第 26 卷第 4 期
2009 年 4 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 26 No. 4
Apr. 2009

文章编号: 1000−8152(2007)01−0446−05

基于LMI的分布时滞系统输出动态反馈镇定

钱 伟[1,2], 沈国江[1], 孙优贤[1]

(1. 浙江大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 河南理工大学 计算机科学与技术学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 研究分布时滞系统的输出动态反馈镇定问题. 基于闭环系统的中立型变换及相应Lyapunov-Krasovskii泛函的构造与解析技巧, 建立了与时滞相关的控制器存在性判据. 在此基础上通过控制器参数化设计方法, 将控制器参数的求解归结为线性矩阵不等式解的形式. 仿真算例验证了方法的有效性.

关键词: 时滞系统; 分布时滞; 输出动态反馈; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码**: A

Output dynamical feedback stabilization for linear systems with distributed delay based on LMI

QIAN Wei[1,2], SHEN Guo-jiang[1], SUN You-xian[1]

(1. State Key Lab of Industrial Control Technology, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China;
2. Department of Computer Science and Technology, Henan Polytechnie University, Jiaozuo Henan 454000, China)

Abstract: This note is concerned with the output dynamical feedback stabilization for linear systems with distributed delay. Based on the model transformation of neutral type, we properly construct and compute a Lyapunov-Krsovskii functional by using a special analytic method, and establish the delay-dependent stability criterion for the transformed closed-loop systems. Then, combining this stability criterion with the parameterization of controller, we develop the design condition for the desired controller in terms of linear matrix inequality through which the controller is explicitly formulated. A numerical example is given to illustrate the effectiveness of the proposed approach.

Key words: time-delay systems; distributed delay; output dynamical feedback; linear matrix inequality (LMI)

1 引言(Introduction)

时滞现象广泛存在于各种实际控制系统中, 如化工反应过程、液压控制系统等[1], 因此分析其对于系统动力学行为及控制性能的影响, 以及如何利用或消除这种影响具有理论与实际上的重要意义. 近年来, 围绕如何减少时滞系统稳定性分析的保守性展开了一系列的研究[2,3]. 时滞系统分析结论的保守性表征为其关于时滞常数的灵敏度, 对于时滞大小完全不敏感的结论即为时滞无关的, 反之则为时滞相关的. 减少保守性的根本途径在于Lyapunov-Krasovskii泛函的构造及其解析方式. 对于线性时滞系统, 一般泛函构造方式将导致求解偏微分方程边值问题[4]; 利用特殊泛函构造方式则可得到基于线性矩阵不等式的稳定性判据[5], 减少保守性的方法体现于系统变换及泛函求导过程中的解析技巧.

分布时滞广泛存在于实际的动力学系统中[6], 因而分布时滞系统的稳定性分析与控制器综合问题得到了许多学者的关注. 文献[7]使用离散Lyapunov泛函, 文献[8]使用模型转换与构造合适的Lyapunov-Krasovskii泛函相结合的方法, 研究了分布时滞系统的稳定性. 对于分布时滞系统的综合问题而言, 控制器的设计依赖于相关的分析结果, 然而很多分析结果并不能用于设计问题. 因此对于设计问题, 在尽可能克服保守性的同时, 还应便于控制器参数的求解. 文献[9]基于模型转换方式, 研究了分布时滞系统的状态反馈控制问题, 由于状态变量未必可直接量测, 因此输出反馈控制更具有现实意义. 文献[10]给出了基于“观测器–控制器”的输出静态反馈控制, 由于时滞系统观测器设计方法并不完善, 因此限制了这种方法的应用. 文献[11]提出的时滞系统输出动

收稿日期: 2007−11−02; 收修改稿日期: 2008−08−29.
基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2007AA11Z216); 国家自然科学基金资助项目(50708094).

态反馈控制器的设计方法均为与时滞无关的, 即为实现控制器的有效求解, 完全回避了保守性问题. 目前, 对于分布时滞系统时滞相关的动态输出反馈控制问题, 相应的研究成果却很少见[12].

本文考虑线性分布时滞系统的输出动态反馈镇定问题. 基于中立型变换及相应的Lyapunov-Krasovskii泛函构造, 建立了闭环系统的稳定性判据; 然后结合控制器参数化, 给出了基于线性矩阵不等式的参数求解条件, 实现了输出动态反馈控制器的参数化设计. 最后通过仿真算例验证了方法的有效性.

2 问题描述(Problem formulation)

考虑线性分布时滞系统:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + A_1x(t-h)+ \\ \qquad A_2\int_{t-d}^{t} x(\sigma)\mathrm{d}\sigma + Bu(t), \\ y(t) = Cx(t), \\ x(t) = \varphi(t), t \in [-\gamma, 0]. \end{cases} \tag{1}$$

其中 $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, y \in \mathbb{R}^h$ 分别为状态、控制输入及量测输出; $h, d > 0$ 均为时滞常数, $\gamma = \max\{h, d\}, A, A_1, A_2, B, C$ 为适当维数矩阵.

本文目的是设计全维动态输出反馈控制器:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A_c\hat{x}(t) + B_cy(t), \\ u(t) = C_c\hat{x}(t) + D_cy(t), \end{cases} t \geqslant 0, \tag{2}$$

使得闭环系统

$$\dot{\xi}(t) = \bar{A}\xi(t) + \bar{A}_1\xi(t-h) + \bar{A}_2\int_{t-d}^{t}\xi(\sigma)\mathrm{d}\sigma \tag{3}$$

为一致渐近稳定的. 这里

$$\bar{A}_1 = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_1 & 0 \end{bmatrix}, \bar{A}_2 = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} A_2 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} A + BD_cC & BC_c \\ B_cC & A_c \end{bmatrix}, \xi = \begin{bmatrix} x \\ \hat{x} \end{bmatrix}.$$

对于闭环系统(3), 设

$$\boldsymbol{G}\xi_t = \xi(t) + \bar{A}_1\int_{t-h}^{t}\xi(\sigma)\mathrm{d}\sigma + \bar{A}_2\int_{t-d}^{t}(\sigma - t + d)\xi(\sigma)\mathrm{d}\sigma, \tag{4}$$

则有

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\boldsymbol{G}\xi_t = \hat{A}\xi(t), t \geqslant 0, \tag{5}$$

其中$\hat{A} = \bar{A} + \bar{A}_1 + d\bar{A}_2$.

变换后的闭环系统(5)稳定的必要条件为算子$\boldsymbol{G}$是稳定的, 为此需要如下引理.

引理 1[8]　如果存在正定矩阵$M \in \mathbb{R}^{n\times n}$ 及常数$\alpha_1, \alpha_2 > 0, \alpha_1 + \alpha_2 < 1$, 满足如下约束条件

$$\begin{bmatrix} h^2\bar{A}_1{}'M\bar{A}_1 - \alpha_1M & dh\bar{A}_1{}'M\bar{A}_2 \\ d\bar{A}_2{}'M\bar{A}_1 & d^2\bar{A}_2{}'M\bar{A}_2 - 3\alpha_2M/d^2 \end{bmatrix} < 0,$$

那么算子 $\boldsymbol{G}$ 是稳定的.

引理 2[13]　给定实数 α, β 及正定矩阵 S, 如果 $\alpha > \beta$, 那么下列不等式

$$(\int_\beta^\alpha \omega(\sigma)\mathrm{d}\sigma)'S(\int_\beta^\alpha \omega(\sigma)\mathrm{d}\sigma) \leqslant \\ (\alpha - \beta)\int_\beta^\alpha \omega'(\sigma)S\omega(\sigma)\mathrm{d}\sigma,$$

对于任意使得积分收敛的向量值函数 $\omega : [\beta, \alpha] \to \mathbb{R}^n$ 成立.

3 主要结果(Main results)

定理 1　若引理1的条件成立, 并且存在正定矩阵 $P = \begin{bmatrix} P_1 & P_3 \\ P_3' & P_2 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{n\times n}, ; S_i \in \mathbb{R}^{n\times n}, i = 1, 2$ 满足下列矩阵不等式方程:

$$\begin{bmatrix} \mathit{\Pi} & \hat{A}'\begin{bmatrix} P_1 \\ P_3' \end{bmatrix} & \hat{A}'\begin{bmatrix} P_1 \\ P_3' \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} A_1' \\ 0 \end{bmatrix} & d^2\begin{bmatrix} A_2' \\ 0 \end{bmatrix} \\ * & -h^{-1}S_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -S_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & -h^{-1}S_1^{-1} & 0 \\ * & * & * & * & -2S_2^{-1} \end{bmatrix} < 0, \tag{6}$$

则闭环系统(3)是一致渐近稳定的. 其中

$$\mathit{\Pi} = \hat{A}'P + P\hat{A}.$$

证　构造Lyapunov-Krasovskii泛函:

$$V(\xi_t) = V_1(\xi_t) + V_2(\xi_t) + V_3(\xi_t), \tag{7}$$

其中各项为

$$\begin{cases} V_1(\xi_t) = (\boldsymbol{G}\xi_t)'P(\boldsymbol{G}\xi_t), \\ V_2(\xi_t) = \int_{-h}^{0}\int_{t+\theta}^{t}\xi'(\sigma)\begin{bmatrix} A_1' \\ 0 \end{bmatrix}S_1\begin{bmatrix} A_1' \\ 0 \end{bmatrix}'\xi(\sigma)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\theta, \\ V_3(\xi_t) = d^2\int_{0}^{d}\int_{t-\theta}^{t}(\sigma - t + \theta)\xi'(\sigma)\begin{bmatrix} A_2' \\ 0 \end{bmatrix}\cdot \\ \qquad S_2\begin{bmatrix} A_2' \\ 0 \end{bmatrix}'\xi(\sigma)\mathrm{d}\xi\mathrm{d}\theta, \end{cases} \tag{8}$$

$V_1(\xi_t)$ 沿着闭环系统解轨线的导数为

$$V_1(\xi_t) \leqslant \\ \xi'(t)(\hat{A}'P + P\hat{A})\xi(t) + \xi'(t)\hat{A}'\begin{bmatrix} P_1 \\ P_3' \end{bmatrix}\cdot$$

$$(hS_1^{-1}+S_2^{-1})\begin{bmatrix}P_1\\P_3'\end{bmatrix}'\hat{A}\xi(t)+\frac{1}{h}\cdot$$
$$\int_{t-h}^{t}\xi'(\sigma)\begin{bmatrix}A_1'\\0\end{bmatrix}\mathrm{d}\sigma S_1\int_{t-h}^{t}\begin{bmatrix}A_1'\\0\end{bmatrix}'\xi(\sigma)\mathrm{d}\sigma+d^2\cdot$$
$$\int_{t-d}^{t}(\sigma-t+\theta)\xi'(\sigma)\begin{bmatrix}A_2'\\0\end{bmatrix}S_2\begin{bmatrix}A_2'\\0\end{bmatrix}'\xi(\sigma)\mathrm{d}\sigma,\quad(9)$$

利用引理2, $V_2(\xi_t)$ 的时间导数为

$$V_2(\xi_t)\leqslant$$
$$h\xi'(t)\begin{bmatrix}A_1'\\0\end{bmatrix}S_1\begin{bmatrix}A_1'\\0\end{bmatrix}'\xi(t)-$$
$$\frac{1}{h}\int_{t-h}^{t}\xi'(\sigma)\begin{bmatrix}A_1'\\0\end{bmatrix}\mathrm{d}\sigma S_1\int_{t-h}^{t}\begin{bmatrix}A_1'\\0\end{bmatrix}'\xi(\sigma)\mathrm{d}\sigma,\quad(10)$$

$V_3(\xi_t)$ 沿着闭环系统解轨线的导数为

$$V_3(\xi_t)\leqslant$$
$$\frac{d^4}{2}\xi'(t)\begin{bmatrix}A_2'\\0\end{bmatrix}S_2\begin{bmatrix}A_2'\\0\end{bmatrix}'\xi(t)-d^2\int_{t-d}^{t}(\sigma-$$
$$t+\theta)\xi'(\sigma)\begin{bmatrix}A_2'\\0\end{bmatrix}S_2\begin{bmatrix}A_2'\\0\end{bmatrix}'\xi(\sigma)\mathrm{d}\sigma,\quad(11)$$

综合(7)~(11), 由Schur引理可知, 如果矩阵不等式(6)成立, 则有$\dot{V}(\xi_t)<0$. 由此结合引理1及泛函微分方程稳定性基本定理, 即可得证闭环系统为一致渐近稳定的. 证毕.

注 1 在考虑时滞系统稳定性问题时, 利用Leibnitz-Newton公式, 可以构造多种系统变换方式. 事实上, 闭环系统的变换形式(5)与原系统(3)的稳定性并不等价, 而是具有附加极点. 对设计问题而言, 系统变换引起的保守性可退为其次, 最重要的是便于控制器的求解.

仅就泛函参数而言, 可以利用锥补线性化的方法, 对于矩阵不等式(6)进行迭代求解. 这里给出另外一种可供参考的求解方法, 即设定一组常数$\lambda_i>0, i=1,2$, 通过引入附加的线性约束:

$$S_i\leqslant\lambda_i I_n,\ \ i=1,2,\quad(12)$$

将式(6)转化为关于泛函参数的凸约束关系:

$$\begin{bmatrix}\Pi & \hat{A}'\begin{bmatrix}P_1\\P_3'\end{bmatrix} & \hat{A}'\begin{bmatrix}P_1\\P_3'\end{bmatrix} & \lambda_1\begin{bmatrix}A_1'\\0\end{bmatrix} & d^2\lambda_2\begin{bmatrix}A_2'\\0\end{bmatrix}\\ * & -h^{-1}S_1 & 0 & 0 & 0\\ * & * & -S_2 & 0 & 0\\ * & * & * & -h^{-1}S_1 & 0\\ * & * & * & * & -2S_2\end{bmatrix}<0.\quad(13)$$

为求解动态控制器参数, 在矩阵不等式判据(13)的基础上, 引入辅助参数集合Φ:
$\{X,Y,R\in\mathbb{R}^{n\times n},U\in\mathbb{R}^{m\times n},V\in\mathbb{R}^{n\times h},W\in\mathbb{R}^{m\times h}\}$, 其中$X,Y$ 为正定矩阵.

设$\tilde{A}=A+A_1+dA_2$ 及$Z=X-Y^{-1}$, 由此给出控制器的参数化形式如下:

$$\begin{cases}A_c=(-BWCX+BU+Y^{-1}VCX-\\ \quad\quad Y^{-1}R+\tilde{A}X)Z^{-1},\\ B_c=BW-Y^{-1}V,\\ C_c=(-WCX+U)Z^{-1},\\ D_c=W,\ \ P^{-1}=Q=\begin{bmatrix}X & Z\\ Z & Z\end{bmatrix},\end{cases}\quad(14)$$

即可得$P=\begin{bmatrix}Y & -Y\\ -Y & Z^{-1}XY\end{bmatrix}$.

定理 2 如果引理1的条件成立; 并且存在一组常数$\lambda_i>0, i=1,2$, 使得下列关于参数集Φ及$S_i, i=1,2$ 的线性矩阵不等式组为可解的, 则闭环系统(3)是一致渐近稳定的.

$$\begin{bmatrix}\Gamma_1+\Gamma_1' & h\Gamma_2' & \Gamma_2' & h\Gamma_3' & d^2\Gamma_4'\\ * & -hS_1 & 0 & 0 & 0\\ * & * & -S_2 & 0 & 0\\ * & * & * & -hS_1 & 0\\ * & * & * & * & -2S_2\end{bmatrix}<0,\quad(15)$$

$$\begin{bmatrix}X & I_n\\ I_n & Y\end{bmatrix}>0,\quad(16)$$

$$S_i\leqslant\lambda_i I_n,\quad(17)$$

其中,

$$\begin{cases}\Gamma_1=\begin{bmatrix}\tilde{A}X+BU & \tilde{A}+BWC\\ R & Y\tilde{A}+VC\end{bmatrix},\\ \Gamma_2=[R\ \ Y\tilde{A}+VC],\\ \Gamma_3=\lambda_1[A_1X\ \ A_1],\\ \Gamma_4=\lambda_1[A_2X\ \ A_2].\end{cases}\quad(18)$$

证 设$T=\begin{bmatrix}I_n & Y\\ 0 & -Y\end{bmatrix}$, 根据式(14)可知泛函参数的正定性等价于$Q>0$, 因此由

$$T'QT=\begin{bmatrix}I_n & 0\\ Y & -Y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}X & Z\\ Z & Z\end{bmatrix}\begin{bmatrix}I_n & 0\\ Y & -Y\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}X & I_n\\ I_n & Y\end{bmatrix}$$

可知, 线性矩阵不等式(16)等价于参数化泛函(14)的正定性.

根据定理1的结论, 为保证闭环系统(3)的稳定性, 只要证明在参数化控制器与参数化泛函(14)的条件

下, 线性矩阵不等式(15)与(13) 的等价性即可. 为此, 将(14)代入矩阵不等式(13)可得到

$$\begin{bmatrix} \Pi\ \hat{A}' \begin{bmatrix} Y \\ -Y \end{bmatrix} & \hat{A}' \begin{bmatrix} Y \\ -Y \end{bmatrix} \lambda_1 \begin{bmatrix} A_1' \\ 0 \end{bmatrix} & d^2\lambda_2 \begin{bmatrix} A_2' \\ 0 \end{bmatrix} & & \\ * & -h^{-1}S_1 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -S_2 & 0 & 0 \\ * & * & * & -h^{-1}S_1 & 0 \\ * & * & * & * & -2S_2 \end{bmatrix} < 0. \tag{19}$$

设非奇异变换矩阵diag $\{T'Q\ I_{2n}\ I_{2n}\ I_{2n}\ I_{2n}\}$, 矩阵不等式(19)通过非奇异变换之后的各项分别计算如下:

$$\begin{cases} T'\hat{A}QT = \Gamma_1, [Y\quad -Y]\hat{A}QT = \Gamma_2, \\ [\lambda_1 A_1\ \ 0]QT = \Gamma_3, [\lambda_2 A_2\ \ 0]QT = \Gamma_4. \end{cases} \tag{20}$$

从而证明了线性矩阵不等式(15)和(13)的等价性.

证毕.

注 2 本文的结论对于模型的假设较为一般, 对于只具有离散时滞项的系统, 其输出动态反馈镇定设计方法可以作为本文的特例得到.

4 仿真算例(Simulations)

考虑分布时滞系统(1), 其系数矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} -1 & -2 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ -1 & 0 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}, C = [-1\ \ 1].$$

取参数为$\alpha_1 = 0.7, \alpha_3 = 0.3; \lambda_1 = 5, \lambda_2 = 15$. 在$d = 0.2$ 时, 根据定理2, 由MATLAB LMI TOOLBOX 可解得允许的时滞上界$h = 0.83$ 及

$$X = \begin{bmatrix} 41.85 & -1.36 \\ -1.36 & 1.26 \end{bmatrix}, Y = \begin{bmatrix} 9.44 & 13.94 \\ 13.94 & 23.12 \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} -2.27 & 1.63 \\ 1.48 & -0.94 \end{bmatrix}, U = \begin{bmatrix} -20.75 & 34.40 \end{bmatrix},$$

$$V = \begin{bmatrix} -8.95 \\ -22.62 \end{bmatrix}, W = 7.84.$$

此时, 存在动态反馈控制器(2)使得系统(1)为一致渐近稳定的, 且控制器的增益为

$$\begin{bmatrix} D_c\ C_c \\ B_c\ A_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 7.84 & 8.23 & 23.42 \\ 3.30 & 2.43 & 28.52 \\ -4.12 & -4.67 & -26.75 \end{bmatrix}.$$

令初始条件$x'(t) = [1\ \ 2\ \ -1\ \ -2]$, 闭环系统的状态轨线如图1所示. 由此可知, 在动态反馈控制器作用下, 闭环系统是渐近稳定的.

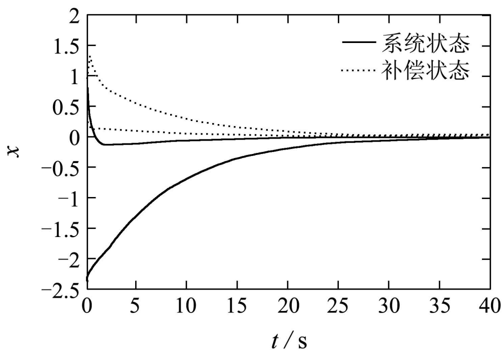

图 1 闭环系统状态轨线

Fig. 1 State trajectory of closed-loop system

5 结论 (Conclusion)

本文考虑了分布时滞系统动态反馈控制器的设计问题. 采用中立型模型变换并与控制参数化相结合, 给出了时滞相关的, 可有效求解的控制器设计方法. 仿真算例说明了方法的有效性. 本文方法的不足在于算子$\boldsymbol{G}$ 的稳定性不受控制的影响, 从而在一定程度上限制了方法的适用性. 在进一步的研究中有望通过引入自由参数矩阵克服这一缺陷.

参考文献(References):

[1] NICULESCU S. *A Robust Control Approach*[M]. New York: Springer-Verlag, 2001.

[2] 吴立刚, 王常虹, 高会军, 等. 时滞不确定随机系统基于参数依赖Lyapunov函数的稳定性条件[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(4): 607 – 612.
(WU Ligang, WANG Changhong, GAO Huijun, et al. Stability of uncertain stochastic systems with time-varying delays based on parameter–dependent Lyapunov funcitonal[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(4): 607 – 612.)

[3] HE Y, WU M, SHE J H, et al. Parameter-dependent Lyapunov functional for stability of time-delay systems[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2004, 49(5): 828 – 832.

[4] KHARITONOV V L. Robust Stability analysis of time delay systems: a survey[J]. *Annual Review in Control*, 1999, 23(1): 185 – 196.

[5] JEUNG E T, KIM J H, PARK H B. H_∞ output feedback controller design for linear systems with time-varying delayed state[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1998, 43(10): 971 –974.

[6] FIAGBEDZI Y, PEARON A. A multistage reduction technique for feedback stabilizing distributed time-lag systems[J]. *Automatica*, 1987, 23(3): 311 – 326.

[7] GU K. An improved stability criterion for systems with distributed delays[J]. *International Journal of Robust and nonlinear control*, 2003, 19(9): 819 – 831.

[8] YUE D, WON S, KWON O. Delay dependent stability of neutral systems with time delay: an LMI approach[J]. *IEE Proceedings of Control Theory and Applications*, 2003, 150(1): 23 – 27.

[9] ZHENG F, FRANK P M. Robust control of uncertain distributed delay systems with application to the stabilization of combusion in rocket motor chambers[J]. *Automatica*, 2002, 38(3): 487 – 497.

[10] CHOI H H, CHUNG M J. Memoryless H_∞ controler design for linear systems with delayed state and control[J]. *Automatica*, 1995, 31(6): 971 – 979.

[11] XUE X, QIU D. Robust H_∞ compensator design for time-delay systems with norm-bounded time-varying uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2000, 45(7): 1363 – 1369.

[12] XU S, JAM L. A delay-dependent approach to robust H_∞ filtering for uncertain distributed delay systems[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2005, 53(10): 3764 – 3772.

[13] GU K. An intergal inequality in the stability problem of time-delay systems[C] //*Proceeding of IEEE International Symposium on Decision Control*. Sydney, Australia, 2000: 2805 – 281.

作者简介:

钱 伟 (1978—), 男, 博士研究生, 主要从事时滞系统和随机系统稳定性方面的研究, E-mail: way.qian@yahoo.com.cn;

沈国江 (1975—), 男, 博士后, 主要从事智能控制方面的研究;

孙优贤 (1940—), 男, 中国工程院院士,主要从事过程控制理论及应用、鲁棒控制理论及应用、造纸过程模型化等方面的研究.

下 期 要 目