第25卷 第2期 自 动 化 学 报 Vol. 25, No. 2
1999年3月 ACTA AUTOMATICA SINICA Mar., 1999

短 文

不确定状态滞后系统时滞相关鲁棒 H_∞ 控制[1)]

曹永岩 孙优贤
(浙江大学工业控制技术研究所 杭州 310027)

摘 要 研究了不确定状态滞后系统的鲁棒 H_∞ 控制问题,假定参数不确定性时变未知但有界. 基于 LMI 方法,提出了一种新的鲁棒无记忆状态反馈 H_∞ 控制器的设计方法,得出的结论与时滞大小有关,相对于时滞无关的结论具有较少的保守性.

关键词 不确定线性系统, H_∞ 控制, 时滞, 鲁棒控制, 线性矩阵不等式(LMI).

DELAY-DEPENDENT ROBUST H_∞ CONTROL FOR UNCERTAIN STATE DELAYED SYSTEMS

CAO Yongyan SUN Youxian
(*Institute of Industrial Process Control, Zhejiang University, Hangzhou* 310027)

Abstract This paper deals with the robust H_∞ control problem for uncertain state delayed systems. The parameter uncertainties are time-varying and unknown but norm-bounded. Based on the LMI approach, a new method for designing a robust memoryless state feedback H_∞ control law is proposed to stabilize this class of uncertain time-delay systems and to reduce the effect of the disturbance input on the controlled output to a prescribed level for all admissible uncertainties. The results depend on the size of the delays and may be less conservative.

Key words Uncertain linear systems, H_∞ control, time-delay, robust control, linear matrix inequality.

1 引言

近年来时滞系统的鲁棒控制及鲁棒 H_∞ 控制得到了广泛的研究,然而大部分结论都是时滞无关的(或称独立时滞)(delay-independent)[5,6]. 众所周知,实际系统中的时滞一

1)国家自然科学基金(69604007, 69635010)、中国博士后基金、浙江大学曹光彪高科技发展基金资助项目.
收稿日期 1997-01-24 收修改稿日期 1998-04-29

般都是有界的,无穷时滞在实际系统中一般不会出现.这种时滞无关的鲁棒控制结果都是比较保守的,而且很多情况下无法设计出合适的时滞无关的鲁棒控制律[3].本文基于 Lyapunov 泛函方法,在通常的 Lyapunov 函数的基础上增加一合适的二次双积分项,给出了一种参数不确定状态滞后系统的与时滞相关的(delay-dependent)鲁棒 H_∞控制器的设计方法.

2 问题描述

考虑如下多状态滞后系统

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}(t)=[A+\Delta A(t)]\boldsymbol{x}(t)+\sum\limits_{i=1}^{l}[A_i+\Delta A_i(t)]\boldsymbol{x}(t-\tau_i)+B_w\boldsymbol{w}(t)+[B+\Delta B(t)]\boldsymbol{u}(t),\\ \boldsymbol{z}(t)=C\boldsymbol{x}(t)+D\boldsymbol{u}(t),\\ \boldsymbol{x}(t)=\phi(t),\qquad t\in[-\tau,0],\end{cases}\tag{1}$$

式中 $\boldsymbol{x}(t)\in\mathscr{R}^n$ 表示系统的状态向量,$\boldsymbol{u}(t)\in\mathscr{R}^m$ 表示系统的输入向量,$\boldsymbol{w}(t)\in\mathscr{R}^p$ 表示系统的干扰输入向量,$A,A_i,(i=1,\cdots,l),B_w,B,C,D$ 为合适维数的已知常矩阵,$\Delta A(t)$, $\Delta B(t),\Delta A_i(t)$为实值连续矩阵函数,表示系统矩阵 $A,B,A_i,(i=1,\cdots,l)$中的时变参数不确定性,τ_i 表示系统中的常数滞后,并且满足

$$0<\tau_i\leqslant\tau,i=1,\cdots,l.$$

为描述非滞后项的方便,本文记 $\tau_0=0$. $\phi(t)$是一实值连续初始向量函数.本文假定不确定性可以描述为

$$[\Delta A(t)\ \Delta B(t)]=D_0F_0(t)[E_a\ E_b],\Delta A_i(t)=D_iF_d(t)E_i,i=1,\cdots,l,\tag{2}$$

式中 $D_0,E_a,E_b,D_i,E_i,i=1,\cdots,l$,是合适维数的已知常实矩阵,$F_0(t)\in\mathscr{R}^{k_0\times j_0}$,$F_d(t)\in\mathscr{R}^{k_d\times j_d}$表示未知的实值时变矩阵,其元素 Lebesgue 可测且有界,且

$$F_0^{\mathrm{T}}(t)F_0(t)\leqslant I,\quad F_d^{\mathrm{T}}(t)F_d(t)\leqslant I,\forall\ t.\tag{3}$$

式中 I 表示合适维数的单位矩阵.为简单起见,记

$$\widetilde{A}(t)=A+\Delta A(t),\quad \widetilde{B}(t)=B+\Delta B(t),\quad \widetilde{A}_i(t)=A_i+\Delta A_i(t),\quad i=1,\cdots,l.$$

本文考虑设计无记忆状态反馈控制律

$$\boldsymbol{u}(t)=K\boldsymbol{x}(t),\quad K\in\mathscr{R}^{m\times n},\tag{4}$$

使得如下闭环系统渐近稳定

$$\dot{\boldsymbol{x}}(t)=\sum_{i=0}^{l}\widetilde{A}_i\boldsymbol{x}(t-\tau_i)+B_w\boldsymbol{w}(t),\quad \boldsymbol{z}(t)=(C+DK)\boldsymbol{x}(t),\tag{5}$$

其中

$$\widetilde{A}_0=A_0+\Delta A_0(t),\ A_0=A+BK,\ \Delta A_0(t)=D_0F_0(t)E_0,\ E_0=E_a+E_bK,$$

且对于式(3)所示的所有不确定性,其传递函数满足给定的 H_∞-性能指标 γ,即 $\|T_{zw}\|_\infty<\gamma$.

定义1. 称不确定时滞系统(1)鲁棒稳定,如果对于所有可能不确定性 $F_0(t),F_d(t)$, $\boldsymbol{u}(t)\equiv0$时泛函微分方程(1)的平凡解 $\boldsymbol{x}(t)=0$全局一致渐近稳定.称不确定时滞系统(1)鲁棒可镇定,如果对于所有可能不确定性 $F_0(t),F_d(t)$,存在状态反馈控制律 $\boldsymbol{u}(t)=K\boldsymbol{x}(t)$使得闭环系统(5)鲁棒稳定.

定义2. 给定正实常数 $\gamma>0$，称不确定时滞系统(1)鲁棒稳定且具有 H_∞性能界 γ，如果系统(1)鲁棒稳定且在零初始条件下，对于任意非零 $\boldsymbol{w}(t)\in L_2[0,\infty)$和所有允许不确定性 $F_0(t)$，$F_d(t)$均使得

$$\|\boldsymbol{z}\|_2<\gamma\|\boldsymbol{w}\|_2.$$

称不确定时滞系统(1)可鲁棒 H_∞控制，如果对于所有可能不确定性 $F_0(t)$，$F_d(t)$，存在控制律 $\boldsymbol{u}(t)=K\boldsymbol{x}(t)$使得闭环系统(4)鲁棒稳定并且其传递函数满足给定的 H_∞-性能指标 γ.

引理1[4]. 对于任意向量 $\boldsymbol{z},\boldsymbol{y}\in\mathscr{R}^n$ 以及任意正定矩阵 $X\in\mathscr{R}^{n\times n}$，一定有

$$2\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{y}\leqslant\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}X^{-1}\boldsymbol{z}+\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}}X\boldsymbol{y}.$$

引理2[4]. 给定合适维数的实矩阵 A,D,E,F，假定$\|F\|\leqslant1$，一定有

a) 对于任意标量 $\varepsilon>0$，$DFE+E^{\mathrm{T}}F^{\mathrm{T}}D^{\mathrm{T}}\leqslant\varepsilon^{-1}DD^{\mathrm{T}}+\varepsilon E^{\mathrm{T}}E$；

b) 对于任意矩阵 $P>0$，一定存在标量 $\varepsilon>0$使得 $\varepsilon I-EPE^{\mathrm{T}}>0$，

$$(A+DFE)P(A+DFE)^{\mathrm{T}}\leqslant APA^{\mathrm{T}}+APE^{\mathrm{T}}(\varepsilon I-EPE^{\mathrm{T}})^{-1}EPA^{\mathrm{T}}+\varepsilon DD^{\mathrm{T}};$$

c) 对于任意矩阵 $P>0$，一定存在标量 $\varepsilon>0$使得 $P-\varepsilon DD^{\mathrm{T}}>0$，

$$(A+DFE)^{\mathrm{T}}P^{-1}(A+DFE)\leqslant A^{\mathrm{T}}(P-\varepsilon DD^{\mathrm{T}})^{-1}A+\varepsilon^{-1}EE^{\mathrm{T}}.$$

3 主要结论

定理1. 给定不确定状态滞后系统(1)，对于任意常数时滞 τ_i，如果存在对称正定矩阵 X,Y,P_{ij}，及正常数 $\xi_{ij}>0,\varepsilon_i>0,\alpha_j>0,i=1,2,\cdots,l;j=0,\cdots,l$，满足如下LMI：

$$S=\begin{bmatrix}S_0 & H\\ H^{\mathrm{T}} & -J\end{bmatrix}<0,\tag{6}$$

其中 $W_i=\sum_{j=0}^{l}P_{ij},\quad \widetilde{A}=A+\sum_{i=1}^{l}A_i,$

$$\begin{aligned}
H&=[H_1\quad H_2\quad H_3\quad H_4],\quad J=\mathrm{diag}(J_1\quad J_2\quad J_3\quad J_4),\\
S_0&=\widetilde{A}X+X\widetilde{A}^{\mathrm{T}}+BY+Y^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}+\alpha_0D_0D_0^{\mathrm{T}}+\sum_{i=1}^{l}(\alpha_i+\tau_i\varepsilon_i)D_iD_i^{\mathrm{T}}+\sum_{i=1}^{l}\tau_iA_iW_iA_i^{\mathrm{T}},\\
H_1&=[XE_a^{\mathrm{T}}+Y^{\mathrm{T}}E_b^{\mathrm{T}}\quad XE_1^{\mathrm{T}}\quad\cdots\quad XE_l^{\mathrm{T}}],\quad J_1=\mathrm{diag}(\alpha_0I,\alpha_1I,\cdots,\alpha_lI),\\
H_2&=[\tau_1A_1W_1E_1^{\mathrm{T}}\quad \tau_2A_2W_2E_2^{\mathrm{T}}\quad\cdots\quad \tau_lA_lW_lE_l^{\mathrm{T}}],\\
J_2&=\mathrm{diag}[\tau_1(\varepsilon_1I-E_1W_1E_1^{\mathrm{T}}),\tau_2(\varepsilon_2I-E_2W_2E_2^{\mathrm{T}}),\cdots,\tau_l(\varepsilon_lI-E_lW_lE_l^{\mathrm{T}})],\\
\overline{H}_i&=[XA^{\mathrm{T}}+Y^{\mathrm{T}}B^{\mathrm{T}}\quad XA_1^{\mathrm{T}}\quad\cdots\quad XA_l^{\mathrm{T}}],\\
\overline{J}_i&=\mathrm{diag}(P_{i0}-\xi_{i0}D_0D_0^{\mathrm{T}},P_{i1}-\xi_{i1}D_1D_1^{\mathrm{T}},\cdots,P_{il}-\xi_{il}D_lD_l^{\mathrm{T}}),\\
H_3&=[\tau_1\overline{H}_1\quad \tau_2\overline{H}_2\quad\cdots\quad \tau_l\overline{H}_l],\qquad J_3=\mathrm{diag}(\tau_1\overline{J}_1,\tau_2\overline{J}_2,\cdots,\tau_l\overline{J}_l),\\
\hat{H}_i&=[XE_a^{\mathrm{T}}+Y^{\mathrm{T}}E_b^{\mathrm{T}}\quad XE_1^{\mathrm{T}}\quad\cdots\quad XE_l^{\mathrm{T}}],\quad \hat{J}_i=\mathrm{diag}(\xi_{i0}I,\xi_{i1}I,\cdots,\xi_{il}I),\\
H_4&=[\tau_1\hat{H}_1\quad \tau_2\hat{H}_2\quad\cdots\quad \tau_l\hat{H}_l],\qquad J_4=\mathrm{diag}(\tau_1\hat{J}_1,\tau_2\hat{J}_2,\cdots,\tau_l\hat{J}_l),
\end{aligned}\tag{7}$$

则该系统可通过无记忆状态反馈控制律 $\boldsymbol{u}(t)=YX^{-1}\boldsymbol{x}(t)$鲁棒镇定.

证明. 设 $\boldsymbol{x}(t)$，$t\geqslant0$是系统(5)在初始时间为零，初始状态为 $\phi(t)$时的解. 由假设可知 $t\geqslant0$时，$\boldsymbol{x}(t)$连续可微，因此对于 $t\geqslant\tau_i$ 有[1]

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{x}(t-\tau_i) = & \boldsymbol{x}(t) - \int_{-\tau_i}^{0} \dot{\boldsymbol{x}}(t+\theta)\mathrm{d}\theta = \\
& \boldsymbol{x}(t) - \int_{-\tau_i}^{0} \Big\{ \sum_{j=0}^{l} \widetilde{A}_j(t+\theta)\boldsymbol{x}(t-\tau_j+\theta) \Big\} \mathrm{d}\theta.
\end{aligned}
$$

这样系统(5)等价于

$$
\begin{cases}
\dot{\boldsymbol{x}}(t) = \sum_{i=0}^{l} \widetilde{A}_i(t)\boldsymbol{x}(t) - \sum_{i=1}^{l} \int_{-\tau_i}^{0} \widetilde{A}(t) \Big\{ \sum_{j=0}^{l} \widetilde{A}_j(t+\theta)\boldsymbol{x}(t-\tau_j+\theta) \Big\} \mathrm{d}\theta, \\
\boldsymbol{x}(t) = \phi(t), \qquad t \in [-2\tau, 0].
\end{cases} \tag{8}
$$

因此系统(8)的全局一致渐近稳定性将保证系统(5)的全局一致渐近稳定性[3]. 构造如下 Lyapunov 函数

$$
V(\boldsymbol{x},t) = \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)P\boldsymbol{x}(t) + W(\boldsymbol{x},t), \tag{9}
$$

$$
W(\boldsymbol{x},t) = \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=0}^{l} \int_{-\tau_i}^{0} \int_{l-\tau_j+\theta}^{l} x^{\mathrm{T}}(s)\widetilde{A}_j^{\mathrm{T}}(s+\tau_j)P_{ij}^{-1}\widetilde{A}_j(s+\tau_j)\boldsymbol{x}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta, \tag{10}
$$

式中 P, P_{ij}为对称正定矩阵，沿式(8)的轨迹对 $V(\boldsymbol{x},t)$求导

$$
\begin{aligned}
\dot{V}(\boldsymbol{x},t) = & \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\Big[P\sum_{i=0}^{l}\widetilde{A}_i + \Big(\sum_{i=0}^{l}\widetilde{A}_i\Big)^{\mathrm{T}}P\Big]\boldsymbol{x}(t) - \\
& \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=0}^{l}\int_{-\tau_i}^{0} 2\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)P\widetilde{A}_i(t)\widetilde{A}_j(t+\theta)\boldsymbol{x}(t-\tau_j+\theta)\mathrm{d}\theta + \dot{W}(\boldsymbol{x},t),
\end{aligned} \tag{11}
$$

$$
\begin{aligned}
\dot{W}(\boldsymbol{x},t) = & \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=0}^{l}\tau_i\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\widetilde{A}_j^{\mathrm{T}}(t+\tau_j)P_{ij}^{-1}\widetilde{A}_j(t+\tau_j)\boldsymbol{x}(t) - \\
& \sum_{i=1}^{l}\sum_{j=0}^{l}\int_{-\tau_i}^{0} \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau_j+\theta)\widetilde{A}_j^{\mathrm{T}}(t+\theta)P_{ij}^{-1}\widetilde{A}_j(t+\theta)\boldsymbol{x}(t-\tau_j+\theta)\mathrm{d}\theta.
\end{aligned} \tag{12}
$$

令 $X=P^{-1}, Y=KX$，由引理1，2不难发现，如果 LMI(6)式成立则有 $\dot{V}(\boldsymbol{x},t)<0$. 因此有不确定系统(5)渐近稳定.

定理2. 给定 H_∞性能指标 $\gamma>0$，对于任意常数时滞 τ_i，如果存在对称正定矩阵 X, Y, P_{ij}, Q_i，以及标量 $\xi_{ij}>0, \varepsilon_i>0, \alpha_j>0, \zeta_i>0, i=1,\cdots,l; j=0,\cdots,l$，满足如下 LMI：

$$
\begin{bmatrix}
S & H_5 & (CX+DY)^{\mathrm{T}} & B_w \\
H_5^{\mathrm{T}} & -J_5 & 0 & 0 \\
CX+DY & 0 & -I & 0 \\
B_w^{\mathrm{T}} & 0 & 0 & -\gamma^2 I + \sum_{i=1}^{l}\tau_i B_\omega^{\mathrm{T}}Q_iB_\omega
\end{bmatrix} < 0, \tag{13}
$$

式中 S 由式(6)定义，其它矩阵定义如下：

$$
\widetilde{H}_i = [D_i \quad A_i], \widetilde{J}_i = \mathrm{diag}(\zeta_i, I, Q_i - \zeta_i E_i^{\mathrm{T}}E_i), \quad i = 1,\cdots l,
$$

$$
H_5 = [\tau_1\widetilde{H}_1 \quad \tau_2\widetilde{H}_2 \quad \cdots \quad \tau_l\widetilde{H}_l], \quad J_5 = \mathrm{diag}(\tau_1\widetilde{J}_1, \tau_2\widetilde{J}_2, \cdots, \tau_l\widetilde{J}_l).
$$

则不确定状态滞后系统(1)可通过无记忆状态反馈 $\boldsymbol{u}(t)=YX^{-1}\boldsymbol{x}(t)$鲁棒 H_∞控制.

证明. 考虑系统(5)，显然 LMI(13)式包含了 LMI(6)式，因此 LMI(13)式成立时系统(5)渐近稳定. 下面证明此时$\|\boldsymbol{z}(t)\|$的上界为 $\gamma\|\boldsymbol{w}\|_2, \boldsymbol{w}(t)\in L_2[0,\infty)$. 假定 $\boldsymbol{x}(t)=0, t\in[-\tau,0]$，并引入

$$J=\int_0^{\infty}[\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{z}(t)-\gamma^2\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(t)\boldsymbol{w}(t)]\mathrm{d}t,$$

构造 Lyapunov 函数

$$V(\boldsymbol{x},t)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)P\boldsymbol{x}(t)+W_1(\boldsymbol{x},t),\tag{14}$$

$$W_1(\boldsymbol{x},t)=W(\boldsymbol{x},t)+\sum_{i=1}^{l}\int_{-\tau_i}^{0}\int_{t+\theta}^{t}\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(s)B_w^{\mathrm{T}}Q_iB_w\boldsymbol{w}(s)\mathrm{d}s\mathrm{d}\theta,\tag{15}$$

式中 P,P_{ij},Q_i 对称正定. 显然

$$\dot{W}_1(\boldsymbol{x},t)=\dot{W}(\boldsymbol{x},t)+\sum_{i=1}^{l}\tau_i\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}B_w^{\mathrm{T}}Q_iB_w\boldsymbol{w}-\sum_{i=1}^{l}\int_{-\tau_i}^{0}\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(t+\theta)B_w^{\mathrm{T}}Q_iB_w\boldsymbol{w}(t+\theta)\mathrm{d}\theta.\tag{16}$$

注意到零初始条件,因此式(5)的状态轨迹满足

$$\dot{\boldsymbol{x}}=\sum_{i=0}^{l}\widetilde{A}_i(t)x-\sum_{i=1}^{l}\int_{-\tau_i}^{0}\widetilde{A}_i\Big\{\sum_{j=0}^{l}\widetilde{A}_j(t+\theta)\boldsymbol{x}(t-\tau_j+\theta)+B_w\boldsymbol{w}(t+\theta)\Big\}\mathrm{d}\theta+B_w\boldsymbol{w}(t),$$

$\boldsymbol{x}=0,\quad \forall\, t\leqslant 0.$

因此 $V(\boldsymbol{x},t)$ 关于时间的导数为

$$\dot{V}(\boldsymbol{x},t)=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}R_1\boldsymbol{x}+\sum_{i=1}^{l}\tau_i\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}B_w^{\mathrm{T}}Q_iB_w\boldsymbol{w}+2\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}PB_w\boldsymbol{w},$$

$$R_1=R+\sum_{i=1}^{l}\tau_iP[A_i(Q_i-\zeta_iE_i^{\mathrm{T}}E_i)^{-1}A_i^{\mathrm{T}}+\zeta_i^{-1}D_iD_i^{\mathrm{T}}]P.$$

因为闭环系统渐近稳定,因此对于任意非零向量 $\boldsymbol{w}(t)\in L_2[0,\infty)$ 有

$$\begin{aligned}\int_0^{\infty}\dot{W}_1(\boldsymbol{x},t)\mathrm{d}t=&\int_0^{\infty}\Big\{\sum_{i=1}^{l}\sum_{j=0}^{l}\int_{-\tau_i}^{0}[\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t)\widetilde{A}_j^{\mathrm{T}}(t+\tau_j)P_{ij}^{-1}\widetilde{A}_j(t+\tau_j)\boldsymbol{x}(t)-\\&\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(t-\tau_j+\theta)\widetilde{A}_j^{\mathrm{T}}(t+\theta)P_{ij}^{-1}\widetilde{A}_j(t+\theta)\boldsymbol{x}(t-\tau_j+\theta)]\mathrm{d}\theta+\\&\sum_{i=1}^{l}\int_{-\tau_i}^{0}[\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(t)B_w^{\mathrm{T}}Q_iB_w\boldsymbol{w}(t)-\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}(t+\theta)B_w^{\mathrm{T}}Q_iB_w\boldsymbol{w}(t+\theta)]\mathrm{d}\theta\Big\}\mathrm{d}t=\\&0,\end{aligned}$$

进一步有

$$\begin{aligned}J=&\int_0^{\infty}[\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{z}-\gamma^2\boldsymbol{w}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{w}+\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}V_1(\boldsymbol{x},t)]\mathrm{d}t-\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(\infty)P\boldsymbol{x}(\infty)\leqslant\\&\int_0^{\infty}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\\boldsymbol{w}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}\begin{bmatrix}R_1+(C+DK)^{\mathrm{T}}(C+DK) & PB_w\\ B_w^{\mathrm{T}}P & -\gamma^2I+\sum_{i=1}^{l}\tau_iB_w^{\mathrm{T}}Q_iB_w\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{x}\\\boldsymbol{w}\end{bmatrix}\mathrm{d}t,\end{aligned}$$

由 Schur 补可知 $J<0$当仅当 LMI(13)式成立.

这两个定理根据 LMI 的可解性给出了不确定状态滞后系统(1)可鲁棒镇定以及可鲁棒 H_∞控制的时滞相关条件.

本文的结论由 LMI 描述,目前 LMI 的解法已比较成熟,这些不等式可直接由 MATLAB 的 LMI 工具箱求解,不需调整任何参数.

参 考 文 献

1 Hale J. Theory of Functional Differential Equations. New York: Springer, 1977

2 Boyd, S, El Ghaoui L, Feron E and Balakrishnan V, Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory, SIAM, 1994

3 Su JH. Further results on the robust stability of linear systems with a single time delay. *Systems & Control Lett.*, 1994, **23**(5):375—379

4 Wang Y, Xie L and de Souza CE, Robust control of a class of uncertain nonlinear systems. *Syst. Contr. Lett.*, 1992, **19**(2):139—149

5 曹永岩,孙优贤. 具有多状态滞后的不确定时变时滞系统鲁棒镇定. 自动化学报, 1998, **24**(3):377—381

6 Lee J H., Kim SW and Kwon WH, Memoryless H_∞ controllers for state delayed systems. *IEEE Trans. Automat. Contr.*, 1994, **39**(1):159—162

7 Cao Y Y, Sun Y X, Cheng C -Delay-dependent robust stabilization of uncertain systems with multiple state delays. To appear in *IEEE Trans. Auto. Control*, 1998, **43**(10):

曹永岩　1968年生. 1996年3月在浙江大学获工学博士学位,1996年4月至1998年5月在浙江大学从事博士后研究,1997年12月至1998年5月在香港大学机械工程系从事访问研究,现为浙江大学工业控制技术研究所副研究员,并于1998年7月获得德国洪堡研究奖学金到德国杜伊斯堡大学从事博士后研究. 感兴趣的研究领域为鲁棒控制,时滞系统,容错控制等.

孙优贤　1940年生. 浙江大学工业控制技术研究所教授,博士生导师,中国工程院院士.