线性时变不确定时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制*

王景成　苏宏业　金建祥　褚　健　　　　俞　立
(浙江大学工业控制技术研究所·杭州,310027)　(浙江工业大学信息工程学院·杭州,310014)

摘要：本文主要研究了状态和控制同时存在滞后的线性时变不确定时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制问题,给出了对所有容许不确定性,被控对象可二次镇定和满足从干扰输入到控制输出的 H_∞ 范数界约束的无记忆状态反馈鲁棒 H_∞ 控制分析结果,得到了确保鲁棒 H_∞ 控制器存在的充分条件. 文中进一步把不确定系统的鲁棒 H_∞ 控制器设计问题等价为线性时不变系统的状态反馈标准 H_∞ 控制问题,并由此得到鲁棒 H_∞ 控制器综合设计方法.

关键词：鲁棒 H_∞ 控制；时滞；不确定性；变形 Riccati 方程

1　引　言

近几十年来,鲁棒控制理论的研究一直得到研究人员的普遍关注. 鲁棒控制理论有两个重要分支:研究不确定性结构及其变化界限已知的参数鲁棒控制和研究不确定性结构未知但给定从干扰输入到控制输出的 H_∞ 范数约束的 H_∞ 控制理论. 在过去的几十年中,取得了很多令人瞩目的结果. H_∞ 控制问题通常归结为代数 Riccati 方程的求解[1,2]. 考虑到标准 H_∞ 控制问题没有直接针对参数不确定性进行设计,本文将考虑对于参数不确定性具有鲁棒性的 H_∞ 控制问题,即鲁棒 H_∞ 控制问题. 其目的是不仅镇定不确定系统而且对于任意容许的不确定性使闭环控制系统满足 H_∞ 范数界约束条件. 对于无时滞不确定系统已有较多的研究报导[3],对于存在时滞的线性时不变确定性系统的 H_∞ 控制问题也有研究报导[4]. 但是,对于存在参数不确定性的时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制问题的研究还鲜见报导. 本文将重点研究状态和控制同时存在滞后的线性时变不确定时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制器分析和综合问题.

2　系统描述

考虑如下的线性时变不确定时滞系统

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = (A_0 + \Delta A_0(t))x(t) + (A_1 + \Delta A_1(t))x(t-d_1) \\ \qquad\quad + (B_0 + \Delta B_0(t))u(t) + (B_1 + \Delta B_1(t))u(t-d_2) + D_1 w(t), \\ z(t) = (C_1 + \Delta C_1(t))x(t) + (C_2 + \Delta C_2(t))u(t) + D_2 w(t), \\ x(t) = \varphi(t), \quad t \in [-d \quad 0], \quad d = \max\{d_1, d_2\}. \end{cases} \tag{1}$$

其中 $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 是状态向量,$u(t) \in \mathbb{R}^m$ 是控制输入向量,$w(t) \in \mathbb{R}^p$ 是属于 $L_2[0,\infty)$ 的干扰输入向量,$z(t) \in \mathbb{R}^q$ 是控制输出向量,$A_0, A_1, B_0, B_1, C_1, C_2, D_1$ 和 D_2 是具有适当维数的已知实值常数矩阵,$\Delta A_0(t), \Delta A_1(t), \Delta B_0(t), \Delta B_1(t), \Delta C_1(t)$ 和 $\Delta C_2(t)$ 是其元素均为时间 t 的连续函数的实值时变矩阵,它们体现了系统的时变不确定性,d_1 和 d_2 是代表系统时滞的非负常数. $\varphi(t) \in C^n[-d, 0]$ 是其元素均为时间 t 的连续函数的实值向量,表示系统的状态向量初值.

假设标称系统 (A_0, B_0) 能控,参数不确定性具有如下的形式

$$\begin{aligned} &[\Delta A_0(t) \quad \Delta B_0(t)] = HF(t)[E_0 \quad E_1], \quad \Delta A_1(t) = H_1 F(t) E_2, \\ &\Delta B_1(t) = H_2 F(t) E_3, \quad \Delta C_1(t) = H_3 F(t) E_4, \quad \Delta C_2(t) = H_4 F(t) E_5. \end{aligned} \tag{2}$$

* 国家自然科学基金资助项目(69604006).
本文于 1996 年 6 月 24 日收到. 1997 年 2 月 24 日收到修改稿.

其中 $H,H_1,H_2,H_3,H_4,E_0,E_1,E_2,E_3,E_4$ 和 E_5 是具有适当维数的已知实值常数矩阵，$F(t)\in\mathbb{R}^{r\times s}$ 是满足下述不等式约束的未知函数矩阵

$$F^{\mathrm{T}}(t)F(t)\leqslant I. \tag{3}$$

进一步假设 B_1 可分解为 $B_1=B_{11}B_{12}$，其中 $B_{11}\in\mathbb{R}^{n\times r_b}$，$B_{12}\in\mathbb{R}^{r_b\times m}$，$r_b=\mathrm{rank}(B_1)$.

本文将采用下述的无记忆线性状态反馈控制的鲁棒 H_∞ 控制律

$$u(t)=-Kx(t). \tag{4}$$

其中 $K\in\mathbb{R}^{m\times n}$ 是一个常数矩阵. 它可保证对于所有容许不确定性，在零初始状态条件下，闭环系统不仅是二次稳定的，而且满足 H_∞ 范数界约束条件 $\|z(t)\|_2\leqslant\gamma\|w(t)\|_2$.

3 鲁棒 H_∞ 控制分析

首先给出一些定义和引理.

定义 1[5] 如果存在一正定矩阵 P 和一正常数 α 使得对于任意容许的不确定性，Lyapunov 函数

$$V(x,t)=x^{\mathrm{T}}Px+\int_{t-d_1}^{t}x^{\mathrm{T}}(\theta)Q_1x(\theta)\mathrm{d}\theta+\int_{t-d_2}^{t}x^{\mathrm{T}}(\theta)Q_2x(\theta)\mathrm{d}\theta$$

对时间 t 的导数满足条件

$$\dot V(x,t)\leqslant-\alpha\|x\|^2,\quad \forall\ (x,t)\in\mathbb{R}^n\times\mathbb{R}, \tag{5}$$

则称系统(1) ($u(t),w(t)=0$ 时) 是二次稳定的. 如果存在一状态反馈控制 $u(t)=-Kx(t)$ 使闭环系统二次稳定，则称系统(1)($w(t)=0$ 时) 可通过状态反馈二次稳定.

定义 2[3] 给定常数 $\gamma>0$. 如果对于任意容许的时变参数不确定性满足条件：a) 系统是二次稳定的；b) 在零初始条件假设下，满足 H_∞ 范数约束条件 $\|z(t)\|_2\leqslant\gamma\|w(t)\|_2$，则称系统(1) ($u(t)=0$ 时)是 H_∞ 范数界 γ 约束下二次稳定的. 如果存在由(4)式描述的状态反馈控制律使闭环系统满足条件 a)和 b)，则称闭环系统(1)和(4)是 H_∞ 范数界 γ 约束下二次稳定的.

引理 1 假设 x 和 y 是具有适当维数的向量，则有不等式 $2x^{\mathrm{T}}y\leqslant x^{\mathrm{T}}Qx+y^{\mathrm{T}}Q^{-1}y$ 成立，其中 Q 是具有适当维数的正定矩阵.

引理 2 假设 $x_i,i=1,2,\cdots,n$ 是具有适当维数的向量，则对任意正整数 n 下述不等式成立

$$\Big(\sum_{i=1}^{n}x_i\Big)^{\mathrm{T}}\Big(\sum_{i=1}^{n}x_i\Big)\leqslant n\Big(\sum_{i=1}^{n}x_i^{\mathrm{T}}x_i\Big).$$

下面给出在(4)式的控制作用下线性不确定时滞系统(1)的二次稳定条件.

定理 1 假设干扰输入作用为零，如果存在一对称正定矩阵 P 满足不等式

$$S=P(A_0-B_0K)+(A_0-B_0K)^{\mathrm{T}}P+PMP+Q<0. \tag{6}$$

其中

$$M=HH^{\mathrm{T}}+A_1R_1^{-1}A_1^{\mathrm{T}}+B_{11}B_{11}^{\mathrm{T}}+H_1H_1^{\mathrm{T}}+H_2H_2^{\mathrm{T}},$$
$$Q=(E_0-E_1K)^{\mathrm{T}}(E_0-E_1K)+R_1+E_2^{\mathrm{T}}E_2+K^{\mathrm{T}}B_{12}^{\mathrm{T}}B_{12}K+K^{\mathrm{T}}E_3^{\mathrm{T}}E_3K.$$

R_1 是给定的正定矩阵. 那么闭环系统(1)和(4)是二次稳定的.

证 简记 $x_{d_1}=x(t-d_1)$ 和 $x_{d_2}=x(t-d_2)$，并在不会产生歧义的前提下忽略自变量 t. 将控制律(4)代人系统(1)中，并假定零干扰输入作用，则闭环系统变为

$$\begin{aligned}\dot x=&(A_0-B_0K+HF(E_0-E_1K))x\\&+(A_1+H_1FE_2)x_{d_1}-(B_1+H_2FE_3)Kx_{d_2}.\end{aligned} \tag{7}$$

选择如下的 Lyapunov 函数

$$V = x^{\mathrm{T}}Px + \int_{t-d_1}^{t} x^{\mathrm{T}}(\theta)(R_1 + E_2^{\mathrm{T}}E_2)x(\theta)\mathrm{d}\theta + \int_{t-d_2}^{t} x^{\mathrm{T}}(\theta)(R_2 + K^{\mathrm{T}}E_3^{\mathrm{T}}E_3K)x(\theta)\mathrm{d}\theta, \tag{8}$$

取 V 对时间 t 的导数，选取 $R_2 = K^{\mathrm{T}}B_{12}^{\mathrm{T}}B_{12}K$，应用引理1和(3)式，整理后可得

$$\dot{V} \leqslant x^{\mathrm{T}}(t)Sx(t) \leqslant \lambda_{\max}(S)x^{\mathrm{T}}(t)x(t). \tag{9}$$

其中 $\lambda_{\max}(S)$ 表示矩阵 S 的最大特征值. 若取 $\alpha = -\lambda_{\max}(S) > 0$，则矩阵不等式(5)成立. 由定义1可知，闭环系统(1)和(4)是二次稳定的. 证毕.

进一步可得本文的主要结论如下述定理所示，其符号定义与定理1相同.

定理 2 若存在对称正定矩阵 P 满足下述的矩阵不等式

$$\begin{aligned} &5D_2^{\mathrm{T}}D_2 < \gamma^2 I, \\ &S + 5C_1^{\mathrm{T}}C_1 + 5\theta_1 E_4^{\mathrm{T}}E_4 + 5K^{\mathrm{T}}C_2^{\mathrm{T}}C_2K \\ &\quad + 5\theta_2 K^{\mathrm{T}}E_5^{\mathrm{T}}E_5K + PD_1(\gamma^2 I - 5D_2^{\mathrm{T}}D_2)^{-1}D_1^{\mathrm{T}}P < 0. \end{aligned} \tag{10}$$

其中 S 由(6)式定义，θ_1 和 θ_2 定义如下

$$\theta_1 = \lambda_{\max}(H_3^{\mathrm{T}}H_3), \quad \theta_2 = \lambda_{\max}(H_4^{\mathrm{T}}H_4). \tag{11}$$

那么闭环系统(1)和(4)是 H∞ 范数界 γ 约束下二次稳定的.

证 由定理1可知，本定理的证明归结为不等式 $\|z(t)\|_2 \leqslant \gamma\|w(t)\|_2$ 的证明. 考虑泛函指标

$$J = \int_0^{\infty}(z^{\mathrm{T}}(t)z(t) - \gamma^2 w^{\mathrm{T}}(t)w(t))\mathrm{d}t. \tag{12}$$

假设 $x(t) = 0, t \in [-h, 0]$. 闭环系统(1)和(4)显然是二次稳定的. 对于任何非零向量 $w(t) \in L_2[0,\infty)$，可得等式

$$J = \int_0^{\infty}\left[z^{\mathrm{T}}(t)z(t) - \gamma^2 w^{\mathrm{T}}(t)w(t) + \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}V(x,t)\right]\mathrm{d}t - x^{\mathrm{T}}(\infty)Px(\infty) - U_\infty - V_\infty. \tag{13}$$

其中 $V(x,t)$ 由(8)式定义，U_∞ 和 V_∞ 定义如下

$$U_\infty = \lim_{t\to\infty}\int_{t-d_1}^{t} x^{\mathrm{T}}(\theta)(R_1 + E_2^{\mathrm{T}}E_2)x(\theta)\mathrm{d}\theta,$$

$$V_\infty = \lim_{t\to\infty}\int_{t-d_2}^{t} x^{\mathrm{T}}(\theta)(R_2 + K^{\mathrm{T}}E_3^{\mathrm{T}}E_3K)x(\theta)\mathrm{d}\theta.$$

为方便起见，在不会引起混淆的前提下忽略自变量 t，由定理1证明过程中的(9)式，考虑到不等式 $0 \leqslant x^{\mathrm{T}}(\infty)Px(\infty) < \infty$，$U_\infty \geqslant 0, V_\infty \geqslant 0$，(13)式可改写为

$$J \leqslant \int_0^{\infty}(z^{\mathrm{T}}z - \gamma^2 w^{\mathrm{T}}w + x^{\mathrm{T}}Sx + 2x^{\mathrm{T}}PD_1w)\mathrm{d}t. \tag{14}$$

应用引理2和(11)式，整理后可得

$$J \leqslant -\int_0^{\infty}\begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} W \begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}\mathrm{d}t = -\int_0^{\infty}\begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix} W_{11} & W_{12} \\ W_{12}^{\mathrm{T}} & W_{22} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ w \end{bmatrix}\mathrm{d}t. \tag{15}$$

其中

$$W = \begin{bmatrix} -(S + 5C_1^{\mathrm{T}}C_1 + 5\theta_1 E_4^{\mathrm{T}}E_4 + 5K^{\mathrm{T}}C_2^{\mathrm{T}}C_2K + 5\theta_2 K^{\mathrm{T}}E_5^{\mathrm{T}}E_5K) & -D_1^{\mathrm{T}}P \\ -PD_1 & (\gamma^2 I - 5D_2^{\mathrm{T}}D_2) \end{bmatrix}. \tag{16}$$

$J \leqslant 0$ 的充分条件为矩阵 W 正定. 由文献[6]，W 的正定性等价于(10)式的成立. 证毕.

基于上述结果，我们可提出如下的条件：

条件 1 对于一给定的参数 $\gamma>0$ 和一给定的对称正定矩阵 R_1，若存在常数阵 $K\in\mathbb{R}^{m\times n}$ 和对称正定阵 $P\in\mathbb{R}^{n\times n}$ 使(10)式满足，则称闭环系统(1)和(4)满足条件 1.

注 1 由定理 2，容易得出下述结论：满足条件 1 的任意系统是二次镇定的，并且满足 H_∞ 范数界 γ 约束. 因此条件 1 是闭环系统(1)和(4)满足二次镇定和 H_∞ 范数界 γ 约束的充分条件.

4 鲁棒 H_∞ 控制综合

本节将给出同时保证闭环系统二次稳定以及 H_∞ 范数界 γ 约束的控制器综合设计方法. 由引理 2.2[7]，条件 1 等价于下面的命题：构造下面的线性时不变系统

$$\dot{x}(t)=A_0x(t)+B_0u(t)+\overline{D}w(t),\quad z(t)=\overline{E}_1x(t)+\overline{E}_2u(t). \tag{17}$$

其中

$$\overline{D}=[H\quad A_1R_1^{-1/2}\quad B_{11}\quad H_1\quad H_2\quad D_1(\gamma^2I-5D_2^{\mathrm{T}}D_2)^{-1/2}],$$

$$\begin{bmatrix}\overline{E}_1^{\mathrm{T}}\\ \overline{E}_2^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}E_0^{\mathrm{T}} & \sqrt{5}C_1^{\mathrm{T}} & \sqrt{5\theta_1}E_4^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & R^{1/2} & E_2^{\mathrm{T}} & 0 & 0\\ E_1^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & \sqrt{5}C_2^{\mathrm{T}} & \sqrt{5\theta_2}E_5^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & B_{12}^{\mathrm{T}} & E_3^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}},$$

以及一个无记忆状态反馈控制律 $u(t)=-Kx(t)$，那么闭环系统稳定且满足 H_∞ 范数界约束

$$\|(\overline{E}_1-\overline{E}_2K)(sI-A_0+B_0K)^{-1}\overline{D}\|_\infty<1. \tag{18}$$

于是将条件 1 转换为线性时不变系统的状态反馈 H_∞ 控制问题.

为方便起见，将采用下述的记号.

令 $r=\mathrm{rank}(\overline{E}_2)$，$U\in\mathbb{R}^{(5s+2q+n+r_b)\times r}$，$V\in\mathbb{R}^{r\times m}$ 是满足下式的任意矩阵

$$\overline{E}_2=UV,\quad \mathrm{rank}(U)=\mathrm{rank}(V)=r. \tag{19}$$

选择 $\Phi\in\mathbb{R}^{(m-r)\times m}$，使之满足条件

$$\Phi V^{\mathrm{T}}=0,\quad (\Phi=0\text{ if }r=m). \tag{20}$$

定义

$$\Xi=V^{\mathrm{T}}(VV^{\mathrm{T}})^{-1}(U^{\mathrm{T}}U)^{-1}(VV^{\mathrm{T}})^{-1}V. \tag{21}$$

下面我们将给出本节的主要结果.

定理 3 对于给定常数 $\gamma>0$ 和给定正定矩阵 $\hat{Q},R_1\in\mathbb{R}^{n\times n}$，选择满足(20)式的矩阵 $\Phi\in\mathbb{R}^{(m-r)\times m}$，那么闭环系统(1)和(4)满足条件 1 的充要条件为存在正常数 ε 使下面的代数 Riccati 方程

$$(A_0-B_0\Xi E_1^{\mathrm{T}}E_0)^{\mathrm{T}}P+P(A_0-B_0\Xi E_1^{\mathrm{T}}E_0)+P\tilde{M}P+\tilde{Q}+\varepsilon\hat{Q}=0. \tag{22}$$

其中

$$\tilde{M}=\overline{D}\,\overline{D}^{\mathrm{T}}-B_0\Xi B_0^{\mathrm{T}}-\frac{1}{\varepsilon}B_0\Phi^{\mathrm{T}}\Phi B_0^{\mathrm{T}},$$

$$\overline{D}\,\overline{D}^{\mathrm{T}}=HH^{\mathrm{T}}+A_1R_1^{-1}A_1^{\mathrm{T}}+B_{11}B_{11}^{\mathrm{T}}+H_1H_1^{\mathrm{T}}+H_2H_2^{\mathrm{T}}+D_1(\gamma^2I-5D_2^{\mathrm{T}}D_2)^{-1}D_1^{\mathrm{T}},$$

$$\tilde{Q}=5C_1^{\mathrm{T}}C_1+5\theta_1E_4^{\mathrm{T}}E_4+E_2^{\mathrm{T}}E_2+R_1+E_0^{\mathrm{T}}(I-E_1\Xi E_1^{\mathrm{T}})E_0.$$

存在一对称正定解 P. 进一步，如果该解存在，鲁棒 H_∞ 控制律(4)中的反馈阵由下式给出：

$$K=\left(\frac{1}{2\varepsilon}\Phi^{\mathrm{T}}\Phi+\Xi\right)B_0^{\mathrm{T}}P+\Xi E_1^{\mathrm{T}}E_0. \tag{23}$$

证 与文献[7]类似，此处略.

5 仿真例子

下面给出一例子来验证本文结论. 考虑由(1)式所描述的系统，其系统矩阵给出如下：

$$
A_0=\begin{bmatrix}0 & 1\\ 1 & -2\end{bmatrix},\quad \Delta A_0=\begin{bmatrix}r\varphi(t) & r\varphi(t)\\ 0 & 0\end{bmatrix},
$$

$$
A_1=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0.1 & 0.1\end{bmatrix},\quad \Delta A_1=\begin{bmatrix}v\varphi(t) & v\varphi(t)\\ 0 & 0\end{bmatrix},
$$

$$
B_0=\begin{bmatrix}6\\ 5\end{bmatrix},\quad \Delta B_0=\begin{bmatrix}s\varphi(t)\\ 0\end{bmatrix},
$$

$$
B_1=\begin{bmatrix}0.1\\ 0\end{bmatrix},\quad \Delta B_1=\begin{bmatrix}n\varphi(t)\\ 0\end{bmatrix},\quad D_1=\begin{bmatrix}1\\ 1\end{bmatrix},
$$

$$
C_1=[1\quad 1],\quad \Delta C_1=[0\quad p\varphi(t)],
$$

$$
C_2=1,\quad \Delta C_2=q\varphi(t),\quad D_2=0.35.
$$

其中 $|\varphi(t)|\leqslant 1,\forall\ t$. 若取 $r,v,s,n,p,q=0.1,R_1=Q=I,\gamma=1,\varepsilon=0.1$ 时，(22)式所给出的 Riccati 方程的对称正定解为

$$
P=\begin{bmatrix}1.6432 & 0.7477\\ 0.7477 & 0.8448\end{bmatrix}.
$$

从而得到不确定时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制器 $u=-2.2418x_1-1.4367x_2$.

6 结　论

本文重点研究了状态和控制同时存在滞后，并且不确定是时变的线性时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制问题. 所得到的基于变形 Riccati 方程解的状态反馈控制律不仅使得闭环系统是二次稳定的，而且确保闭环系统满足 H_∞ 范数界约束. 最后通过构造等价的线性时不变系统的状态反馈标准 H_∞ 控制问题，给出了可确保变形 Riccati 方程可解性的控制器综合方法.

参 考 文 献

1 Doyle, J. C., Glover, K., Khargonekar, P. P. and Francis, B. A.. State-space solution to standard H^2 and H^∞ control problem. IEEE Trans. Automat. Contr., 1989, AC-34(8): 881－897

2 Glover, K. and Doyle, J. C.. State-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an H^∞ norm bound and relations to risk sensitivity. Systems & Control Lett., 1988, 11(3): 167－172

3 Xie, L. and Souza, C. E.. Robust H^∞ control for linear systems with norm-bounded time-varying uncertainty. IEEE Trans. Automat. Contr., 1992, AC-37(8): 1188－1191

4 Choi, H. H. and Chung, M. J.. Memoryless H^∞ controller design for linear systems with delayed state and control. Automatica, 1995, 31(6): 917－919

5 Khargonekar, P. P., Petersen, I. R. and Zhou, K.. Robust stabilization of uncertain linear systems: quadratic stabilizability and H^∞ control theory. IEEE Trans. Automat. Contr., 1990, AC-35(3): 356－361

6 Kreindler, E. and Jameson, A.. Conditions for Nonnegativeness of Partitioned Matrices. IEEE Trans. Automat. Contr, 1972, AC-17(1): 147－148

7 Zhou, K. and Khargonekar, P. P.. An algebraic Riccati equation approach to H^∞ optimization. Systems & Control Lett., 1988, 11(2): 85－91

Robust H_∞ Controller Design for Linear Time-Varying Uncertain Systems with Delayed State and Control

WANG Jingcheng, SU Hongye, JIN Jianxiang and CHU Jian
(Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University · Hangzhou, 310027, PRC)
YU Li
(Department of Automation, Zhejiang University of Technology · Hangzhou, 310014, PRC)

Abstract: This paper focuses on analysis and synthesis of robust H_∞ control for linear time-varying uncertain dynamic systems with delayed state and control. The paper presents a static state feedback controller which quadratically stabilizes the plant and reduces the effect of the disturbance input on the controlled output to a prescribed levels for all admissible uncertainties. The sufficient conditions for robust H_∞ controller design are derived. An equivalent linear time-invariant structural description for the time-varying uncertain systems with delayed state and control is obtained.

Key words: robust H_∞ control; time-delay systems; uncertainty; modified Riccati equation

本文作者简介

王景成 1972年生. 1992年毕业于西北工业大学，1995年获西北工业大学工学硕士学位，现于浙江大学工业控制研究所攻读博士学位. 主要研究兴趣是鲁棒控制，时滞系统控制，控制系统计算机辅助设计，实时控制算法研究.

苏宏业 1969年生. 1990年毕业于南京化工大学，1993年获浙江大学工业自动化专业硕士学位，1995年获浙江大学工业自动化专业博士学位，现于浙江大学工业控制研究所任教和研究. 主要研究兴趣是鲁棒控制，时滞系统控制，非线性系统控制和PID自整定理论和应用研究.

金建祥 1963年生. 1984年毕业于浙江大学，现为浙江大学工业控制研究所副教授. 主要从事DCS和智能化仪器仪表开发研究及PID自整定应用研究.

褚 健 1963年生. 1982年毕业于浙江大学，1986年至1989年留学日本京都大学. 获工学博士学位. 1993年被聘为浙江大学教授，博士生导师. 现为工业自动化国家工程研究中心副主任. 主要从事时滞系统控制，非线性控制，鲁棒控制等理论与应用研究.

俞 立 1961年生. 1982年获南开大学控制理论专业学士学位，1988年获浙江大学工业自动化专业硕士学位，1993年至1995年获瑞士联邦政府奖学金留学瑞士联邦洛桑理工学院，现为浙江工业大学信息工程学院副教授. 主要研究领域包括不确定系统的鲁棒控制，H_∞控制，大系统的分散控制和时滞系统的控制等. 发表论文50余篇.