 760-764.)

[7] Brogliato B, Lozano R, Maschke B, et al. Dissipative systems analysis and control[M]. 2nd ed. London: Springer-Verlag, 2007.

[8] Xie S L, Xie L H, Souza C E. Robust dissipative control for linear systems with dissipative uncertainty [J]. Int J of Control, 1998, 70(2): 169-191.

[9] Hill D J, Moylan P J. Dissipative dynamical systems: Basic input-output and state properties[J]. J of the Franklin Institute, 1980, 30(9): 327-357.

[10] Zhang H, Guan Z H, Feng G. Reliable dissipative control for stochastic impulsive systems [J]. Automatica, 2008, 44(4):1004-1010.

[11] Rojas O J, Bao J, Lee P L. On dissipativity, passivity and dynamic operability of nonlinear processes[J]. J of Process Control, 2008, 18(5): 515-526.

[12] 俞立. 鲁棒控制——线性矩阵不等式方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(Yu L. Robust control — Linear matrix inequality methods[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)

(上接第 1743 页)

[6] 张军, 裴润, 裴辛哲, 等. 不确定滞后系统的鲁棒模型预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 212-215.
(Zhang J, Pei R, Pei X Z, et al. Robust model for predictive control of uncertain systems with time-delay [J]. Proc of CSEE, 2003, 23(7): 212-215.)

[7] 陈秋霞, 俞立. 不确定离散时滞系统的输出反馈鲁棒预测控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(3): 401-406.
(Chen Q X, Yu L. Robust MPC for uncertain discrete time-delay system via dynamic output feedback [J]. Control Theory & Applications, 2007, 24 (3): 401-406.)

[8] 陆姝, 邵慧鹤. 一类多状态时滞不确定系统的鲁棒模型预测控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(11): 2547-2549.
(Lu M, Shao H H. Robust predictive control for uncertain systems with multiple state delays[J]. J of System Simulation, 2007, 19(11): 2547-2549.)

[9] 刘晓华, 于晓华. 多面体不确定系统时滞依赖鲁棒预测控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(7): 808-812.
(Liu X H, Yu X H. Delay-dependent robust predictive control for polytopic uncertain systems[J]. Control and Decision, 2008, 23(7): 808-812.)

[10] Yaohui Lu, Yaman Arkun. Quasi-min-max MPC algorithms for LPV systems[J]. Automatica, 2000, 36 (4): 527-540.

[11] David Q Mayne, Rawling J B, Rao C V. Constrained model predictive control: Stability and optimality[J]. Automatica, 2000, 36(4): 789-814.

[12] 王蓬, 李少远. 一类非线性系统的多模型预测控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1113-1118.
(Wang P, Li S Y. Multiple model-based predictive control for a class of nonlinear systems [J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1113-1118.)