第21卷 第11期 控 制 与 决 策 2006年11月
Vol. 21 No. 11 Control and Decision Nov. 2006

文章编号: 1001-0920(2006)11-1275-05

线性不确定广义时滞系统的鲁棒无源滤波器设计

张 鹏, 付艳明, 段广仁
(哈尔滨工业大学 控制理论与制导技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 研究一类线性不确定广义时滞系统的鲁棒无源滤波器设计问题. 系统中所含的不确定性假设是未知且范数有界的. 利用线性矩阵不等式方法和Lyapunov函数方法相结合, 给出了广义滤波增广系统时滞独立的鲁棒无源滤波器的存在条件. 设计目标是对所有的不确定性, 滤波增广系统是正则 稳定 无脉冲的, 且满足所提的无源滤波性能指标. 所提的滤波器设计问题可转化为标准的线性矩阵不等式的求解问题, 并可推广到多时滞情况. 数值例子验证了设计方法的可行性.

关键词: 时滞系统; 广义系统; 无源滤波; 线性矩阵不等式
中图分类号: TP13 文献标识码: A

Design of Robust Passive Filter for Linear Uncertain Descriptor Time-delay Systems

ZHANG Peng, FU Yan-ming, DUAN Guang-ren
(Center for Control Theory and Guidance Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China. Correspondent: ZHANG Peng, E-mail: zhangpeng0718@hit.edu.cn)

Abstract: Robust passive filtering for a class of linear uncertain descriptor time-delay systems is proposed. The parameter uncertainties of the system are assumed unknown and norm bounded. By combining the linear matrix inequality with Lyapunov function method, a sufficient condition on the existence of robust passive filters is derived. The objective is to design linear memoryless filters such that, for all uncertainties, the resulting augmented system is regular, robust stochastically stable independent of delays, impulse-free, and satisfies the proposed passive performance. The proposed filter design problem is turned into the feasible solution problem of linear matrix inequalities. The proposed design method can be extended to the case of multi-delays systems. A numerical example shows the feasibility of the proposed design approach.

Key words: Time-delay systems; Descriptor systems; Passive filtering; Linear matrix inequalitiy

1 引 言

广义时滞系统普遍存在于许多实际问题(如飞行器镇定, 电子网络, 经济系统和控制系统等)中, 因而应用十分广泛[1]. 无源性理论在系统稳定性研究中起着重要的作用, 它将输入输出的乘积作为能量的供给率, 体现了系统在有界输入条件下的能量衰减特性. 近年来, 许多学者在无源性理论方面做了大量的工作[2~7], 文献[2]讨论了非线性系统的无源性问题; [3]讨论了线性时滞系统的无源控制问题; [4]进一步研究了不确定时滞系统鲁棒无源控制问题; [5]考虑了一类时变不确定离散时滞系统的鲁棒无源控制问题; [6]研究了广义系统的无源控制问题; [7]利用Lyapunov函数和线性矩阵不等式方法研究了含有跳变参数时滞系统的无源控制.

状态估计是控制领域里较为重要的基本问题之一. 自从Kalman提出随机系统的最优滤波理论和Luenberger提出确定系统的观测器理论之后, 国内外学者在状态估计这一问题上做了大量的研究工

收稿日期: 2005-08-01; 修回日期: 2005-10-12.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60374024).
作者简介: 张鹏(1977—), 男, 吉林扶余人, 博士生, 从事时滞系统鲁棒控制与滤波、观测器设计理论及应用研究;
段广仁(1962—), 男, 黑龙江桦川人, 教授, 博士生导师, 从事特征结构配置理论、鲁棒控制理论等研究.

作. 文献[8]研究了时滞不确定性系统的鲁棒 H_∞ 滤波器设计问题; [9]研究了离散时滞系统的鲁棒 L_2-L_∞ 滤波; [10]研究了时滞系统的保性能与 H_∞ 滤波.

本文基于 LMI 方法研究了一类含有时滞线性广义系统的鲁棒无源滤波器设计问题. 本文提出的滤波器设计方法保证对所有容许不确定性滤波增广系统是容许(正则、稳定、无脉冲)的, 并且满足所提出的无源性能指标.

2 问题的描述

考虑下述不确定广义时滞系统:

$$\begin{cases} E\dot{x}(t) = A(t)x(t) + A_1(t)x(t-d) + Bw(t), \\ y(t) = C(t)x(t) + C_1(t)x(t-d) + Dw(t), \\ z(t) = H(t)x(t) + D_1w(t), \\ x(t) = \phi(t), \forall t \in [-d, 0]. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in R^n$, $y(t) \in R^r$, $z(t) \in R^p$ 分别表示状态向量、量测输出向量与被估计向量, $w(t) \in R^p$ 是输入噪声信号; d 表示定常时滞, $\phi(t) \in L_2[-A, 0]$ 为系统初始函数; E 是具有合适维数的已知矩阵且 rank $E = q \leqslant n$; B, D, D_1 是适当维数的已知实矩阵, $A(t), A_1(t), C(t), C_1(t)$ 与 $H(t)$ 是含有不确定性矩阵, 可描述如下:

$$\begin{aligned} A(t) &= A + \Delta A(t), \\ A_1(t) &= A_1 + \Delta A_1(t), \end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} C(t) &= C + \Delta C(t), \\ C_1(t) &= C_1 + \Delta C_1(t), \\ H(t) &= H + \Delta H(t). \end{aligned} \tag{3}$$

其中: A, A_1, C, C_1 与 H 为适当维数的已知实矩阵. 不确定矩阵 $\Delta A(t), \Delta A_1(t), \Delta C(t), \Delta C_1(t)$ 与 $\Delta H(t)$ 表示范数有界的不确定性, 且满足

$$\begin{bmatrix} \Delta A(t) & \Delta A_1(t) \\ \Delta C(t) & \Delta C_1(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_1 \\ M_2 \end{bmatrix} F(t)[N_1 \quad N_2], \tag{4}$$

$$\Delta H(t) = SF(t)T. \tag{5}$$

其中: M_1, M_2, N_1, N_2, S, T 是适当维数的已知常数实矩阵, 它们反映了不确定性的结构, $F(t)$ 是满足 $F(t)F^T(t) \leqslant I$ 的未知矩阵, 且 $F(t)$ 中的元素是 Lebesgue 可测的.

定义 1 考虑如下广义时滞系统:

$$\begin{cases} E\dot{x} = Ax(t) + A_1x(t-d), \\ x(t) = \phi(t), \forall t \in [-d, 0]. \end{cases} \tag{6}$$

1) 如果存在 $s \in C$, 使得 $\det(sE - A) \neq 0$, 即 $\det(sE - A)$ 不恒为零, 则称广义系统(6) 或矩阵对 (E, A) 是正则的.

2) 如果 $\deg\det(sE - A) = \operatorname{rank} E$, 则称广义系统(6) 或矩阵对 (E, A) 是无脉冲的.

3) 如果广义系统(6) 或矩阵对 (E, A) 是正则的、无脉冲的、稳定的, 则称它是容许的.

考虑下述 k 阶滤波器(当 $k = n$ 时, 称为全维滤波器; 当 $1 \leqslant k \leqslant n$ 时, 称为降阶滤波器):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = K_1\hat{x}(t) + K_2y(t), \\ \hat{z}(t) = K_3\hat{x}(t), \\ \hat{x}(0) = 0. \end{cases} \tag{7}$$

其中: $\hat{x}(t) \in R^k$ 为滤波器状态, $\hat{z}(t) \in R^p$ 为估计向量, 矩阵 K_1, K_2 与 K_3 是待设计的滤波器参数.

记误差状态为 $e(t) = z(t) - \hat{z}(t)$, 增广的状态向量为 $x_f = [x^T(t) \quad \hat{x}^T(t)]^T$. 进一步, 定义

$$\begin{aligned} &E_f = \operatorname{diag}(E, I), \quad A_f = \begin{bmatrix} A & 0 \\ K_2C & K_1 \end{bmatrix}, \\ &A_{f1} = \begin{bmatrix} A_1 & 0 \\ K_2C_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_f = \begin{bmatrix} B \\ K_2D \end{bmatrix}, \\ &L = [H \quad -K_3], \quad \Delta A_f = M_fFN_f, \\ &\Delta A_{f1} = M_{f1}FN_{f1}, \quad \Delta L = [\Delta H \quad 0], \\ &M_f = M_{f1} = \begin{bmatrix} M_1 \\ K_2M_2 \end{bmatrix}, \\ &N_f = [N_1 \quad 0], \quad N_{f1} = [N_2 \quad 0]. \end{aligned} \tag{8}$$

综合(1) 与(8), 得到如下的增广系统:

$$\begin{cases} E_f\dot{x}_f(t) = (A_f + \Delta A_f)x_f(t) + (A_{f_1} + \\ \qquad \Delta A_{f1})x_f(t-d) + B_fw(t), \\ e(t) = (L + \Delta L)x_f(t) + D_1w(t), \\ x_{f0}(t) = [\phi^T(t), 0]^T, \forall t \in [-a, 0]. \end{cases} \tag{9}$$

定义 2 形式为(7) 的滤波器是广义时滞系统(1) 的具有耗散率为 γ 的鲁棒无源滤波器, 如果存在矩阵 K_1, K_2 与 K_3, 使得

1) 当 $w(t) = 0$ 时, 对于所有容许的不确定性滤波增广系统(9) 是容许的;

2) 在零初始条件下, 对于所有的非零 $w(t) \in L_2[0, \infty)$, 常数 $\gamma > 0$, 滤波增广系统(9) 对任意的 $T > 0$ 满足

$$\int_0^T (w^T(t)e(t) - \gamma w^T(t)w(t))\,dt \geqslant 0. \tag{10}$$

基于上面的描述, 本节要解决的问题可表述如下:

问题 1(鲁棒无源滤波) 给定广义时滞系统(1), 确定滤波器参数 K_1, K_2 与 K_3, 使得滤波器(7) 是系统(1) 的一个鲁棒无源滤波器.

3 滤波器设计

在给出主要结果之前先给出如下引理:

引理 1[11] 系统(6) 是容许的, 如果存在可逆矩阵 P 及矩阵 $Q > 0$ 满足下面的不等式:

$$E^TP = P^TE \geqslant 0,$$

$$A^TP + P^TA + P^TA_1Q^{-1}A_1P + Q < 0.$$

引理 2[12]　给定适当维数的矩阵 Q, H, E, 并且 Q 是对称的, 则

$$Q + HFE + E^TF^TH^T < 0$$

对所有满足 $F^TF \leqslant I$ 的矩阵 F 成立, 当且仅当存在 $\varepsilon > 0$, 使得

$$Q + \varepsilon HH^T + \varepsilon^{-1}E^TE < 0.$$

定理 1　考虑滤波增广系统(9), 对于所有的不确定性, 如果存在可逆矩阵 P 和矩阵 $Q > 0$ 满足如下的矩阵不等式:

$$E_f^TP = P^TE_f \geqslant 0, \tag{11}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Omega & P^T(A_{f1} + \Delta A_{f1}) & P^TB_f - (L + \Delta L)^T \\ (A_{f1} + \Delta A_{f1})^TP & -Q & 0 \\ B_f^TP - (L + \Delta L) & 0 & -D_1 - D_1^T + 2\gamma I \end{bmatrix} < 0, \tag{12}$$

则上述的鲁棒无源滤波问题有解. 其中

$$\Omega = (A_f + \Delta A_f)^TP + P^T(A_f + \Delta A_f) + Q. \tag{13}$$

证明　当 $w(t) = 0$, 式(11), (12) 成立时, 由引理 1 和 Schur 补性质可知滤波增广系统(9) 是容许的. 进一步, 对增广系统选取 Lyapunov 函数

$$V(x_f, t) = x_f^T(t)E_f^TPx_f(t) + \int_{t-d}^{t} x_f^T(t)Qx_f(t)dt, \tag{14}$$

则 $V(x_f, t) \geqslant 0$, 关于时间 t 求导可得

$$\begin{aligned}\dot V(x_f, t) = {} & x_f^T(t)[(A_f + \Delta A_f)^TP + P^T(A_f + \Delta A_f) + Q]x_f(t) + x_f^T(t)P^T(A_{f1} + \Delta A_{f1})x_f(t - d) + x_f^T(t - d)(A_{f1} + \Delta A_{f1})^TPx_f(t) - \\ & x_f^T(t - d)Qx_f(t - d) + x_f^T(t)P^TB_fw(t) + w^T(t)B_f^TPx_f(t).\end{aligned} \tag{15}$$

进一步, 考虑下述指标:

$$J_T = \int_0^T 2(w^T(t)e(t) - \gamma w^T(t)w(t))dt, T > 0, \tag{16}$$

对于所有的非零 $w(t) \in L_2[0, \infty)$, 与任意的 $T > 0$, 有

$$-J_T = \int_0^T [-2(w^T(t)e(t) - \gamma w^T(t)w(t)) + \dot V(x_f, t)]dt - V(x_f, t) \leqslant \int_0^T x_a^T\Phi x_a dt.$$

其中 $x_a^T = [x_f^T(t)\quad x_f^T(t - d)\quad w^T(t)]$, Φ 由式(11) 给出. 从式(11) 可知, 对于所有的 $T > 0$, $J_T > 0$ 成立, 则滤波增广系统是严格无源的. □

基于上面的充分条件, 鲁棒无源滤波器设计问题能够转化为线性矩阵不等式的求解问题.

定理 2　考虑滤波增广系统(9), 对于所有的不确定性, 如果存在常数 $\varepsilon > 0$, 矩阵 Y_1, Y_2, Y_3 与可逆矩阵 $P = \mathrm{diag}(P_1, P_2)$ 及矩阵 $Q > 0$, 满足如下线性矩阵不等式:

$$E_f^TP = P^TE_f \geqslant 0, \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} \Gamma_1 & \Gamma_2 \\ \Gamma_2^T & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0. \tag{18}$$

则上述的鲁棒无源滤波问题有解. 其中

$$\Gamma_1 = \begin{bmatrix} \Phi_1 & \Phi_2 & \Phi_3 \\ \Phi_2^T & -Q & 0 \\ \Phi_3^T & 0 & -D_1 - D_1^T + 2\gamma I + SS^T \end{bmatrix},$$

$$\Gamma_2 = \begin{bmatrix} P_1^TM_1 & \varepsilon N_1^T \\ Y_2M_2 & 0 \\ 0 & \varepsilon N_2^T \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\Phi_1 = \begin{bmatrix} P_1^TA + A^TP_1 & C^TY_2^T \\ Y_2C & Y_1^T + Y_1 \end{bmatrix} + Q + \begin{bmatrix} T^T \\ 0 \end{bmatrix}[T\quad 0],$$

$$\Phi_2 = \begin{bmatrix} P_1^TA_1 & 0 \\ Y_2C_1 & 0 \end{bmatrix},\quad \Phi_3 = \begin{bmatrix} P_1^TB - H^T \\ Y_2D + Y_3^T \end{bmatrix},$$

特别地, 鲁棒无源滤波器的参数可表示为

$$K_1 = P_2^{-1}Y_1,\ K_2 = P_2^{-1}Y_2,\ K_3 = Y_3. \tag{19}$$

证明　定义

$$\Xi = \begin{bmatrix} A_f^TP + P^TA_f + Q & P^TA_{f1} & P^TB_f - L^T \\ A_{f1}^TP & -Q & 0 \\ B_f^TP - L & 0 & -D_1 - D_1^T + 2\gamma I \end{bmatrix}, \tag{20}$$

进一步, 可知(12) 等价于

$$\Xi + \begin{bmatrix} P^TM_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} F[N_f\quad N_{f1}\quad 0] + [N_f\quad N_{f1}\quad 0]^TF^T\begin{bmatrix} P^TM_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}^T - \begin{bmatrix} 0 & 0 & \Delta L^T \\ 0 & 0 & 0 \\ \Delta L & 0 & 0 \end{bmatrix} < 0. \tag{21}$$

通过应用引理 2, 可知不等式(21) 成立等价于存在

正数 E使得

$$++E^{1}\begin{bmatrix}P^TM_f\\0\\0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}P^TM_f\\0\\0\end{bmatrix}^T+$$

$$E[N_f\quad N_{f1}\quad 0]^T[N_f\quad N_{f1}\quad 0]-$$

$$\begin{bmatrix}0&0&\$L^T\\0&0&0\\\$L&0&0\end{bmatrix}<0. \tag{22}$$

令

$$P=\mathrm{diag}(P_1\quad P_2),\ Y_1=P_2^TK_1,$$
$$Y_2=P_2^T,\ Y_3=K_3,$$

利用不等式(22) 及下式:

$$\begin{bmatrix}0_{(n+k)\times(n+k)}&0_{(n+k)\times(n+k)}&-\$L^T\\0_{(n+k)\times(n+k)}&0_{(n+k)\times(n+k)}&0_{(n+k)\times p}\\-\$L&0_{p\times(n+k)}&0_{p\times p}\end{bmatrix}=$$

$$\begin{bmatrix}\begin{bmatrix}0_{n\times(n+k)}\\0_{k\times(n+k)}\end{bmatrix}&0_{(n+k)\times(n+k)}&\begin{bmatrix}-\$H^T\\0_{k\times p}\end{bmatrix}\\0_{(n+k)\times(n+k)}&0_{(n+k)\times(n+k)}&0_{(n+k)\times p}\\[-\$H\quad 0_{p\times k}]&0_{p\times(n+k)}&0_{p\times p}\end{bmatrix}=$$

$$-\begin{bmatrix}0_{n\times n}&0_{n\times(n+2k)}&\$H^T\\0_{(n+2k)\times n}&0_{(n+2k)\times(n+2k)}&0_{(n+2k)\times p}\\\$H&0_{p\times(n+2k)}&0_{p\times p}\end{bmatrix}\leqslant$$

$$\begin{bmatrix}T^TT&0&0\\0&0&0\\0&0&SS^T\end{bmatrix}. \tag{23}$$

从 Schur 补定理可知, 由不等式(18) 成立可推出不等式(22) 成立. □

注 1 通过定理 2 可将鲁棒无源滤波器的设计问题转化为线性矩阵不等式的求解问题, 这个问题能够容易地通过 MATLAB 中的 LMI 工具箱求解.

注 2 线性矩阵不等式(17), (18) 给出了鲁棒无源滤波器的参数化形式. 这个参数化的结果能够用来设计具有附加性能的鲁棒无源滤波器. 具有最大耗散率的鲁棒无源滤波器可以转化为下面的线性矩阵不等式约束下的凸优化问题:

$$\max_{Q,P_1,P_2,Y_1,Y_2,Y_3,G} G$$
$$\mathrm{s.t.}\ \ \mathrm{LMIs}(17),(18).$$

4 数值例子

假定系统(1) 的系统参数取值如下:

$$E=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&0\\0&0&0\end{bmatrix},\ A=\begin{bmatrix}-3&0&0\\0&-3&0\\0&0&-4\end{bmatrix},$$

$$A_1=\begin{bmatrix}-1&0&1\\2&-1&1\\0&0&-1\end{bmatrix},\ B=\begin{bmatrix}1&2\\3&4\\5&1\end{bmatrix},$$

$$C=[1\quad 0\quad 0],\ C_1=[0\quad 1\quad 0],\ D=[1\quad 1],$$

$$H=\begin{bmatrix}1&0&0\\0&0&1\end{bmatrix},\ D_1=\begin{bmatrix}1&0\\0&2\end{bmatrix},$$

$$\$A(t)=$$
$$\begin{bmatrix}0.1&0&0\\0&0.2&0\\0&0&0.3\end{bmatrix}F(t)\begin{bmatrix}0.1&0&0\\0&0.1&0\\0&0&0.1\end{bmatrix},$$

$$\$A_1(t)=$$
$$\begin{bmatrix}0.1&0&0\\0&0.2&0\\0&0&0.3\end{bmatrix}F(t)\begin{bmatrix}0.1&0&0\\0&0.1&0\\0&0&0.1\end{bmatrix},$$

$$\$C(t)=[0.1\quad 0\quad 0]F(t)\begin{bmatrix}0.1&0&0\\0&0.1&0\\0&0&0.1\end{bmatrix},$$

$$\$C_1(t)=[0.1\quad 0\quad 0]F(t)\begin{bmatrix}0.1&0&0\\0&0.1&0\\0&0&0.1\end{bmatrix},$$

$$\$H(t)=\begin{bmatrix}0.2&0&0\\0&0.2&0\end{bmatrix}F(t)\begin{bmatrix}1&0&0\\0&1&0\\0&0&1\end{bmatrix}.$$

其中: $F^TF\leqslant I$, 给定的耗散率 $G=0.1$.

本文所设计的滤波器的阶数 $k=3$. 利用 MATLAB 中的 LMItoolbox 解 LMIs(17), (18), 可得

$$P_1=\begin{bmatrix}0.7817&-0.0545&0.1278\\-0.0737&0.5233&-0.0656\\-0.1540&-0.1123&0.4664\end{bmatrix},$$

$$P_2=\begin{bmatrix}2.3219&0&0\\0&2.3219&0\\0&0&2.3219\end{bmatrix},$$

$$Q=\begin{bmatrix}2.3906&-41.4227&-1.6977&-0.0311&0.0262&-0.0292\\41.1253&1.4949&-29.3478&-0.1109&0.0564&0.0387\\1.9302&28.8649&1.9746&-0.1521&0.0671&0.1039\\-0.0311&-0.1109&-0.1521&2.3320&0.3765&-0.6453\\0.0262&0.0564&0.0671&-0.3811&2.3249&-1.4645\\-0.0292&0.0387&0.1039&0.6428&1.4726&2.3270\end{bmatrix},$$

$$Y_1=\begin{bmatrix}-2.4264&3.0653&2.6581\\-3.2000&-2.4761&-4.2957\\-2.6150&3.9431&-2.6510\end{bmatrix},$$

$$Y_2=\begin{bmatrix}0.1870\\0.4201\\0.4180\end{bmatrix},\ E=2.3024.$$

$$Y_3=\begin{bmatrix}-0.1376 & -0.9888 & -1.3714\\ -0.9521 & -0.7965 & 0.0040\end{bmatrix},$$

由(19) 可得滤波器的参数为

$$K_1=\begin{bmatrix}-1.0450 & 1.3202 & 1.1448\\ -1.3782 & -1.0664 & -1.8501\\ -1.1262 & 1.6982 & -1.1417\end{bmatrix},$$

$$K_2=\begin{bmatrix}0.0805\\0.1809\\0.1800\end{bmatrix},$$

$$K_3=\begin{bmatrix}-0.1376 & -0.9888 & -1.3714\\ -0.9521 & -0.7965 & 0.0040\end{bmatrix}.$$

5　结　　语

本文基于线性矩阵不等式方法, 考虑了一类含有时滞的线性不确定广义系统鲁棒无源滤波器设计问题. 系统中的参数不确定性是时变且范数有界的. 给出了无记忆鲁棒无源滤波器的设计方法. 所设计的滤波器使得滤波增广系统对所有的容许不确定性是容许的, 且满足所要求的无源指标. 具有最大耗散率的鲁棒无源滤波器可以转化为线性矩阵不等式约束下的凸优化问题. 数值例子说明本文提出的方法是可行的.

参考文献(References)

[1] Rosenbrock H H. Structural Properties of Linear Dynamical Systems[J]. Int J of Control, 1974, 20(2): 191-202.

[2] 冯纯伯. 应用无源性研究时变非线性系统的稳定性[J]. 自动化学报, 1997, 23(6): 775-781.
(Feng C B. Stability Analysis for Time-varying Nonlinear Systems via Passivity Analysis[J]. Acta Automatica Sinica, 1997, 23(6): 775-781.)

[3] 俞立, 陈国定. 线性时滞系统的无源控制[J]. 控制理论与应用, 1999, 16(1): 130-133.
(Yu L, Chen G D. Passive Control of Linear Time-delay Systems[J]. Control Theory and Applications, 1999, 16(1): 130-133.)

[4] Mahmoudm S. Passive Control Synthesis for Uncertain Time-delay Systems[A]. Proc of the 37th IEEE Conf on Decision and Control[C]. Tampa, 1998: 4139-4143.

[5] 关新平, 龙承念, 段广仁. 离散时滞系统的鲁棒无源控制[J]. 自动化学报, 2002, 28(1): 146-149.
(Guan X P, Long C N, Duan G R. Robust Passive Control for Discrete Time-delay Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2002, 28(1): 146-149.)

[6] 董心壮, 张庆灵. 时变不确定广义系统的鲁棒无源控制[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(4): 517-520.
(Dong X Z, Zhang Q L. Robust Passive Control for Singular Systems with Time-varying Uncertainties[J]. Control Theory and Applications, 2004, 21(4): 517-520.)

[7] Fu Y M, Duan G R. Stochastic Stabilizability and Passive Control for Time-delay Systems with Markovian Jumping Parameters[A]. Proc of the 8th Int Conf on Control, Automation, Robotics and Vision[C]. Kunming, 2004: 1757-1761.

[8] Cai Y Z, Xu X M, He X, et al. Robust H_∞ filter Design for a Class of Linear Systems with Time Delay and Parameter Uncertainty[A]. Proc of American Control Conf[C]. Anchorage, Alaska, 2002: 2194-2195.

[9] Gao H J, Wang C H, Li Y H. Robust L_2-L_∞ Filter Design for Uncertain Discrete-time State-delayed Systems[J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(9): 666-672.

[10] 关新平, 罗小元, 刘奕昌, 等. 不确定时滞系统具 A-C 保性能性质的 H_∞ 控制器设计[J]. 控制与决策, 2001, 16(增): 677-680.
(Guan X P, Luo X Y, Liu Y C, et al. Design of H_∞ Controller with Property of A-C Guaranteed Cost for Uncertain Time-delay Systems[J]. Control and Decision, 2001, 16(S): 677-680.)

[11] Xu S Y, Dooren P V, Stefan R, et al. Robust Stability and Stabilization for Singular Systems with State Delay and Parameter Uncertainty[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 47(7): 1122-1128.

[12] Xie L. Output Feedbackcontrol of System with Parameter Uncertainty[J]. Int J Control, 1996, 63(4): 741-750.