文章编号: 1001-0920(2005)06-0629-05

不确定时滞广义系统的鲁棒非脆弱H∞控制

舒伟仁[1,2], 张庆灵[1]
(1. 东北大学 理学院, 辽宁 沈阳 110004; 2. 嘉兴学院 数学与信息科学学院, 浙江 嘉兴 314001)

摘 要: 研究状态反馈控制器增益具有摄动的一类不确定时滞广义系统的鲁棒非脆弱H_∞控制问题. 分别对控制器增益具有加法式摄动和乘法式摄动研究了控制器的设计问题, 并通过对系统广义二次能稳定且满足H_∞范数界的研究得到解决. 控制器的设计可通过求解一组线性矩阵不等式得到. 数值例子说明了所给方法的有效性.

关键词: 时滞广义系统; 非脆弱控制; 鲁棒H_∞控制; 线性矩阵不等式方法
中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Robust and non-fragile H∞ control for uncertain singular systems with time-delay in state

SHU Wei-ren[1,2], *ZHANG Qing-ling*[1]
(1. College of Science, Northeastern University, Shenyang 110004, China; 2. Institute of Mathematics and Information Science, Jiaxing College, Jiaxing 314001, China. Correspondent: SHU Wei-ren: E-mail: wrshu278@sohu.com)

Abstract: The design problem of robust and non-fragile H_∞ state feedback controller is discussed under controller gain perturbations for a class of uncertain singular systems with state delay. Two classes of perturbations are considered, namely, additive and multiplicative. This problem is solved via the notion of generalized quadratic stabilization with H_∞ norm bound. And the controllers can be obtained by solving a set of linear matrix inequalities (LMIs). An illustrative example shows the effectiveness of the proposed design method.

Key words: singular time-delay system; non-fragile control; robust H_∞ control; LMI approach

1 引 言

为适应现代科学技术的发展以及大型工程技术的需要, 人们提出了非传统数学模型描述的比正常系统更为广泛的广义系统. 由于时滞是客观世界和工程技术中普遍存在的问题, 近年来对于时滞广义系统的研究引起了众多学者的广泛关注, 并取得了丰硕的成果[1~4]. 最近, Keel 等[5]指出, 现有的鲁棒控制设计方法考虑的仅是系统参数的不确定性, 并没有考虑控制器增益的不确定性. 而由于硬件和软件等原因, 这种不确定性是经常出现的, 进而使得传统的鲁棒控制方法表现出高度的脆弱性, 造成闭环系统的性能下降或稳定性破坏. 因此, 关于正常系统的非脆弱控制问题也成为人们感兴趣的课题[5~8]. 但对于时滞广义系统的相关研究结果目前还没见到. 为此, 本文研究一类不确定时滞广义系统的鲁棒非脆弱H_∞控制问题. 该问题通过对系统进行广义二次能稳定且具有H_∞范数界的研究而得到解决. 利用线性矩阵不等式(LMI)方法给出了鲁棒非脆弱H_∞状态反馈控制器的设计.

2 问题描述与预备知识

考虑如下不确定时滞广义系统:

收稿日期: 2004-04-05; **修回日期**: 2004-07-20.
基金项目: 辽宁省普通高校学科带头人基金项目(124210).
作者简介: 舒伟仁(1962—), 男(满族), 辽宁抚顺人, 副教授, 博士生, 从事广义系统和时滞系统的研究; 张庆灵(1956—), 男, 辽宁营口人, 教授, 博士生导师, 从事广义系统、时滞系统和生物控制等研究.

$$\begin{cases} E\mathring{x}(t) = [A + \Delta A]x(t) + [A_d + \\ \quad \Delta A_d]x(t-\tau) + Bu(t) + B_1w(t), \\ z(t) = [C + \Delta C]x(t), \\ x(t) = H(t), t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x(t) \in R^n$ 是系统的状态, $u(t) \in R^m$ 是控制输入, $w(t) \in R^q$ 是干扰输入, $z(t) \in R^s$ 是控制输出; $\tau > 0$ 是常数, 表示滞后量; $H(t)$ 是相容的连续初始函数; $E \in R^{n\times n}$ 是常数矩阵, 且 $\mathrm{rank}\ E = r \leq n$; A, A_d, B, B_1 和 C 是具有适当维数的常数矩阵; ΔA, ΔA_d 和 ΔC 是系统的不确定性, 且满足如下范数有界条件:

$$\Delta A = D_1F_1G_1, \Delta A_d = D_2F_2G_2, \Delta C = D_3F_3G_3. \tag{2}$$

其中: D_i 和 $G_i(i = 1, 2, 3)$ 是具有适当维数的常数矩阵; $F_i(i = 1, 2, 3)$ 是满足 $F_i^TF_i \leq I$ 的未知参数矩阵, 这里的 I 是具有不同维数的单位矩阵.

系统(1) 的无控制无干扰标称系统为

$$\begin{cases} E\mathring{x}(t) = Ax(t) + A_dx(t-\tau), \\ x(t) = H(t), t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \tag{3}$$

系统(1) 的无控制标称系统为

$$\begin{cases} E\mathring{x}(t) = Ax(t) + A_dx(t-\tau) + B_1w(t), \\ z(t) = Cx(t), \\ x(t) = H(t), t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \tag{4}$$

定义 1[9] 1) 矩阵对(E, A) 是正则的, 如果存在标量 s, 使得 $\det(sE - A) \neq 0$; 2) 矩阵对(E, A) 是无脉冲的, 如果 $\deg(\det(sE - A)) = \mathrm{rank}E$.

引理 1[2] 如果(E, A) 正则、无脉冲, 则时滞广义系统(3) 在$[0, +\infty)$ 上存在唯一解且无脉冲.

定义 2[2] 1) 时滞广义系统(3) 是正则的且无脉冲, 如果(E, A) 正则且无脉冲; 2) 时滞广义系统(3) 是稳定的, 如果对任意 $\epsilon > 0$, 存在 $\delta(\epsilon) > 0$, 使得对于满足条件 $\sup\limits_{-\tau\leq t\leq 0}\|H(t)\| \leq \delta(\epsilon)$ 的任意相容初始条件 $H(t)$, 系统(3) 的解 $x(t)$ 满足 $\|x(t)\| \leq \epsilon$ 且 $t \geq 0$, 进一步 $x(t) \to 0(t \to +\infty)$.

引理 2[2] 时滞广义系统(3) 是正则的、稳定的且无脉冲, 如果存在矩阵 P_1 和对称正定矩阵 Q_1, 使得

$$EP_1^T = P_1E^T \geq 0, \tag{5}$$

$$AP_1^T + P_1A^T + A_dP_1^TQ_1^{-1}P_1A_d^T + Q_1 < 0. \tag{6}$$

假定系统的状态可测. 对于系统 (1), 设计如下形式的状态反馈控制器:

$$u(t) = (K + \Delta K)x(t), \tag{7}$$

其中: K 表示控制器增益, ΔK 表示增益的摄动. 本文将考虑以下两种形式的摄动:

1) 加法式摄动

$$\Delta K = D_4F_4G_4, F_4^TF_4 \leq I; \tag{8}$$

2) 乘法式摄动

$$\Delta K = D_5F_5G_5K, F_5^TF_5 \leq I. \tag{9}$$

其中: D_4, D_5, G_4 和 G_5 是具有适当维数的常数矩阵; F_4 和 F_5 是未知的扰动矩阵.

系统(1) 与形如式(7) 的控制器, 构成如下闭环系统:

$$\begin{cases} E\mathring{x}(t) = [A_K + \Delta A_K]x(t) + \\ \quad [A_d + \Delta A_d]x(t-\tau) + B_1w(t), \\ z(t) = [C + \Delta C]x(t), \\ x(t) = H(t), t \in [-\tau, 0]. \end{cases} \tag{10}$$

其中

$$A_K = A + BK, \Delta A_K = D_1F_1G_1 + B(\Delta K).$$

在描述本文目的时需要以下的定义:

定义 3 闭环系统(10) 是鲁棒稳定的, 且具有 H_∞ 范数界 γ, 如果对任意的 $F_i(i = 1, \cdots, 5)$, 系统是正则的、无脉冲且稳定的, 同时满足 $\|T_{zw}(s)\|_\infty \leq \gamma$. 其中: $\gamma > 0$ 是预先给定的常数, $T_{zw}(s)$ 是从干扰输入 $w(t)$ 到控制输出 $z(t)$ 的传递函数.

定义 4 系统(1) 能由形如式(7) 的状态反馈鲁棒能稳定的且具有 H_∞ 范数界 γ, 如果闭环系统(10) 是鲁棒稳定的, 且具有 H_∞ 范数界 γ.

本文的目的是: 设计系统(1) 的形如式(7) 的状态反馈控制器, 使得闭环系统(10) 是鲁棒稳定的, 且具有 H_∞ 范数界 γ. 其中 $\gamma > 0$ 是预先给定的常数.

3 主要结果

首先给出引理 2 的等价结果, 即:

定理 1 时滞广义系统(3) 是正则的、无脉冲且稳定的, 如果存在可逆矩阵 P 和对称矩阵 $Q > 0$, 使得以下矩阵不等式同时成立:

$$E^TP = P^TE \geq 0, \tag{11}$$

$$A^TP + P^TA + P^TA_dQ^{-1}A_d^TP + Q < 0. \tag{12}$$

证明 首先引进记号, 设 M 是可逆方阵, 本文用 M^{-T} 表示 $(M^{-1})^T$. 由式(6) 知, 矩阵 P_1 可逆. 式(5) 和式(6) 分别左乘 P_1^{-1}, 右乘 P_1^{-T}. 令 $P = P_1^{-T}$, $Q = P_1^{-1}Q_1P_1^{-T}$, 则式(5) 和式(6) 分别与式(11) 和式(12) 等价. □

现在给出系统(4) 正则、无脉冲且稳定, 同时具有 H_∞ 范数界的结果.

定理 2 给定实数 $\gamma > 0$. 如果存在可逆矩阵 P 和对称矩阵 $Q > 0$, 使得

$$E^TP = P^TE \geq 0, \tag{13}$$

$$A^TP + P^TA + Q + P^TA_dQ^{-1}A_d^TP +$$

$$C^TC + \frac{1}{\gamma^2}P^TB_1B_1^TP < 0, \tag{14}$$

则时滞广义系统(4) 是正则的、无脉冲且稳定的, 同时满足 $\|T_{zw}(s)\|_\infty \le \gamma$.

证明　不等式(14) 蕴含不等式(12) 成立, 由定理 1 知, 系统(4) 是正则的、无脉冲且稳定的. 关于 $\|T_{zw}(s)\|_\infty$ 的证明与文献[4] 中定理 2 证明方法类似, 故省略. □

根据定理 2, 给出以下定义:

定义 5　闭环系统(10) 是广义二次稳定的且具有 H_∞ 范数界 γ(简记为 GQS-H_∞-γ), 如果存在可逆矩阵 P 和对称矩阵 $Q > 0$, 使得对所有的 $F_i (i = 1, \cdots, 5)$, 下列矩阵不等式成立:

$$E^TP = P^TE \ge 0, \tag{15}$$

$$\begin{aligned}&(A_K + \Delta A_K)^TP + P^T(A_K + \Delta A_K) + Q + \\ &P^T(A_d + \Delta A_d)Q^{-1}(A_d + \Delta A_d)^TP + \\ &(C + \Delta C)^T(C + \Delta C) + \frac{1}{\gamma^2}P^TB_1B_1^TP < 0.\end{aligned} \tag{16}$$

这里 $\gamma > 0$ 是给定的实数.

定义 6　系统(1) 为可由形如式(7) 的状态反馈广义二次能稳定的且具有 H_∞ 范数界 γ, 如果闭环系统(10) 是 GQS-H_∞-γ.

容易证明, 如果系统(1) 是广义二次能稳定的且具有 H_∞ 范数界 γ, 则它一定是鲁棒能稳定的且具有 H_∞ 范数界 γ.

引理 3[10]　设 Ω, Γ 和 Φ 是具有适当维数的矩阵, 且 Ω 对称, 则不等式 $\Omega + \Gamma F\Phi + (\Gamma F\Phi)^T < 0$ 对所有满足 $F^TF \le I$ 的 F 成立的充分必要条件是存在标量 $\lambda > 0$, 使得 $\Omega + \lambda\Gamma\Gamma^T + \frac{1}{\lambda}\Phi^T\Phi < 0$.

现在给出系统(1) 广义二次能稳定且具有 H_∞ 范数界 γ 的结果.

定理 3　对给定的 $\gamma > 0$, 当控制器增益的摄动 ΔK 为式(8) 时, 系统(1) 可由形如式(7) 的状态反馈广义二次能稳定且具有 H_∞ 范数界 γ, 当且仅当存在标量 $\lambda > 0$, 可逆矩阵 X, 对称矩阵 $Y > 0$ 和矩阵 Z, 使得

$$EX^T = XE^T \ge 0, \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} L & A_dX^T & XC^T & XG_1^T & XG_4^T & XG_3^T & 0 \\ XA_d^T & -Y & 0 & 0 & 0 & 0 & XG_2^T \\ CX^T & 0 & -I_1 + \lambda D_3D_3^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_1X^T & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 & 0 & 0 \\ G_4X^T & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 & 0 \\ G_3X^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 \\ 0 & G_2X^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 \end{bmatrix} < 0, \tag{18}$$

并且, 当不等式组有解时, 一个所求的状态反馈控制器为

$$\begin{aligned}&u(t) = (K + \Delta K)x(t), K = ZX^{-T}, \\ &\Delta K = D_4F_4G_4, F_4^TF_4 \le I.\end{aligned} \tag{19}$$

其中

$$\begin{aligned}L = {} & AX^T + BZ + (AX^T + BZ)^T + Y + \\ & \frac{1}{\gamma^2}B_1B_1^T + \lambda(D_1D_1^T + D_2D_2^T + BD_4D_4^TB^T),\end{aligned}$$

I_1 是具有不同维数的单位矩阵.

证明　利用 Schur 补, 式(16) 等价于

$$\begin{bmatrix} (A_K + \Delta A_K)^TP + P^T(A_K + \Delta A_K) + Q + \frac{1}{\gamma^2}P^TB_1B_1^TP & P^T(A_d + \Delta A_d) & (C + \Delta C)^T \\ (A_d + \Delta A_d)^TP & -Q & 0 \\ C + \Delta C & 0 & -I_1 \end{bmatrix} < 0. \tag{20}$$

式(20) 等价于

$$\begin{aligned}&\begin{bmatrix} A_K^TP + P^TA_K + Q + \frac{1}{\gamma^2}P^TB_1B_1^TP & P^TA_d & C^T \\ A_d^TP & -Q & 0 \\ C & 0 & -I_1 \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} P^TD_1 & P^TBD_4 & 0 & P^TD_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \end{bmatrix} \times \\ &\begin{bmatrix} F_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ G_4 & 0 & 0 \\ G_3 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \end{bmatrix} + \\ &\begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ G_4 & 0 & 0 \\ G_3 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} F_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & F_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & F_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & F_2 \end{bmatrix}^T \times \\ &\begin{bmatrix} P^TD_1 & P^TBD_4 & 0 & P^TD_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \end{bmatrix}^T < 0.\end{aligned} \tag{21}$$

由引理 3, 式(21) 成立当且仅当存在标量 $\lambda > 0$, 使

得

$$
\begin{bmatrix} A_K^T P + P^T A_K + Q + \frac{1}{\gamma^2}P^T B_1 B_1^T P & P^T A_d & C^T \\ A_d^T P & -Q & 0 \\ C & 0 & -I_1 \end{bmatrix} +
$$

$$
\lambda\begin{bmatrix} P^T D_1 & P^T B D_4 & 0 & P^T D_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \end{bmatrix} \times
$$

$$
\begin{bmatrix} P^T D_1 & P^T B D_4 & 0 & P^T D_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_3 & 0 \end{bmatrix} +
$$

$$
\frac{1}{\lambda}\begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ G_4 & 0 & 0 \\ G_3 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} G_1 & 0 & 0 \\ G_4 & 0 & 0 \\ G_3 & 0 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 \end{bmatrix} < 0. \tag{22}
$$

经简单计算, 再次利用 Schur 补, 式(22) 等价于

$$
\begin{bmatrix} L_1 & P^T A_d & C^T & G_1^T & G_4^T & G_3^T & 0 \\ A_d^T P & -Q & 0 & 0 & 0 & 0 & G_2^T \\ C & 0 & -I_1 + \lambda D_3 D_3^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_1 & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 & 0 & 0 \\ G_4 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 & 0 \\ G_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 \\ 0 & G_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 \end{bmatrix} < 0, \tag{23}
$$

其中

$$
L_1 = A_K^T P + P^T A_K + Q + \frac{1}{\gamma^2}P^T B_1 B_1^T P + \lambda P^T(D_1 D_1^T + D_2 D_2^T + B D_4 D_4^T B^T)P.
$$

分别用 P^{-T} 和 P^{-1} 乘以式(15) 的左端和右端, 用 $\mathrm{diag}(P^{-T}, P^{-T}, I_1, I_1, I_1, I_1, I_1)$ 和 $\mathrm{diag}(P^{-1}, P^{-1}, I_1, I_1, I_1, I_1, I_1)$ 乘以式(23) 的左端和右端, 并令 $P^{-1} = X^T$, $P^{-T}QP^{-1} = Y$, $KP^{-1} = Z$, 则式(15) 与式(17) 等价, 式(23) 与式(18) 等价. 因为 X 可逆, 所以 $K = ZX^{-T}$, 即控制器由式(19) 给出. □

定理 4 对给定的 $\gamma > 0$, 当控制器增益的摄动 ΔK 为式(9) 形式时, 系统(1) 可由形如式(7) 的状态反馈广义二次能稳定且具有 H_∞ 范数界 γ, 当且仅当存在标量 $\lambda > 0$, 可逆矩阵 X, 对称矩阵 $Y > 0$ 和矩阵 Z, 使得式(17) 和下式成立:

$$
\begin{bmatrix} L & A_d X^T & XC^T & XG_1^T & Z^T G_5^T & XG_3^T & 0 \\ XA_d^T & -Y & 0 & 0 & 0 & 0 & XG_2^T \\ CX^T & 0 & -I_1 + \lambda D_3 D_3^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ G_1 X^T & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 & 0 & 0 \\ G_5 Z & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 & 0 \\ G_3 X^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 & 0 \\ 0 & G_2 X^T & 0 & 0 & 0 & 0 & -\lambda I_1 \end{bmatrix} < 0. \tag{24}
$$

并且, 当不等式组有解时, 一个所求的状态反馈控制器为

$$
u(t) = (K + \Delta K)x(t), K = ZX^{-T},
$$
$$
\Delta K = D_5 F_5 G_5 K, F_5^T F_5 \leq I. \tag{25}
$$

其中

$$
L = AX^T + BZ + (AX^T + BZ)^T + Y + \frac{1}{\gamma^2}B_1 B_1^T + \lambda(D_1 D_1^T + D_2 D_2^T + BD_5 D_5^T B^T),
$$

I_1 是具有不同阶数的单位矩阵.

证明过程与定理 3 的证明类似, 在此不再赘述.

4 算 例

考虑系统(1), 其中

$$
E = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, A_d = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.6 \\ 0.6 & 0.6 \end{bmatrix},
$$

$$
B = \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.7 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0.8 \\ 0.8 \end{bmatrix}, C = [0.9 \quad 0.5],
$$

$$
D_1 = D_2 = G_1 = G_2 = \begin{bmatrix} \sqrt{0.2} & \sqrt{0.2} \\ \sqrt{0.2} & \sqrt{0.2} \end{bmatrix},
$$

$$
D_3 = [\sqrt{0.1} \quad \sqrt{0.1}], G_3 = \begin{bmatrix} \sqrt{0.1} & \sqrt{0.1} \\ \sqrt{0.1} & \sqrt{0.1} \end{bmatrix}.
$$

取 $\gamma = \sqrt{0.7}$.

1) 当控制器增益具有加法式摄动时, 其中

$$
D_4 = [\sqrt{0.5} \quad \sqrt{0.5}], G_4 = \begin{bmatrix} \sqrt{0.5} & \sqrt{0.5} \\ \sqrt{0.5} & \sqrt{0.5} \end{bmatrix}.
$$

用 Matlab 软件的 LMI 工具箱求得控制器为

$$
u(t) = [K + \Delta K]x(t),
$$

其中

$$
K = [-13.2099 \quad -7.7914],
$$
$$
\Delta K = D_4 F_4 G_4, F_4^T F_4 \leq I.
$$

2) 当控制器增益具有乘法式摄动时, 其中 D_5

$= G_5 = \sqrt{0.2}$. 用Matlab软件的LMI工具箱求得控制器为

$$u(t) = [K + \Delta K]x(t),$$

其中

$$K = [-18.8360 \quad -9.2584],$$

$$\Delta K = D_5F_5G_5K, \; F_5^TF_5 \leq I.$$

5　结　　语

本文研究了一类不确定时滞广义系统的鲁棒非脆弱H_∞控制问题. 该问题通过对系统进行广义二次能稳定且具有H_∞范数界γ的研究而得到解决. 利用LMI方法, 分别对控制器增益具有加法式摄动和乘法式摄动两种情形, 设计了满足要求的鲁棒非脆弱H_∞状态反馈控制器. 因采用的是LMI方法, 参数无需预取便可利用LMI工具箱获得解, 故具有设计简单的优点.

参考文献(References)

[1] 刘永清, 谢湘生. *大型动力系统的理论与应用——卷8: 滞后广义系统的稳定镇定与控制*[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998.
(Liu Y Q, Xie X S. *Theory and application of large-scale dynamic systems (8): Stability stabilization and control for singular large-scale systems with delay*[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1998.)

[2] 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.

[3] Zhou S S, Li H L, Feng C B. H_∞ suboptimal control for a class of singular systems with time-delay: An LMI approach[J]. *Control Theory and Applications*, 2002, 19(3): 324-328.

[4] 冯俊娥, 程兆林. 线性广义时滞系统的H_∞状态反馈控制器[J]. *控制与决策*, 2003, 18(2): 159-163.
(Feng J E, Cheng Z L. H_∞ state feedback control for linear singular systems with time-delay in state [J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 159-163.)

[5] Keel L H, Bhattacharyya S P. Robust, fragile, or optimal? [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1997, 42(8): 1098-1105.

[6] Yang G H, Wang J L, Lin C. H_∞ control for linear systems with additive controller gain variation[J]. *Int J Control*, 2000, 73(16): 1500-1506.

[7] Fanularo D, Dorato P, Abdallah C T, et al. Robust non-fragile LQ controllers: The static state feedback case[J]. *Int J Control*, 2000, 73(2): 159-165.

[8] 王武, 杨富文. 不确定时滞系统的时滞依赖鲁棒非脆弱H_∞控制[J]. *控制理论与应用*, 2003, 20(3): 473-476.
(Wang W, Yang F W. Delay-dependent robust and non-fragile H_∞ control for linear time-delay systems with uncertainties[J]. *Control Theory and Applications*, 2003, 20(3): 473-476.)

[9] Dai L. *Singular control systems*[M]. Berlin: Springer-Vertag, 1989.

[10] Khargonekar P P, Petersen I R, Zhou K. Robust stabilization of uncertain systems and H_∞ optimal control[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(3): 351-361.

(上接第628页)

[7] Olfa Boubaker, Jean-Pierre Babary. On SISO and MIMO variable structure control of nonlinear distributed parameter systems: Application to fixed bed reactors[J]. *J of Process Control*, 2003, 13(8): 729-737.

[8] 胡跃明, 周其节. *分布参数变结构控制系统*[M]. 北京: 国防工业出版社, 1996.

[9] 刘永清, 谢胜利. *滞后分布参数系统的稳定性与变结构控制*[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 1998.

[10] 谢胜利, 谢振东, 刘永清, 等. 滞后抛物型控制系统的变结构控制[J]. *控制与决策*, 1997, 12(3): 247-251.
(Xie S L, Xie Z D, Liu Y Q, et al. Variable structure control of parabolic type control system with delay[J]. *Control and Decision*, 1997, 12(3): 247-251.)

[11] 谢振东, 谢胜利, 刘永清. 滞后关联分布参数系统的分散变结构控制[J]. *自动化学报*, 1999, 25(6): 805-810.
(Xie Z D, Xie S L, Liu Y Q. Design of decentralized variable structure controller of large-scale distributed parameter system with delay [J]. *Acta Automatica Sinica*, 1999, 25(6): 805-810.)

[12] 崔宝同, 邓飞其, 王伟, 等. 时滞分布参数系统的指数渐近稳定性[J]. *系统工程与电子技术*, 2003, 25(5): 579-583.
(Cui B T, Deng F Q, Wang W, et al. Exponential asymptotical stability for distributed parameter systems with time delays[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2003, 25(5): 579-583.)

[13] Boyd S, Ghaoui L EI, Feron E, et al. *Linear matrix inequalities in system and control theory* [M]. Philadephia: SIAM, 1994.

[14] Sanchez E N, Perez J P. Input-to-state stability analysis for dynamic NN [J]. *IEEE Trans on Circuits System - I*, 1999, 46(11): 1395-1398.

[15] 廖晓昕. *动力系统的稳定性理论和应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.