第 22 卷 第 4 期 控 制 与 决 策 2007 年 4 月
Vol. 22 No. 4 Control and Decision Apr. 2007

文章编号: 1001-0920(2007)04-0436-04

线性离散时滞系统的 Gl_2 状态反馈控制

张彦虎, 颜文俊, 赵光宙
(浙江大学 系统科学与工程系, 杭州 310027)

摘 要: 研究具有状态时滞的线性离散时不变系统的 Gl_2 控制问题. 基于简化的 Gl_2 分析定理, Gl_2 控制问题被等价转化为 H_∞ 控制问题. 通过 LMI 和构造 Lyapunov 函数, 得到了 Gl_2 性能的 LMI 表述. 给出了使得时滞系统稳定且满足给定性能指标的无记忆 Gl_2 状态反馈控制器存在的充分条件和设计方法. 当系统具有独立范数有界扰动输入和全结构不确定性时, 使用此方法设计得到的 Gl_2 控制器比 H_∞ 控制器的保守性更小. 算例验证了该方法的有效性.

关键词: LMI; Gl_2 性能; 时滞; 独立范数有界扰动; 全结构不确定性
中图分类号: TP27 **文献标识码**: A

Gl_2 state-feedback control for linear discrete-time systems with time delay

ZHANG Yan-hu, YAN Wen-jun, ZHAO Guang-zhou
(Department of System Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China. Correspondent: YAN Wen-jun, E-mail: yanwenjun@zju.edu.cn)

Abstract: The problem of Gl_2 control for discrete-time linear time-invariant systems with time delay in the state is presented. Based on the simplified Gl_2 analysis theorem, the Gl_2 control problem is equivalently transformed to the H_∞ control prolem. The linear matrix inequality (LMI) representation of Gl_2 performance for the delayed systems is also derived by using LMI and constructing Lyapunov function. The sufficient condition for the existence of memoryless Gl_2 state feedback controller ensuring the stability and a prescribed performance index for the state delay is established. Using the proposed method, the designed Gl_2 controller is less conservative than the H_∞ controller when the input disturbance is independently norm-bounded and the systems with time delay have full structure uncertainty. A numerical example shows the effectiveness of the result.

Key words: LMI; Gl_2 performance; Time delay; Independently norm-bounded disturbance; Full structure uncertainty

1 引 言

在化工过程、移动通讯中的多路传播, 基于 Internet 的网络控制系统以及其他各种工程系统中的时滞现象常常被看作是系统不稳定和性能变差的一个主要因素, 因此对于时滞系统的分析和综合成为研究的一大热点. 针对各种不同对象, 包括状态时滞、控制输入时滞、单时滞、多时滞、确定时滞、时变时滞、时滞独立、时滞依赖、确定系统、不确定系统、连续系统和离散系统等以及以上某几种情况同时出现的复杂时滞系统的综合问题, 研究工作主要放在状态反馈[1] 和输出反馈镇定[2]、鲁棒保性能状态反馈[3] 和输出反馈控制[4]、鲁棒 H_∞ 状态反馈[5] 和输出反馈控制[6,7] 的控制器设计等方面. 其中 H_∞ 性能指标是时滞系统综合的一个重要指标, 所设计的 H_∞ 控制器可以保证闭环系统具有一定的扰动衰减水平.

在 H_∞ 问题中, 信号的扰动和不确定性被放在一个范数中, 将会导致设计的保守性. 在无时滞的系统综合中, μ 综合方法能克服这种保守性, 但在优化过程中使用所谓的"D-K"迭代, 尽管在单独的递归过程中是收敛的, 但其联合收敛性无法保证[8]. D'Andrea[9] 提出了 Gl_2 (Generalized-l_2) 综合框架, 用来解决鲁棒控制与优化控制中一些开问题, 包括具有独立范数有界扰动的系统的综合问题, 具有"元素 - 元素"的有界全结构不确定性系统的鲁棒稳定问题, 一大类系统的鲁棒性能问题和抑制确定性的

收稿日期: 2005-12-28; **修回日期**: 2006-03-24.
基金项目: 国家自然科学基金项目(60374028).
作者简介: 张彦虎(1976 —), 男, 陕西大荔人, 博士生, 从事鲁棒控制理论的研究; 颜文俊(1965 —), 男, 浙江温岭人, 教授, 博士, 从事离散事件动态系统理论、多目标优化与控制等研究.

白噪声扰动问题. 该框架综合了 H_∞ 优化、LMIs 和积分二次约束概念. 使用该框架可得到一大类鲁棒和优化控制问题的收敛解[10]. 同时, Gl_2 控制方法已成功地应用于主动悬挂系统[10-12] 和蒸发过程[8]. 与标准的 H_∞ 框架相比,在系统的输入扰动为独立有界范数和系统具有"元素 - 元素"的有界全结构不确定性情况下, Gl_2 框架具有比 H_∞ 框架更少保守性的潜力,同时比 μ 集成方法在算法上更易处理. 因此,本文采用 Gl_2 性能指标来设计时滞系统的控制器,研究线性离散时滞系统的 Gl_2 状态反馈控制问题.

2　Gl_2 控制问题描述

考虑如下线性时滞离散系统:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= A_0x(k) + A_dx(k-d) + B_1u(k) + B_2w(k), \\ z(k) &= C_0x(k) + C_dx(k-d) + D_1u(k) + D_2w(k). \end{aligned} \tag{1}$$

式中: $x(k) \in R^n$ 为系统状态向量; $u(k) \in R^m$ 为控制输入; $z(k) \in R^p$ 为被调输出; $w(k) \in R^q$ 为有限能量的外部扰动,即 $w(k) \in l_2$; $d \geq 0$ 为已知滞后时间. 假设已知的初始条件序列为 $x(k) = \phi(k)$, $k = -d, -d+1, \cdots, 0$.

构造无记忆状态反馈控制器如下:

$$u(k) = Kx(k), \tag{2}$$

式中 K 为待求的反馈增益矩阵. 把式(2) 带入系统(1),得到闭环系统状态方程为

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \\ &\tilde{A}_0x(k) + A_dx(k-d) + B_2w(k), \\ z(k) &= \tilde{C}_0x(k) + C_dx(k-d) + D_2w(k). \end{aligned} \tag{3}$$

其中

$$\tilde{A}_0 = A_0 + B_1K,\ \tilde{C}_0 = C_0 + D_1K. \tag{4}$$

问题 1　针对系统(1) 设计状态反馈控制器 K,使对于系统存在的状态时滞保证闭环系统稳定,且保证从外部输入 $w(k)$ 到被调输出 $z(k)$ 的传函矩阵的 Gl_2 范数不超过给定的常数 γ. 如果这两个条件能满足,则称系统(3) 具有 Gl_2 性能 γ.

为求出满足闭环系统(3) 稳定且满足一定 Gl_2 性能的状态反馈矩阵 K,先要对 Gl_2 进行描述. 从文献[9] 可得到一简化的扰动集合和性能判据集合,定义如下:

$$\begin{aligned} W:&= \{w_k \in l_2: \|w_k\| \leq 1, \\ &\quad k \in [1, C_q] \in Z^+\}, \\ Z:&= \{z_l \in l_2: \|z_l\| \leq 1, \\ &\quad l \in [1, C_p] \in Z^+\}. \end{aligned} \tag{5}$$

式中: C_q 表示把系统(3) 中 q 个扰动分量分成 C_q 组,即 $q \geq C_q$; C_p 表示把系统(3) 中 p 个被调输出分量分成 C_p 组,即 $p \geq C_p$; Z^+ 表示正整数. 在文献[9] 中的 Gl_2 分析定理被简化后重新描述为如下引理:

引理 1[12]　对于给定一线性时不变系统的有界算子 M 和如式(5) 描述的集合 W, Z, 下面两种描述等价.

1) 不等式

$$\|M\|_{Gl_2} := \sup_{w\in W}\sup_{z\in Z}\langle z, Mw\rangle < \gamma \tag{6}$$

成立. 式中 $\langle\cdot, \cdot\rangle$ 表示内积;

2) 存在 x_k, $y_l \in R^+$, $k \in [1, C_q] \subset Z^+$, $l \in [1, C_p] \subset Z^+$ 满足

$$\|Y^{1/2}MX^{-1/2}\|_\infty < \gamma, \tag{7}$$

其中

$$X := x_1 I_{d_1} \oplus x_2 I_{d_2} \oplus \cdots \oplus x_{C_q} I_{d_{C_q}} > 0,$$

$$\sum_{k=1}^{C_q} x_k \leq \gamma, \tag{8}$$

$$Y := y_1 I_{z_1} \oplus y_1 I_{z_2} \oplus \cdots \oplus y_{C_p} I_{z_{C_p}} > 0,$$

$$\sum_{l=1}^{C_p} y_l \leq \gamma. \tag{9}$$

式中: $\oplus$ 表示直积,即 $A \oplus B = \begin{bmatrix} A & \\ & B \end{bmatrix}$; I_{d_k} 和 I_{z_k} 为分别与 $w_k w_k'$ 和 $z_l z_l'$ 具有相同维数的单位矩阵.

此引理的详细证明见文献[9]. 引理 1 中条件 1) 即为 Gl_2 范数的定义,而条件 1) 的等价条件 2) 在下一步推导 Gl_2 性能条件时起到了关键作用. 从不等式(7) 可以看出, Gl_2 范数的定义式(6) 被转换成为 H_∞ 问题,使得按照已有的时滞系统的 H_∞ 性能条件可导出 Gl_2 性能条件及控制器设计方法.

定义状态空间描述的系统(3) 的传递函数为

$$T_0 := \left[\begin{array}{c|cc} \tilde{A}_0 & A_d & B_2 \\ \hline \tilde{C}_0 & C_d & D_2 \end{array}\right],$$

并定义

$$\bar{T}_0 := Y^{1/2}T_0X^{-1/2} = \left[\begin{array}{c|cc} \tilde{A}_0 & A_d & \bar{B}_2 \\ \hline \bar{C}_0 & \bar{C}_d & \bar{D}_2 \end{array}\right],$$

其中

$$\bar{B}_2 := B_2X^{-1/2},\ \bar{C}_0 := Y^{1/2}\tilde{C}_0, \tag{10}$$

$$\bar{C}_d = Y^{1/2}C_d,\ \bar{D}_2 := Y^{1/2}D_2X^{-1/2}. \tag{11}$$

把传函 $\bar{T}_0$ 写成状态空间实现如下:

$$\begin{aligned} x(k+1) &= \overline{A_0}x(k) + A_dx(k-d) + \bar{B}_2w(k), \\ z(k) &= \bar{C}_0x(k) + \bar{C}_dx(k-d) + \bar{D}_2w(k). \end{aligned} \tag{12}$$

对于系统(1) 和(12),考虑如下问题:

问题 2　针对系统(1) 设计状态反馈控制器,使对于系统存在的状态时滞保证闭环系统(12) 稳定且系统(12) 的 H_∞ 增益小于 1. 按照 H_∞ 范数的定义,即在零初始条件下对任意非零 $w \in l_2$, 满足

$\|z\|_2 \le \|w\|_2$,其中 $\|\cdot\|_2$ 表示 l_2 范数.如果闭环系统(12) 满足以上两个条件,则称系统(12) 具有 H_∞ 性能 1.

引理 2　下面两个描述是等价的,即问题 1 等价于问题 2:

1) 系统(3) 具有 Gl_2 性能 γ;

2) 系统(12) 具有 H_∞ 性能 1.

证明　根据引理 1 及系统(3) 和系统(12) 的定义,很容易得到 1) 等价于 2). □

引理 2 的成立为推导 Gl_2 性能条件和设计 Gl_2 控制器奠定了基础.

3　Gl_2 性能条件

假设系统(3) 和系统(12) 中的矩阵确切已知.下面定理给出了系统(3) 具有 Gl_2 性能 γ 的充分条件.

定理 1　对于系统(3) 和给定的常数 γ,如果存在对称正定矩阵 $P, S \in R^{n\times n}$ 和分别满足式(8),(9) 的矩阵 $X \in R^{q\times q}$, $Y \in R^{p\times p}$,使得

$$\begin{bmatrix} -P & 0 & P\tilde{A}_0 & PA_d & PB_2 \\ * & -Y & \tilde{C}_0 & C_d & D_2 \\ * & * & -P+S & 0 & 0 \\ * & * & * & -S & 0 \\ * & * & * & * & -X \end{bmatrix} < 0, \tag{13}$$

则系统(3) 具有 Gl_2 性能 γ.

证明　根据引理 2,系统(3) 具有 Gl_2 性能 γ 等价于系统(12) 具有 H_∞ 性能 1.下面通过推导系统(12) 具有 H_∞ 性能 1 的条件来得到系统(3) 具有 Gl_2 性能 γ 的条件.

构造 Lyapunov 函数为

$$V(x(k)) = V_1 + V_2 =$$
$$x(k)'Px(k) + \sum_{t=1}^{d} x(k-t)'Sx(k-t). \tag{14}$$

其中:$P, S \in R^{n\times n}$ 为正定对称矩阵,′表示转置.

令 $w(k) = 0$,对于任意初始条件,沿系统(12) 的任意轨迹,$V(x(k))$ 的一阶前向差分为

$$\Delta V(x(k)) := V(x(k+1)) - V(x(k)) =$$
$$x(k+1)'Px(k+1) - x(k)'Px(k) +$$
$$x(k)'Sx(k) - x(k-d)'Sx(k-d).$$

考虑式(12) 可得

$$\Delta V(x(k)) = \hat{x}(k)'\Theta\hat{x}(k). \tag{15}$$

其中

$$\hat{x}(k) := [\hat{x}(k)' \;\; x(k-d)']',$$

$$\Theta := \begin{bmatrix} A_0'P\tilde{A}_0 - P + S & A_0'PA_d \\ * & -S + A_d'PA_d \end{bmatrix}.$$

由 Schur 补引理可知,不等式(13) 保证了 $\Theta < 0$,则由式(15) 知 $\Delta V(x(k)) < 0$,因此闭环系统(12) 是稳定的.下面建立系统(12) 的 H_∞ 性能准则.首先要注意到系统(12) 是渐进稳定的,则当 $k \to \infty$ 时,$x(k) \to 0$;然后在零初始条件下,考虑如下性能指标:

$$J := \sum_{k=0}^{\infty}\{z(k)'z(k) - w(k)'w(k)\} =$$
$$\sum_{k=0}^{\infty}\{z(k)'z(k) - w(k)'w(k) + \Delta V(x(k))\} +$$
$$V(x(k))|_{k=0} - V(x(k))|_{k\to\infty}, \tag{16}$$

式中 $V(x(k))$ 的定义由式(14) 给出.

考虑到 $V(x(k))|_{k=0} = 0$, $V(x(k))|_{k\to\infty} \to 0$,使用系统(12) 和式(15) 可以得到

$$J = \sum_{k=0}^{\infty}\xi(k)'\Lambda_1\xi(k). \tag{17}$$

其中

$$\xi(k) := [x(k)', x(k-d)', w(k)']',$$

$$\Lambda_1 := \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & \Omega_{13} \\ * & \Omega_{22} & \Omega_{23} \\ * & * & \Omega_{33} \end{bmatrix}, \tag{18}$$

$$\Omega_{11} := \tilde{A}_0'P\tilde{A}_0 - P + S + \tilde{C}_0'\tilde{C}_0,$$
$$\Omega_{12} := A_0'PA_d + \bar{C}_0'\bar{C}_d,$$
$$\Omega_{13} := A_0'P\bar{B}_2 + \bar{C}_0'\bar{D}_2,$$
$$\Omega_{22} := -S + C_0'\bar{C}_d,$$
$$\Omega_{23} := A_d'P\bar{B}_2 + C_d'\bar{D},$$
$$\Omega_{33} := -I + B_2'P\bar{B}_2 + D_2'\bar{D}_2.$$

对式(13) 进行合同变换,即左乘 $T := I \oplus Y^{1/2} \oplus I \oplus I \oplus X^{1/2}$,右乘 T';然后利用(11) 可得

$$\begin{bmatrix} -P & 0 & P\tilde{A}_0 & PA_d & P\bar{B}_2 \\ * & -I & \bar{C}_0 & \bar{C}_d & \bar{D}_2 \\ * & * & -P+S & 0 & 0 \\ * & * & * & -S & 0 \\ * & * & * & * & -I \end{bmatrix} < 0. \tag{19}$$

由 Schur 补引理可知,条件(19) 保证了 $\Lambda_1 < 0$,则有 $J < 0$,因而对于系统(12) 有 $\|z\|_2 \le \|w\|_2$,则可以得到系统(12) 具有 H_∞ 性能 1.根据引理 2,条件(13) 保证了系统(3) 具有 Gl_2 性能 γ. □

不等式(13) 是关于矩阵变量 P, S, X, Y 的线性矩阵不等式,故可以用成熟的 LMI 求解算法通过求解优化问题 $\min \gamma$; s.t. (8),(9),(13) 求出系统(3) 的最优 Gl_2 性能 γ^*.

在定理 1 中,如果让不等式(13) 中 $X = Y = \gamma I$,即让扰动分量 $C_q = q$,被调输出分量 $C_p = p$,则 Gl_2 性能条件变成了 H_∞ 性能条件,可见 Gl_2 性能指标涵盖了 H_∞ 性能指标,H_∞ 性能指标是 Gl_2 性能指标的特例.可以预知,如果用 Gl_2 性能指标来设计时

滞系统的控制器,将会得到比 H_∞ 控制更少保守性的解.

4 GI_2 控制器设计

如果闭环系统(3) 具有 GI_2 性能 γ,则控制律(2) 是时滞系统(1) 的一个 γ 次优状态反馈控制律. 下面的定理给出了状态反馈 GI_2 控制律存在的充分条件.

定理 2 对于系统(1) 及给定的正常数 γ,如果存在正定对称矩阵 $Q, R \in R^{n\times n}$ 和矩阵 $X \in R^{q\times q}$, $Y \in R^{p\times p}$, $H \in R^{n\times n}$,使得下面不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -Q & 0 & A_0Q+B_1H & A_dQ & B_2 \\ * & -Y & C_0Q+D_1H & C_dQ & D_2 \\ * & * & -Q+R & 0 & 0 \\ * & * & * & -R & 0 \\ * & * & * & * & -X \end{bmatrix} < 0, \tag{20}$$

则系统(1) 存在无记忆的 γ 次优状态反馈 GI_2 控制律,其中 X 和 Y 分别满足式(8) 和(9). 若控制器存在,则控制器矩阵为

$$K = HQ^{-1}. \tag{21}$$

证明 假设存在满足 LMI(20) 的正定对称矩阵 $Q, R \in R^{n\times n}$ 和矩阵 $X \in R^{q\times q}$, $Y \in R^{p\times p}$, $H \in R^{n\times n}$. 因为 Q 是正定的,所以存在控制器矩阵 K.

由式(21) 可得 $H = KQ$,代入式(20),并考虑式(4),则有

$$\begin{bmatrix} -Q & 0 & \tilde{A}_0Q & A_dQ & B_2 \\ * & -Y & \tilde{C}_0Q & C_dQ & D_2 \\ * & * & -Q+R & 0 & 0 \\ * & * & * & -R & 0 \\ * & * & * & * & -X \end{bmatrix} < 0. \tag{22}$$

利用 $T: = Q^{-1} \oplus I \oplus Q^{-1} \oplus Q^{-1} \oplus I$ 对上式进行合同变换,可得

$$\begin{bmatrix} -Q^{-1} & 0 & Q^{-1}\tilde{A}_0 & Q^{-1}A_d & Q^{-1}B_2 \\ * & -Y & \tilde{C}_0 & C_d & D_2 \\ * & * & -Q^{-1}+Q^{-1}RQ^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & -Q^{-1}RQ^{-1} & 0 \\ * & * & * & * & -X \end{bmatrix} < 0. \tag{23}$$

定义 $P: = Q^{-1}$, $S: = Q^{-1}RQ^{-1}$,代入上式则得到式(13),根据定理 1,定理得证. □

不等式(20) 是 LMI,所以可通过求解 $\min\gamma$; s.t. (8),(9),(20) 来求取使得闭环系统的扰动抑制度 γ 最小的状态反馈 GI_2 控制律,也称为最优状态反馈 GI_2 控制律.

5 算 例

考虑下面线性离散时滞系统:

$$x(k+1) = \begin{bmatrix} -2 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} x(k) + \begin{bmatrix} 0.2 & 0.1 \\ 0.3 & 0.1 \end{bmatrix} x(k-d) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} 0.1 & 0.5 \\ 0 & 0.2 \end{bmatrix} w(k),$$

$$z(k+1) = [1 \quad 1]x(k) + [0.1 \quad 0.1]x(k-d) + u(k) + [0.1 \quad 0.5]w(k).$$

此例中 $q = 2$, $p = 1$. 分别让集合(5) 中的 $C_q = 1$ 和 $C_q = 2$,以此来求解最优控制器. 根据定理 2 给出的状态反馈 GI_2 控制器设计方法,分别对于 $C_q = 1$ 和 $C_q = 2$ 这两种情况使用 LMI 工具箱求解,得到最优的控制器和最优的性能指标如下:

1) 在 $C_q = 1$ 情况下(相当于 H_∞ 控制,所有扰动被放在一起,用一个范数来界定),得到最优 GI_2 性能指标和最优控制器为

$$\gamma^* = 2.088, \quad K = [1.6936 \quad -0.99995];$$

2) 在 $C_q = 2$ 情况下(输入扰动为独立范数有界且系统具有全结构不确定性),得到最优 GI_2 性能指标和最优控制器为

$$\gamma^* = 2.451, \quad K = [1.6938 \quad -1].$$

从上例可以看出,输入扰动为独立范数有界且系统具有全结构不确定性时, GI_2 控制比 H_∞ 控制的保守性小.

6 结 语

本文针对简单的线性离散时滞系统,成功开发出了最优状态反馈 GI_2 控制器设计方法. 首先通过简化的 GI_2 分析定理把 GI_2 控制器设计问题转化成等价 H_∞ 控制器设计问题;然后通过 LMI 和构造 Lyapunov 函数方法,给出了线性离散时滞系统的 GI_2 状态反馈控制器的存在条件和设计方法. 所获得的 GI_2 状态反馈控制器不仅保证闭环系统渐进稳定,而且满足 GI_2 范数小于一定的衰减指标 γ. 在独立有界范数和"元素 - 元素"的有界全结构不确定性情况下,本文设计方法与 H_∞ 控制相比具有更少的保守性. 同时,得到的结果较容易扩展到凸多面体不确定时滞系统. 本文已成功将 GI_2 性能指标引入简单时滞系统的综合. 有理由相信:如果把本文思想用到其他复杂时滞系统综合问题中,同样会取得较好的结果.

(下转第 444 页)

了常规设计方法对模型参数以及故障信息的需要.但对于非线性系统和模型不确定系统的重构控制还需进一步的研究与深化.

6 结 论

针对飞控系统操纵面未知故障情况的重构设计,本文提出了一种基于直接自适应控制的重构飞控系统设计方法.根据飞行品质要求设计正常情况下的控制器,采用优化算法设计了反馈补偿器以保证故障系统的严格正实性,并利用Lyapunov函数证明了重构系统的渐近稳定性.仿真结果显示,在舵面严重受损的情况下,飞机仍能保持良好的性能.本文算法简便可靠,适合工程应用.同时,为解决未知故障情况下的重构控制拓宽了研究思路.

参考文献(References)

[1] 尹怡欣,孙一康,舒迪前.具有二次型性能指标的简单自适应控制算法及其应用[J].控制与决策,2000,15(2):276-279.
(Yin Y X, Sun Y K, Shu D Q. Simple adaptive control algorithm with quadratic performance and its application[J]. Control and Decision, 2000, 15(2): 276-279.)

[2] Howard Kaufman, Itzhak Barkana, Kenneth Sobel, et al. Direct adaptive control algorithms: Theory and applications[M]. 2nd ed. New York: Springer-Verlag, 1998.

[3] Huang C H, Ioannou P A, Maroulas J, et al. Design of strictly positive real systems using constant output feedback[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44(3): 569-575.

[4] Zhang Y M, Jiang J. Fault tolerant control system design with explicit consideration of performance degradation [J]. IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems, 2003, 39(3): 838-849.

[5] Itzhak Barkana. On gain conditions and convergence of simple adaptive control [C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. Austin, 2003:1-14

[6] Itzhak Barkana. Simple adaptive control for non-minimum phase autopilot design[C]. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conf and Exhibit. Providence, 2004: 1-12.

(上接第439页)

参考文献(References)

[1] Leite V J S, Tarbouriech S, Peres P L D. A convex approach for robust state feedback control of discrete-time systems with state delay[C]. Proc of the 2004 American Control Conference. Boston, 2004: 2870-2875.

[2] Haurani A, Michalska H, Boulet B. Delay-dependent robust output feedback stabilization of uncertain state-delayed systems with saturating actuators[C]. Proc of the 2004 American Control Conference. Boston, 2004: 4963-4965.

[3] Chen G, Yang M, Yu L, et al. Delay dependent guaranteed cost control for linear uncertain time-delay systems [C]. Proc of the 3rd World Congress on Intelligent Control and Automation. Hangzhou, 2000: 3363-3367.

[4] 关新平,陈彩莲,龙承念,等.不确定离散时滞系统的动态输出反馈鲁棒保性能控制[J].控制理论与应用,2003,20(2):199-204.
(Guan X P, Chen C L, Long C N, et al. Robust guaranteed cost control for uncertain discrete delayystems via dynamic output feedback[J]. Control Theory and Applications, 2003, 20(2): 199-204.

[5] Lee Y S, Moon Y S, Kwon W H, et al. Delay-dependent robust H_∞ control for uncertain systems with a state-delay[J]. Automatica, 2004, 40(1): 65-72.

[6] Choi H H, Chung M J. An LMI approach to H_∞ controller design for linear time-delay systems [J]. Automatica, 1997, 33(4): 737-739.

[7] Jeung E T, Kwon S, Kim J H, et al. An LMI approach to H_∞ control for linear delay systems[C]. Proc of the American Control Conference. 1998: 2398-2402.

[8] 颜文俊,张森林.新型多目标优化控制策略及其应用研究[J].浙江大学学报,2004,38(6):691-696.
(Yan W J, Zhang S L. New multi-objective optimization control and its application to nonlinear evaporation process[J]. J of Zhejiang University, 2004, 38(6): 691-696.

[9] D'Andrea R. Generalized l_2 synthesis[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1999, 44: 1145-1156.

[10] Wang J, Wilson D A. Application of generalized L_2 synthesis to decoupled active suspension systems[C]. Proc of the American Control Conference. Arlington, 2001: 2664-2669.

[11] Wang J, Wilson D A. Multi-objective control of decoupled vehicle suspension systems[C]. Proc of the 40th IEEE Conference on Decision and Control. Orlando, 2001: 535-539.

[12] Wang J, Wilson D A. Mix $Gl_2/H_2/Gh_2$ control with pole placement and its application to vehicle suspension systems[J]. Int J of Control, 2001, 74(13): 1353-1369.