第 23 卷第 4 期
2006 年 8 月

控 制 理 论 与 应 用
Control Theory & Applications

Vol. 23 No. 4
Aug. 2006

文章编号：1000−8152(2006)04−0636−04

离散多时滞系统的时滞相关鲁棒稳定性分析

张文安, 俞　立, 张贵军

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310032)

摘要: 研究了具有凸多面体不确定性的离散多时滞系统鲁棒稳定性问题. 通过引入一种新的二次型的有限和不等式, 采用参数依赖型Lyapunov泛函, 导出了适用于具有凸多面体不确定性离散时滞系统的一个新的时滞相关稳定性条件. 该方法不需要进行系统模型变换即可得到时滞相关的结果, 和已有文献相比, 所得结果具有更小的保守性. 数值例子说明了该方法的有效性.

关键词: 离散系统; 时滞系统; 凸多面体不确定性; 参数依赖型Lyapunov泛函; 时滞依赖准则

中图分类号: TP13　　**文献标识码**: A

Delay-dependent robust stability analysis for discrete-time systems with multiple delays

ZHANG Wen-an, YU Li, ZHANG Gui-jun

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou Zhejiang 310032, China)

Abstract: The robust stability of discrete-time systems with polytopic-type uncertainties and multiple state delays is investigated in this paper. A new delay-dependent stability condition is derived by using a newly established inequality for the finite sum of quadratic terms and the parameter-dependent Lyapunov functionals. There is no need of model transformations in the proposed method and the obtained results are less conservative than some existing ones in the literature. Two numerical examples are also given to demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: discrete-time systems; time-delay systems; polytopic-type uncertainties; parameter-dependent Lyapunov functionals; delay-dependent criteria

1　引言(Introduction)

目前国内外学者关于不确定时滞系统的分析和综合问题研究已取得了丰富的成果[1~5], 但所得结果大多是时滞无关的, 采用的Lyapunov泛函大多不依赖于不确定参数, 即参数独立的. 为了降低结果的保守性, 人们研究了时滞相关的稳定性条件和性能准则问题. 近年来, 又有学者采用参数依赖型Lyapunov泛函来研究不确定时滞系统的鲁棒性能分析和综合问题, 以进一步降低结果的保守性. 文献[6]基于参数依赖Lyapunov函数方法研究了一类不确定系统的H_∞性能分析问题, 但所得结果不适用于时滞系统. 进一步, 文献[7]利用参数依赖Lyapunov泛函方法研究了一类连续时间不确定时滞系统的鲁棒稳定性问题, 得到了一个时滞相关的鲁棒稳定性充分条件. 但是, 关于时滞相关问题的研究仍存在一些不足. 一是适用于离散时间系统的研究成果不多; 二是大多数研究成果仍然具有较大的保守性. 原因主要有3个: 首先是不等价模型变换的引入或者是引入的模型变换需要增加额外的约束条件, 例如, 中立型模型变换和参数化中立型模型变换等; 其次是交叉项的界定, 如基于Park不等式[1]和Moon不等式[2]的交叉项界定技术都存在着较大的保守性; 三是适用于时滞系统的参数依赖型时滞相关稳定性条件和性能准则的研究还不多见. 文献[8]采用模型变换, 利用Moon不等式, 通过定义新的Lyapunov泛函并引入Oliveira的参数依赖Lyapunov泛函思想[9]得到了适用于离散多时滞系统的参数依赖型时滞相关稳定性条件, 但所得结果仍有改进的余地.

针对以上提出的几个问题, 受文献[4]积分不等式思想的启发, 本文引入一种新的有限和不等式方法, 不需要通过模型变换即可直接得到时滞相关的

收稿日期: 2004−10−23; 收修改稿日期: 2005−10−18.
基金项目: 国家杰出青年科学基金资助项目 (60525304).

结果, 并采用Oliveira的参数依赖型Lyapunov泛函方法[6]得到了一个新的适用于具有多面体不确定性离散多时滞系统的时滞相关稳定性条件, 从而有效降低了所得结果的保守性.

2 问题的描述(Problem statement)

考虑具有多重状态滞后的不确定离散时间系统

$$x(k+1)=A_0x(k)+\sum_{j=1}^{q}A_{dj}x(k-d_j). \tag{1}$$

其中: $x(k)\in\mathbb{R}^n$ 为系统状态变量, d_j是未知时滞, 且满足$0\leqslant d_j\leqslant \bar{d}_j$, $j=1,\cdots,q$. 状态空间模型(1)中的系数矩阵假定为满足以下描述的凸多面体不确定性:

$$\begin{aligned}\varGamma:=&[A_0,A_{d1},\cdots,A_{dq}]\in\varOmega:=\\&\{[A_0(\alpha),A_{d1}(\alpha),\cdots,A_{dq}(\alpha)]=\\&\sum_{i=1}^{N}\alpha_i[A_{0i},A_{d1i},\cdots,A_{dqi}],\\&\sum_{i=1}^{N}\alpha_i=1,\ \alpha_i\geqslant 0\}.\end{aligned} \tag{2}$$

本文要研究的问题是采用参数依赖型Lyapunov泛函, 导出系统(1)的时滞相关鲁棒稳定性条件.

3 时滞相关鲁棒稳定性条件(Delay-dependent robust stability conditions)

在得到主要结果之前, 首先建立以下的一个有限和不等式:

引理 1　设$x(k)\in\mathbb{R}^n$, 则对$\forall R_j=R_j^{\mathrm{T}}>0$, $\forall Y_0$, $Y_j\in\mathbb{R}^{n\times n}$ 以及$\forall d_j>0(j=1,\cdots,q)$以下不等式成立:

$$\begin{aligned}&-\sum_{j=1}^{q}\sum_{m=k-d_j}^{k-1}\eta^{\mathrm{T}}(m)R_j\eta(m)\leqslant\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\begin{bmatrix}Y_{11}&Y_{12}\\Y_{12}^{\mathrm{T}}&Y_{22}\end{bmatrix}\xi(k)+\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\begin{bmatrix}Y_0^{\mathrm{T}}\\\tilde{Y}_q^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\sum_{j=1}^{q}(\bar{d}_j^{-1}R_j)^{-1}[Y_0\quad\tilde{Y}_q]\xi(k).\end{aligned} \tag{3}$$

其中

$$\begin{aligned}&Y_{11}=qY_0+qY_0^{\mathrm{T}},\ \tilde{Y}_q=[Y_1\ \ Y_2\ \ \cdots\ \ Y_q],\\&Y_{12}=[qY_1-Y_0^{\mathrm{T}}\ \ qY_2-Y_0^{\mathrm{T}}\ \ \cdots\ \ qY_q-Y_0^{\mathrm{T}}],\\&Y_{22}=\begin{bmatrix}-Y_1-Y_1^{\mathrm{T}}&-Y_2-Y_1^{\mathrm{T}}&\cdots&-Y_q-Y_1^{\mathrm{T}}\\-Y_1-Y_2^{\mathrm{T}}&-Y_2-Y_2^{\mathrm{T}}&\cdots&-Y_q-Y_2^{\mathrm{T}}\\\vdots&\vdots&\vdots&\vdots\\-Y_1-Y_q^{\mathrm{T}}&-Y_2-Y_q^{\mathrm{T}}&\cdots&-Y_q-Y_q^{\mathrm{T}}\end{bmatrix},\\&\eta(m)=x(m+1)-x(m),\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)=[x^{\mathrm{T}}(k)\ \ x^{\mathrm{T}}(k-d_1)\ \ \cdots\ \ x^{\mathrm{T}}(k-d_q)].\end{aligned}$$

证　定义

$$F=[Y_0\ \ Y_1\ \ \cdots\ \ Y_q],\ \ \varPi=\underbrace{\begin{bmatrix}I_{n\times n}&\cdots&I_{n\times n}\end{bmatrix}}_{q}.$$

由熟知的不等式$-2\alpha^{\mathrm{T}}\beta\leqslant\alpha^{\mathrm{T}}R\alpha+\beta^{\mathrm{T}}R^{-1}\beta$, 可得

$$\begin{aligned}&-\sum_{j=1}^{q}\sum_{m=k-d_j}^{k-1}\eta^{\mathrm{T}}(m)R_j\eta(m)\leqslant\\&\sum_{j=1}^{q}\sum_{m=k-d_j}^{k-1}\{2\eta^{\mathrm{T}}(m)F\xi(k)+\xi^{\mathrm{T}}(k)F^{\mathrm{T}}R_j^{-1}F\xi(k)\}=\\&\sum_{j=1}^{q}2\left\{x^{\mathrm{T}}(k)-x^{\mathrm{T}}(k-d_j)\right\}F\,\xi(k)+\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\,F^{\mathrm{T}}\sum_{j=1}^{q}(d_j^{-1}R_j)^{-1}F\xi(k)\leqslant\\&2\xi^{\mathrm{T}}(k)\left[q\,I_{n\times n}-\varPi\right]^{\mathrm{T}}F\xi(k)+\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\,F^{\mathrm{T}}\sum_{j=1}^{q}(\bar{d}_j^{-1}R_j)^{-1}F\xi(k)=\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\left\{\begin{bmatrix}Y_{11}&Y_{12}\\Y_{12}^{\mathrm{T}}&Y_{22}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}Y_0^{\mathrm{T}}\\\tilde{Y}_q^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\sum_{j=1}^{q}(\bar{d}_j^{-1}R_j)^{-1}\,[Y_0\ \tilde{Y}_q]\right\}\xi(k).\end{aligned}$$

引理得证.

以下定理给出了系统(1)鲁棒渐近稳定的一个充分条件.

定理 1　系统(1)鲁棒渐近稳定的一个充分条件是存在$n\times n$矩阵$P_i=P_i^{\mathrm{T}}>0$, $Q_{ji}=Q_{ji}^{\mathrm{T}}>0$, $R_{ji}=R_{ji}^{\mathrm{T}}>0$, Y_0, Y_j, $j=1,\cdots,q$, $i=1,\cdots,N$, 使得

$$U_i=\begin{bmatrix}\varphi_{11}&Y_{12}&A_{0i}^{\mathrm{T}}P_i&\varphi_{14}&Y_0^{\mathrm{T}}\varPi*&-Q_i+Y_{22}&\tilde{A}_{di}^{\mathrm{T}}P_i&\tilde{A}_{di}^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_{1i}&\tilde{Y}_q^{\mathrm{T}}\varPi*&*&-P_i&0&0*&*&*&-\varDelta_{1i}&0*&*&*&*&-\varDelta_{2i}\end{bmatrix}<0,$$
$$i=1,\cdots,N, \tag{4}$$

$$U_{ik}=\begin{bmatrix}\psi_{11}&2Y_{12}&A_{0i}^{\mathrm{T}}P_k+A_{0k}^{\mathrm{T}}P_i&\psi_{14}&2Y_0^{\mathrm{T}}\varPi*&\psi_{22}&\tilde{A}_{di}^{\mathrm{T}}P_k+\tilde{A}_{dk}^{\mathrm{T}}P_i&\psi_{24}&2\tilde{Y}_q^{\mathrm{T}}\varPi*&*&-P_i-P_k&0&0*&*&*&\psi_{44}&0*&*&*&*&\psi_{55}\end{bmatrix}<0,$$
$$i=1,\cdots,N-1,k=i+1,\cdots,N. \tag{5}$$

其中

$$\begin{aligned}&\varphi_{11}=-P_i+\sum_{j=1}^{q}Q_{ji}+Y_{11},\ \varphi_{14}=(A_{0i}-I)^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_{1i},\\&\psi_{11}=-P_i-P_k+\sum_{j=1}^{q}(Q_{ji}+Q_{jk})+2Y_{11},\\&\psi_{14}=(A_{0i}-I)^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_{1k}+(A_{0k}-I)^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_{1i},\end{aligned}$$

$$\psi_{22}=-Q_i-Q_k+2Y_{22},$$
$$\psi_{24}=\tilde{A}_{di}^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_{1k}+\tilde{A}_{dk}^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_{1i},$$
$$\psi_{44}=-\varDelta_{1i}-\varDelta_{1k},\quad \psi_{55}=-\varDelta_{2i}-\varDelta_{2k},$$
$$\tilde{A}_{di}=\begin{bmatrix}A_{d1i}&\cdots&A_{dqi}\end{bmatrix},$$
$$Q_i=\mathrm{diag}(Q_{1i},\ \cdots,\ Q_{qi}),$$
$$\varDelta_{1i}=\mathrm{diag}(\bar{d}_1R_{1i},\cdots,\bar{d}_qR_{qi}),$$
$$\varDelta_{2i}=\mathrm{diag}(\bar{d}_1^{-1}R_{1i},\cdots,\bar{d}_q^{-1}R_{qi}).$$

证 考虑以下参数依赖型Lyapunov泛函

$$V(x(k),\alpha)=V_1(x(k),\alpha)+V_2(x(k),\alpha)+V_3(x(k),\alpha).\tag{6}$$

其中

$$V_1(x(k),\alpha)=x^{\mathrm{T}}(k)P(\alpha)x(k),$$
$$V_2(x(k),\alpha)=\sum_{j=1}^{q}\sum_{m=k-d_j}^{q}x^{\mathrm{T}}(m)Q_j(\alpha)x(m),$$
$$V_3(x(k),\alpha)=\sum_{j=1}^{q}\sum_{i=-d_j}^{-1}\sum_{m=k+i}^{k-1}\eta^{\mathrm{T}}(m)R_j(\alpha)\eta(m),$$
$$P(\alpha)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_iP_i,\quad Q_j(\alpha)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_iQ_{ji},$$
$$R_j(\alpha)=\sum_{i=1}^{N}\alpha_iR_{ji},\ \ \sum_{i=1}^{N}\alpha_i=1,\ \ \alpha_i\geqslant 0.$$

沿系统(1)的任意轨线，$V(x(k),\alpha)$的前向差分

$$\begin{aligned}&\Delta V_1(x(k),\alpha)=\\&x^{\mathrm{T}}(k)(A_0^{\mathrm{T}}P(\alpha)A_0-P(\alpha))x(k)+\\&2x^{\mathrm{T}}(k)A_0^{\mathrm{T}}P(\alpha)(\sum_{j=1}^{q}A_{dj}x(k-d_j))+\\&(\sum_{j=1}^{q}x^{\mathrm{T}}(k-d_j)A_{dj}^{\mathrm{T}})P(\alpha)(\sum_{j=1}^{q}A_{dj}x(k-d_j))=\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\begin{bmatrix}A_0^{\mathrm{T}}P(\alpha)A_0-P(\alpha)&A_0^{\mathrm{T}}P(\alpha)\tilde{A}_d\\ *&\tilde{A}_d^{\mathrm{T}}P(\alpha)\tilde{A}_d\end{bmatrix}\xi(k).\end{aligned}\tag{7}$$

其中$\tilde{A}_d=\begin{bmatrix}A_{d1}&\cdots&A_{dq}\end{bmatrix}$.

$$\begin{aligned}&\Delta V_2(x(k),\alpha)=\\&x^{\mathrm{T}}(k)\sum_{j=1}^{q}Q_j(\alpha)x(k)-\\&\sum_{j=1}^{q}x^{\mathrm{T}}(k-d_j)Q_j(\alpha)x(k-d_j)=\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\mathrm{diag}(\sum_{j=1}^{q}Q_j(\alpha),\ -Q(\alpha))\xi(k).\end{aligned}\tag{8}$$

其中$Q(\alpha)=\mathrm{diag}(Q_1(\alpha),\ \cdots,\ Q_q(\alpha))$.

根据引理1, 可得

$$\begin{aligned}&\Delta V_3(x(k),\alpha)=\\&\sum_{j=1}^{q}\sum_{i=-d_j}^{-1}\{\eta^{\mathrm{T}}(k)R_j(\alpha)\eta(k)-\\&\eta^{\mathrm{T}}(k+i)R_j(\alpha)\eta(k+i)\}=\\&\sum_{j=1}^{q}\sum_{i=-d_j}^{-1}\eta^{\mathrm{T}}(k)\,R_j(\alpha)\,\eta(k)-\\&\sum_{j=1}^{q}\sum_{m=k-d_j}^{k-1}\eta^{\mathrm{T}}(m)\,R_j\,(\alpha)\eta(m)\leqslant\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\left(\begin{bmatrix}\varOmega_{11}&\varOmega_{12}\\ \varOmega_{12}^{\mathrm{T}}&\varOmega_{22}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}Y_{11}&Y_{12}\\ Y_{12}^{\mathrm{T}}&Y_{22}\end{bmatrix}\right)\xi(k)+\\&\xi^{\mathrm{T}}(k)\begin{bmatrix}Y_0^{\mathrm{T}}\\ \tilde{Y}_q^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\sum_{j=1}^{q}(\bar{d}_j^{-1}R_j(\alpha))^{-1}\,[Y_0\ \ \tilde{Y}_q]\xi(k).\end{aligned}\tag{9}$$

其中

$$\varOmega_{11}=(A_0-I)^{\mathrm{T}}(\sum_{j=1}^{q}\bar{d}_jR_j(\alpha))(A_0-I),$$
$$\varOmega_{12}=(A_0-I)^{\mathrm{T}}(\sum_{j=1}^{q}\bar{d}_jR_j(\alpha))\tilde{A}_d,$$
$$\varOmega_{22}=\tilde{A}_d^{\mathrm{T}}(\sum_{j=1}^{q}\bar{d}_jR_j(\alpha))\tilde{A}_d.$$

对式(7)～(9) 求和, 并结合Schur补性质可得

$$\Delta V(x(k),\alpha)\leqslant\xi^{\mathrm{T}}(k)U(\alpha)\xi(k).\tag{10}$$

因此, 若$U(\alpha)<0$成立，则$\Delta V(x(k),\alpha)<0$, 从而由Lyapunov稳定性理论可知系统(1)渐近稳定. 其中

$$U(\alpha)=\begin{bmatrix}\varXi_{11}&Y_{12}&A_0^{\mathrm{T}}P(\alpha)&\varXi_{14}&Y_0^{\mathrm{T}}\varPi\\ *&\varXi_{22}&\tilde{A}_d^{\mathrm{T}}P(\alpha)&\varXi_{24}&\tilde{Y}_q^{\mathrm{T}}\varPi\\ *&*&-P(\alpha)&0&0\\ *&*&*&-\varDelta_1(\alpha)&0\\ *&*&*&*&-\varDelta_2(\alpha)\end{bmatrix},\tag{11}$$

$$\varXi_{11}=-P(\alpha)+\sum_{j=1}^{q}Q_j(\alpha)+Y_{11},$$
$$\varXi_{14}=(A_0-I)^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_1(\alpha),$$
$$\varXi_{22}=-Q(\alpha)+Y_{22},\ \ \varXi_{24}=\tilde{A}_d^{\mathrm{T}}\varPi\varDelta_1(\alpha),$$
$$\varDelta_1(\alpha)=\mathrm{diag}(\bar{d}_1R_1(\alpha),\cdots,\bar{d}_qR_q(\alpha)),$$
$$\varDelta_2(\alpha)=\mathrm{diag}(\bar{d}_1^{-1}R_1(\alpha),\cdots,\bar{d}_q^{-1}R_q(\alpha)).$$

注意到$\sum\limits_{i=1}^{N}\alpha_i=1,\alpha_i\geqslant 0,U(\alpha)$可以写成

$$\begin{cases}U(\alpha)=\sum\limits_{i=1}^{N}\alpha_i^2U_i+\sum\limits_{i=1}^{N-1}\sum\limits_{k=i+1}^{N}\alpha_i\alpha_kU_{ik},\\ i=1,\cdots,N-1,\quad k=i+1,\cdots,N.\end{cases}\tag{12}$$

故当不等式(4) (5)同时成立时, 由式(12)可知$U(\alpha)<0$成立. 定理得证.

注 1　与以往方法不同的是, 在定理1的导出过程中并没有用到任何模型变换, 通过采用一个新的有限和不等式即得到了时滞相关的稳定性条件. 此外, 有限和不等式中引入的自由变量没有额外的约束和结构限制. 因此定理1给出的时滞相关稳定性条件具有较小的保守性.

注 2　式(4) (5)是关于矩阵变量P_i, Q_{ji}, R_{ji}, Y_0, Y_j $(j=1,\cdots,q,\ i=1,\cdots,N)$ 的一个线性矩阵不等式系统. 因此系统(1)的参数依赖时滞相关稳定性问题相应的转化为一个线性矩阵不等式系统的可行性问题, 从而可以借助于LMI工具箱求解.

4　示例(Illustrative examples)

以下两个数值算例验证本文给出方法的有效性.

例 1　考虑具有如下参数的不确定离散时滞系统(1)[8]:

$$A_0=\begin{bmatrix}0 & 0.3\\ -0.2 & \delta\end{bmatrix},\ A_{d1}=\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0.1 & \beta\end{bmatrix},$$

$$A_{d2}=\begin{bmatrix}0 & 0.1\\ 0 & 0.1+\beta\end{bmatrix}.$$

其中δ和β为系统的不确定参数, 且已知$|\beta|\leqslant 0.1$, $|\delta|\leqslant\delta_1$, $\bar{d}_1=1$, $\bar{d}_2=2$.

此例的目的是在系统最大时滞已知的情况下确定使得该系统保持稳定的不确定参数允许变化范围, 显然这个允许的变化范围越大, 则所给出的方法具有越小的保守性. 表1给出了应用文献[8]和本文的方法所得到的结果.

表 1　不确定参数允许最大值

Table 1　Maximal values of the uncertain paramters

方法	不确定参数允许最大值δ_1
文献[8]推论2	0.7146
本文定理1	0.7400

例 2　考虑具有如下4个顶点的不确定离散时滞系统(1):

$$A_{01}=\begin{bmatrix}0 & 0.3\\ 1 & -0.5\end{bmatrix},\ A_{02}=\begin{bmatrix}0 & 0.3\\ 1 & -0.5\end{bmatrix},$$

$$A_{03}=\begin{bmatrix}0 & -0.54\\ 1 & -0.43\end{bmatrix},\ A_{04}=\begin{bmatrix}0 & -0.54\\ 1 & -0.43\end{bmatrix},$$

$$A_{d11}=\begin{bmatrix}-0.1 & -0.35\\ 0 & 0.31\end{bmatrix},\ A_{d12}=\begin{bmatrix}-0.1 & -0.35\\ 0 & 0.29\end{bmatrix},$$

$$A_{d13}=\begin{bmatrix}-0.1 & -0.35\\ 0 & 0.31\end{bmatrix},\ A_{d14}=\begin{bmatrix}-0.1 & -0.35\\ 0 & 0.29\end{bmatrix}.$$

此例的目的是确定使得以上系统稳定的最大允许时滞$\bar{d}_1$, 从而说明算法的保守性. 表2给出了应用文献[8]和本文的方法所得到的结果.

表 2　最大允许时滞

Table 2　Maximal values of the time delays

方法	最大允许时滞$\bar{d}_1$
文献[8]推论2	0.0740
本文定理1	0.2920

以上数值算例的计算结果表明, 本文给出的参数依赖时滞相关稳定性条件较已有文献中的结果具有更小的保守性.

5　结论(Conclusion)

对具有凸多面体不确定性的离散多时滞系统, 本文研究了其时滞相关稳定性问题. 采用参数依赖型Lyapunov泛函, 通过引入一种新的有限和不等式处理方法, 不用进行模型变换直接得到了一个新的参数依赖型时滞相关稳定判据. 最后的数值算例验证了该方法得到的结果较已有文献具有更小的保守性.

参考文献(References):

[1] PARK P. A delay-dependent stability criterion for systems with uncertain time-invariant delays[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1999, 44(4): 876 – 877.

[2] MOON Y S, PARK P, KWON W H, et al. Delay-dependent robust stabilization of uncertain state-delayed systems[J]. *Int J Control*, 2001, 74(11): 1447 – 1455.

[3] 俞立. 鲁棒控制–线性矩阵不等式处理方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 158 – 207.
(YU Li. *Robust Control–An LMI Approach*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 158 – 207.)

[4] 张先明, 吴敏, 何勇. 不确定线性多时变时滞系统的时滞相关鲁棒控制[J]. 控制与决策, 2004, 19(5): 496 – 500.
(ZHANG Xianming, MU Ming, HE Yong. Delay-dependent robust control for linear systems with multiple time-varying delays and uncertainties[J]. *Control and Decision*, 2004, 19(5): 496 – 500.)

[5] XU S Y, CHEN T W. Robust H-infinity control for uncertain discrete-time systems with time-varying delays via exponential output feedback controllers [J]. *Systems & Control Letters*, 2004, 51(3/4): 171 – 183.

[6] de OLIVEIRA P J, OLIVEIRA R C L F, LEITE V J S, et al. H_∞ guaranteed cost computation by means of parameter-dependent Lyapunov functions [J]. *Automatica*, 2004, 40(6): 1053 – 1061.

[7] 夏元清, 韩京清. 基于参数相关Lyapunov 泛函不确定时滞系统的鲁棒稳定性[J]. 中国科学院研究生院学报, 2003, 20(3): 283 – 289.
(XIA Yuanqing, HAN Jingqing. Robust stability of state delayed systems with ploytopic type uncertainties via parameter dependent Lyapunov functionals [J]. *J of the Graduate School of the Chinese Academy of Sciences*, 2003, 20(3): 283 – 289.)

(下转第648页)

[6] KENNEDY M P, CHAU L O. Neural networks for nonlinear programming[J]. *IEEE Trans on Circuits and Systems*, 1988, 35(6): 554 – 562.

[7] CICHOCKI A, UNBEHAUEN R. *Neural Networks for Optimization and Signal Processing*[M]. New York: John Wiley & Sons, 1993.

[8] CICHOCKI A, UNBEHAUEN R. Neural networks for computing eigenvalues and eigenvectors[J]. *Biolog Cybernetics*, 1992, 68(1): 155 – 164.

[9] BAZARAA M S, SHETTY C M. *Nonlinear Programming, Theory and Algorithms*[M]. New York: John Wiley and Sons, 1979.

[10] LASALLE J. *The Stability of Dynamical Systems*[M]. Philadelphia, PA: SIAM, 1976.

[11] LASALLE J. The stability theory for ordinary differential equations[J]. *J of Differential Equations*, 1983, 4(1): 57 – 65.

作者简介:

冯芙叶 (1963—), 女, 副教授, 空军工程大学博士生, 主要从事运筹学、神经网络等研究, E-mail:zhangquanju@sina.com.cn ;

魏正红 (1964—) , 女, 副教授, 香港浸会大学博士生, 主要从事运筹学、金融数学等研究;

刘付显 (1962—) 男, 教授, 博士生导师, 主要从事军事运筹学、神经网络等研究.

(上接第639页)

[8] 高会军, 王常虹. 不确定离散多时滞系统的时滞相关鲁棒镇定[J]. 自动化学报, 2004, 30(5): 789 – 795.
(GAO Huijun, WANG Changhong. Delay-dependent robust stabilization for uncertain discrete-time systems with multiple state delays[J]. *Acta Automatica Sinica,* 2004, 30(5): 789 – 795.)

[9] de OLIVEIRA M C, BERNUSSOU J, GEROMEL J C. A new discrete-time robust stability condition[J]. *Systems & Control Letters,* 1999, 37(3): 261 – 265.

作者简介:

张文安 (1982—), 男, 研究领域为时滞系统分析与控制、网络控制等, E-mail:zwa_auto@hotmail.com;

俞 立 (1961—), 男, 浙江工业大学教授, 博士生导师, 研究领域为鲁棒控制、网络控制等, E-mail:lyu@zjut.edu.cn;

张贵军 (1973—), 男, 博士，浙江工业大学讲师, 研究领域为优化算法、鲁棒控制等.

(上接第644页)

[10] STECK J K and BALKRISHNAN S N. Use of Hopfield Neural Net works in Optimal Guidance[J]. *IEEE Trans on Aerospace and Electronic Systems,* 1994, 30(1): 287 – 293.

[11] RUAN Xiaogang. Linear Quadratic Dynamic Optimization With Hopfield Network for Discrete-time Systems[C]// *Proc of the 2nd World Congress on Intelligent Control and Automation,* Xian, China, 1997: 1880 – 1883.

[12] 李树荣, 李峰. 基于Hopfield网络的多变量动态矩阵控制及其在精馏塔系统中的应用[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 304 – 306.
(LI Shurong, LI Feng. The dynamic matrix control based on Hopfield neural network and its application in distillation colum[J]. *Control Theory and Applications,* 2001, 18(2): 304 – 306.)

[13] 李明爱, 阮晓钢. 基于连续Hopfield网络的最优控制方法[J]. 北京工业大学学报, 2004, 30(1): 27 – 30.
(LI Mingai, RUAN Xiaogang. Optimal Control Based on Continuous Hopfield Neural Nwtwork[J]. *Journal of Beijing University of Technology,* 2004, 30(1): 27 – 30.)

[14] KIM K B. Implementation of stabilizing receding horizon controls for time-varying systems[J].*Automatica,* 2002, 38: 1705 – 1711.

[15] 王永驥, 涂健. 神经元网络控制[M]. 北京：机械工业出版社,1999.
(WANG Yongji, TU Jian. *Neural Network Control*[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1999.)

作者简介:

李明爱 (1966—), 女, 博士, 北京工业大学电子信息与控制工程学院副教授, 主要研究方向为智能控制理论、神经网络控制等, E-mail:limingai@bjut.edu.cn;

乔俊飞 (1968—), 男, 博士, 北京工业大学电子信息与控制工程学院教授, 主要研究方向为非线性系统理论、智能控制等, E-mail:junfeiq@bjut.edu.cn;

阮晓钢 (1958—), 男, 博士生导师,北京工业大学电子信息与控制工程学院教授, 本文通讯作者, 主要研究方向为智能控制理论、人工智能、智能信息处理等, E-mail:adrxg@bjut.edu.cn.