第30卷 第2期 自动化学报 Vol. 30, No. 2
2004年3月 ACTA AUTOMATICA SINICA Mar., 2004

噪声环境中时延区间CNN网络鲁棒稳定性[1)]

廖伍代[1,2] 廖晓昕[1] 沈轶[1]
[1](华中科技大学控制科学与工程系 武汉 430074)
[2](军事经济学院基础部 武汉 430035)
(E-mail: wdliao@263.net)

摘 要 由于采用大规模集成电路方法实现细胞神经网络(cellular neural networks, CNN),其电路所产生的噪声不可避免,实际的网络都是在噪声环境中进行工作的,弄清楚这些随机干扰是如何影响网络的稳定性,在网络设计时非常关键.利用鞅收敛定理、李雅普诺夫直接法和矩阵分析的方法,研究了白噪声干扰下时延区间细胞神经网络承受扰动的能力,得到了仅依赖系统参数的充分性代数判据.所得结果在系统设计时检验较为方便.

关键词 时延CNN网络,区间矩阵,白噪声,随机系统,鲁棒稳定,矩阵稳定度
中图分类号 TP183

Robust Stability of Time-Delayed Interval CNN in Noisy Environment

LIAO Wu-Dai[1,2] LIAO Xiao-Xin[1] SHEN Yi[1]
[1](*Department of Automatic Control, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan* 430074)
[2](*Department of Basic Science, Military Economy College, Wuhan* 430035)
(E-mail: wdliao@263.net)

Abstract Because of the VLSI realization of cellular neural networks (CNN), noises coming from the circuit are unavoidable and therefore any real CNNs operate in a noisy environment. It is very important to understand how these stochastic perturbations affect the networks' stability in system synthesis. Making use of the martingale convergence theorem, Lyapunov direct methods and matrix analysis, the tolerance against perturbations for the time-delays interval cellular neural networks (ICNN) perturbed by white noise is examed, and some sufficiently algebraic criteria which only depend on the systems' parameters are given. The results obtained in this paper are easily tested in system synthesis.

Key words Delayed CNN, interval systems, white noise, stochastic system, robust stability, matrix stability degree

1) 国家自然科学基金(60074008, 60274007)和高校博士点基金(20010487005)资助
Supported by National Natural Science Foundation of P. R. China (60074008, 60274007) and National Doctoral Foundation of P. R. China (20010487005)
收稿日期 2003-01-23 收修改稿日期 2003-06-14
Received January 23, 2003; in revised form June 14, 2003

1 引言

自 1988 年，Chua LO 等人提出细胞神经网络理论与应用以来[1,2]，由于它在图象处理和模式识别等信息领域中的重要应用，CNN 的理论与应用研究一直是热点问题. 从理论研究方面来看，系统的稳定性是首先必须考虑的，它是系统能正常工作的前提，这方面得到了许多实用而方便的条件，如文献[3～6]；从应用方面看，实现细胞神经网络的方法是大规模集成电路（VLSI），电路原件之间不可避免地会产生热噪声；从真实神经系统来看，突触传递是一个由神经元发射器和其它随机原因引起具有随机偏差的噪声过程[7]，因此为了更为真实地描述神经网络有必要在 CNN 系统模型中引入噪声.

现在的问题是，对于已设计好的 ICNN(1)（它的模型方程见下面式(1)），它能承受多大强度的随机扰动，即是对于鲁棒稳定的区间时延系统 ICNN(1)，噪声强度在怎样的范围内还可以保持该性质？本文给出几个充分性代数判据.

时延区间细胞神经网络 ICNN 的模型方程如下：

$$\begin{cases}\dfrac{\mathrm{d}\boldsymbol{x}(t)}{\mathrm{d}t} = -B\boldsymbol{x}(t) + A\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t)) + A^{\tau}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{\tau}(t)) \\ \boldsymbol{x}(s) = \boldsymbol{\xi}(s),\ -\tau \leqslant s \leqslant 0, \tau = \max\limits_{1\leqslant i\leqslant n}\{\tau_i\}, \boldsymbol{\xi}(\cdot) \in C([-\tau,0];R^n)\end{cases} \tag{1}$$

其中 $\boldsymbol{x}(t)=(x_1(t),x_2(t),\cdots,x_n(t))^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{x}_{\tau}(t)=(x_1(t-\tau_1),\ x_2(t-\tau_2),\cdots,\ x_n(t-\tau_n))^{\mathrm{T}}$ 分别表示网络在时刻 t 和时延时刻的状态，$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t))=(f_1(x_1(t)),\ f_2(x_2(t)),\cdots,\ f_n(x_n(t)))^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{\tau}(t))=(g_1(x_1(t-\tau_1)),\ g_2(x_2(t-\tau_2)),\cdots,\ g_n(x_n(t-\tau_n)))^{\mathrm{T}}$ 满足 $|f_i(x)|\leqslant 1\wedge\alpha_i|x|$，$|g_i(x)|\leqslant 1\wedge\beta_i|\boldsymbol{x}|$，$\alpha_i>0,\beta_i>0,i=1,2,\cdots,n$，$B=\mathrm{diag}(b_1,b_2,\cdots,b_n)$ 是 n 阶正对角矩阵.

$A=(a_{ij})_{n\times n}$，$A^{\tau}=(a_{ij}^{\tau})_{n\times n}$，$a_{ij}$，$a_{ij}^{\tau}$ 分别表示第 j 个神经元对第 i 个神经元在 t 时刻和 $t-\tau_j$ 时刻的连接权重，$i,j=1,2,\cdots,n$，且 $A\in[\underline{A},\overline{A}]$，$A^{\tau}\in[\underline{A}^{\tau},\overline{A^{\tau}}]$ 是两给定的区间矩阵.

本文中出现的上标 T 表示向量或矩阵的转置.

对 ICNN(1)引入白噪声后，可用 Itô 随机微分方程描述如下

$$\begin{cases}\mathrm{d}\boldsymbol{x}(t) = [-B\boldsymbol{x}(t) + A\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x}(t)) + A^{\tau}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{x}_{\tau}(t))]\mathrm{d}t + \sigma(\boldsymbol{x}(t),\boldsymbol{x}_{\tau}(t))\mathrm{d}\boldsymbol{w}(t) \\ \boldsymbol{x}(s) = \boldsymbol{\xi}(s),\ -\tau \leqslant s \leqslant 0, \tau = \max\limits_{1\leqslant i\leqslant n}\{\tau_i\}, \boldsymbol{\xi}(\cdot) \in C([-\tau,0];R^n)\end{cases} \tag{2}$$

其中 $\boldsymbol{w}(t)$ 是定义在完备概率空间 (Ω,F,F_t,P) 上 m 维标准布朗运动，$\sigma(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})$ 是 $n\times m$ 维随机扰动矩阵，且假定存在 $c_i>0,d_i>0,i=1,2,\cdots,n$ 使得

$$\mathrm{trace}(\sigma^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})B^{-1}\sigma(x,y)) \leqslant \sum_{i=1}^{n}(c_i x_i^2 + d_i y_i^2) \tag{3}$$

其余参数的意义与系统 ICNN(1)中参数相同.

2 定义与引理

定义 1. ICNN(1)或 ICNN(2)称为关于区间矩阵$[\underline{A},\overline{A}]$，$[\underline{A}^{\tau},\overline{A^{\tau}}]$鲁棒稳定（以下简称鲁棒稳定），如果它的唯一平衡点 $\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$ 对任意 $A\in[\underline{A},\overline{A}]$，$A^{\tau}\in[\underline{A}^{\tau},\overline{A^{\tau}}]$是指数稳定的.

定义 2. 区间矩阵$[\underline{A},\overline{A}]$称为负定的，如果任意 $A\in[\underline{A},\overline{A}]$都是负定的.

定义 3. 称矩阵 A 有稳定度 $h>0$，如果 $\max\{\mathrm{Re}\,\lambda_i(A), i=1,2,\cdots,n\}<-h$，其中 $\mathrm{Re}\,\lambda_i(A)$ 表示矩阵 A 的第 i 个特征根的实部.

定义 4. 取 $V\in C^{2,1}(R^n\times R_+;R_+)$，即李雅普诺夫函数 $V(x,t)$ 关于 $\boldsymbol{x}$ 和 t 分别为二次和一次连续可微函数，其中 $R_+=(0,+\infty)$，对任意 $\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}\in R^n$，定义

$$LV(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = V_x[-B\boldsymbol{x}+A\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})+A^{\tau}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{y})]+\frac{1}{2}\mathrm{trace}(\sigma^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})V_{xx}\sigma(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})) \tag{4}$$

为 ICNN(2)生成的微分算子.

引理 1. 区间矩阵 $[\underline{A},\overline{A}]$ 是负定的等价于其中有限个矩阵是负定的[8,9].

注 1. 文献[8,9]还给出了如何找到这有限个矩阵的方法，这是很有实际意义的.

以下的引理 2 是不难证明的：

引理 2. $n\times n$ 矩阵 A 的稳定度为 $h>0$ 的充分必要条件是矩阵 $A+hI$ 为负定的矩阵，其中 I 为 $n\times n$ 单位阵.

引理 3. 若存在 $V\in C^{2,1}(R^n\times R_+;R_+)$，$\varphi\in C(R^n;R_+)$，$\varphi_i\in C(R_+;R_+)$，$i=1,2,\cdots,n$，和常数 $\lambda_1>\lambda_2\geqslant 0$，使得对任意 $\boldsymbol{x}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^{\mathrm{T}}$，$\boldsymbol{y}=(y_1,y_2,\cdots,y_n)^{\mathrm{T}}$ 成立以下条件：

$$1)\ LV(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\leqslant -\lambda_1\varphi(\boldsymbol{x})+\lambda_2\sum_{i=1}^{n}\varphi_i(y_i),\quad 2)\ V(\boldsymbol{x},t)\leqslant\varphi(\boldsymbol{x}),\quad 3)\ \sum_{i=1}^{n}\varphi_i(x_i)\leqslant\varphi(\boldsymbol{x})$$

则 ICNN(2)的平衡点 $\boldsymbol{x}=0$ 指数稳定[7].

3 主要结果

定理 1. 对任意连接权矩阵 $A\in[\underline{A},\overline{A}]$ 和 $A^{\tau}\in[\underline{A^{\tau}},\overline{A^{\tau}}]$，选取正定矩阵 $R=\mathrm{diag}(r_i)$，$S=\mathrm{diag}(s_i)$，如果矩阵

$$H=\begin{pmatrix}-2I+\overline{R}+\overline{S}+C+D & B^{-1}A & B^{-1}A^{\tau}\\ (B^{-1}A)^{\mathrm{T}} & -R & \boldsymbol{0}\\ (B^{-1}A^{\tau})^{\mathrm{T}} & \boldsymbol{0} & -S\end{pmatrix}$$

负定，则 ICNN(2)鲁棒稳定. 其中

$\overline{R}=\mathrm{diag}(r_i\alpha_i^2)$，$\overline{S}=\mathrm{diag}(s_i\beta_i^2)$，$C=\mathrm{diag}(c_i)$，$D=\mathrm{diag}(d_i)$，$I$ 是 $n\times n$ 单位阵.

证明. 作李雅普诺夫函数 $V(\boldsymbol{x})=\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}B^{-1}\boldsymbol{x}$，由(3)和(4)知，

$$\begin{aligned}
LV(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) = {} & 2\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}B^{-1}[-B\boldsymbol{x}+A\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})+A^{\tau}\boldsymbol{g}(\boldsymbol{y})]+\mathrm{trace}(\sigma^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})B^{-1}\sigma(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}))\leqslant\\
& -2\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}B^{-1}A\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x})(B^{-1}A)^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(B^{-1}A^{\tau})\boldsymbol{g}(\boldsymbol{y})+\\
& \boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y})(B^{-1}A^{\tau})^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x}+\sum_{i=1}^{n}(c_ix_i^2+d_iy_i^2)=\\
& (\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{x}),\boldsymbol{g}^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{y}))H\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}\\ \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})\\ \boldsymbol{g}(\boldsymbol{y})\end{pmatrix}+\sum_{i=1}^{n}[r_if_i^2(x_i)+s_ig_i^2(y_i)]+\sum_{i=1}^{n}[c_ix_i^2+d_iy_i^2]-\\
& \boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(\overline{R}+\overline{S}+C+D)\boldsymbol{x}\leqslant\\
& -\sum_{i=1}^{n}(\lambda+r_i\alpha_i^2+s_i\beta_i^2+d_i)x_i^2+\sum_{i=1}^{n}(r_i-\lambda)f_i^2(x_i)+\sum_{i=1}^{n}(s_i-\lambda)g_i^2(y_i)+\sum_{i=1}^{n}d_iy_i^2
\end{aligned}$$

由矩阵 H 结构知，对 $i=1,2,\cdots,n$，都有 $r_i-\lambda\geqslant 0$，$s_i-\lambda\geqslant 0$，从而由输出函数的性质进

一步得

$$LV(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y}) \leqslant -\sum_{i=1}^{n}[\lambda(1+\alpha_i^2)+s_i\beta_i^2+d_i]x_i^2+\sum_{i=1}^{n}[(s_i-\lambda)\beta_i^2+d_i]y_i^2$$

记

$$\lambda_1 = \min_{1\leqslant i\leqslant n}\{b_i[\lambda(1+\alpha_i^2)+s_i\beta_i^2+d_i]\}, \qquad \lambda_2 = \max_{1\leqslant i\leqslant n}\left\{\frac{(s_i-\lambda)\beta_i^2+d_i}{\lambda(1+\alpha_i^2)+s_i\beta_i^2+d_i}\right\} < 1$$

$$\varphi(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{\lambda_1}\sum_{i=1}^{n}[\lambda(1+\alpha_i^2)+s_i\beta_i^2+d_i]x_i^2, \quad \varphi_i(y_i) = \frac{1}{\lambda_1}[\lambda(1+\alpha_i^2)+s_i\beta_i^2+d_i]y_i^2$$

从而 $LV(\boldsymbol{x},\boldsymbol{y})\leqslant-\lambda_1\varphi(\boldsymbol{x})+\lambda_1\lambda_2\sum_{i=1}^{n}\varphi_i(y_i)$，且 $V(\boldsymbol{x})\leqslant\varphi(\boldsymbol{x})$，$\sum_{i=1}^{n}\varphi_i(x_i)=\varphi(\boldsymbol{x})$，由引理 3 知，ICNN(2)鲁棒稳定.　　证毕.

定理 2. 记 $h=\max_{1\leqslant i\leqslant n}(c_i+d_i)$，任意连接权矩阵 $A\in[\underline{A},\overline{A}]$和 $A^\tau\in[\underline{A^\tau},\overline{A^\tau}]$，若矩阵

$$H_1=\begin{pmatrix}-2I+\overline{R}+\overline{S} & B^{-1}A & B^{-1}A^\tau\\ (B^{-1}A)^{\mathrm{T}} & -R & \mathbf{0}\\ (B^{-1}A^\tau)^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} & -S\end{pmatrix}$$

有稳定度 h，则 ICNN(2)鲁棒稳定. 有关参数同定理 1 中的参数.

证明. 由定理 1 知，为了证明 ICNN(2)鲁棒稳定，只需检验定理 1 中矩阵 H 是负定的. 对任意 $\boldsymbol{x},\boldsymbol{y},\boldsymbol{z}\in R^n$，

$$(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}})H\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}\\ \boldsymbol{y}\\ \boldsymbol{z}\end{pmatrix}=(\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{y}^{\mathrm{T}},\boldsymbol{z}^{\mathrm{T}})H_1\begin{pmatrix}\boldsymbol{x}\\ \boldsymbol{y}\\ \boldsymbol{z}\end{pmatrix}+\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(C+D)\boldsymbol{x}\leqslant-(\lambda_1-h)|\boldsymbol{x}|^2-\lambda_1|\boldsymbol{y}|^2-\lambda_1|\boldsymbol{z}|^2$$

其中 $-\lambda_1=\max\lambda(H_1)$，由已知条件知 $\lambda_1-h>0$，从而矩阵 H 负定.　　证毕.

注 2. 矩阵 H_1 中除了可选矩阵 R,S 外，其余元素只依赖于 ICNN(1)本身的参数. 定理 2 表明对已设计好的 ICNN(1)，若矩阵 H_1 有稳定度 h，则它可以承受扰动强度小于 h 的随机扰动.

注 3. 矩阵 H_1 中引入可选矩阵 R,S 是使定理 2 的应用留有较大的余地，但另一方面，给定理 2 的应用带来了不方便. 下面给出一种选择矩阵 R,S 的方法.

定理 3. 选取 $m>0$，$r_i=\dfrac{2}{\alpha_i^2+\beta_i^2+m}$，$R=\mathrm{diag}(r_i)$，$i=1,2,\cdots,n$，若矩阵

$$H_2=\begin{pmatrix}-mR & B^{-1}A & B^{-1}A^\tau\\ (B^{-1}A)^{\mathrm{T}} & -R & \mathbf{0}\\ (B^{-1}A^\tau)^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} & -R\end{pmatrix}$$

有稳定度 h，则 ICNN(2)鲁棒稳定.

证明. 在矩阵 H_1 中选取 $R=S,2I-\overline{R}-\overline{S}=mR$，得 $mr_i=2-r_i(\alpha_i^2+\beta_i^2)$，从而 $r_i=\dfrac{2}{\alpha_i^2+\beta_i^2+m}$，$i=1,2,\cdots,n$. 此时，矩阵 H_1 变成矩阵 H_2，由定理 2 知定理 3 成立.　　证毕.

注 4. 矩阵 $H_2\in[\underline{H_2},\overline{H_2}]$是区间矩阵，由引理 1 和引理 2 知，要验证$[\underline{H_2},\overline{H_2}]$有稳定度 h，等价地验证$[hI_{3n\times3n}+\underline{H_2},hI_{3n\times3n}+\overline{H_2}]$中有限个矩阵的负定性，其中矩阵$\underline{H_2}$，$\overline{H_2}$分别是把矩阵 H_2 中矩阵 A,A^τ同时换为$\underline{A}$，$\underline{A^\tau}$与$\overline{A}$，$\overline{A^\tau}$所得的两个矩阵.

仿定理 1,定理 2 与定理 3 的证明,不难证明以下定理 4 的结论.

定理 4. 对任意连接权矩阵 $A\in[\underline{A},\overline{A}]$和 $A^{\tau}\in[\underline{A^{\tau}},\overline{A^{\tau}}]$,选取正定矩 $R=\mathrm{diag}(r_i)$,$S=\mathrm{diag}(s_i)$.

1) 如果矩阵

$$H_3=\begin{bmatrix}-2B+\overline{R}+\overline{S}+\overline{C}+\overline{D} & A & A^{\tau}\\ A^{\mathrm{T}} & -R & \mathbf{0}\\ (A^{\tau})^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} & -S\end{bmatrix}$$

负定,则 ICNN(2)鲁棒稳定;

2)记 $\overline{h}=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant n}\{\overline{c_i}+\overline{d_i}\}$,若矩阵

$$H_4=\begin{bmatrix}-2B+\overline{R}+\overline{S} & A & A^{\tau}\\ A^{\mathrm{T}} & -R & \mathbf{0}\\ (A^{\tau})^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} & -S\end{bmatrix}$$

有稳定度$\overline{h}$,则 ICNN(2)鲁棒稳定;

3) 选取 $m>0$, $r_i=\dfrac{2b_i}{\alpha_i^2+\beta_i^2+m}$, $R=\mathrm{diag}(r_i)$, $i=1,2,\cdots,n$,若矩阵

$$H_5=\begin{bmatrix}-mR & A & A^{\tau}\\ A^{\mathrm{T}} & -R & \mathbf{0}\\ (A^{\tau})^{\mathrm{T}} & \mathbf{0} & -R\end{bmatrix}$$

有稳定度$\overline{h}$,则 ICNN(2)鲁棒稳定.

其中$\overline{c_i}=\dfrac{1}{b}c_i$,$\overline{d_i}=\dfrac{1}{b}d_i$,$b=\min\limits_{1\leqslant i\leqslant n}\{b_i\}$,$C=\mathrm{diag}(\overline{c_i})$,$D=\mathrm{diag}(\overline{d_i})$,$i=1,2,\cdots,n$.

4 结论

作为系统分析而言,对于给定的 ICNN(1),若区间矩阵 H_1,H_2有稳定度 $h=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant n}(c_i+d_i)$或区间矩阵 H_4和 H_5有稳定度$\overline{h}=\max\limits_{1\leqslant i\leqslant n}\{\overline{c_i}+\overline{d_i}\}$,则 ICNN(1)可以承受干扰强度小于 h 或$\overline{h}$ 的随机干扰;作为系统综合而言,在可以事先估计随机干扰强度 h 或$\overline{h}$的情况下,可以设计细胞元之间的连接权矩阵 A 与 A^{τ},使得矩阵 H_1,H_2有稳定度 h 或使矩阵 H_4和 H_5有稳定度$\overline{h}$,从而可以让 ICNN(1)正常工作而不至于受干扰失稳. 特别地,若随机干扰强度 $\boldsymbol{\sigma}=\mathbf{0}$,即对确定性系统 ICNN(1),本文的结论也都成立.

References

1 Chua L O, Yang L. Cellular neural networks: Theory. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988,**35**(10):1257～1272

2 Chua L O, Yang L. Cellular neural networks: Application. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, **35**(10):1273～1290

3 Liao X X. Mathematical theory of cellular neural networks (1). *Science in China* (A), 1994,**24**(9):902～910 (in Chinese)

4 Liao X X. Mathematical theory of cellular neural networks (2). *Science in China* (A), 1994,**24**(10):1037～1046

(in Chinese)

5 Cao J, Zhou D. Stability analysis of delayed cellular neural networks. *Neural Netowrks*, 1998, **11**: 1601～1605

6 Mao X. Stochastic Defferential Equations and Their Applications. Chichester: Horwood Pub., 1997

7 Blythe S, Mao X, Liao X X. Stability of stochastic delay neural networks. *Journal of the Franklin Institute*, 2001, **338**(4): 481～495

8 Liao X X, Luo Qi, Mei Z *et al*. Notes on necessary and sufficient conditions of stability, observability and controliability for interval matrices. *Acta Automatica Sinica*, 1988, **24**(6): 829～833 (in Chinese)

9 Wang K, Michel A N, Liu D. Necessary and sufficient conditions for the Hurwitz stability of interval matrices. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1994, **39**(6): 1251～1255

廖伍代　1993 年于华中师大运筹学与控制论专业，获硕士学位，现华中科技大学自控系博士研究生．研究方向为随机系统稳定性和人工神经网络渐近行为分析．

(**LIAO Wu-Dai**　Received his master degree from Huazhong Normal University in 1993, and now is a Ph. D. candidate at Huazhong University of Scicence and Technology. His research interests include the stability of stochastic systems and the analysis of asymptotic behavior of artificial neural networks.)

廖晓昕　华中科技大学自控系教授、博士生导师．研究领域为智能控制系统稳定性、非线性与复杂系统及神经网络理论．

(**LIAO Xiao-Xin**　Professor at Huazhong University of science and Technology. His research interests include the stability of intelligent control system, the theory of nonlinear and complex systems, and artifical neural networks.)

沈　轶　博士后、华中科技大学自控系副教授．研究方向为随机动力系统稳定性和人工神经网络研究．

(**SHEN Yi**　Postdoctor and associated professor at Huazhong University of Science and Technology. His research interests include the stability of stochastic dynamic systems and artificial neural networks.)