

文章编号: 1000-8152(2005)06-0991-04

含饱和驱动的线性时滞系统的时滞相关鲁棒稳定化

张先明^{1,2}, 吴 敏¹, 余锦华³

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 中南大学 数学科学与计算技术学院, 湖南 长沙 410083;

3. 东京工科大学 工学部, 日本 东京 192-0982)

摘要: 讨论含饱和驱动的线性时滞系统的时滞相关鲁棒稳定化以及控制器的设计问题. 借助于积分不等式, 利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法, 结合 S-过程, 获得了基于 LMI 的可稳定化的时滞相关条件, 同时给出了无记忆控制器的设计方法, 不必对原系统进行任何模型变换. 实例表明, 本文方法所得结论具有较小的保守性.

关键词: 时滞相关; 积分不等式; 饱和驱动; 状态反馈; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A

Delay-dependent robust stabilization of uncertain linear time-varying delay systems containing saturating actuators

ZHANG Xian-ming^{1,2}, WU Min¹, SHE Jin-hua³

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

2. School of Mathematical Science and Computing Technology, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;

3. School of Bionics, Tokyo University of Technology, Tokyo 192-0982, Japan)

Abstract: The delay-dependent robust stabilization of the systems with saturating actuator is discussed. Based on an integral inequality, some new delay-dependent criteria are obtained by using Lyapunov-Krasovskii functional method incorporating with S-procedure, which can guarantee the asymptotical stability of the closed-loop systems via memoryless state feedback. There is no any model transformation required. Finally, a numerical example is given to illustrate that the new results are of less conservativeness than the present ones in literature.

Key words: delay-dependent; integral inequality; saturating actuator; state-feedback; linear matrix inequality(LMI)

1 引言(Introduction)

时滞系统的时滞相关稳定性分析与控制器设计已引起众多学者的广泛关注^[1~4]. 近几年, 关于含饱和驱动的线性时滞系统的时滞相关鲁棒稳定化问题讨论较多, 如文献[5~8]等. 这类问题的研究主要在于两个方面, 其一是如何处理饱和和非线性, 文献[5, 6]将饱和和非线性用多面体来描述, 文献[7]巧妙地结合待设计的控制器得到饱和和非线性的另一种描述等; 其二是借助于各种模型变换^[9], 结合 Lyapunov-Krasovskii 方法, 获得了基于 LMI 的时滞相关条件. 然而这些条件对于系统允许的最大时滞上界仍然具有较大的保守性.

本文利用文献[7]对饱和和非线性的处理方法, 借助文献[10]建立的积分不等式, 利用 Lyapunov-Krasovskii 泛函方法, 获得了系统基于 LMI 的时滞相关稳定化条件, 不必对系统进行模型变换. 同时给出

了无记忆控制器的设计方法. 实例表明, 利用本文方法所获得的时滞相关条件较已有结论具有更小的保守性.

全文沿用如下记号: A^T 表示矩阵 A 的转置的逆, $P > 0$ 表示 P 为对称正定阵, $\mathbb{R}^n$, $\mathbb{R}^{n \times n}$ 分别表示实数域上的 n 维向量空间与 $n \times n$ 矩阵空间, I 表示具有适当维数的单位矩阵, $\text{diag}\{A, B, \dots, C\}$ 表示块对角矩阵.

2 问题描述(Problem statement)

考虑如下含饱和驱动的不确定线性时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + A_1(t)x(t-h_1(t)) + \\ \quad B_1(t)\text{sat}(u(t)) + B_2(t)\text{sat}(u(t-h_2(t))), \\ x(t) = \phi(t), t \in [-\max\{\bar{h}_1, \bar{h}_2\}, 0]. \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态, $u(t) \in \mathbb{R}^m$ 为控制输入, $\phi(t)$ 为初始函数, 时变系统矩阵 $A(t)$,

$A_1(t), B_1(t), B_2(t)$ 具有如下形式:

$$\begin{aligned} (A(t), A_1(t), B_1(t), B_2(t)) = \\ (A, A_1, B_1, B_2) + DF(E_1, E_2, E_3, E_4). \end{aligned}$$

$A, A_1, B_1, B_2, D, E_1, E_2, E_3, E_4$ 为具有适当维数的常数实矩阵, 时变不确定矩阵 F 满足

$$F^T F \leq I. \quad (2)$$

时滞 $h_1(t), h_2(t)$ 满足

$$\begin{aligned} 0 \leq h_1(t) \leq \bar{h}_1, \quad 0 \leq h_2(t) \leq \bar{h}_2, \\ \bar{h}_1 > 0, \quad \bar{h}_2 > 0, \quad \dot{h}_1(t) \leq d < 1. \end{aligned} \quad (3)$$

饱和函数 $\text{sat}(\cdot)$ 定义为

$$\begin{aligned} \text{sat}(u(t)) = \\ [\text{sat}(u_1(t)) \quad \text{sat}(u_2(t)) \quad \cdots \quad \text{sat}(u_m(t))]^T, \\ \text{sat}(u_i(t)) = \begin{cases} \underline{u}_i, & u_i(t) \leq \underline{u}_i < 0, \\ u_i(t), & \underline{u}_i \leq u_i(t) \leq \bar{u}_i, \\ \bar{u}_i, & 0 < \bar{u}_i \leq u_i(t). \end{cases} \end{aligned}$$

引入状态反馈

$$u(t) = 2Kx(t), \quad (4)$$

则系统(1)的闭环系统为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) = \\ (A(t) + B_1(t)K)x(t) + A_1(t)x(t-h_1(t)) + \\ B_2(t)Kx(t-h_2(t)) + B_1(t)\eta_1(t) + B_2(t)\eta_2(t). \end{aligned} \quad (5)$$

其中

$$\begin{aligned} \eta_1(t) &= \text{sat}(2Kx(t)) - Kx(t), \\ \eta_2(t) &= \text{sat}(2Kx(t-h_2(t))) - Kx(t-h_2(t)) \end{aligned}$$

满足

$$\begin{cases} \eta_1^T(t)\eta_1(t) \leq x^T(t)K^TKx(t), \\ \eta_2^T(t-h_2(t))\eta_2(t-h_2(t)) \leq \\ x^T(t-h_2(t))K^TKx(t-h_2(t)). \end{cases} \quad (6)$$

本文讨论的主要问题是: 寻求形如式(4)所示的控制器, 使得闭环系统(5)对所有满足式(2)的容许不确定性均为渐近稳定的时滞相关条件, 同时给出控制器的设计方法. 为此, 先引入如下引理:

引理 1^[10] 设 $x(t)$ 为 $\mathbb{R}^n$ 上具有连续一阶导数的向量函数, 则对 $\forall M_1, M_2 \in \mathbb{R}^{n \times n}, \forall \mathbb{R} > 0, \forall h \geq 0$, 满足不等式

$$\begin{aligned} - \int_{t-h}^t \dot{x}^T(s) R \dot{x}(s) ds \leq \\ \xi^T(t) \begin{bmatrix} M_1^T + M_1 & -M_1^T + M_2 \\ * & -M_2^T - M_2 \end{bmatrix} \xi(t) + \\ h \xi^T(t) \begin{bmatrix} M_1^T \\ M_2^T \end{bmatrix} R^{-1} [M_1 \quad M_2] \xi(t). \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $\xi^T(t) = [x^T(t) \quad x^T(t-h)]$.

引理 2^[11] (S-过程) 设 T_0, T_1, T_2 为对称矩阵, 则 $\xi^T T_0 \xi > 0$ 对 $\forall \xi \neq 0$ s.t. $\xi^T T_1 \xi \geq 0, \xi^T T_2 \xi \geq 0$

成立当且仅当存在 $\tau_1 \geq \tau_2 \geq 0$, 使得 $T_0 - \tau_1 T_1 - \tau_2 T_2 > 0$ 成立.

下面的引理用于讨论系统(1)的鲁棒性.

引理 3^[12] 给定矩阵 $Q = Q^T$, 以及适当维数的矩阵 H, E , 则

$$Q + HFE + E^T F^T H^T < 0,$$

对任意满足 $F^T F \leq I$ 的 F 成立的充要条件是存在 $\epsilon > 0$, 使得 $Q + \epsilon^{-1} H H^T + \epsilon E^T E < 0$.

3 主要结果(Main results)

这一节, 陈述本文的主要结果. 首先考虑系统(1)无不确定性时的标称系统, 此时设 $F = 0$. 定义 $A_K = A + B_1 K, B_K = B_2 K$, 则闭环系统(5)的标称系统为

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_K x(t) + A_1 x(t-h_1(t)) + B_K x(t-h_2(t)) + \\ &B_1 \eta_1(t) + B_2 \eta_2(t). \end{aligned} \quad (8)$$

对于系统(8), 利用引理 1 得到以下定理:

定理 1 给定 $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2 \in \mathbb{R}$. 如果存在 $\bar{P} > 0, \bar{R}_1, \bar{R}_2 > 0, \bar{Q} > 0, \bar{\tau}_1 > 0, \bar{\tau}_2 > 0$, 具有适当维数的矩阵 Y , 使得以下 LMI 成立:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Theta_{11} & \Theta_{12} \\ * & \Theta_{22} \end{bmatrix} < 0. \quad (9)$$

其中

$$\Theta_{11} = \begin{bmatrix} \Sigma_{11} & \Sigma_{12} & \Sigma_{13} & \bar{\tau}_1 B_1 & \bar{\tau}_1 B_2 \\ * & \Sigma_{22} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \Sigma_{33} & 0 & 0 \\ * & * & * & -\bar{\tau}_1 I & 0 \\ * & * & * & * & -\bar{\tau}_2 I \end{bmatrix},$$

$$\Sigma_{11} =$$

$$\bar{A} \bar{P} + \bar{P} \bar{A}^T + B_1 Y + Y^T B_1^T - \lambda_1 \mu_1^{-1} (A_1 \bar{Q} + \bar{Q} A_1^T) -$$

$$\lambda_2 \mu_2^{-1} (B_2 Y + Y^T B_2^T) - \lambda_1^2 \mu_1^{-2} (1-d) \bar{Q},$$

$$\Sigma_{12} = \mu_1^{-1} A_1 \bar{Q} + \bar{P} + \lambda_1 \mu_1^{-1} \bar{Q} + \lambda_1 \mu_1^{-2} (1-d) \bar{Q},$$

$$\Sigma_{22} = -2\mu_1^{-1} \bar{Q} - \mu_1^{-2} (1-d) \bar{Q}, \quad \Sigma_{33} = -2\mu_2^{-1} \bar{P},$$

$$\Sigma_{13} = \mu_2^{-1} B_2 Y + \bar{P} + \lambda_2 \mu_2^{-1} \bar{P},$$

$$\Theta_{12} =$$

$$\begin{bmatrix} \bar{h}_1 \omega_1 & \bar{h}_2 \omega_1 & 0 & 0 & Y^T & -\lambda_2 \mu_2^{-1} Y^T \bar{P} \\ \bar{h}_1 \omega_2 & \bar{h}_2 \omega_2 & \bar{h}_1 \bar{R}_1 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{h}_1 \omega_3 & \bar{h}_2 \omega_3 & 0 & \bar{h}_2 \bar{R}_1 & 0 & \mu_2^{-1} Y^T \\ \bar{h}_1 \bar{\tau}_1 B_1^T & \bar{h}_2 \bar{\tau}_1 B_1^T & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \bar{h}_1 \bar{\tau}_2 B_2^T & \bar{h}_2 \bar{\tau}_2 B_2^T & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$\begin{aligned} \Theta_{22} = \text{diag}(-\bar{h}_1 \bar{R}_1, -\bar{h}_2 \bar{R}_2, -\bar{h}_1 \bar{R}_1, -\bar{h}_2 \bar{R}_2, \\ -\bar{\tau}_1 I, -\bar{\tau}_2 I, -\bar{Q}), \end{aligned}$$

$$\omega_1 = Y^T B_1^T + \bar{P} A^T - \lambda_1 \mu_1^{-1} \bar{Q} A_1^T - \lambda_2 \mu_2^{-1} Y^T B_2^T,$$

$$\omega_2 = \mu_1^{-1} \bar{Q} A_1^T, \quad \omega_3 = \mu_2^{-1} Y^T B_2^T,$$

则闭环系统(8)渐近稳定, 且 $K = Y \bar{P}^{-1}$ (注: 式中

“*”表示对称矩阵的对称项,下同).

证 取 Lyapunov-Krasovskii 泛函

$$V(t) = x^T(t)Px(t) + \int_{t-h_1(t)}^t x^T(s)Qx(s)ds + \sum_{j=1}^2 \int_{-\bar{h}_j}^0 \int_{t+\tau}^t \dot{x}^T(s)R_j \dot{x}(s)dsd\tau.$$

其中 $P, Q, R_j > 0$. 则 $V(t)$ 沿系统(8)的导数为

$$\dot{V}(t) = 2x(t)P\dot{x}(t) + \bar{h}_1 \dot{x}^T(t)R_1 \dot{x}(t) + \bar{h}_2 \dot{x}^T(t)R_2 \dot{x}(t) + x^T(t)Qx(t) - \sum_{j=1}^2 \int_{t-\bar{h}_j}^t \dot{x}^T(s)R_j \dot{x}(s)ds - (1 - \dot{h}_1(t))x^T(t-h_1(t))Qx(t-h_1(t)). \quad (10)$$

由式(3)有

$$-\int_{t-\bar{h}_j}^t \dot{x}^T(s)R_j \dot{x}(s)ds \leq -\int_{t-h_j(t)}^t \dot{x}^T(s)R_j \dot{x}(s)ds.$$

由引理1,对 $\forall M_{i1}, M_{i2} \in \mathbb{R}^{n \times n} (i = 1, 2)$ 有

$$-\int_{t-h_i(t)}^t \dot{x}^T(s)R_i \dot{x}(s)ds \leq \xi^T(t) \begin{bmatrix} M_{i1}^T + M_{i1} & -M_{i1}^T + M_{i2} \\ * & -M_{i2}^T - M_{i2} \end{bmatrix} \xi(t) + \bar{h}_i \xi^T(t) \begin{bmatrix} M_{i1}^T \\ M_{i2}^T \end{bmatrix} R_i^{-1} [M_{i1} \quad M_{i2}] \xi(t).$$

代入式(10),并引入向量

$$\xi(t) = [x^T(t) \quad x^T(t-h_1(t)) \quad x^T(t-h_2(t)) \quad \eta_1^T(t) \quad \eta_2^T(t)]^T,$$

整理式(10),得到

$$\dot{V}(t) \leq \xi^T(t)\Xi\xi(t).$$

其中

$$\Xi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \varphi_{13} & PB_1 & PB_2 \\ * & \varphi_{22} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & \varphi_{33} & 0 & 0 \\ * & * & * & 0 & 0 \\ * & * & * & * & 0 \end{bmatrix} +$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} + \tau_1 K^T K & \varphi_{12} & \varphi_{13} & PB_1 & PB_2 & \bar{h}_1 \bar{A}_K^T & \bar{h}_2 \bar{A}_K^T & \bar{h}_1 M_{11}^T & \bar{h}_2 M_{12}^T \\ * & \varphi_{22} & 0 & 0 & 0 & \bar{h}_1 \bar{A}_1^T & \bar{h}_2 \bar{A}_1^T & \bar{h}_1 M_{21}^T & 0 \\ * & * & \varphi_{33} + \tau_2 K^T K & 0 & 0 & \bar{h}_1 \bar{B}_K^T & \bar{h}_2 \bar{B}_K^T & 0 & \bar{h}_2 M_{22}^T \\ * & * & * & -\tau_1 I & 0 & \bar{h}_1 \bar{B}_1^T & \bar{h}_2 \bar{B}_1^T & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\tau_2 I & \bar{h}_1 \bar{B}_2^T & \bar{h}_2 \bar{B}_2^T & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\bar{h}_1 R_1^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\bar{h}_2 R_2^{-1} & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\bar{h}_1 R_1 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & -\bar{h}_2 R_2 \end{bmatrix} < 0. \quad (12)$$

$$\Gamma_1^T \left(\sum_{j=1}^2 \bar{h}_j R_j \right) \Gamma_1 + \Gamma_2^T R_1^{-1} \Gamma_2 + \Gamma_3^T R_2^{-1} \Gamma_3,$$

$$\Gamma_1 = [A_K \quad A_1 \quad B_K \quad B_1 \quad B_2],$$

$$\Gamma_2 = [M_{11} \quad M_{21} \quad 0 \quad 0 \quad 0],$$

$$\Gamma_3 = [M_{12} \quad 0 \quad M_{22} \quad 0 \quad 0],$$

$$\varphi_{11} = PA_K + A_K^T P + Q + \sum_{j=1}^2 (M_{1j}^T + M_{1j}),$$

$$\varphi_{12} = PA_1 - M_{11}^T + M_{21}, \quad \varphi_{22} = -(1-d)Q - M_{21}^T - M_{21},$$

$$\varphi_{13} = PB_K - M_{12}^T + M_{22}, \quad \varphi_{33} = -M_{22}^T - M_{22}.$$

注意到式(6)等价于

$$\begin{cases} \xi^T(t) \text{diag}(K^T K, 0, 0, -I, 0) \xi(t) \geq 0, \\ \xi^T(t) \text{diag}(0, 0, K^T K, 0, -I) \xi(t) \geq 0. \end{cases} \quad (11)$$

由引理2, $\xi^T(t)\Xi\xi(t) < 0$ 对 $\forall \xi \neq 0, s.t.$ 式(11)

成立当且仅当 $\exists \tau_1 \geq 0, \tau_2 \geq 0$, 使得

$$-\Xi - \tau_1 \text{diag}(K^T K, 0, 0, -I, 0) - \tau_2 \text{diag}(0, 0, K^T K, 0, -I) > 0$$

成立. 于是由 Schur 补^[11], 如果矩阵不等式(12)成立, 则 $\dot{V}(t) < 0$. 由 Lyapunov-Krasovskii 稳定性定理^[14], 知闭环系统(8)渐近稳定.

为从非线性矩阵不等式(12)中解出 K , 令

$$W = \begin{bmatrix} P & 0 & 0 \\ M_{11} & M_{21} & 0 \\ M_{12} & 0 & M_{22} \end{bmatrix}, \quad \bar{A} = \begin{bmatrix} A_K & A_1 & B_K \\ I & -I & 0 \\ I & 0 & -I \end{bmatrix}.$$

取 $M_{11} = \lambda_1 P, M_{21} = \mu_1 Q, M_{12} = \lambda_2 P, M_{22} = \mu_2 P$, 其中 $\mu_1, \mu_2 \neq 0$, 则 W 可逆. 令

$$T = \text{diag}(W^{-1}, \tau_1^{-1}I, \tau_2^{-1}I, I, I, R_1^{-1}, R_2^{-1}),$$

对式(12)左乘 T^T 右乘 T , 然后记 $\bar{P} = P^{-1}, \bar{R}_1 = R_1^{-1}, \bar{R}_2 = R_2^{-1}, \bar{Q} = Q^{-1}, \bar{\tau}_1 = \tau_1^{-1}, \bar{\tau}_2 = \tau_2^{-1}$. 如果 LMI(9)成立, 则 $T^T \Psi T < 0$, 于是 $\Psi < 0$, 从而闭环系统(8)渐近稳定, 且 $K = Y\bar{P}^{-1}$. 证毕.

下面的定理给出了系统(1)的闭环系统(5)的时滞相关鲁棒稳定化条件.

定理 2 给定 $\lambda_1, \lambda_2, \mu_1, \mu_2 \in \mathbb{R}$. 如果存在 $\bar{P} > 0, \bar{R}_1, \bar{R}_2 > 0, \bar{Q} > 0$, 具有适当维数的矩阵 Y , 以及正数 $\bar{\tau}_1, \bar{\tau}_2, \varepsilon > 0$ 使得以下 LMI 成立:

$$\begin{bmatrix} \Phi & \varepsilon H & E^T \\ * & -\varepsilon I & 0 \\ * & * & -\varepsilon I \end{bmatrix} < 0.$$

其中

$$H =$$

$$[D^T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ \bar{h}_1 D^T \ \bar{h}_2 D^T \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$E =$$

$$[\delta_1 \ \delta_2 \ \delta_3 \ \bar{\tau}_1 E_3 \ \bar{\tau}_2 E_4 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T,$$

$$\delta_1 = E_1 \bar{P} + E_3 Y - \lambda_1 \mu_1^{-1} E_2 \bar{Q} - \lambda_2 \mu_2^{-1} E_4 Y,$$

$$\delta_2 = \mu_1^{-1} E_2 \bar{Q}, \delta_3 = \mu_2^{-1} E_4 Y,$$

Φ 的定义如式(9).

则闭环系统(5)鲁棒渐近稳定, 且 $K = Y\bar{P}^{-1}$.

证 利用定理 1 及引理 3 不难证得, 在此从略.

4 数值例子(Numerical example)

例 1 考虑如下具输入饱和的线性时滞系统^[6]

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A_1 x(t - h_1(t)) + B_1 \text{sat}(u(t)). \quad (13)$$

其中

$$0 \leq h_1(t) \leq h, A = \begin{bmatrix} 0.5 & -1 \\ 0.5 & -0.5 \end{bmatrix},$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0.6 & 0.4 \\ 0 & -0.5 \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$\text{sat}(u_j(t)) = \text{sgn}(u_j(t)) \min(5, |u_j(t)|).$$

文献[6]得到系统(13)可稳定化的最大时滞界限 $h \leq 0.35$. 利用本文定理 1, 取 $\lambda_1 = -0.9, \mu_1 = 0.1$ 得到系统(13)可稳定化的最大时滞界限 $h \leq 0.61$, 并且当 $h = 0.61$ 时相应的控制器为 $u(t) = [-165.8843 \ -42.1262]x(t)$, 可见本文的结论具有更小的保守性.

5 结论(Conclusion)

本文借助于积分不等式, 讨论了具饱和驱动线性时滞系统的时滞相关鲁棒稳定化问题, 获得了基于 LMI 的时滞相关条件, 同时给出了无记忆控制器的设计方法. 实例表明, 利用本文方法所获得的结论较以往文献具有更小的保守性.

参考文献(References):

- [1] NICULESCU S. *Delay Effects on Stability: A Robust Control Approach* [M]. London: Springer-Verlag, 2001.
- [2] GU K, KHARITONOV L, CHEN J. *Stability of Time-Delay Systems* [M]. Boston: Birkhauser, 2003.
- [3] RICHARD J. Time-delay systems: an overview of some recent advances and open problem [J]. *Automatica*, 2003, 39(10): 1667 - 1694.
- [4] 张先明, 吴敏, 何勇. 中立型线性时滞系统的时滞相关稳定性 [J]. *自动化学报*, 2004, 30(4): 624 - 628.
(ZHANG Xianming, WU Min, HE Yong. Delay dependent stability for linear neutral type systems with delay [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2004, 30(4): 624 - 628.)
- [5] HU J S, LIN Z L. *Control Systems with Actuator Saturation: Analysis and Design* [M]. Boston, MA: Birkhauser, 2001.
- [6] CAO Y Y, LIN Z L, HU T S. Stability analysis of linear time-delay systems subject to input saturation [J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems: Fundamental Theory and Application*, 2002, 49(2): 233 - 240.
- [7] SU H Y, LIU F, CHU J. Robust stabilisation of uncertain time-delay systems containing saturating actuators [J]. *IEE Proc D: Control Theory and Applications*, 2001, 148(4): 323 - 328.
- [8] NICULESCU S I, DION J M, DUGRAD L. Robust stabilization for uncertain time-delay systems containing saturating actuators [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1996, 41: 742 - 747.
- [9] FRIDMAAN E, SHAKED U. Delay-dependent stability and H-infinite control: constant and time-varying delays [J]. *Int J Control*, 2003, 76(1): 48 - 60.
- [10] 张先明, 吴敏, 何勇. 不确定多时变时滞系统的时滞相关鲁棒控制 [J]. *控制与决策*, 2004, 19(5): 496 - 500.
(ZHANG Xianming, WU Min, HE yong. Delay dependent robust control for linear systems with multiple time-varying delays and uncertainties [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 496 - 500.)
- [11] BOYD S, EL GHAOU L, FERON E, et al. *Linear Matrix Inequalities in System and Control* [M]. Philadelphia: SIAM Press, 1994.
- [12] XIE L H. Output feedback H_∞ control of systems with parameter uncertainty [J]. *Int J Control*, 1996, 63(4): 741 - 750.

作者简介:

张先明 (1968—), 男, 中南大学博士研究生, 主要研究方向为时滞系统、广义系统的鲁棒控制, E-mail: zhangxmy@yahoo.com.cn;

吴敏 (1963—), 男, 博士生导师, 主要研究方向为鲁棒控制、智能控制和过程控制, E-mail: min@csu.edu.cn;

余锦华 (1963—) 男, 东京工业大学副教授, 主要研究方向为鲁棒控制、智能控制和过程控制.