

文章编号: 1000-8152(2008)05-0976-05

一类约束条件下的跟踪保性能控制

徐建省¹, 王永骥²

(1. 中国科学院 力学研究所 国家微重力实验室, 北京 100080; 2. 华中科技大学 控制科学与工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 本文研究了一类时变非线性系统在输入有位置约束条件下的跟踪保性能控制问题。首先对非线性对象选择合适的特征运行状况, 采用瞬时线性化技术得到多个线性化控制模型, 将之看作是一个线性不确定系统, 提出应用基于线性矩阵不等式的跟踪保性能控制设计控制器, 然后经过推导得到了满足控制约束的充分条件, 以定理的形式给出了约束条件下跟踪保性能控制器存在的充分条件。最后给出了仿真算例, 仿真结果表明了所提方法的有效性和可行性。

关键词: 鲁棒控制; 跟踪保性能控制; 线性矩阵不等式; 控制约束

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Tracking guaranteed-cost control under a class of constraints

XU Jian-sheng¹, WANG Yong-ji²

(1. National Microgravity Laboratory, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Science, Beijing 100080, China;
2. Department of Control Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan Hubei 430074, China)

Abstract: A novel design approach of the tracking guaranteed-cost controller under input constraint is proposed in terms of linear matrix inequality. The nonlinear object model is linearized in several operating points; the obtained linear models are viewed as an uncertain system. The tracking guaranteed-cost control under input constraint is proposed. An example is given; and the simulation results demonstrate the effectiveness and the feasibility of the proposed design approach.

Key words: robust control; tracking guaranteed cost control; linear matrix inequality; constrained input

1 引言(Introduction)

现实世界的绝大多数对象都是非线性系统, 对非线性系统的研究一直是控制领域研究的一个热点^[1~4]。本文提出一种非线性的研究方法, 线将非线性对象在特征点处采用瞬时线性化技术线性化, 得到多个线性化模型, 将非线性对象看作是线性不确定系统, 进而考虑输入有约束条件的情况下, 结合保性能控制来研究非线性对象的控制问题。

不确定性系统的保性能控制(guaranteed cost control, GCC)是解决不确定系统的一种有效方法。它是由Chang 和Peng^[5]于1972年在自适应控制中首次提出来的。国内外学者已有不少研究成果^[6~10], 且贯穿控制系统的各个领域。由于线性矩阵不等式(linear matrix inequality, LMI)的优良特性以及解法的突破, 使其在控制系统的分析和设计方面得到了广泛的应用。

对许多的被控对象来说, 执行机构总会受到一定

的限制, 或者是基于安全而人为加入的限制条件, 或是器件装置所固有的特性。最常见的是执行机构存在饱和非线性。这种执行机构的饱和非线性现象, 使得我们在设计控制系统时, 必须考虑控制输入饱和非线性对闭环系统性能的影响, 特别是对闭环稳定性的影响。否则按照无约束设计的控制器可能会使被控系统运行性能变差, 或者会出现不稳定, 从而导致系统失控甚至引起事故。有不少文献对带有执行器饱和的线性连续、线性离散等系统作了较为深入的研究^[11~17], 但大多是研究如何设计反馈控制保证闭环系统稳定, 或者如何优化设计可以是被控系统获得尽可能大的吸引域。但涉及保性能控制和跟踪控制系统设计的较少。

本文提出一种基于LMI的跟踪保性能控制器设计方法, 在设计控制器时, 将控制约束作为必须满足的一个条件, 使得所设计的控制器总处于执行器的线性区, 以定理的形式给出了控制器存在的充分条

收稿日期: 2006-08-20; 收修改稿日期: 2007-09-25。

基金项目: 航天创新基金资助项目(20060115); 国家自然科学基金资助项目(60674105)。

件。应用这种方法所设计的控制器, 既考虑到模型的不确定性, 满足控制输入的约束条件, 又能保证系统的控制性能指标不大于一个确定的界。

2 问题描述(Problem description)

考虑具有输入限幅条件的不确定系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \tilde{A}(t)x(t) + \tilde{B}(t)\sigma(u(t)), \\ y(t) = x(t), \\ x(0) = x_0, \end{cases} \quad (1)$$

其中: $\tilde{A}(t) = A + \Delta A(t)$, $\tilde{B}(t) = B + \Delta B(t)$ 系统初始状态 $x(t_0) = x_0$, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是系统的状态向量, $u(t) \in \mathbb{R}^p$ 是控制输入, $y \in \mathbb{R}^q$ 是系统的被控输出, A 和 B 是具有适当维数的已知常数矩阵, $\Delta A(t)$ 和 $\Delta B(t)$ 是适当维数的不确定矩阵函数, 表示了系统模型中的参数不确定性。假定所考虑的参数不确定性范数有界, 且具有以下的形式:

$$[\Delta A(t) \Delta B(t)] = DF(t) [E_1 E_2], \quad (2)$$

其中: D, E_1, E_2 是适当维数的已知常数矩阵, 它们反映了不确定性的结构信息; $F(t)$ 是适当维数的未知矩阵, 且满足

$$F(t) \in \Omega = \{w(t) | w^T(t)w(t) \leq I\}, \quad (3)$$

$\sigma(\cdot)$ 为标准对称饱和非线性函数, 表示对控制输入的限制条件, 限幅值为 1。 $\sigma(u) = [\sigma(u_1) \ \sigma(u_2) \ \dots \ \sigma(u_p)]$, 记 $M = \{1, 2, \dots, p\}$, 用分段函数表示的对控制输入分量的表达式为

$$\sigma(u_i) = \begin{cases} 1, & u_i > 1, \\ u_i, & |u_i| \leq 1, \\ -1, & u_i < -1, \end{cases} \quad (4)$$

其中 $i \in M$, $u^T = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_p]$ 。若实际应用中对输入的限制不为 1, 则可以对原系统的输入矩阵 \tilde{B} 乘以一个相应的对角阵。因为 $\sigma_\alpha(x) = \alpha\sigma(x/\alpha)$, 假设对第 i 个输入的实际限幅为 \bar{u}_i , 则 $\text{diag}\{\bar{u}\} \sigma(u)$ 就可以将输入限幅等价为 1。

注 $\text{diag}\{x\}$ 表示以向量 x 的分量为对角元素的对角矩阵。

设系统(1)的期望输出为时变向量 $y_r(t)$, 定义误差向量

$$e(t) = y(t) - y_r(t) = x(t) - y_r(t),$$

当控制律采用广义误差反馈:

$$u(t) = Ke(t) + v(t), \quad (5)$$

使闭环系统不会发生输入饱和时, 即 $u(t)$ 处于线性区, 得到的误差闭环系统为

$$\dot{e}(t) = \bar{A}e(t), \quad (6)$$

其中:

$$\bar{A} = \tilde{A}(t) + \tilde{B}(t)K, \quad (7)$$

$$v(t) = \tilde{B}^+(t)(-\tilde{A}(t)y_r(t) + \dot{y}_r), \quad (8)$$

令

$$u_e = u(t) - v(t), \quad (9)$$

定义跟踪性能指标

$$J_e = \int_0^\infty (e^T Q e + u_e^T R u_e) dt. \quad (10)$$

本文的目标是对系统(1)设计反馈控制律 $u(t)$, 使得闭环系统能够跟踪给定的期望输出 $y_r(t)$, 且具有一定的闭环跟踪性能。

因为跟踪控制的控制输入是广义的误差反馈形式, 所以, 对控制输入的限幅需要先进行变换, 并且使限幅值变换成标准限幅 1。假设期望输出已知, 则可以根据(8)得到 $v(t)$ 的最大值, 将之记为 v_{\max} ; 又设系统(1)的控制输入限幅为 \bar{u} , 则将(1)的系统输入矩阵 \tilde{B} 乘以 $\text{diag}\{\bar{u} - v_{\max}\}$, 则控制输入就可以变成标准的单位限幅, 同时需要变换的矩阵有(2)中的 E_2 , (7)(8)中的 \tilde{B} 。下文假设对(1)做了上述变换后, 系统的输入矩阵结构不确定性矩阵表示不变, 即仍然用 \tilde{B}, E_2 表示。下面以定理的形式给出输入限幅条件下不确定系统跟踪保性能控制律存在的充分条件。先给出下文证明需要使用的引理。

引理 1^[18] 对不存在控制约束的不确定系统(1)和性能指标(10), 如果存在对称正定矩阵 P 和矩阵 K , 使得对所有允许的不确定性,

$$Q + K^T R K + P \bar{A} + \bar{A}^T P < 0, \quad (11)$$

则 $u(t) = Ke(t) + v(t)$ 是系统(1)具有性能矩阵为 P 的一个跟踪保性能控制律, 其中 $v(t)$ 为式(8)定义, 相应的一个系统性能上界是 $J^* = e^T(0)Pe(0)$ 。

3 主要结论(Main results)

定理 1 对存在对称饱和控制约束条件(4)下的不确定系统(1)和性能指标(10), 如果存在正定对称矩阵 P , 矩阵 K 和常数 $\alpha > 0$, 满足以下矩阵不等式:

$$Q + K^T R K + P \bar{A} + \bar{A}^T P < 0, \quad (12)$$

$$e_0^T Pe_0 \leq \alpha, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & k_i \\ k_i^T & \alpha^{-1}P \end{bmatrix} \geq 0, \quad i \in M, \quad (14)$$

其中 k_i 为矩阵 K 的第 i 个行向量, 即 $K^T = [k_1^T \ k_2^T \ \dots \ k_p^T]$ 。则 $u(t) = Ke(t) + v(t)$ 是系统(1)的一个跟踪保性能控制律, 性能矩阵为 P , 相应的性能上界为 $J^* = e^T(0)Pe(0)$ 。

证 若式(12)满足, 则根据引理1可知, 如果控制律 $u(t) = Ke(t) + v(t)$ 保证输入不会进入饱和非线性区, 即自然满足约束性条件, 则 $u(t) = Ke(t) + v(t)$

为系统(1)的一个保性能控制律, 相应的性能上界为 $J^* = e_0^T P e_0$.

下面证明不等式(13)(14)可以保证反馈控制不会进入饱和特性的非线性区. 由Schur补引理可知, 不等式(14)等价于

$$\alpha k_i P k_i^T \leq 1. \quad (15)$$

令 $V = e^T P e$, 易知 $\dot{V} < 0$, 即 $e^T P e \leq e_0^T P e_0$, 结合(13), 上式等价于

$$\begin{aligned} k_i P^{-1/2} P^{-1/2} k_i^T e^T P^{1/2} P^{1/2} e = \\ \|k_i P^{-1/2} P^{1/2} e\|^2 = \|k_i e\|^2 = \\ u_i^2 \leq 1, \end{aligned}$$

有 $|u_i| \leq 1$, 即不等式(13)(14)保证了用 $u(t) = K e(t) + v(t)$ 构成的控制律满足约束性条件.

证毕.

因为定理7中条件(12)中含有不确定矩阵 $F(t)$ 不易检验, (14)含有 α 和 P 的非线性关系, 无法直接应用LMI求解. 为了解决这个问题, 下面将之转化为等价不等式的形式.

定理2 对不确定系统(1)和性能指标(10), 如果存在正定对称矩阵 X , 矩阵 W 和常数 $\varepsilon > 0, \alpha > 0$, 满足以下矩阵不等式:

$$\begin{bmatrix} S & * & * & * \\ E_1 X + E_2 W - \varepsilon I & * & * & * \\ X & 0 & -\alpha Q^{-1} & * \\ W & 0 & 0 & -\alpha R^{-1} \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & e_0^T \\ e_0 & X \end{bmatrix} \geq 0, \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & w_i \\ w_i^T & X \end{bmatrix} \geq 0, i \in M, \quad (18)$$

其中: $S = AX + BW + (AX + BW)^T + \varepsilon DD^T, w_i$ 为矩阵 W 的第 i 个行向量, * 表示对称矩阵中相应的对称的部分. 则不确定系统(1)存在满足控制约束条件(4)的保性能控制. 如果上面不等式组的可行解为 $(X, W, \alpha, \varepsilon)$, 则系统(1)满足控制约束条件(4)的一个的保性能控制律为: $u(t) = WX^{-1}e(t) + v(t)$, 且对所有满足(2)的不确定性, 对应的闭环系统的性能上界 $J^* = e^T(0)Pe(0)$.

证 根据Schur补引理由式(16)得

$$\begin{aligned} AX + BW + (AX + BW)^T + \varepsilon DD^T + \\ \varepsilon^{-1}(E_1 + E_2 W)^T(E_1 + E_2 W) + \\ \alpha^{-1}XQ_iX + \alpha^{-1}W^TRW < 0, \end{aligned} \quad (19)$$

再根据引理1, 上式等价于

$$DF(E_1 + E_2 W) + (DF(E_1 + E_2 W))^T +$$

$$\begin{aligned} AX + BW + (AX + BW)^T + \\ \alpha^{-1}XQX + \alpha^{-1}W^TRW < 0, \end{aligned}$$

即

$$\begin{aligned} \tilde{A}X + \tilde{B}W + (\tilde{A}X + \tilde{B}W)^T + \\ \alpha^{-1}XQX + \alpha^{-1}WRW < 0, \end{aligned} \quad (20)$$

在矩阵不等式(20)两边分别左乘和右乘 $\alpha^{1/2}X^{-1}$, 令 $K = WX^{-1}, P = \alpha X^{-1}$, 得式(12).

将 $K = WX^{-1}, P = \alpha X^{-1}$ 代入(14), 得

$$\begin{aligned} \alpha k_i P^{-1} k_i^T = k_i X^{-1} k_i^T = \\ w_i X X^{-1} X w_i^T = w_i X w_i^T \leq 1. \end{aligned}$$

再根据Schur补引理得上式等价于(18), 即(18)等价于(14). 由Schur补引理直接可得(17)等价于(13). 根据定理1可知结论成立.

证毕.

不等式组(16)~(18), 是关于变量 $\alpha, \varepsilon, X, W$ 的线性矩阵不等式, 因此, 可以用MATLAB软件所提供的鲁棒控制工具箱中的命令feasp 来求解该不等式组解的可行性问题, 并在存在可行解的情况下直接得到控制器的参数化表示. 利用定理2中的条件, 还可以通过求得 α 的最小值得到最优保性能控制律. 最优保性能控制律可以通过求解以下优化问题得到.

定理3 如果以下优化问题:

$$\min_{\varepsilon, X, W} \alpha,$$

满足不等式(16)~(18)有解 $(\tilde{X}, \tilde{W}, \tilde{\varepsilon}, \tilde{\alpha})$, 则

$$u^*(t) = \tilde{W} \tilde{X}^{-1} e(t) + v(t)$$

是系统在约束条件下的最优跟踪保性能控制律. 该问题是具有线性不等式约束的凸优化问题, 可以转化为求最小最大特征值问题, 用MATLAB中的mincx函数来求解.

4 仿真算例(Numerical example)

对某非线性对象, 先选择特征点采用瞬时线性化技术得到多个线性化模型, 后选择合适的点作为标称系统, 其他特征点的参数与之相比较得到不确定性. 得到的方程具有(1)的形式, 参数的具体表达式为:

$$A = \begin{bmatrix} -0.3487 & 1.0000 \\ -17.801 & -0.2741 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} -0.0680 \\ -31.267 \end{bmatrix},$$

$$C = I_2, D = \begin{bmatrix} 0.02 \\ 3 \end{bmatrix},$$

$$E_1 = [4 \ 0.01], E_2 = 5,$$

控制输入约束条件为控制量小于10。下面应用定理3设计跟踪保性能控制器。加权矩阵如下:

$$Q = \begin{bmatrix} 2.5 & 0 \\ 0 & 0.01 \end{bmatrix}, R = 1.$$

设系统初始状态为 $x_0^T = [0.0 \ 0.18]$, 期望输出为 $y_r^T(0) = [0.18 \ 0.0]$, 则初始误差 $e_0^T = [-0.18 \ 0.18]$ 应用定理3设计考虑约束条件的最优跟踪保性能控制律为(假设期望输出为慢变信号)

$$K = [0.0925 \ 0.2421],$$

$$v(t) = [-0.6618 \ 0.0]y_r(t),$$

性能矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0.8221 & 0.1087 \\ 0.1087 & 0.0495 \end{bmatrix},$$

最优性能为 $J^* = 0.0212$ 。经过对采用设计控制器的非线性对象的仿真, 可以得到满意的跟踪效果。为了表明本文所提出算法的有效性, 在非线性仿真程序中参考信号采用周期为 4π , 幅值为10的方波信号。采用无约束条件和利用本文所提出的考虑约束条件的最优跟踪保性能控的控制曲线分别见图1、图2所示。

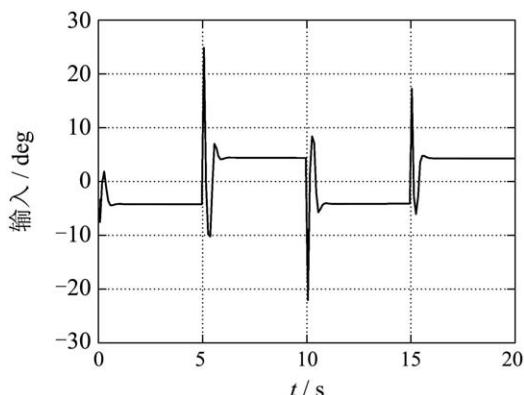


图1 无约束最优保性能控制方波跟踪控制输入曲线

Fig. 1 Simulation control input curve with the optimal tracking guaranteed cost controller

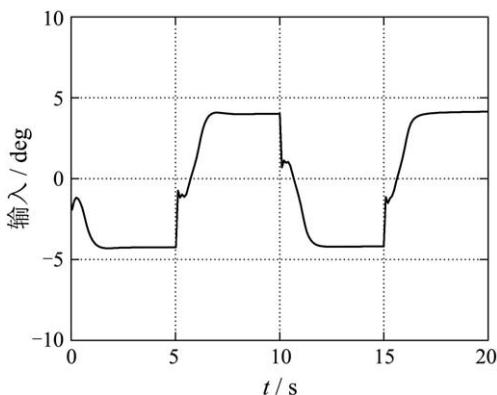


图2 考虑约束的最优保性能方波跟踪控制输入曲线

Fig. 2 Simulation control input curve with the proposed controller

当然一般情况下, 考虑约束条件而设计的最优跟踪保性能跟踪控制, 与不考虑约束的相比, 后者在跟踪信号发生突变时上升时间稍长, 但它可以保证控制输入不会进入饱和非线性区。而前者虽然在期望输出信号变化较快时上升时间较短, 但很可能就会超过控制约束。从图1中可以看出, 虽然上升时间较短, 但控制量很大, 在跟踪幅度为10的阶跃时控制量甚至达到了24; 在同样的条件下, 图2表明, 用本文提出的方法设计的控制器, 控制量没有超过控制约束10, 从而验证了本文提出的结论。

5 结论(Conclusion)

针一类时变非线性对象, 首先采用瞬时线性化技术得到多个线性模型, 然后将之看作线性不确定系统, 提出使用跟踪保性能控制设计控制器; 针对输入存在幅度限制约束条件的情况, 找出可以保证控制输入在线性区的充分条件; 然后结合保性能控制, 从而得到了考虑约束条件的跟踪保性能控制律存在的充分条件, 同时给出了控制器的参数化表示。通过对算例仿真, 结果表明了所提方法分有效性和可行性。

参考文献(References):

- [1] HAG S K, YOUNG M C, LEE K. Robust nonlinear task space control for 6 DOF parallel manipulator[J]. *Automatica*, 2005, 41: 1591 – 1600.
- [2] VENKATESWARLU C, VENKAT RAO K. Dynamic recurrent radial basis function network model predictive control of unstable nonlinear processes[J]. *Chemical Engineering Science*, 2005 (60): 6718 – 6732.
- [3] TONG S C, LI H X. Fuzzy adaptive sliding-mode control for mimo nonlinear systems[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2003, 11(3): 354 – 360.
- [4] 唐功友, 张宝琳. 受扰非线性离散系统的前馈反馈最优控制[J]. 控制理论与应用, 2006, 23(1): 25 – 30。
(TANG Gongyou, ZHANG Baolin. Feedforward and feedback optimal control for nonlinear discrete-time systems with deterministic disturbances[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(1): 25 – 30.)
- [5] CHANG S, PENG T. Adaptive guaranteed cost control of systems with uncertain parameters[J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1972, 17(4): 474 – 483.
- [6] 薛安克, 孙优贤. 不确定线性系统的保代价控制的鲁棒性分析[J]. 自动化学报, 2001, 27(13): 346 – 352。
(XUE Anke, SUN Youxian. Robustness of guaranteed cost control systems with uncertainties[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(13): 346 – 352.)
- [7] 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 Junlin, ZHANG Qingling. Optimal guaranteed cost control for descriptor systems with uncertain[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(4): 588 – 591.)
- [8] XU S, LAM J, ZOU Y. Delay-dependent guaranteed cost control for uncertain systems with state and input delays[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2006, 153(3): 307 – 313.

- [9] BING C, XIAOPING L. Fuzzy guaranteed cost control for nonlinear systems with time-varying delay[J]. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 2005, 13(2): 238 – 249.
- [10] 史国栋, 沃松林, 邹云. 参数不确定广义大系统的保性能分散控制[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 913 – 918.
(SHI Guodong, WO Songlin, ZOU Yun. Guaranteed cost decentralized control for singular large-scale systems with parameter uncertainty[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 913 – 918.)
- [11] 张先明, 吴敏, 余锦华. 含饱和驱动的线性时滞系统的时滞相关鲁棒稳定性[J]. 控制理论与应用, 2005, 22(6): 991 – 994.
(ZHANG Xianming, WU Min, SHE Jinhua. Delay-dependent robust stabilization of uncertain linear time-varying delay systems containing saturating actuators[J]. *Control Theory & Applications*, 2005, 22(6): 991 – 994.)
- [12] YANG S, ZHENG RONG X, QINGWEI C, et al. Control of switched systems with actuator saturation[J]. *Journal of Control Theory and Applications*, 2006, 4(1): 38 – 43.
- [13] LIU H, SUN F, BOUKAS E L K. Robust control of uncertain discrete-time Markovian jump systems with actuator saturation[J]. *International Journal of Control*, 2006, 79(7): 805 – 812.
- [14] HAIJUN F, ZONGLI L. Global practical stabilization of planar linear systems in the presence of actuator saturation and input additive disturbance[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2006, 51(7): 1177 – 1184.
- [15] YONG – YAN C, ZONGLI L. Min-max MPC mpc algorithm for LPV systems subject to input saturation[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2005, 152(3): 266 – 272.
- [16] FEN W, ZONGLI L, QIAN Z. Output feedback stabilization of linear systems with actuator saturation[C] // 2005 American Control Conference. Portland, OR, USA: [s.n.], 2005: 3385 – 3390.
- [17] LAN W, CHEN B M, HE Y. On improvement of transient performance in tracking control for a class of nonlinear systems with input saturation[J]. *Systems & Control Letters*, 2006, 55(2): 132 – 138.
- [18] 徐建省, 王永骥. BTT导弹姿态跟踪保性能控制器设计[J]. 弹箭与制导学报, 2006, 26(3): 23 – 25.
(XU Jiansheng, WANG Yongji. BTT missile attitude tracking guaranteed cost controller design[J]. *Journal of Projectiles, Rocket, Missile and Guidance*, 2006, 26(3): 23 – 25.)

作者简介:

徐建省 (1975—), 男, 中国科学院力学研究所助理研究员, 博士, 目前研究方向为鲁棒控制与最优控制、智能控制, E-mail: jsxu_126@126.com;

王永骥 (1955—), 男, 华中科技大学控制科学与工程系教授、博士生导师, 目前的研究方向为神经网络控制、智能控制、飞行器自适应控制, E-mail: wangyjch@hust.edu.cn.

(上接第975页)

- [6] XIE L, CARLOS E. Delay-dependent robust stability and stabilization of uncertain linear delay systems: a linear matrix inequality approach[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1997, 42(1): 1144 – 1148.
- [7] BARNISH B R. Necessary and sufficient conditions for quadratic stability of an uncertain system[J]. *Journal Optimal Theory Application*, 1985, 46(4): 399 – 408.
- [8] 蔡晨晓, 邹云. 奇异摄动系统的二次稳定[J]. 南京理工大学学报, 2004, 28(3): 225 – 229.
(CAI Chenxiao, ZOU Yun. Quadratic Stability of a Singular Perturbation System[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology(Natural Science)*, 2004, 28(3): 225 – 229.)
- [9] FRIDMAN E. Effects of small delays on stability of singularly perturbed systems[J]. *Automatica*, 2002, 38(4): 897 – 902.
- [10] SHAO Z. Robust stability of singularly perturbed systems with state delays[J]. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 2003, 150(1): 2 – 5.
- [11] FRIDMAN E. Stability of singularly perturbed differential-difference systems: an LMI approach[J]. *Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems*, 2002, 9(2): 201 – 212.
- [12] WILLIAM D L. Multivariable singularly perturbed feedback systems with time delay[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1987, 32(3): 990 – 994.
- [13] LIN C L, CHEN B S. On the design of stabilizing controllers for singularly perturbed systems[J]. *IEEE Transaction on Automatic Control*, 1992, 37(11): 1828 – 1834.

作者简介:

梅 平 (1981—), 女, 南京理工大学博士研究生, 主要研究方向为奇异摄动控制系统、时滞系统, E-mail: meiping1007@163.com;

蔡晨晓 (1975—), 女, 南京理工大学讲师, 博士研究生, 主要研究方向为奇异摄动控制系统研究, E-mail: ccx5281@vip.163.com;

邹 云 (1962—), 男, 教授, 博士生导师, 近年主要从事广义系统、2-D系统、奇异摄动系统及其应用领域的研究.