第 28 卷 第 2 期
2002 年 3 月

自 动 化 学 报
ACTA AUTOMATICA SINICA

Vol. 28, No. 2
Mar., 2002

短文

非线性扰动不确定时滞系统时滞相关鲁棒观测器设计[1)]

关新平[1] 罗小元[1] 刘奕昌[1] 段广仁[2]

[1](燕山大学电气工程学院 秦皇岛 066004)

[2](哈尔滨工业大学控制工程系 哈尔滨 150001)

(E-mail: xpguan@ysu.edu.cn)

摘 要 研究一类具有非线性扰动的不确定时滞系统的时滞相关鲁棒稳定性及其基于观测器的时滞相关鲁棒控制问题. 将线性矩阵不等式(LMI, linear matrix inequality)与数值不等式(AVI, algebraic value inequality)方法相结合给出了开环系统渐近稳定及其指数稳定的时滞相关条件. 并设计了系统的观测器, 给出了该系统基于观测器的时滞相关可镇定条件.

关键词 不确定时滞系统, 非线性扰动, 时滞相关, 状态观测器, 指数稳定

中图分类号 TP273

DELAY-DEPENDENT ROBUST STATE OBSERVER DESIGN FOR TIME-DELAY UNCERTAIN SYSTEMS WITH NONLINEAR PERTURBATIONS

GUAN Xin-Ping[1] LUO Xiao-Yuan[1] LIU Yi-Chang[1] DUAN Guang-Ren[2]

[1](*Institute of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao* 066004)

[2](*Department of Control Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150001)

(E-mail: xpguan@ysu.edu.cn)

Abstract This paper is concerned with the problem of delay-dependent robust stability and observer-based robust control of a class of time-delay uncertain systems with nonlinear perturbations. The robustly stable or exponentially stable sufficient conditions which depend on the size of delay of systems are discussed for open-loop systems by using linear matrix inequality (LMI) incorporated with algebraic value inequality (AVI) approach. Furthermore, we design the state observer of the system and obtain delay-dependent controllable sufficient conditions.

Key words Time-delay uncertain system, nonlinear perturbation, delay-dependent, state observer, exponential stability

1) 国家自然科学基金(69504002)和国家教委跨世纪人才基金资助

收稿日期 1999-11-25 收修改稿日期 2001-09-03

1 引言

由于传输和测量的不灵敏性等因素而使系统中出现的时滞是影响系统稳定性的一个重要因素，因此，近年来时滞系统的稳定性及控制问题引起了广泛的研究[1~3]. 但这些研究都没有充分考虑系统时滞的影响，保守性较大[4]. 近年来，一些学者着手将时滞的大小引入到系统稳定性的判别条件中，并也取得了一些颇有价值的结果[4~7]. 但他们所获得的结果均是在系统状态可完全测量的假定下得到的，由于实际系统的复杂性，该假设往往难以满足. 很明显，一个较方便的解决途径是构造系统的状态观测器[8,9]，并利用其观测状态来进行状态反馈控制，而目前关于观测器的时滞相关鲁棒控制领域的研究报道尚未见到.

本文应用 LMI 与 AVI 相结合的方法，研究一类非线性扰动不确定时滞系统时滞相关鲁棒稳定性及其基于观测器的时滞相关鲁棒控制问题. 在分析开环系统稳定性的前提下，针对生产实际中广泛存在系统状态不可完全测量的情况，研究了系统基于状态观测器的时滞相关鲁棒控制问题. 文中同时给出了系统渐近稳定和具指数衰减度的稳定性条件，由于结论由 LMI 的形式给出，且所要求解的 LMI 变量与时滞的大小有关，因而该结论具有易于验证且保守性小等优点. 所获得的结果推广和改进了已有文献的结论.

2 系统描述

考虑如下非线性扰动的不确定常时滞系统

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=(A+\Delta A(t))\boldsymbol{x}(t)+(A_d+\Delta A_d(t))\boldsymbol{x}(t-\tau)+(B+\Delta B(t))\boldsymbol{u}(t)+\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_\tau,t)\\ \boldsymbol{y}(t)=(C+\Delta C(t))\boldsymbol{x}(t)\\ \boldsymbol{x}(t)=\boldsymbol{\phi}(t),\ \ t\in[t_0-\bar{\tau},t_0]\end{cases}\tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{x}(t)\in R^n$，$\boldsymbol{u}(t)\in R^m$，$\boldsymbol{y}(t)\in R^q$ 和 $\boldsymbol{\phi}(t)\in R^n[t_0-\bar{\tau},t_0]$分别为系统状态向量，控制输入，输出和初始函数矩阵；A,A_d,B,C 为适当维数的已知实常矩阵；τ 为系统时滞常数，且满足 $0\leqslant\tau\leqslant\bar{\tau}$；$\Delta A,\Delta A_d(t),\Delta B(t),\Delta C(t)$为时变参数不确定连续矩阵，且满足如下范数有界条件

$$[\Delta A(t),\Delta A_d(t),\Delta B(t)]=HF(t)[E_1,E_2,E_3],\quad \Delta C(t)=MS(t)N\tag{2}$$

这里 $F^{\mathrm T}(t)F(t)\leqslant I$，$S^{\mathrm T}(t)S(t)\leqslant I$，$H,M,E_1,E_2,E_3$ 和 N 为适当维数的时常矩阵；$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_\tau,t)$为未知的非线性扰动(其中 $\boldsymbol{x}_\tau$ 为 $\boldsymbol{x}(t-\tau)$的简写)，但满足

$$\|\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_\tau,t)\|\leqslant\beta_1\|\boldsymbol{x}(t)\|+\beta_2\|\boldsymbol{x}(t-\tau)\|\tag{3}$$

这里给定的常数 $\beta_1,\beta_2\geqslant0$.

假设 1. 存在常数 $k>0$ 和 $\rho>0$ 满足

$$\|\boldsymbol{x}(t)-\boldsymbol{x}(t+\theta)\|\leqslant k\|\boldsymbol{x}(t)\|e^{-\rho\theta},\quad \theta\in[-2\bar{\tau},0]\tag{4}$$

注 1. 显然，因为$-2\bar{\tau}\leqslant\theta\leqslant0$，所以 $e^{-\rho\theta}>1$，而 $\bar{\tau}$ 有界，因而假设 1 容易满足，且较线性 Razumikhin 定理保守性要小得多.

3 主要结果

3.1 时滞相关稳定性分析

为后文做准备,我们首先分析开环系统(1)($u(t)\equiv 0$)的稳定性.

因为 $\boldsymbol{x}(t-\tau)=\boldsymbol{x}(t)-\int_{t-\tau}^{t}\dot{\boldsymbol{x}}(s)\mathrm{d}s$, 则自由运动的时滞系统(1)($\boldsymbol{u}(t)\equiv\boldsymbol{0}$)可转换成

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=(\overline{A}(t)+\overline{A}_d(t))\boldsymbol{x}(t)+\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_\tau,t)+\boldsymbol{W}(t),\\ \boldsymbol{x}(t)=\phi(t),\quad t\in[t_0-2\bar{\tau},t_0],\end{cases}\tag{5}$$

其中 $\overline{A}(t)=A+\Delta A(t)$, $\overline{A}_d(t)=A_d+\Delta A_d(t)$,

$$\boldsymbol{W}(t)=-\overline{A}_d(t)\int_{t-\tau}^{t}[\overline{A}(t)\boldsymbol{x}(s)+\overline{A}_d(t)\boldsymbol{x}(s-\tau)+\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{x}_\tau,s)]\mathrm{d}s\tag{6}$$

由此可分别给出系统(5)鲁棒稳定和指数稳定条件.

定理 1. 称满足式(2)和式(3)的开环时滞系统(9)鲁棒渐近稳定,若存在正定矩阵 X, $Q,R_1,R_2,R_3(R=R_1+R_2+R_3)$ 和常数 $\alpha>0$, $\varepsilon_i>0(i=0,1,2)$, 满足 $\varepsilon_0 I-E_2RE_2^{\mathrm{T}}>0$, $R_1-\varepsilon_1HH^{\mathrm{T}}>0$, $R_2-\varepsilon_2HH^{\mathrm{T}}>0$,使得如下的 LMI

$$\begin{bmatrix}\Phi_{11}(X,R) & X\Phi_{12}^{\mathrm{T}} & \bar{\tau}X\Phi_{13}^{\mathrm{T}} & \bar{\tau}A_dRE_2^{\mathrm{T}}\\ \Phi_{12}X & -J_1 & 0 & 0\\ \bar{\tau}\Phi_{13}X & 0 & -\bar{\tau}J_2 & 0\\ \bar{\tau}E_2RA_d^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & -\bar{\tau}J_3\end{bmatrix}<0\tag{7}$$

和

$$\lambda_m(Q)\geqslant(\beta_1^2+\beta_2^2)(\alpha^{-1}+2\bar{\tau}\|R_3^{-1}\|)\|X\|^2\tag{8}$$

成立. 其中 $M=X(A+A_d)^{\mathrm{T}}+(A+A_d)X+\bar{\tau}A_dRA_d^{\mathrm{T}}+(1+\varepsilon_0\bar{\tau})HH^{\mathrm{T}}+2\alpha I+Q$,

$\Phi_{12}=[(1+\varepsilon_1^{-1}\bar{\tau})E_1^{\mathrm{T}}\quad(1+\varepsilon_2^{-1}\bar{\tau})E_2^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}}$, $\Phi_{13}=[A_0\quad A_1]$,

$J_1=\mathrm{diag}\{(1+\varepsilon_1^{-1}\bar{\tau})I,\ (1+\varepsilon_2^{-1}\bar{\tau})I\}$,

$J_2=\mathrm{diag}\{(R_1-\varepsilon_1HH^{\mathrm{T}}),\ (R_2-\varepsilon_2HH^{\mathrm{T}})\}$, $J_3=\varepsilon_0I-E_1RE_1^{\mathrm{T}}$.

证明. 类似文献[6]定理 3.1 的证明,并应用其引理 2.1 易证得结论. 证毕.

定理 2. 称上述满足假设 1、不确定性分解式(2)及非线性扰动式(3)的时滞系统(5)是鲁棒指数稳定的,若存在对称正定矩阵 $X,Q,R_1,R_2,R_3(R=R_1+R_2+R_3)$ 和常数 $\alpha>0,\varepsilon_i>0$ $(i=0,1,2)$, 使得下述的 LMI

$$\begin{bmatrix}M & X(E_1+E_2)^{\mathrm{T}} & \bar{\tau}A_dRE_2^{\mathrm{T}}\\ (E_1+E_2)X & -I & 0\\ \bar{\tau}E_2RA_d^{\mathrm{T}} & 0 & -\bar{\tau}J_2\end{bmatrix}<0\tag{9}$$

成立. 其中 $M=X(A+A_d)^{\mathrm{T}}+(A+A_d)X+\bar{\tau}A_dRA_d^{\mathrm{T}}+(1+\bar{\tau}\varepsilon_0)HH^{\mathrm{T}}+2Q+2\alpha I$,这里 Q 满足不等式

$$\lambda_m(Q)\geqslant(\bar{\tau}a+b-c(1-e^{2\rho\bar{\tau}}))\|X\|^2\tag{10}$$

其中 $a=s_1+s_2$, $b=\left(\frac{1}{2}\alpha^{-1}+\bar{\tau}\|R_3^{-1}\|\right)(\beta_1^2+\beta_2^2)+k^2\beta_2^2e^{2\rho\bar{\tau}}$,

$c=(k^2/\rho)(s_1+s_2e^{2\rho\bar{\tau}}+\beta_1^2+\beta_2^2)$, $s_1=\|A^{\mathrm{T}}(R_1-\varepsilon_1HH^{\mathrm{T}})^{-1}A+\varepsilon_1^{-1}E_1^{\mathrm{T}}E_1\|$,

$$s_2 = \| A_d^{\mathrm{T}}(R_2 - \varepsilon_2 HH^{\mathrm{T}})^{-1}A_d + \varepsilon_2^{-1}E_2^{\mathrm{T}}E_2 \|.$$

且以 $\rho' = \dfrac{1}{\lambda_M(X^{-1})}\{\lambda_m(Q)\|X^{-1}\|^2 - (2\bar{\tau}a + b - c(1 - e^{2\rho\bar{\tau}}))$速度收敛.

证明. 因为

$$\|\boldsymbol{x}(t+\theta)\|^2 = \|\boldsymbol{x}(t) - (\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}(t+\theta))\|^2 \leqslant 2\|\boldsymbol{x}(t)\|^2 + 2\|\boldsymbol{x}(t) - \boldsymbol{x}(t+\theta)\|^2,\ \theta \in [-2\bar{\tau}, 0] \tag{11}$$

由假设 1 有

$$\|\boldsymbol{x}(t+\theta)\|^2 \leqslant 2\|\boldsymbol{x}(t)\|^2 + 2k^2\|\boldsymbol{x}(t)\|^2 e^{-2\rho\theta},\ \theta \in [-2\bar{\tau}, 0] \tag{12}$$

则易得如下不等式:

$$\dot{V}(\boldsymbol{x}(t), t) \leqslant -\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)X^{-1}QX^{-1}\boldsymbol{x}(t) + (2\bar{\tau}a + b - c(1 - e^{2\rho\bar{\tau}}))\|\boldsymbol{x}(t)\|^2 < 0 \tag{13}$$

进一步,类似于文献[2]定理 2.1 证明,易得定理 2.　　证毕.

注 2. 文献[4～7]研究了线性时滞系统时滞相关鲁棒控制问题,但都没有考虑存在非线性扰动情形,且关于时滞相关的指数稳定的结果很少见到,因而定理 1 和 2 推广和改进了已有文献中的结果.

3.2　时滞相关鲁棒状态观测器设计

在实际系统中,利用状态观测器来解决状态不可测系统的控制问题是一个重要的手段.本小节中,考虑对不确定时滞系统(1)的基于观测器的鲁棒控制器设计问题,设计如下形式的状态观测器

$$\dot{\bar{\boldsymbol{x}}} = A\bar{\boldsymbol{x}}(t) + B\boldsymbol{u}(t) + L(\boldsymbol{y} - C\bar{\boldsymbol{x}}(t)) \tag{14}$$

以及观测器状态反馈控制律 $\boldsymbol{u}(t) = K\bar{\boldsymbol{x}}(t)$,并定义观测器误差为 $\boldsymbol{e}(t) = \boldsymbol{x}(t) - \bar{\boldsymbol{x}}(t)$,则可构成如下增广系统

$$\begin{pmatrix}\dot{\boldsymbol{x}}(t)\\ \dot{\boldsymbol{e}}(t)\end{pmatrix} = \begin{bmatrix}\bar{A}(t) + \bar{B}(t)K & -\bar{B}(t)K\\ \Delta A + \Delta BK + L\Delta C & A - \Delta BK - LC\end{bmatrix}\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}(t)\\ \boldsymbol{e}(t)\end{pmatrix} + \begin{bmatrix}\bar{A}_d(t)\\ \bar{A}_d(t)\end{bmatrix}\boldsymbol{x}(t-\tau) + \begin{bmatrix}f(x, x_\tau, t)\\ f(x, x_\tau, t)\end{bmatrix} \tag{15}$$

根据定理 1 和定理 2,则有下述定理.

定理 3. 在上述观测器及观测器状态反馈控制作用下,称满足式(2),式(3)的系统(1)鲁棒渐近稳定,若存在对称正定矩阵 $X_1, X_2, X_{ij}(i=1,2,\ j=1,2,3,4)$和正常数 $\alpha, \bar{\varepsilon}_1, \bar{\varepsilon}_2, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}$, 使得下述两个 LMIs 成立

$$\begin{bmatrix}\Phi_{11}(X_1, Y, \tilde{X}_1) & \Phi_{12}^{\mathrm{T}} & X_1\Phi_{13}^{\mathrm{T}} & \bar{\tau}X_1\Phi_{14}^{\mathrm{T}} & \bar{\tau}A\tilde{X}_1E_2^{\mathrm{T}}\\ \Phi_{12} & -J_1 & 0 & 0 & 0\\ \Phi_{13}X_1 & 0 & -J_2 & 0 & 0\\ \bar{\tau}\Phi_{14}X_1 & 0 & 0 & -\bar{\tau}J_3 & 0\\ \bar{\tau}E_2\tilde{X}_1A^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & -\bar{\tau}J_4\end{bmatrix} < 0 \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix}\Phi_{21}(X_2, \tilde{X}_2) & X_2\Phi_{22}^{\mathrm{T}} & \bar{\tau}\Phi_{23}^{\mathrm{T}}(X_2)\\ \Phi_{22}X_2 & -\tilde{J}_1 & 0\\ \bar{\tau}\Phi_{23}(X_2) & 0 & -\bar{\tau}\tilde{J}_2\end{bmatrix} < 0 \tag{17}$$

以及下述不等式成立

$$\lambda_m(Q_1) \geqslant (\beta_1^2 + \beta_2^2)(\alpha^{-1} + 2\bar{\tau}(\| X_{14}^{-1} \| + \| X_{24}^{-1} \|)) \| X_1 \|^2 \tag{18}$$

其中$\widetilde{X}_1 = X_{11}+X_{12}+X_{13}+X_{14}$，$\widetilde{X}_2 = X_{21}+X_{22}+X_{23}+X_{24}$，

$$\Phi_{11}(X_1, Y, \widetilde{X}_1) = (A+A_d)X_1 + X_1(A+A_d)^{\mathrm{T}} + BY + Y^{\mathrm{T}}B + BB^{\mathrm{T}} + \bar{\tau}A_d\widetilde{X}_1A_d^{\mathrm{T}} + 2Q + 2\alpha I,$$

$$\Phi_{12} = [(E_1+E_2)X_1 + E_3Y,\ \bar{\tau}(E_1X_1+E_3Y)],\quad \Phi_{13} = [A_d, N, \bar{\tau}E_1, \bar{\tau}E_2]^{\mathrm{T}},$$

$$\Phi_{14} = [AX_1+BY, A_dX_1]^{\mathrm{T}},\quad \Phi_{22} = [C^{\mathrm{T}}M,\ X_1^{-1}Y^{\mathrm{T}},\ X_1^{-1}Y^{\mathrm{T}}E_2,\ X_1^{-1}YE_3^{\mathrm{T}}]^{\mathrm{T}},$$

$$\Phi_{21}(X_2, \widetilde{X}_2) = (A - X_2C^{\mathrm{T}}C)X_2 + X_2(A - X_2C^{\mathrm{T}}C)^{\mathrm{T}} + \bar{\tau}A_d\widetilde{X}_2A_d^{\mathrm{T}} + (1+2\alpha)I,$$

$$\Phi_{23} = [X_2X_1^{-1}YB^{\mathrm{T}},\ A_d\widetilde{X}_2E_2^{\mathrm{T}}],\ J_1 = \mathrm{diag}\{I, \bar{\tau}\varepsilon_{12}I\},\ J_2 = \mathrm{diag}\{I, I, \bar{\tau}\varepsilon_{11}I, \bar{\tau}\varepsilon_{12}I\},$$

$$J_4 = \tilde{\varepsilon}_1I - E_2\widetilde{X}_1E_2^{\mathrm{T}},\ J_3 = \mathrm{diag}\{(X_{11}+X_{21}-\varepsilon_{11}HH^{\mathrm{T}}),\ (X_{12}+X_{22}-\varepsilon_{12}HH^{\mathrm{T}})\},$$

$$\widetilde{J}_1 = \mathrm{diag}\{I, \frac{1}{2}I, \frac{1}{2}I, \bar{\tau}\varepsilon_{22}I\},\ \widetilde{J}_2 = \mathrm{diag}\{(X_{13}+X_{23}-\varepsilon_{22}MM^{\mathrm{T}}),\ (\tilde{\varepsilon}_2I - E_2\widetilde{X}_2E_2^{\mathrm{T}})\},$$

此时控制增益分别为 $K = YX_1^{-1}$，$L = X_2C^{\mathrm{T}}$.

定理 4. 在上述观测器及观测器状态反馈控制下，称满足假设 1、式(2)及式(3)的时滞系统(1)鲁棒指数稳定，若存在对称正定矩阵 $X_1, X_2, X_{ij}(i=1,2,\ j=1,2,3,4)$和正常数 α，$\tilde{\varepsilon}_1, \tilde{\varepsilon}_2, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}, \varepsilon_{21}, \varepsilon_{22}$，使得 LMI(17)和下述的 LMI 成立

$$\begin{bmatrix} \Phi_{11}(X_1, Y, \widetilde{X}_1) & \Phi_{12}^{\mathrm{T}} & X_1\Phi_{13}^{\mathrm{T}} & \bar{\tau}A_d\widetilde{X}_1E_2^{\mathrm{T}} \\ \Phi_{12} & -I & 0 & 0 \\ \Phi_{13}X_1 & 0 & -J_1 & 0 \\ \bar{\tau}E_2\widetilde{X}_1A_d^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & -\bar{\tau}J_2 \end{bmatrix} < 0 \tag{19}$$

其中 $\Phi_{11}(X_1, Y, \widetilde{X}_1)$，$\Phi_{12}$如定理 3 中所示，$\Phi_{13} = [A, N]$，$J_1 = \mathrm{diag}\{I, I\}$. 这里 Q 满足不等式(10)，其中

$$a = s_1 + s_2,\quad b = \left(\frac{1}{2}\alpha^{-1} + \bar{\tau}(\| X_{13}^{-1} \| + \| X_{23}^{-1} \|)\right)(\beta_1^2 + \beta_2^2) + 2k^2\beta_2^2e^{2\rho\bar{\tau}},$$

$$c = (k^2/\rho)(s_1 + s_2e^{2\rho\bar{\tau}} + 2\beta_1^2 + 2\beta_2^2),$$

$$s_1 = \| (A + BYX_1^{-1})^{\mathrm{T}}(X_{11} + X_{21} - \varepsilon_1HH^{\mathrm{T}})^{-1}(A + BYX_1^{-1}) + \varepsilon_1^{-1}(E_1 + E_3Y)^{\mathrm{T}}(E_1 + E_3Y) \|,$$

$$s_2 = \| A_d^{\mathrm{T}}(X_{12} + X_{22} - \varepsilon_2HH^{\mathrm{T}})^{-1}A_d + \varepsilon_2^{-1}E_2^{\mathrm{T}}E_2 \|,$$

且以 $\rho' = \dfrac{1}{\lambda_M(X_1^{-1})}\{\lambda_m(Q)\| X_1^{-1} \|^2 - (2\bar{\tau}a + b - c(1-e^{2\rho\bar{\tau}}))\}$的速度指数收敛.

4　结论

研究了一类非线性扰动的不确定时滞系统的鲁棒稳定性及其基于状态观测器鲁棒控制器设计问题. 在分析了自由运动的时滞系统时滞相关稳定的基础上，进一步通过设计状态观测器并利用观测器状态反馈，给出了系统时滞相关的满足 AVI 的 LMI 可鲁棒镇定的充分条件. 上述的稳定性分析推广和改进了已有的时滞相关的稳定性结果，并在将这些结果应用于鲁棒状态观测器的设计问题上做了有意义的尝试工作.

参 考 文 献

1　Su J H, Fong I K, Tsang C L. Stability analysis of linear systems with time delay. *IEEE. Trans. Autom. Control*, 1994, **39**(6):1341～1344

2 黎明. 非线性参数扰动时滞系统的鲁棒指数稳定性. 控制理论与应用, 1998, **15**(6):969～971

3 Said Oucheriah. Exponential stabilization of a class of uncertain time-delay systems with bounded controllers. *IEEE. Trans. on Circuits and Systems—I: Fundamental Theory and Applications*, 2000, **47**(3):606～609

4 年晓红. LURIE 控制系统绝对稳定的时滞相关条件. 自动化学报, 1998, **25**(4):564～566

5 Cao Y Y, Sun Y X, Cheng C W. Delay-dependent robust stabilization of uncertain system with multiple state delay. *IEEE. Trans. Autom. Control*, 1998, **43**(11):1608～1612

6 Carlos E de Souza, Li X. Delay-dependent robust H_∞ control of uncertain linear state-delayed systems. *Automatica*, 1999, **35**(7):1313～1321

7 Vladimir L K, Daniel M A. On delay-dependent stability conditions. *Systems & Control Letters*, 2000, **40**(1):71～76

8 关新平，刘奕昌，段广仁. 时滞不确定系统基于观测器的鲁棒控制器设计. 见：中国控制与决策学术年会论文集，南京：东北大学出版社. 1999. 117～121

9 关新平，林志云，段广仁. 时变时滞不确定系统基于观测器的鲁棒控制器设计. 信息与控制，1999, **28**(3):161～167

关新平　教授，博士生导师. 目前主要研究领域为时滞系统分析与综合、鲁棒控制、ATM 网络流量控制.

罗小元　2001 年于燕山大学控制理论与控制工程专业获工学硕士学位，现为燕山大学博士生. 研究方向为时滞系统鲁棒控制、复杂系统容错控制.

刘奕昌　2001 年于燕山大学控制理论与控制工程专业获工学硕士学位，现为香港中文大学博士生. 研究方向为时滞系统、非线性系统鲁棒控制.

段广仁　教授，博士生导师，IEEE 高级会员. 主要研究方向为线性系统理论、鲁棒控制理论及其在航天控制中的应用.