文章编号: 1000−8152(2009)06−0669−04

不确定多通道奇异时滞系统分散H_∞控制

陈 宁[1], 桂卫华[1], 翟贵生[2]

(1. 中南大学 信息科学与工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 大阪府立大学 工学院, 日本 大阪 599-8531)

摘要: 针对不确定多通道奇异时滞大系统, 研究其分散鲁棒H_∞控制问题. 假定不确定性是时不变、范数有界. 基于奇异系统Lyapunov稳定性理论, 通过设定Lyapunov-Krasovskii矩阵为合适的块对角结构, 推导出了使不确定多通道奇异时滞大系统可鲁棒镇定, 且满足一定的扰动水平的充分条件即一组线性矩阵不等式(LMIs)有可行解. 给出了具有期望阶数的分散输出反馈H_∞控制器的设计方法.

关键词: 多通道奇异系统; 分散H_∞控制; 时滞; 不确定性; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP13 **文献标识码**: A

Decentralized H-infinity control for multi-channel uncertain descriptor systems with time-delay

CHEN Ning[1], GUI Wei-hua[1], ZHAI Gui-sheng[2]

(1. School of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410083, China;
2. Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University, Osaka 599–8531, Japan)

Abstract: A robust decentralized H-infinity control is studied for uncertain multi-channel descriptor systems with time-delay. The uncertainties are assumed to be time-invariant, norm-bounded. A sufficient condition for the uncertain multi-channel descriptor time-delay system to be robustly stabilizable with a specified disturbance attenuation level is derived based on the theorem of Lyapunov stability theory in which the Lyapunov-Krasovskii matrix is set to a block diagonal form with compatible order to the controller. This condition is in terms of linear matrix inequalities(LMIs) with a feasible solution. The design of the decentralized H-infinity control with desired order and output feedback is given.

Key words: multi-channel descriptor system; decentralized H-infinity control; time-delay; uncertainty; linear matrix inequality

1 引言(Introduction)

奇异系统又称为广义系统、广义状态空间系统、微分代数系统等. 对奇异系统进行集中控制和分散控制的研究均已取得了许多成果[1~3]. 在集中控制中, Masubuchi应用LMI方法, 给出了奇异系统稳定和H_∞控制器存在条件[4]. 徐胜元等人提出了使参数不确定性的奇异系统稳定和镇定条件[5].

时滞现象存在于许多系统中, 如化学反应过程、柔性机器人、气动传动等各种工程系统中. 时滞往往是系统不稳定的重要因素之一. 在过去几十年里, 已经对时滞系统进行了广泛深入地研究, 并得到了很多研究成果[6~8]. 到目前为止, 多通道奇异时滞系统的分散鲁棒输出反馈问题仍然没有完全解决. 多通道系统的模型是指一个复杂系统可以看成是具有N个输入和N个输出的工作站, 每个工作站之间不能进行信息交换, 只能用每个通道的信息[1]. 因此, 控制器具有结构约束, 即控制器应具有块对角结构. 陈宁等人研究了不确定多通道奇异系统的鲁棒分散H_∞控制问题[9], 推导出了使不确定多通道奇异系统能鲁棒稳定且满足一定性能指标的充分必要条件, 采用两步同伦法迭代来求解非线性矩阵不等式. Zhai等人研究了多通道奇异系统的分散鲁棒H_∞控制问题, 提出了设计低阶分散控制器的严格LMI条件[10]. 上述文献没有考虑时滞的存在. Xu等人针对具有状态时滞和参数不确定性的奇异集中系统, 提出了使其稳定和镇定条件[11].

本文研究多通道不确定奇异时滞系统的鲁棒分散H_∞控制问题. 假定不确定性是时不变、范数有界,

收稿日期: 2007−09−26; 收修改稿日期: 2009−01−04.
基金项目: 国家自然科学重点基金项目(60634020); 湖南省自然科学基金资助项目(07JJ6138); 中国博士后科学基金资助项目(20060390883); 高校博士点专项科研基金资助项目(20070533132).

且存在于系统、时滞和输出矩阵中. 主要针对动态输出反馈控制问题. 基于Lyapunov稳定性理论, 通过设定Lyapunov-Krasovskii矩阵为合适的块对角结构, 采用矩阵替换的方法推导出了使多通道不确定奇异时滞系统可鲁棒镇定, 且满足一定的扰动水平的时滞无关充分条件即线性矩阵不等式(LMI)有可行解. 给出了具有期望阶数的分散鲁棒控制器的设计方法.

2 问题的描述(Problem description)

考虑具有N个通道的不确定奇异时滞大系统, 其状态方程描述为

$$\begin{cases} E\dot{x}(t)=(A+\delta A)x(t)+(A_{\rm d}+\delta A_{\rm d})x(t- \\ \qquad d(t))+B_1w(t)+\sum\limits_{i=1}^{N}B_{2i}u_i(t), \\ z(t)=C_1x(t)+D_{11}w(t),\ i=1,2,\cdots,N. \\ y_i(t)=(C_{2i}+\delta C_{2i})x(t)+D_{21i}w(t). \end{cases} \tag{1}$$

其中: $x\in\mathbb{R}^n$是状态变量, $w\in\mathbb{R}^r$是扰动输入, $z\in\mathbb{R}^p$是控制输出, $u_i\in\mathbb{R}^{m_i}$和$y_i\in\mathbb{R}^{q_i}$分别是第$i(i=1,2,\cdots,N)$通道的控制输入和测量输出. 矩阵E和A均为方阵, E可能是奇异的, 且$\operatorname{rank}E=r\leqslant n$. $d(t)$是滞后时间, 且满足: $0\leqslant d(t)<\infty$, $\dot{d}(t)\leqslant\rho<1$. 矩阵$A, A_{\rm d}, B_1, B_{2i}, C_1, C_{2i}, D_{11}$和$D_{21i}$是具有合适维数的常数矩阵.

定义 1[11] 对任意给定矩阵$E\in\mathbb{R}^{n\times n}$, $A\in\mathbb{R}^{n\times n}$: 1) 若存在常数$s_0\in C$, 满足$\det(s_0E-A)\neq 0$, 则称矩阵束$sE-A$是正则的; 2) 若满足$\deg(\det(sE-A))=\operatorname{rank}E$, 则称系统$E\dot{x}(t)=Ax(t)$无脉冲.

奇异时滞系统$E\dot{x}(t)=Ax(t)+A_{\rm d}x(t-\tau)$可能存在脉冲解, 然而矩阵对$(E,A)$正则、无脉冲可以保证系统$E\dot{x}(t)=Ax(t)+A_{\rm d}x(t-\tau)$存在惟一的无脉冲解.

引理 1[11] 若(E,A)正则、无脉冲, 则系统$E\dot{x}(t)=Ax(t)+A_{\rm d}x(t-\tau)$存在惟一的无脉冲解.

引理 2[11] 若存在对称矩阵P, 满足$E^{\rm T}P=PE\geqslant 0$和$PA+A^{\rm T}P<0$, 则矩阵对(E,A)正则、无脉冲.

假设(E,A)均是正则、无脉冲和稳定的. 假设多通道奇异系统没有不稳定的分散固定模[3]. δA, $\delta A_{\rm d}$, δC_{2i}反映系统模型中参数不确定性的未知实矩阵, 并满足范数有界条件:

$$[\delta A\ \ \delta A_{\rm d}]=M\varDelta[F_1\quad F_2],$$

$$\begin{bmatrix}\delta C_{21}\\ \vdots\\ \delta C_{2N}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}H_1\\ \vdots\\ H_N\end{bmatrix}\varDelta F_3. \tag{2}$$

其中: $M, F_1, F_2, F_3, H_i(i=1,\cdots,N)$是适当维数的常数矩阵, 反映了不确定参数的结构信息. $\varDelta$是未知常数矩阵, 且满足$\varDelta^{\rm T}\varDelta\leqslant I$.

对于系统(1), 设计一个分散输出反馈控制器

$$\begin{cases}\dot{\hat{x}}_i=\hat{A}_i\hat{x}_i+\hat{B}_iy_i,\\ u_i=\hat{C}_i\hat{x}_i+\hat{D}_iy_i,\end{cases} i=1,2,\cdots,N. \tag{3}$$

其中: $\hat{x}_i\in\mathbb{R}^{\hat{n}_i}$是第$i$个局部控制器的状态, 且$\hat{n}_i$具有某一固定的维数; $\hat{A}_i, \hat{B}_i, \hat{C}_i, \hat{D}_i(i=1,2,\cdots,N)$是需要确定具有相应维数的常数矩阵.

将控制器(3)应用于系统(1)得闭环系统如下:

$$\begin{cases} E\dot{x}(t)= \\ [A+\delta A+\sum\limits_{i=1}^{N}B_{2i}\hat{D}_i(C_{2i}+ \\ \delta C_{2i})]x(t)+(A_{\rm d}+\delta A_{\rm d})x(t- \\ d(t))+\sum\limits_{i=1}^{N}B_{2i}\hat{C}_i\hat{x}_i(t)+ \\ (B_1+\sum\limits_{i=1}^{N}B_{2i}\hat{D}_iD_{21i})w(t), \\ \dot{\hat{x}}_i(t)=\hat{B}_i(C_{2i}+\delta C_{2i})x(t)+ \\ \qquad \hat{A}_i\hat{x}_i(t)+\hat{B}_iD_{21i}w(t), \\ z(t)=C_1x(t)+D_{11}w(t), \\ i=1,2,\cdots,N. \end{cases} \tag{4}$$

定义如下系统(1)中的系数矩阵:

$$\begin{cases} B_2=[B_{21}\ \ B_{22}\ \ \cdots\ \ B_{2N}], \\ C_2=[C_{21}^{\rm T}\ \ C_{22}^{\rm T}\ \ \cdots\ \ C_{2N}^{\rm T}]^{\rm T}, \\ D_{21}=[D_{211}^{\rm T}\ \ D_{212}^{\rm T}\ \ \cdots\ \ D_{21N}^{\rm T}]^{\rm T}, \\ H=[H_1^{\rm T}\ \ H_2^{\rm T}\ \ \cdots\ \ H_N^{\rm T}]^{\rm T}, \\ \delta C_2=[\delta C_{21}^{\rm T}\ \ \delta C_{22}^{\rm T}\ \ \cdots\ \ \delta C_{2N}^{\rm T}]^{\rm T} \end{cases}$$

和控制器的状态和系数矩阵:

$$\begin{cases} \hat{x}=\left[\hat{x}_1^{\rm T},\ \hat{x}_2^{\rm T},\ \cdots,\ \hat{x}_N^{\rm T}\right]^{\rm T}, \\ \hat{A}_{\rm D}=\operatorname{diag}\{\hat{A}_1,\hat{A}_2,\cdots,\hat{A}_N\}, \\ \hat{B}_{\rm D}=\operatorname{diag}\{\hat{B}_1,\hat{B}_2,\cdots,\hat{B}_N\}, \\ \hat{C}_{\rm D}=\operatorname{diag}\{\hat{C}_1,\hat{C}_2,\cdots,\hat{C}_N\}, \\ \hat{D}_{\rm D}=\operatorname{diag}\{\hat{D}_1,\hat{D}_2,\cdots,\hat{D}_N\}. \end{cases}$$

于是, 闭环系统(4)可写成如下形式:

$$\begin{cases} E\dot{x}(t) = [A + \delta A + B_2\hat{D}_{\rm D}(C_2 + \\ \qquad \delta C_2)]x(t) + B_2\hat{C}_{\rm D}\hat{x}(t) + \\ \qquad (A_{\rm d} + \delta A_{\rm d})x(t-d(t)) + \\ \qquad (B_1 + B_2\hat{D}_{\rm D}D_{21})w(t), \\ \dot{\hat{x}}(t) = \hat{B}_{\rm D}(C_2 + \delta C_2)x(t) + \hat{A}_{\rm D}\hat{x}(t) + \\ \qquad \hat{B}_{\rm D}D_{21}w(t), \\ z(t) = C_1x(t) + D_{11}w(t). \end{cases} \tag{5}$$

进一步定义控制器系数矩阵

$$G_{\rm D} = \begin{bmatrix} \hat{A}_{\rm D} & \hat{B}_{\rm D} \\ \hat{C}_{\rm D} & \hat{D}_{\rm D} \end{bmatrix}. \tag{6}$$

同样引入下述描述:

$$\tilde{E} = \begin{bmatrix} E & 0_{n\times\hat{n}} \\ 0_{\hat{n}\times n} & I_{\hat{n}\times\hat{n}} \end{bmatrix},\ \tilde{A} = \begin{bmatrix} A & 0_{n\times\hat{n}} \\ 0_{\hat{n}\times n} & 0_{\hat{n}\times\hat{n}} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{B}_1 = \begin{bmatrix} B_1 \\ 0_{\hat{n}\times q} \end{bmatrix},\ \tilde{B}_2 = \begin{bmatrix} 0_{n\times\hat{n}} & B_2 \\ I_{\hat{n}} & 0_{\hat{n}\times m} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{C}_1 = \begin{bmatrix} C_1 & 0_{p\times\hat{n}} \end{bmatrix},\ \tilde{C}_2 = \begin{bmatrix} 0_{\hat{n}\times n} & I_{\hat{n}} \\ C_2 & 0_{q\times\hat{n}} \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_{\rm d} = \begin{bmatrix} A_{\rm d} & 0_{n\times\hat{n}} \\ 0_{\hat{n}\times n} & 0_{\hat{n}\times\hat{n}} \end{bmatrix},\ \delta\tilde{A} = \begin{bmatrix} \delta A & 0_{n\times\hat{n}} \\ 0_{\hat{n}\times n} & 0_{\hat{n}\times\hat{n}} \end{bmatrix},$$

$$\delta\tilde{A}_{\rm d} = \begin{bmatrix} \delta A_{\rm d} & 0_{n\times\hat{n}} \\ 0_{\hat{n}\times n} & 0_{\hat{n}\times\hat{n}} \end{bmatrix},$$

其中: $\hat{n} = \sum\limits_{i=1}^{N}\hat{n}_i, m = \sum\limits_{i=1}^{N}m_i, q = \sum\limits_{i=1}^{N}q_i$, 因此闭环系统(5)可写为

$$\begin{cases} \tilde{E}\dot{\tilde{x}}(t) = \\ \tilde{A}_{\rm cl}\tilde{x}(t) + \tilde{A}_{\rm dcl}\tilde{x}(t-d(t)) + \tilde{B}_{\rm cl}w(t), \\ z(t) = \tilde{C}_{\rm cl}\tilde{x}(t) + \tilde{D}_{\rm cl}w(t). \end{cases} \tag{7}$$

其中:

$$\tilde{x}(t) = \begin{bmatrix} x(t) \\ \hat{x}(t) \end{bmatrix},\ \tilde{x}(t-d(t)) = \begin{bmatrix} x(t-d(t)) \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$\tilde{A}_{\rm cl} = \tilde{A} + \tilde{E}\varDelta\tilde{F}_1 + \tilde{B}_2G_{\rm D}(\tilde{C}_2 + \tilde{H}\varDelta\tilde{F}_3),$$

$$\tilde{A}_{\rm dcl} = \tilde{A}_{\rm d} + \tilde{E}\varDelta\tilde{F}_2,\ \tilde{B}_{\rm cl} = \tilde{B}_1 + \tilde{B}_2G_{\rm D}\tilde{D}_{21},$$

$$\tilde{C}_{\rm cl} = \tilde{C}_1, \tilde{D}_{\rm cl} = D_{11},\ \tilde{E} = \begin{bmatrix} E \\ 0 \end{bmatrix},\ \tilde{H} = \begin{bmatrix} 0 \\ H \end{bmatrix},$$

$$\tilde{F}_1 = [F_1\ \ 0],\ \tilde{F}_2 = [F_2\ \ 0],\ \tilde{F}_3 = [F_3\ \ 0].$$

在闭环系统(7)中, 仅控制器的系数矩阵$G_{\rm D}$为未知矩阵, 其他矩阵均可由系统(1)和各控制器的阶数给出.

定义 2　具有不确定参数的多通道时滞奇异系统(1), 对给定的正常数γ, 如果存在由分散输出反馈控制器(3)构成的闭环系统(7)满足:

1) 对所有满足(2)的容许的不确定性, 当$w(t) = 0$时, 闭环系统(7)是正则、无脉冲和稳定的;

2) 在零初始条件下, 对$\forall w \in {\rm L}_2[0,\infty)$, 满足

$$\|\ z\ \|_2 \leqslant \gamma\ \|\ w\ \|_2,$$

则称具有不确定参数的多通道时滞奇异系统(1)是鲁棒可镇定且具有H_∞范数界γ.

本文的控制问题是对给定的正常数γ, 设计一个输出反馈控制器(3), 使得多通道时滞奇异系统(1)是鲁棒可镇定且具有H_∞范数界γ.

3　主要结果(Main result)

在给出主要结论之前, 引入以下引理.

引理 3 [12]　设$\varXi, M$和F是具有合适维数的矩阵, 且$\varXi$是对称的, 对所有$\varDelta$满足$\varDelta^{\rm T}\varDelta \leqslant I$. 那么

$$\varXi + M\varDelta F + F^{\rm T}\varDelta^{\rm T}M^{\rm T} < 0$$

当且仅当存在标量$\varepsilon > 0$, 使得下式成立, 即

$$\varXi + \varepsilon MM^{\rm T} + \varepsilon^{-1}F^{\rm T}F < 0.$$

假设 1　矩阵B_2是列满秩的.

下面给出了闭环系统渐近稳定且具有H_∞性能γ的分散H_∞控制器存在的充分条件.

定理 1　如果存在如下结构的对称正定矩阵P:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 \\ 0 & P_2 \end{bmatrix},\ P_2 \in \mathbb{R}^{(n-m)\times(n-m)}, \tag{8}$$

$$P_1 = \begin{bmatrix} P_{\rm A} & P_{\rm B} \\ * & P_{\rm D} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(\hat{n}+m)\times(\hat{n}+m)},$$

$$P_{\rm A} = {\rm diag}\{P_{A1}, P_{A2}, \cdots, P_{AN}\},\ P_{Ai} \in \mathbb{R}^{\hat{n}_i\times\hat{n}_i},$$

$$P_{\rm B} = {\rm diag}\{P_{B1}, P_{B2}, \cdots, P_{BN}\},\ P_{Bi} \in \mathbb{R}^{\hat{n}_i\times m_i},$$

$$P_{\rm D} = {\rm diag}\{P_{D1}, P_{D2}, \cdots, P_{DN}\},\ P_{Di} \in \mathbb{R}^{m_i\times m_i}$$

和正定矩阵S, 正数$\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$和具有如下结构的任意矩阵:

$$W = \begin{bmatrix} W_{\rm A} & W_{\rm B} \\ W_{\rm C} & W_{\rm D} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(\hat{n}+m)\times(\hat{n}+q)}. \tag{9}$$

其中:

$$W_{\rm A} = {\rm diag}\{W_{A1}, W_{A2}, \cdots, W_{AN}\},\ W_{Ai} \in \mathbb{R}^{\hat{n}_i\times\hat{n}_i},$$

$$W_{\rm B} = {\rm diag}\{W_{B1}, W_{B2}, \cdots, W_{BN}\},\ W_{Bi} \in \mathbb{R}^{\hat{n}_i\times q_i},$$

$$W_{\rm C} = {\rm diag}\{W_{C1}, W_{C2}, \cdots, W_{CN}\},\ W_{Ci} \in \mathbb{R}^{m_i\times\hat{n}_i},$$

$$W_{\rm D} = {\rm diag}\{W_{D1}, W_{D2}, \cdots, W_{DN}\},\ W_{Di} \in \mathbb{R}^{m_i\times q_i}.$$

使以下LMI成立:

$$\hat{E}^{\mathrm{T}}P = P\hat{E} \geqslant 0, \tag{10}$$

$$\begin{bmatrix} \Xi_1+U & \Xi_2 & \hat{C}_1^{\mathrm{T}} & P\hat{M} & P\hat{M} & \Xi_3 & \Xi_4 \\ * & -\gamma I & \tilde{D}_{11}^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & -\gamma I & 0 & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & -\epsilon_1^{-1}I & 0 & 0 & 0 \\ * & * & * & * & -\epsilon_2^{-1}I & 0 & 0 \\ * & * & * & * & * & -\epsilon_3^{-1}I & 0 \\ * & * & * & * & * & * & \Xi_5 \end{bmatrix} < 0. \tag{11}$$

则对任意给定正数γ, 在满足假设1的条件下, 多通道时滞奇异系统(1)是鲁棒可镇定的, 且具有扰动抑制水平γ. 其中:

$$\Xi_1 = P\hat{A} + \hat{A}^{\mathrm{T}}P + \begin{bmatrix} W \\ 0 \end{bmatrix}\hat{C}_2 + \hat{C}_2^{\mathrm{T}}[W^{\mathrm{T}}\ 0],$$

$$U = \epsilon_1^{-1}\hat{F}_1^{\mathrm{T}}\hat{F}_1 + \epsilon_3^{-1}\hat{F}_3^{\mathrm{T}}\hat{F}_3 + T^{\mathrm{T}}ST,$$

$$\Xi_2 = P\hat{B}_1 + \begin{bmatrix} W \\ 0 \end{bmatrix}\tilde{D}_{21},\ \Xi_3 = \begin{bmatrix} W \\ 0 \end{bmatrix}\tilde{H},$$

$$\Xi_4 = [P\hat{A}_{\mathrm{d}}\ \ 0],\ \Xi_5 = \begin{bmatrix} -(1-\rho)T^{\mathrm{T}}ST & \epsilon_2^{-1}\hat{F}_2^{\mathrm{T}} \\ \epsilon_2^{-1}\hat{F}_2 & -\epsilon_2^{-1}I \end{bmatrix},$$

$$\hat{E} = T^{-1}\tilde{E}T,\ \hat{A} = T^{-1}\tilde{A}T,\ \hat{A}_{\mathrm{d}} = T^{-1}\tilde{A}_{\mathrm{d}}T,$$

$$\hat{B}_1 = T^{-1}\tilde{B}_1,\ \hat{C}_1 = \tilde{C}_1T,\ \hat{C}_2 = \tilde{C}_2T,$$

$$\hat{M} = T^{-1}\tilde{M},\ \hat{F}_1 = \tilde{F}_1T,\ \hat{F}_3 = \tilde{F}_3T.$$

$T \in \mathbb{R}^{(n+\hat{n})\times(n+\hat{n})}$是非奇异矩阵, 且满足

$$T^{-1}\tilde{B}_2 = \begin{bmatrix} I_{\hat{n}+m} \\ 0 \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{(n+\hat{n})\times(\hat{n}+m)}. \tag{12}$$

若LMI(10)(11)有解, 则分散鲁棒控制器可由下式获得

$$G_{\mathrm{D}} = P_1^{-1}W \in \mathbb{R}^{(\hat{n}+m)\times(\hat{n}+q)}. \tag{13}$$

注 1 定理1的证明分为3个步骤: 1) 根据引理1和引理2证明闭环系统正则、无脉冲的; 2) 根据Lyapunov稳定性理论, Schur补和引理3证明定义2中的条件能成立; 3) 证明控制器具有块对角结构.

4 结论(Conclusion)

研究了一类多通道不确定多通道奇异时滞系统的鲁棒分散H_∞控制器的设计问题. 基于Lyapunov稳定性定理, 通过设定Lyapunov矩阵为合适的块对角结构, 采用矩阵替换的方法推导出了使多通道不确定奇异时滞大系统可鲁棒镇定, 且满足一定的扰动水平的时滞依赖充分条件即线性矩阵不等式有可行解. 给出分散输出反馈控制器的设计方法.

参考文献(References):

[1] DAI L. *Singular Control Systems*[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1989.

[2] LEWIS F L. A survey of linear singular systems: circuits [J]. *Systems, and Signal Processing*, 1986, 5(1): 3 – 36.

[3] 张庆灵. 广义大系统的分散控制与鲁棒控制[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1997.
(ZHANG Qingling. *Decentralized Contro and Robust Contro for Large-Scale Singular System*[M]. Xi'an: Northwest University of Technology Press, 1997.)

[4] MASUBUCHI I, KAMITANE Y, OHARA A, et al. H_∞ control for descriptor systems: a matrix inequalities approach[J]. *Automatica*, 1997, 33(4): 669 – 673.

[5] 徐胜元, 牛玉刚, 杨成梧. 参数不确定性奇异系统的鲁棒H_∞控制[J]. 自动化学报, 2001 27(3): 397 – 400.
(XU Shengyuan, NIU Yugang, YANG Chengwu. Robust H_∞ control for singular systems with parameter uncertainty[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2001, 27(3): 397 – 400.)

[6] FRIDMAN E, SHAKED U. Delay-dependent stability and H_∞ control: constant and time-varying delays[J]. *International Joural of Control*, 2003, 76 (1): 48 – 60.

[7] MAHMOUD M S. Robust H_∞ control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delays[J]. *Automatica*, 2000, 36(4): 627 – 635.

[8] GU K, KHARITONOV V L, CHEN J. *Stability of Time-Delay Systems*[M]. Boston: Birkhuser, 2003.

[9] 陈宁, 桂卫华, IKEDA M. 不确定多通道奇异大系统分散鲁棒H_∞控制[J]. 控制理论与应用, 2007, 24(2): 322 – 328.
(CHEN Ning, GUI Weihua, IKEDA M. Robust decentralized H_∞ control of uncertain multi-channel descriptor systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 4(2): 322 – 328.)

[10] ZHAI G, KOYAMA N, YOSHIDA M. Decentralized H_∞ controller design for descriptor systems[J]. *Control and Intelligent Systems*, 2005, 33(3): 158 – 165.

[11] XU S, VAN DOOREN P, STEFAN R, et al. Robust stability and stabilization for singular systems with state delay and parameter uncertainty[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2002, 47(7): 1122 – 1128.

[12] PETERSEN I R. A stabilization algorithm for a class of uncertain linear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1987, 8(1): 351 – 357.

作者简介:

陈 宁 (1970—), 女, 教授, 博士, 主要研究方向大系统、奇异大系统分散鲁棒控制及参数稳定性理论研究及应用, E-mail: ningchen@mail.csu.edu.cn;

桂卫华 (1950—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为工业大系统递阶和分散控制理论及应用、鲁棒控制、复杂生产过程建模与控制等, E-mail: gwh@mail.csu.edu.cn;

翟贵生 (1967—), 男, 中南大学客座教授, 博士, 主要研究方向为大系统的分散控制、混合切换系统与网络控制系统等, E-mail: zhai@me.osakafu-u.ac.jp.