第 24 卷 第 3 期 控 制 与 决 策 2009 年 3 月
Vol. 24 No. 3 Control and Decision Mar. 2009

文章编号: 1001-0920(2009)03-0356-05

具有非线性扰动的广义系统的鲁棒 H_∞ 控制

沃松林[1], 史国栋[1], 邹 云[2]
(1. 江苏技术师范学院 电气信息工程学院, 江苏 常州 213001; 2. 南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘 要: 研究具有非线性结构扰动广义系统的鲁棒 H_∞ 控制和鲁棒 H_∞ 保性能控制问题,该不确定性为时间和状态的函数,且满足 Lipschitz 条件. 目的是分别设计系统的鲁棒 H_∞ 控制器和鲁棒 H_∞ 保性能控制器. 应用线性矩阵不等式方法,分别给出了系统的鲁棒 H_∞ 控制器和鲁棒 H_∞ 保性能控制器存在的充分条件. 当这些条件可解时,分别给出了鲁棒 H_∞ 控制器和鲁棒 H_∞ 保性能控制器的表达式. 最后通过一个仿真算例说明了所给出方法的应用.

关键词: 扰动系统; 非线性广义系统; 鲁棒 H_∞ 控制; 保性能控制; LMI 方法
中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Robust H-infinity control for singular systems with nonlinear perturbation

WO Song-lin[1], *SHI Guo-dong*[1], *ZOU Yun*[2]
(1. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu Teachers University of Technology, Changzhou 213001, China; 2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China. Correspondent: WO Song-lin, E-mail: wosonglin2000@yahoo.com.cn)

Abstract: This paper discusses robust *H*-infinity control problems for singular systems with nonlinear structured perturbation. The uncertainty is a function of time and system state, and satisfies Lipschitz constraint. The aims are to design a robust *H*-infinity controller and a robust *H*-infinity guaranteed cost controller, respectively. By means of the linear matrix inequality approach (LMI), sufficient conditions for existence of robust *H*-infinity controller and robust *H*-infinity guaranteed cost controller are presented, respectively. When these LMIs are feasible, explicit expressions of robust *H*-infinity controller and robust *H*-infinity guaranteed cost controller are obtained, respectively. Finally, a numerical example is provided to demonstrate the application of the proposed method.

Key words: Perturbation systems; Nonlinear singular systems; Robust *H*-infinity controller; Guaranteed cost control; LMI approach

1 引 言

广义系统在控制、电路、机械、经济等领域具有广泛的应用,它能更好地描述实际系统,因而备受关注[1-5]. 对其研究的主要课题之一是广义系统的鲁棒稳定和镇定问题,它不仅要考虑其渐近稳定性,而且要考虑其正则性和脉冲模. 与正则系统相比,广义系统的鲁棒稳定和镇定的研究要困难得多. 文献[1,6-8]研究了不确定时不变且模有界的广义系统的鲁棒稳定和镇定问题;[9,10]研究了不确定为模有界的广义系统的保性能控制问题. 对于不确定时变的非线性结构扰动的广义系统,目前研究得还不多. [11]研究了不确定时变非线性结构扰动的连续广义系统的广义二次稳定问题;[12]研究了不确定非线性广义系统的鲁棒控制和保性能控制. 对于不确定非线性结构扰动的连续广义系统的鲁棒 H_∞ 控制和鲁棒 H_∞ 保性能控制问题,至今还没有相关报道.

本文研究不确定非线性结构扰动的广义系统的鲁棒 H_∞ 控制和鲁棒 H_∞ 保性能控制问题. 该不确定性为时间和状态的函数,且满足 Lipschitz 条件. 首先给出不确定时变非线性结构扰动的广义系统的鲁棒 H_∞ 控制和鲁棒 H_∞ 保性能控制的定义;然后应用线性矩阵不等式方法,分别设计系统的鲁棒 H_∞ 控制器和鲁棒 H_∞ 保性能控制器,使得闭环系统是广义二次稳定的,且具有干扰衰减度 γ,保性能控

收稿日期: 2008-01-27; **修回日期**: 2008-04-11.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60474078).
作者简介: 沃松林(1964—),男,江苏丹阳人,教授,博士,从事广义系统理论的研究; 邹云(1962—),男,江苏宜兴人,教授,博士生导师,从事奇异系统理论、电力系统自动化等研究.

制还需满足所给指标有一上界;再后分别给出了控制器的参数表示式;最后通过一个算例验证所给出方法的有效性.

本文所用的部分记号如下:

H^T:矩阵 H 的转置矩阵;

I:适当维数的单位矩阵;

$\Phi\in R^{n\times(n-r)}$:满足 $E\Phi=0$ 和 $\operatorname{rank}\Phi=n-r$ 的矩阵(其中 $E\in R^{n\times n}$, $\operatorname{rank}E=r$);

$\|y(t)\|_2 := \left(\int_0^{+\infty} y^T(t)y(t)\,dt\right)^{1/2}$;

$\begin{bmatrix} X & Z\\ * & Y\end{bmatrix}$: 对称矩阵 $\begin{bmatrix} X & Z\\ Z^T & Y\end{bmatrix}$.

如无特别说明,所有矩阵都是具有适当维数的矩阵.

2　问题描述和准备工作

考虑如下不确定非线性结构扰动的连续广义系统:

$$\begin{cases} E\dot{x}(t)=Ax(t)+B_1\omega(t)+\\ \qquad f(t,x(t))+B_2u(t),\\ z(t)=Cx(t)+D\omega(t),\ x(0)=x_0. \end{cases}\tag{1}$$

其中:$x(t)$,$\omega(t)$,$u(t)$ 和 $z(t)$ 分别为系统的状态、扰动输入、控制输入和被控输出向量;矩阵 E,A,B_1,B_2,C 和 D 均为维数兼容的常数矩阵;$\operatorname{rank}(E)=r<n$;$x(0)=x_0$ 为匹配初值条件;$\|\omega(t)\|_2\le\rho$;$f=f(t,x(t))\in R^n$ 为 n 维向量函数,它是系统的非线性时变扰动. 关于向量函数 $f(t,x)$,假定[11]

$$f(t,0)=0,\ \forall t\ge 0,\tag{2}$$

满足 Lipschitz 条件

$$\|f(t,x)-f(t,\tilde{x})\|\le\alpha\|F(x-\tilde{x})\|,\quad \forall x,\tilde{x}\in R^n.\tag{3}$$

其中:α 为正常数,F 为给定的具有适当维数的常数矩阵,范数 $\|\cdot\|$ 表示 R^n 维空间中的距离范数. 本文称满足式(2)和(3)的不确定性 f 为容许扰动(Lipschitz 扰动).

由式(3)有 $\|f(t,x)\|\le\alpha\|Fx\|$.

注 1　条件(2)为系统(1)零解渐近稳定的必要条件,条件(3)意味着向量函数 f 是 Lipschitz 连续函数.

定义 1[11]　系统 $E\dot{x}(t)=Ax(t)+f(t,x(t))$ 称为广义二次稳定的,如果存在矩阵 P,满足

$$E^TP=P^TE\ge 0,\tag{4}$$

且对于满足式(2)和(3)的所有 f,有

$$\Delta=(Ax+f)^TPx+x^TP^T(Ax+f)<0,\quad x\ne 0,\ \forall x\in R^n.\tag{5}$$

注 2　若结构扰动 f 是线性不确定的,如 $f(t,x)=MF(\sigma)Nx(t)$,$F(\sigma)$ 为时不变满足 $F^T(\sigma)F(\sigma)\le I$,则式(5)为

$$[A+MF(\sigma)N]^TP+P^T[A+MF(\sigma)N]<0.$$

定义 1 可看成广义系统的广义二次稳定概念[8]在非线性广义系统中的推广.

引理 1[11]　如果系统 $E\dot{x}(t)=Ax(t)+f(t,x(t))$ 是广义二次稳定的,则:

1) 对于任意匹配的初值条件 $x(0)=x_0$,该系统在 $[0,\infty)$ 存在唯一解;

2) 对于所有容许的扰动 f 和任意匹配的初值条件 $x(0)=x_0$,该系统的解 $x(t)$ 是指数稳定的.

引理 2[11,12]　对于所有容许的扰动 f,以下表述是等价的:

1) 系统 $E\dot{x}(t)=Ax(t)+f(t,x(t))$ 是广义二次稳定的;

2) 存在矩阵 P,满足式(4)和(5);

3) 存在矩阵 P,满足式(4)和

$$\begin{bmatrix} A^TP+P^TA+\alpha^2F^TF & P^T\\ P & -I\end{bmatrix}<0;\tag{6}$$

4) 存在正定矩阵 $X>0$,矩阵 Y 和正数 ε,使得

$$(EX+Y\Phi^T)A^T+A(EX+Y\Phi^T)^T+\varepsilon I+\frac{\alpha^2}{\varepsilon}(EX+Y\Phi^T)F^TF(EX+Y\Phi^T)^T<0;\tag{7}$$

5) 存在正定矩阵 $X>0$,矩阵 Y 和正数 ε,使得

$$A^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}+(EX+Y\Phi^T)^{-1}A+\frac{\alpha^2}{\varepsilon}F^TF+\varepsilon(EX+Y\Phi^T)^{-1}(EX+Y\Phi^T)^{-T}<0.\tag{8}$$

注 3　引理 2 的证明只需在文献[12]引理 3 的证明中将 P 用 $\varepsilon^{-1}P$ 代替即可.

取系统(1)的状态反馈控制器

$$u(t)=Kx(t),\tag{9}$$

其中 K 为具有适当维数的常数矩阵,则系统(1)和控制器(9)构成的闭环系统为

$$\begin{cases} E\dot{x}(t)=(A+B_2K)x(t)+\\ \qquad B_1\omega(t)+f(t,x(t)),\\ z(t)=(C+DK)x(t). \end{cases}\tag{10}$$

选取系统(1)的性能指标

$$J=\int_0^{+\infty}[x^T(t)Qx(t)+u^T(t)Ru(t)]dt,\quad Q>0,\ R>0.\tag{11}$$

本文的目的是分别设计系统(1)的鲁棒 H_∞ 控制器和鲁棒 H_∞ 保性能控制器. 为此,给出系统(1)的鲁棒 H_∞ 控制器和鲁棒 H_∞ 保性能控制器的定义如下:

定义 2　对于具有非线性扰动广义系统(1)和正数 $\gamma>0$,如果存在状态反馈控制器(9),使得对于所有容许的 f,相应的闭环系统(10)为:

1) 是广义二次稳定的(当 $\omega(t)=0$ 时);

2) 在零初始条件($x(0)=0$)下, $\|z(t)\|_2<\gamma\|\omega(t)\|_2$.

则称具有非线性扰动广义系统(1)是可鲁棒 H_∞ 控制的,称控制器(9)为系统(1)的一个鲁棒 H_∞ 控制器.

定义 3 对于具有非线性扰动广义系统(1)和正数 $\gamma>0$,如果存在状态控制器(9)和一个正数 J^*,使得对于所有容许的 f,满足:

1) 控制器(9)是系统(1)的可鲁棒 H_∞ 控制器;

2) 性能指标 J 满足 $J\leq J^*$.

则称具有非线性扰动广义系统(1)是可鲁棒 H_∞ 保性能的, J^* 为系统(1)的一个可保性能;称控制器(9)为系统(1)的一个鲁棒 H_∞ 保性能控制器.

3 鲁棒 H_∞ 控制器的设计

定理 1 对于给定的正数 $\gamma>0$ 和所有容许的扰动 f,如果存在对称正定矩阵 $X>0$,矩阵 Y 和 Z,以及正数 $\varepsilon>0$,使得

$$\begin{bmatrix} \tilde{A} & \alpha(EX+Y\Phi^T)F^T & (EX+Y\Phi^T)C^T+ZD^T \\ * & -\varepsilon I & 0 \\ * & * & -\gamma^2 I \end{bmatrix}<0, \tag{12}$$

其中

$$\tilde{A}=(EX+Y\Phi^T)A^T+A(EX+Y\Phi^T)^T+ZB_2^T+B_2Z^T+\varepsilon I+B_1B_1^T.$$

则非线性扰动广义系统(1)是可鲁棒 H_∞ 控制的,其鲁棒 H_∞ 控制器为

$$u(t)=Kx(t),\quad K=Z^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}.$$

证明 在定理 1 的条件下,可知 $(EX+Y\Phi^T)$ 可逆.注意到式(12),有

$$\begin{bmatrix} \tilde{A} & \alpha(EX+Y\Phi^T)F^T \\ \alpha F(EX+Y\Phi^T)^T & -\varepsilon I \end{bmatrix}<0, \tag{13}$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma+\frac{1}{\gamma^2}(C+DK)^T(C+DK) & (EX+Y\Phi^T)^{-1}B_1 \\ B_1^T(EX+Y\Phi^T)^{-T} & -I \end{bmatrix}<0. \tag{14}$$

其中

$$\Sigma=[A+B_2K]^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}+(EX+Y\Phi^T)^{-1}[A+B_2K]+\frac{\alpha^2}{\varepsilon}F^TF+\varepsilon(EX+Y\Phi^T)^{-1}(EX+Y\Phi^T)^{-T}. \tag{15}$$

1) 当 $\omega(t)=0$ 时,考虑闭环系统(10).因为

$$E(EX+Y\Phi^T)^T=(EX+Y\Phi^T)E^T=EXE^T\geq 0,$$

所以

$$(EX+Y\Phi^T)^{-1}E=E^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}\geq 0. \tag{16}$$

而

$$\begin{aligned}&[(A+B_2K)x(t)+f]^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}x(t)+x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}[(A+B_2K)x(t)+f]=\\&x^T(t)\{[A+B_2K]^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}+(EX+Y\Phi^T)^{-1}[A+B_2K]\}x(t)+f^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}x(t)+x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}f\leq\\&x^T(t)\{[A+B_2K]^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}+(EX+Y\Phi^T)^{-1}[A+B_2K]+\frac{\alpha^2}{\varepsilon}F^TF+\varepsilon(EX+Y\Phi^T)^{-1}(EX+Y\Phi^T)^{-T}\}x(t),\end{aligned}$$

由上式和式(15)及定义 1 知,闭环系统(10)是广义二次稳定的(当 $\omega(t)=0$ 时).

2) 当 $x(0)=0$ 时,取函数

$$V(x(t))=x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}Ex(t)\geq 0.$$

注意到 $V(0)=0$,沿闭环系统(10)有

$$\begin{aligned}&dV(x(t))/dt|_{(10)}=\\&[(A+B_2K)x(t)+B_1\omega(t)+f]^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}x(t)+x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}\times[(A+B_2K)x(t)+B_1\omega(t)+f]\leq\\&x^T(t)\{[A+B_2K]^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}+(EX+Y\Phi^T)^{-1}[A+B_2K]\}x(t)+x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}B_1\omega(t)+\omega^T(t)B_1^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}x(t)+\\&f^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}x(t)+x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}f\leq\\&x^T(t)\Big\{[A+B_2K]^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}+(EX+Y\Phi^T)^{-1}[A+B_2K]+\frac{\alpha^2}{\varepsilon}F^TF+\varepsilon(EX+Y\Phi^T)^{-1}(EX+Y\Phi^T)^{-T}\Big\}x(t)+x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}B_1\omega(t)+\omega^T(t)B_1^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}x(t)=\\&[x^T(t)\quad \omega^T(t)]\begin{bmatrix}\Sigma & (EX+Y\Phi^T)^{-1}B_1\\ * & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}x(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix}.\end{aligned}$$

因为

$$\begin{aligned}&\int_0^T\Big[\frac{1}{\gamma^2}z^T(t)z(t)-\omega^T(t)\omega(t)\Big]dt=\\&\int_0^T\Big[\frac{1}{\gamma^2}x^T(t)(C+DK)^T(C+DK)x(t)-\omega^T(t)\omega(t)\Big]dt=\\&\int_0^T\Big[\frac{1}{\gamma^2}x^T(t)(C+DK)^T(C+DK)x(t)-\omega^T(t)\omega(t)\Big]dt+\int_0^T\Big[\frac{dV(x(t))}{dt}\Big]dt-V(T)+V(0)\leq\end{aligned}$$

$$\int_0^T [x^T(t)\quad \omega^T(t)]\Xi\begin{bmatrix} x(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix}dt < 0,$$

其中

$$\Xi = \begin{bmatrix} \Sigma + \frac{1}{\gamma^2}(C+DK)^T(C+DK) & (EX+Y\Phi^T)^{-1}B_1 \\ B_1^T(EX+Y\Phi^T)^{-T} & -I\end{bmatrix}.$$

由式(14) 和上式,令 $T\to+\infty$,则有 $\|z(t)\|_2 < \gamma\|\omega(t)\|_2$. 从而在定理 1 的条件下,非线性扰动广义系统(1) 是可鲁棒 H_∞ 控制的,其鲁棒 H_∞ 控制器为

$$u(t) = Kx(t),\ K = Z^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}. \qquad \square$$

4　鲁棒 H_∞ 保性能控制器的设计

定理 2　对于给定的正数 $\gamma>0$ 和所有容许的扰动 f,如果存在对称正定矩阵 $X>0$,矩阵 Y 和 Z,以及正数 $\varepsilon>0$,使得

$$\begin{bmatrix} \tilde{A} & \alpha PF^T & PC^T+ZD^T & P & Z\\ * & -\varepsilon I & 0 & 0 & 0\\ * & * & -\gamma^2 I & 0 & 0\\ * & * & * & -Q^{-1} & 0\\ * & * & * & * & -R^{-1}\end{bmatrix} < 0. \tag{17}$$

其中

$$\tilde{A} = PA^T + AP^T + ZB_2^T + B_2Z^T + \varepsilon I + B_1B_1^T,$$

$$P = (EX + Y\Phi^T).$$

则控制器 $u(t) = Kx(t)$, $K = Z^T(EX+Y\Phi^T)^{-T}$ 是系统(1) 的鲁棒 H_∞ 保性能控制器,相应的可保性能为

$$J^* = x_0^T(EX+Y\Phi^T)^{-1}Ex_0 + \rho^2.$$

证明　在定理 2 的条件下,可知 $(EX+Y\Phi^T)$ 可逆. 由 Schur 补引理,式(17) 成立等价于

$$\begin{bmatrix} \tilde{A} & \alpha PF^T & PC^T+ZD^T\\ * & -\varepsilon I & 0\\ * & * & -\gamma^2 I\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} P & Z\\ 0 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} Q & 0\\ 0 & R\end{bmatrix}\begin{bmatrix} P^T & 0 & 0\\ Z^T & 0 & 0\end{bmatrix} < 0, \tag{18}$$

$$\begin{bmatrix} \Sigma + \frac{1}{\gamma^2}(C+DK)^T(C+DK) + Q + K^TRK & P^{-1}B_1\\ * & -I\end{bmatrix} < 0. \tag{19}$$

由定理 1 知,在定理 2 的条件下,对应的闭环系统是广义二次稳定的,且 $\|z(t)\|_2 < \gamma\|\omega(t)\|_2$.

下面证明控制器是保性能控制器. 取函数

$$V(x(t)) = x^T(t)(EX+Y\Phi^T)^{-1}Ex(t) \geq 0,$$

由定理 1 的证明可知,沿闭环系统(10) 有

$$dV(x(t))/dt|_{(10)} =$$

$$[x^T(t)\quad \omega^T(t)]\begin{bmatrix} \Sigma & (EX+Y\Phi^T)^{-1}B_1\\ * & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix} x(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix} =$$

$$[x^T(t)\quad \omega^T(t)][\Xi + \mathrm{diag}(Q+K^TRK\quad 0)]\times \begin{bmatrix} x(t)\\ \omega(t)\end{bmatrix} - \frac{1}{\gamma^2}z^T(t)z(t) + \omega^T(t)\omega(t) - x^T(t)[Q+K^TRK]x(t). \tag{20}$$

上式两边对 t 从 0 到 T 积分,有

$$V(x(T)) - V(x(0)) \leq -\int_0^T x^T(t)(Q+K^TRK)x(t)dt - \int_0^T\left[\frac{1}{\gamma^2}z^T(t)z(t) - \omega^T(t)\omega(t)\right]dt.$$

令 $T\to+\infty$,有

$$J = \int_0^{+\infty} x^T(t)(Q+K^TRK)x(t)dt \leq V(x(0)) + \rho^2.$$

所以控制器是保性能控制器,相应的可保性能为

$$J^* = V(x(0)) = x_0^T(EX+Y\Phi^T)^{-1}Ex_0 + \rho^2. \qquad \square$$

5　仿真算例

考虑非线性广义系统(1),其中各系数如下:

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 1\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix},\ A = \begin{bmatrix} -1 & 0.5 & -1\\ 2 & 1 & 1\\ 1 & -2 & 1\end{bmatrix},$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0\\ -0.1 & 0.2\\ 0 & 0.1\end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5\\ 1 & 1\\ -0.5 & 1\end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 0\\ -0.5 & 1 & 1\end{bmatrix},\ D = \begin{bmatrix} 1 & 0.5\\ 0 & 1\end{bmatrix}.$$

$$f(t,x(t)) = \begin{bmatrix} \sin[x_1(t)+x_2(t)]\\ \sin[x_2(t)+x_3(t)]\\ \sin[x_3(t)+x_1(t)]\end{bmatrix},$$

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t)\\ x_2(t)\\ x_2(t)\end{bmatrix}.$$

则有

$$\|f(t,x(t))\|^2 = \sin^2[x_1(t)+x_2(t)] + \sin^2[x_2(t)+x_3(t)] + \sin^2[x_3(t)+x_1(t)] \leq [x_1(t)+x_2(t)]^2 + [x_2(t)+x_3(t)]^2 + [x_3(t)+x_1(t)]^2 = x^T(t)Gx(t),$$

其中

$$G = \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1\\ 1 & 2 & 1\\ 1 & 1 & 2\end{bmatrix}.$$

取 $Q=I$, $R=I$, $\gamma=1$, $\rho=0.5$, $x_0=[1,-1,1]^T$. 根据定理 2,应用 Matlab 工具包可解得鲁棒 H_∞ 保

性能控制器

$$u(t) = \begin{bmatrix} 1.0397 & 1.9479 & -8.0961 \\ 4.4324 & -3.3994 & -19.6309 \end{bmatrix} x(t).$$

相应的可保性能为 $J^* = 25.5212$.

6 结 论

本文研究不确定时变非线性结构扰动的连续广义系统的鲁棒 H_∞ 控制和鲁棒 H_∞ 保性能控制问题. 首先给出不确定时变非线性结构扰动的广义系统的鲁棒 H_∞ 控制定义和鲁棒 H_∞ 保性能控制定义;然后应用线性矩阵不等式方法,分别给出了系统的鲁棒 H_∞ 控制器和鲁棒 H_∞ 保性能控制器存在的充分条件,当这些条件可解时,分别给出了控制器的参数表示式;最后通过一个算例验证了所给出方法的有效性.

参考文献(References)

[1] Chou J H, Liao W H. Stability robustness of continuous-time perturbed descriptor systems[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems: Ⅰ, 1999, 46(9): 1153-1155.

[2] Dai L. Singular control systems[M]. Berlin: Springer-Verlag, 1989.

[3] Lin J L, Chen S J. Robust analysis of uncertain linear singular systems with output feedback control[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(10): 1924-1929.

[4] Masubuchia I, Kamitaneb Y, Oharac A, et al. H_∞ control for descriptor systems: A matrix inequalities approach[J]. Automatica, 1997, 33(4): 669-673.

[5] Xu S Y, Dooren P V, Stefen 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.

[6] Fang C H, Chang F R. Analysis of stability robustness for generalized state-space systems with structured perturbations[J]. System & Control Letters, 1993, 21(2): 109-114.

[7] Xu S Y, Yang C W. Robust stabilization for generalized state-space systems with uncertainty[J]. Int J of Control, 1999, 72(18): 1659-1664.

[8] Xu S Y, Yang C W. An algebraic approach to the robust stability analysis and robust stabilization of uncertain singular systems[J]. Int J of Control, 2000, 31(1): 55-61.

[9] 胡刚. 具有参数不确定性广义系统的保成本控制[J]. 系统工程, 2003, 21(4): 106-111.
(Hu G. Guaranteed cost control for singular systems with parameter uncertainty[J]. Systems Engineering, 2003, 21(4): 106-111.)

[10] 熊军林, 张庆灵. 不确定广义系统的最优保性能控制[J]. 自动化学报, 2004, 30(4): 588-591.
(Xiong J L, Zhang Q L. Optimal guaranteed cost control for descriptor systems with uncertainties[J]. Acta Automatica Sinica, 2004, 30(4): 588-591.)

[11] Liu G P, Daniel W C Ho, Yeung L F. Generalized quadratic stability for perturbated singular systems[C]. Proc of the 42nd IEEE Conf on Decision and Control. Hawaii, 2003: 2413-2418.

[12] 沃松林, 吴建成. 不确定非线性广义系统的鲁棒控制和保性能控制[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(6): 955-957, 961.
(Wo S L, Wu J C. Robust control and guaranteed cost control for uncertain nonlinear systems[J]. Systems Engineering and Electronics, 2007, 29(6): 955-957, 961.)

(上接第 355 页)

[10] 关叶青, 刘思峰. 基于不动点的强化缓冲算子序列及其应用[J]. 控制与决策, 2007, 22(10): 1189-1192.
(Guan Y Q, Liu S F. Sequence of strengthening buffer operator and its application based on fixed point[J]. Control and Decision, 2007, 22(10): 1189-1192.)

[11] 关叶青, 刘思峰. 强化缓冲算子序列与 m 阶算子作用研究[J]. 云南师范大学学报, 2007, 27(1): 32-35.
(Guan Y Q, Liu S F. Study on the sequence of strengthening buffer operator and its application by m-thorder[J]. J of Yunnan Normal University, 2007, 27(1): 32-35.)

[12] 曹定爱, 张顺明. 累积法引论[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
(Cao D A, Zhang S M. Introduction to the cumulative-sum method[M]. Beijing: Science Press, 1999.)

[13] 谢乃明, 刘思峰. 强化缓冲算子的性质与若干实用强化算子的构造[J]. 统计与决策, 2006, 22(4): 9-10.
(Xie N M, Liu S F. The character of strengthening buffer operator and building of some operators[J]. Statistics and Decision, 2006, 22(4): 9-10.)