文章编号: 1000-8152(2004)02-0267-04

不确定关联时滞系统的鲁棒 H_∞ 滤波

张群亮[1],关新平[2]
(1. 上海交通大学 自动化研究所,上海 200030; 2. 燕山大学 电气工程学院,河北 秦皇岛 066004)

摘要: 考虑一类不确定关联时滞系统,其中的不确定性满足范数有界条件,以子系统输出作为输入,分别为每个子系统设计一个线性滤波器.通过将系统的状态向量和滤波误差向量组合成一个新的增广向量,原系统状态方程和滤波误差方程就可以组成一个新的增广系统.如果可以设计滤波器参数,使得干扰噪声到增广系统输出的增益为最小,则噪声对系统估计的影响也就降为最低,受噪声影响的状态向量就可以恢复出来.这样,原系统的滤波问题就转化为最小化增广系统增益问题.通过选择一个适当的 Lyapunov 函数,并基于 Lyapunov 稳定性定理,得到了滤波器存在的充分条件.为了简化滤波器设计过程,将上述充分条件的未知参数矩阵定义为一个新的变换矩阵,在此基础上,实施了一系列巧妙的矩阵等价变换,同时定义了几个新的矩阵变量,将原充分条件化成了一组易于求解的线性矩阵不等式(LMI).使用 Matlab 的 LMI 工具箱,可以对上述 LMIs 直接求解,最后的数值算例验证了所给设计方法的有效性.

关键词: 关联时滞系统; 鲁棒 H_∞ 滤波; 不确定性; 线性矩阵不等式
中图分类号: O511 **文献标识码**: A

Robust H-infinity filtering for uncertain interconnected time-delay systems

ZHANG Qun-liang[1], GUAN Xin-ping[2]
(1. Institute of Automation, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;
2. Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Hebei Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: A class of uncertain interconnected time-delay systems is considered in the paper, where the uncertainties are assumed to satisfy the boundedness condition of the norm. For such a class of systems, a linear filter is designed for each subsystem by using the outputs of subsystems as inputs. With the new augmented vector composed of both the state vector and the filtering error vector, a new augmented system is derived containing the system state equations and filtering error equations. If the filter parameters can be designed to minimize the gain from disturbance noise to augmented system output, the influence of noise on the state estimate is the lowest, and the real state can be resumed at the same time. Under such conditions, the problem of filtering for the original system is equivalent to minimizing H-infinity gain of the augmented system. By selecting a proper Lyapunov function, the sufficient conditions for existence of the filter are derived on the basis of the Lyapunov stability theorem. In order to simplify the process of designing filter parameters, a new matrix transformation is introduced for the uncertain parameter matrices in sufficient conditions, and via a series of equivalent transformations, the above sufficient conditions are transformed to a system of easily solvable LMIs. Based on the LMI toolbox of Matlab software, these LMIs are directly solved. Finally, the numerical simulation proves the validity of the main results.

Key words: interconnected time-delay systems; robust H-infinity filtering; uncertainty; LMI

1 引言(Introduction)

最近,时滞系统的滤波研究引起了众多学者的广泛关注[1].文献[1]研究了一类离散时滞系统的鲁棒卡尔曼滤波问题,基于 Riccati 方程的方法,得到了滤波器存在的充分条件;而文献[2]考虑了一类连续时滞系统的卡尔曼滤波问题,利用协方差配置理论,分别给出了设计滤波器的 Riccati 方程方法和 LMI 方法.为了使得滤波器具有良好的收敛性能,文献[3]研究了一类非线性时滞系统的指数滤波问题,并给出了设计滤波器的 Riccati 不等式方法.然而,上面的结果都要求系统的噪声特性是已知的,但在实际场合,作者们常常无法预知噪声信号的统计规律.为此,文献[4]研究了时滞系统的鲁棒 H_∞ 滤波问题;文献[5]将文献[4]的结果推广到多时滞系统,分析了不确定多时滞系统的鲁棒 H_∞ 滤波问题,并给出了相应的滤波器的设计方法.

不确定关联时滞系统是实际工程中一类重要的系统,有关不确定关联时滞系统的控制方面的结果

收稿日期:2001-11-29; 收修改稿日期:2003-02-27.
基金项目:国家自然科学基金项目(60174010).

已有很多[6],但关于滤波方面的结果还很鲜见.由于关联项的出现,使用文献[2~5]的方法无法对关联时滞系统进行滤波.鉴于此,本文研究了一类不确定关联时滞系统的鲁棒 H_∞ 滤波问题,通过对每个子系统设计一个不含关联项的滤波器,使得每个子系统都能达到良好的滤波效果.最后的结果以 LMI 的形式给出,利用 Matlab 的软件,可以很方便地设计系统所需要的滤波器.

2 问题描述(Problem description)

考虑一类不确定关联时滞组合系统,其第 i 个子系统的状态方程如下:

$$\begin{cases}\dot{x}_i(t)=(A_i+\Delta A_i)x_i(t)+\sum\limits_{j=1}^{N}(A_{ij}+\\ \qquad \Delta A_{ij})x_j(t-\tau_{ij})+B_iw_i(t),\\ y_i(t)=(C_i+\Delta C_i)x_i(t)+D_iw_i(t),\\ z_i(t)=L_ix_i(t),\\ x_i(t)=0,\ t\in[-\tau_{ij}\quad 0],\ i,j=1,2,\cdots,N.\end{cases} \tag{1}$$

其中: $x_i(t)\in\mathbb{R}^{n_i}, y_i(t)\in\mathbb{R}^{m_i}, z_i(t)\in\mathbb{R}^{q_i}$ 分别是第 i 个子系统的状态向量、输出向量和被估计量; $w_i(t)\in L_2[0,\infty)$ 是系统的噪声输入信号,各矩阵维数适当, τ_{ij} 为关联时滞;参数不确定性 $\Delta A_i,\Delta A_{ij},\Delta C_i$ 满足

$$\begin{cases}\begin{bmatrix}\Delta A_i\\ \Delta C_i\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_{i1}\\ H_{i2}\end{bmatrix}F_i(t)E_{i1},\ \Delta A_{ij}=M_i\Delta_{ij}(t)N_{ij},\\ F_i^{\mathrm T}F_i\leqslant I,\ \Delta_{ij}^{\mathrm T}\Delta_{ij}\leqslant I,\end{cases} \tag{2}$$

而 $H_{i1},H_{i2},M_i,N_{ij}(i,j=1,2,\cdots,N)$ 为适当维数的常数矩阵.

对于关联时滞系统(1),考虑如下线性滤波器

$$\begin{aligned}&\dot{\hat{x}}_i(t)=\hat{A}_i\hat{x}_i(t)+\hat{B}_iy_i(t),\\ &\hat{z}_i(t)=\hat{L}_i\hat{x}_i(t),\end{aligned}\qquad i=1,2,\cdots,N. \tag{3}$$

选择参数 $\hat{A}_i,\hat{B}_i$ 和 $\hat{L}_i$,使得每一个子系统的滤波误差 $\tilde{z}_i(t)=z_i(t)-\hat{z}_i(t)$,对于所有的可容许参数不确定性均小于给定的 γ_i 界,且使得该上界的平方和为最小.

为了书写方便,定义如下的矩阵和状态变量

$$\begin{cases}A_{fi}=\begin{bmatrix}A_i & 0\\ \hat{B}_iC_i & \hat{A}_i\end{bmatrix},\ B_{fi}=\begin{bmatrix}B_i\\ \hat{B}_iD_i\end{bmatrix},\\ A_{fij}=\begin{bmatrix}A_{ij}\\ 0\end{bmatrix},\ H_{fi}=\begin{bmatrix}H_{i1}\\ \hat{B}_iH_{i2}\end{bmatrix},\ M_{fi}=\begin{bmatrix}M_i\\ 0\end{bmatrix},\end{cases} \tag{4}$$

$$\begin{cases}E_{fi}=[E_{i1}\quad 0],\ U_j=[I_j\quad 0],\ L_{fi}=[L_i\quad -\hat{L}_i],\\ x_{fi}(t)=[x_i^{\mathrm T}(t)\quad \hat{x}_i^{\mathrm T}(t)]^{\mathrm T}.\end{cases} \tag{5}$$

则由式(1)、(3)组成的增广系统可以记为

$$\begin{cases}\dot{x}_{fi}(t)=\\ (A_{fi}+H_{fi}F_i(t)E_{fi})x_{fi}(t)+\\ \sum\limits_{j=1}^{N}(A_{fij}+M_{fi}\Delta_{ij}(t)N_{ij})U_jx_{fj}(t-\tau_{ij})+B_{fi}w_i(t),\\ z_{fi}=L_{fi}x_{fi}(t).\end{cases} \tag{6}$$

3 主要结论(Main results)

本节中,将给出系统(1)的鲁棒 H_∞ 滤波器存在的充分条件,并给出设计滤波器的 LMI 方法.为了以下叙述和证明的方便,简记

$$\begin{aligned}\hat{A}_{fi}&=A_{fi}+H_{fi}F_i(t)E_{fi},\\ \hat{A}_{fij}&=A_{fij}+M_{fi}\Delta_{ij}(t)N_{ij}.\end{aligned} \tag{7}$$

定理 1 对于不确定关联时滞组合系统(1),给定 $R_i>0,\gamma_i>0$,则滤波器(3)存在的充分条件是:存在正定对称矩阵 $P_i\in\mathbb{R}^{2n_i\times 2n_i}, Q_{ij}\in\mathbb{R}^{n_j\times n_j}$,使得下面的矩阵不等式成立:

$$\Theta_i=\begin{bmatrix}\hat{A}_{fi}^{\mathrm T}P_i+P_i\hat{A}_{fi}+\sum\limits_{j=1}^{N}U_i^{\mathrm T}Q_{ji}U_i+L_{fi}^{\mathrm T}L_{fi} & \Phi_{i1} & P_iB_{fi}\\ \Phi_{i1}^{\mathrm T} & -J_{i1} & 0\\ B_{fi}^{\mathrm T}P_i & 0 & -\gamma_i^2I\end{bmatrix}<0, \tag{8}$$

$$U_iP_iU_i^{\mathrm T}<\gamma_i^2R_i. \tag{9}$$

其中

$$\Phi_{i1}=[P_i\hat{A}_{fi1}\quad\cdots\quad P_i\hat{A}_{fiN}],$$
$$J_{i1}=\mathrm{diag}\ \{Q_{i1}\quad\cdots\quad Q_{iN}\},$$

U_i 满足式(5).

证 选取李雅普诺夫函数为

$$V(x_{fi}(t),t)=\sum_{i=1}^{n}\{x_{fi}^{\mathrm T}P_ix_{fi}+\sum_{j=1}^{N}\int_{-\tau_{ij}}^{t}x_{fj}^{\mathrm T}(s)U_j^{\mathrm T}Q_{ij}U_jx_{fj}(s)\mathrm{d}s\}. \tag{10}$$

求导得

$$\begin{aligned}&\dot{V}(x_{fi}(t),t))=\\ &\sum_{i=1}^{N}\{x_{fi}^{\mathrm T}(\hat{A}_{fi}^{\mathrm T}P_i+P_i\hat{A}_{fi}+\sum_{j=1}^{N}U_i^{\mathrm T}Q_{ji}U_i)x_{fi}+\\ &2\sum_{j=1}^{N}x_{fi}^{\mathrm T}P_i\hat{A}_{fij}x_j(t-\tau_{ij})+\\ &2x_{fi}^{\mathrm T}P_iB_{fi}w_i(t)-\sum_{j=1}^{N}x_j^{\mathrm T}(t-\tau_{ij})Q_{ij}x_j(t-\tau_{ij})\}.\end{aligned} \tag{11}$$

考虑泛函指标

$$J=\sum_{i=1}^{N}(\int_0^{\infty}(z_{fi}^{\mathrm T}(t)z_{fi}(t)-\gamma_i^2w_i^{\mathrm T}(t)w_i(t)\mathrm{d}t), \tag{12}$$

$$J = \sum_{i=1}^{N}\left(\int_0^\infty (z_{fi}^{\mathrm T} z_{fi} - \gamma_i^2 w_i^{\mathrm T} w_i(t) + \dot V(x_{fi}(t),t)\mathrm{d}t\right) + V(x_{fi}(0),0) - V(x_{fi}(\infty),\infty). \qquad (13)$$

由于 $V(x_f(\infty),\infty) \geqslant 0$, 所以有下式成立:

$$J \leqslant \sum_{i=1}^{N}\int_0^\infty \eta_i^{\mathrm T}(t)\Gamma_i\eta_i(t)\mathrm{d}t + V(x_{fi}(0),0). \qquad (14)$$

其中

$\eta_i(t) = [x_{fi}^{\mathrm T}(t)\ \ x_{fi1}^{\mathrm T}(t-\tau_{i1})\ \cdots\ x_{fiN}^{\mathrm T}(t-\tau_{iN})\ \ w_i^{\mathrm T}(t)]^{\mathrm T}$.

当 $\Gamma_i < 0$ 时,则有

$$\int_0^\infty z_{fi}^{\mathrm T}(t)z_{fi}(t)\mathrm{d}t \leqslant \gamma_i\left(\int_0^\infty w_i^{\mathrm T}(t)w_i(t)\mathrm{d}t + \sigma\right)$$

成立,即滤波误差系统(6)满足 H_∞ 性能指标.其中 $\sigma = x_i^{\mathrm T}(0)R_i x_i(0)$ 是和系统初始条件有关的一个数.由不等式的基本定理可知,式(8)成立当且仅当存在常数 $\varepsilon_{i1} > 0, \varepsilon_{i2} > 0 (i = 1,2,\cdots,N)$,使得下面的矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Omega_i & P_iA_{fi} & \cdots & P_iA_{iN} & PB_i & L_{fi} & P_iH_{fi} & 0 & P_iM_{fi} \\ * & -Q_{i1} & \cdots & 0 & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{i1}N_{i1}^{\mathrm T} & 0 \\ * & * & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ * & * & * & -Q_{iN} & 0 & 0 & 0 & \varepsilon_{i1}N_{iN}^{\mathrm T} & 0 \\ * & * & * & * & -\gamma_i^2 I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & -\varepsilon_{i2}I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & -\varepsilon_{i1}I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & * & * & -\varepsilon_{i1}I \end{bmatrix} < 0. \qquad (15)$$

其中 $\Omega_i = A_{fi}^{\mathrm T}P_i + P_iA_{fi} + \sum_{j=1}^{N} U_i^{\mathrm T}Q_{ji}U_i + \varepsilon_{i2}E_{fi}^{\mathrm T}E_{fi}$.

式(15)是一个非线性矩阵不等式,在实际中很难求解,因此考虑通过矩阵变换将其化为 LMI 的形式.定义如下矩阵变量

$$P_i = \begin{bmatrix} Y_i & N_i \\ N_i^{\mathrm T} & * \end{bmatrix},\ P_i^{-1} = \begin{bmatrix} X^{-1} & M_i \\ M_i^{\mathrm T} & * \end{bmatrix}, \qquad (16a)$$

$$\Pi_{i1} = \begin{bmatrix} X^{-1} & I_i \\ M_i^{\mathrm T} & 0_i \end{bmatrix},\ \Pi_{i2} = \begin{bmatrix} I_i & Y_i \\ 0_i & N_i^{\mathrm T} \end{bmatrix}. \qquad (16b)$$

其中:X_i, Y_i 为正定对称矩阵;M_i, N_i 为非奇异矩阵;显然 $P_i\Pi_{i1} = \Pi_{i2}$.同时,为了保证 P_i 的正定性,令

$$Y_i - X_i > 0. \qquad (17)$$

取 $\Psi_i = \mathrm{diag}\ \{\Pi_{i1}, \underbrace{I, I, \cdots, I}_{N+5}\}$,对式(15)两端分别左乘和右乘 $\Psi_i^{\mathrm T}, \Psi_i$,再经过一些等价变换,可得定理 2.

定理 2 　对于关联时滞组合系统(1),给定 $R_i > 0, \gamma_i > 0$,如果存在对称矩阵 $X_i > 0, Y_i > 0$,以及常数 $\varepsilon_{i1} > 0, \varepsilon_{i2} > 0$,使得下面的 LMI 成立

$$\begin{bmatrix} H_{i1} & H_{i2} & H_{i3} \\ * & H_{i4} & H_{i5} \\ * & * & H_{i6} \end{bmatrix} < 0, \qquad (18)$$

$$Y_i < \gamma_i^2 R_i, \qquad (19)$$

则式(3)是系统(1)的一个滤波器.其中

$$H_{i1} = \begin{bmatrix} X_iA_i + A_i^{\mathrm T}X_i + \sum_{j=1}^{N} Q_{ji} + \varepsilon_{i2}E_{i1}^{\mathrm T}E_{i1} & A_i^{\mathrm T}Y_i + \tilde A_{fi}^{\mathrm T} + C_i^{\mathrm T}\tilde B_{fi}^{\mathrm T} + X_iA_i + \sum_{j=1}^{N} Q_{ji} + \varepsilon_{i2}E_{i1}^{\mathrm T}E_{i1} \\ Y_iA_i + \tilde B_{fi}C_i + \tilde A_{fi} + A_iX_i + \sum_{j=1}^{N} Q_{ji} + \varepsilon_{i2}E_{i1}^{\mathrm T}E_{i1} & A_i^{\mathrm T}Y_i + Y_iA_i + \tilde B_{fi}C_i + C_i^{\mathrm T}\tilde B_{fi}^{\mathrm T} + \sum_{j=1}^{N} Q_{ji} + \varepsilon_{i2}E_{i1}^{\mathrm T}E_{i1} \end{bmatrix}, \qquad (20)$$

$$H_{i2} = \begin{bmatrix} X_iA_{fi1} & \cdots & X_iA_{fiN} & X_iB_i & L_i^{\mathrm T} - \tilde L_{fi}^{\mathrm T} & X_iH_{i1} \\ Y_iA_{fil} & \cdots & Y_iA_{fiN} & Y_iB_i + \tilde B_{fi}D_i & L_i^{\mathrm T} & Y_iH_{i1} + \tilde B_{fi}H_{i2} \end{bmatrix}, \qquad (21)$$

$$H_{i3} = \begin{bmatrix} 0 & X_iM_i \\ 0 & Y_iM_i \end{bmatrix},\ H_{i5} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{i1}N_{i1} & \varepsilon_{i1}N_{i2} & \cdots & \varepsilon_{i1}N_{iN} \\ 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix},\ H_{i6} = \begin{bmatrix} -\varepsilon_{i1}I & 0 \\ 0 & -\varepsilon_{i1}I \end{bmatrix}, \qquad (22)$$

$$H_{i4} = \mathrm{diag}\ \{-Q_{i1}, -Q_{i2}, \cdots, -Q_{iN}, -\gamma_i^2 I, -I, -\varepsilon_{i2I}\}. \qquad (23)$$

在上面的式子里,X_i, Y_i 是正定对称矩阵,且满足条件(17),这样就保证了 P_i 的正定性,而参数 $\tilde A_{fi} = N_i\hat A_iM_i^{\mathrm T}X_i, \tilde B_{fi} = N_i\hat B_iC_i, \tilde L_{fi} = \hat L_iM_i^{\mathrm T}X_i$.

根据传递函数的等价性以及 $N_iM_l^{\mathrm T} = I_i - Y_iX_i^{-1}$,则有下式成立:

$$H_i(s) = \hat L_i(sI - \hat A_i)\hat B_i = \tilde L_{fi}(s(X_i - Y_i) - \tilde A_{fi})^{-1}\tilde B_{fi}. \qquad (24)$$

滤波器参数可以选取为

$$\hat A_i = (X_i - Y_i)^{-1}\tilde A_{fi},\ \hat B_i = (X_i - Y_i)^{-1}\tilde B_{fi},\ \hat L_i = \hat L_{fi}. \qquad (25)$$

为了更好地抑制噪声 $w_i(t)$,希望 γ_i 尽可能地小,但是在设计关联系统的滤波器时,很难使得每一个 γ_i 都为最小,这样通过定义一个综合指标,即:使得 γ_i 平方和的平方根 $\gamma_{\min}$ 为最小.在实际设计当中,可以求解以下LMI优化问题:

$$\min \sum_{i=1}^{N} \rho_i$$

$$\begin{cases}\text{inequation } (18),\\ \text{inequation } (19).\end{cases} \tag{26}$$

其中 $\rho_i = \gamma_i^2 (i = 1,2,\cdots,N)$. 这样可以获得全局意义下的最优滤波器.

4 数值算例(Numerical example)

本节中给出一个数值算例,用以说明本文结果的有效性.沿用前面的符号,系统的各参数如下:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -1.5 & 8 \\ -7 & -8 \end{bmatrix},\ A_{11} = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.3 \\ -0.2 & 0.3 \end{bmatrix},$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} -0.1 & 0.3 \\ 0 & 0.8 \end{bmatrix},\ B_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix},\ C_1 = \begin{bmatrix} -0.11 \\ -0.15 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} -5 & 2 \\ -3 & -7 \end{bmatrix},\ A_{21} = \begin{bmatrix} 0.3 & 0.2 \\ -0.8 & 0.01 \end{bmatrix},$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} 0.12 & 0.3 \\ -0.21 & 0.1 \end{bmatrix},\ B_2 = \begin{bmatrix} 0.24 \\ 1 \end{bmatrix},$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},\ H_{11} = \begin{bmatrix} 0.02 \\ 0.1 \end{bmatrix},\ H_{21} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.01 \end{bmatrix},$$

$$R_1 = \begin{bmatrix} 0.0003 & 0 \\ 0 & 0.0033 \end{bmatrix},\ R_2 = \begin{bmatrix} 0.0028 & 0 \\ 0 & 0.0007 \end{bmatrix},$$

$$E_{21} = [0 \quad -0.02],\ M_1 = [0.2 \quad 0.01]^{\mathrm{T}},$$

$$M_2 = [0.01 \quad 0.03]^{\mathrm{T}},\ N_{22} = [0.3 \quad 0.01],$$

$$D_1 = 0.4,\ N_{11} = [-0.2 \quad 0.01],$$

$$N_{12} = [0.03 \quad 0.01],\ N_{21} = [0.1 \quad 0.1],$$

$$L_1 = [1 \quad 1],\ L_2 = [1 \quad 1],\ H_{12} = 0.02,$$

$$H_{22} = 0.01,\ D_2 = 0.4,\ E_{11} = [0.1 \quad 0].$$

将上面的参数代入到式(26),利用MATLAB进行求解,可以得到如下的优化解:

$$\hat{A}_1 = \begin{bmatrix} -1.6321 & 8.1306 \\ -6.8832 & -7.7953 \end{bmatrix},$$

$$\hat{A}_2 = \begin{bmatrix} -4.8719 & 2.0034 \\ -3.2050 & -10.0495 \end{bmatrix},$$

$$\hat{B}_1 = \begin{bmatrix} 2.6367 \\ -0.0008 \end{bmatrix},\ \hat{B}_2 = \begin{bmatrix} 0.3747 \\ 2.7897 \end{bmatrix},$$

$$\hat{L}_1 = [0.0909 \quad 0.0909],$$

$$\hat{L}_2 = [0.0833 \quad 0.0833],\ \gamma_{\min} = 0.037.$$

从上面求得的优化解可以看出,设计的滤波器具有良好的滤波性能.

5 结论(Conclusion)

本文研究了一类不确定关联时滞系统的鲁棒 H_∞ 滤波问题.通过对每一个子系统设计一个不含有关联项的线性滤波器,使得每一个误差子系统均满足一定的 H_∞ 性能指标.最后的结果以LMI的形式给出,通过求解LMI优化问题,可以得到性能良好的分散滤波器.

参考文献(References):

[1] MAHMOUD M S, XIE L, SOH Y C. Robust Kalman filtering for discrete state-delay systems [J]. *IEE Proc-Control Theory and Applications*, 2000, 147(6):613 - 618.

[2] MAHMOUD M S, Al-MUHTAIRI N F, BINGULAC S. Robust Kalman filtering for continuous time-lag systems [J]. *Systems & Control Letters*, 1999, 38(5):309 - 319.

[3] WANG Z D, BURNHAM K J. Robust filtering for a class of stochastic uncertain nonlinear time-delay systems via exponential state estimation [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2001, 49(4):794 - 804.

[4] PILA W, SHAKED U, de SOUZA C E. H_∞ filtering for continuous-time linear systems with delay [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(7):1412 - 1417.

[5] de SOUDA C E, PALHARES R M, PERES P L D. Robust H_∞ filter design for uncertain linear systems with multiple time-varying state delays [J]. *IEEE Trans on Signal Processing*, 2001, 49(3):569 - 576.

[6] 关新平,张群亮,段广仁.区间时滞组合系统的鲁棒分散 H_∞ 控制[J].控制与决策,2002,17(3):328 - 331.
(GUAN Xinping, ZHANG Qunliang, DUAN Guangren. Robust decentralized H_∞ control for interval time-delay interconnected systems [J]. *Control and Decision*, 2002,17(3): 328 - 331.)

作者简介:

张群亮 (1978 —),男.上海交通大学自动化所博士研究生.研究方向为鲁棒控制与滤波.E-mail: hbqlzhang@163.com;

关新平 (1963 —),男.博士,燕山大学电气工程学院自动化系教授.研究方向为时滞系统,混沌系统,ATM网络拥塞控制.E-mail: xpguan@ysu.edu.cn.