具有时滞的细胞神经网络的稳定性 [1]

张　强　　马润年　　许　进*

(西安电子科技大学雷达信号处理重点实验室　西安　710071)

*(华中理工大学控制科学与工程系　武汉　430074)

摘　要　该文研究了具有时滞的细胞神经网络的稳定性问题，运用 Lyapunov 泛函法和 Razumikhin 法分别给出了时滞细胞神经网络全局渐近稳定的两个新的充分条件. 其中，第一个条件与时延无关，而第二个条件与时延有关. 获得的定理推广了已有文献中的结果，对于时滞细胞神经网络的硬件设计具有一定的指导意义.

关键词　细胞神经网络，时延，全局渐近稳定性，Lyapunov 泛函，Razumikhin 法

中图号　TN-052

1 引　言

细胞神经网络 (CNN) 是由 L. O. Chua 和 L. Yang[1] 于 1988 年提出的一种大规模的非线性模拟电路。其基本单元称为一个细胞. 每个细胞是一个非线性电路. 通常由线性电阻，线性电容，独立源以及线性和非线性压控电流源组成. 细胞神经网络最基本的特性是局域连接性. 即每个细胞仅与它的邻域细胞相连接. 正是由于这一特点，使其硬件实现较一般神经网络而言容易得多. 目前，细胞神经网络已经用于信号处理，尤其是用于静态图像处理中. 然而动态图像处理却需在细胞之间传输的信号中引入迟延，这样便形成了具有时滞的细胞神经网络 (DCNN)。目前，DCNN 已经应用于包括模式分类及移动图像的重建等领域中. 众所周知对于 CNN, DCNN 这类反馈型神经网络的稳定性的研究是一个重要的理论问题，具有十分重要的理论和应用价值. 对 CNN, DCNN 的稳定性已有一些结果 [1-6]。由于时延的引入，可能导致系统振荡而使系统出现不稳定 [4]，也可能使系统出现混沌. 然而在某些应用中 (例如模式分类)，要求系统只有一个平衡点并且该平衡点是全局渐近稳定 (globally asymptotically stable, GAS) 的. 因此深入研究 DCNN 的稳定动力学行为不仅具有理论意义而且对于 DCNN 的硬件实现具有一定的指导意义。本文运用泛函微分方程中的 Lyapunov 函数法和 Razumikhin 法分别获得了具有时滞的细胞神经网络的全局渐近稳定性的两个充分条件. 所得结果一个与时延有关，另一个与时延无关，即文献 [5] 中所谓的无条件稳定性.

2 DCNN 模型描述

由 $M\times N$ 个细胞构成的 M 行 N 列的 DCNN 神经网络，其细胞之间均有延迟 $\tau>0$。以 $C(i,j)$ 表示 DCNN 中第 i 行第 j 列的一个细胞，则 $C(i,j)$ 单元的细胞动力学方程可以描述如下：

$$\begin{aligned}\dot{x}_{ij}(t) &= -x_{ij}(t)+\sum_{c(k,l)\in N_r(i,j)}A^0_{ij,kl}y_{kl}(t)+\sum_{c(k,l)\in N_r(i,j)}A^1_{ij,kl}y_{kl}(t-\tau)\\ &\quad+\sum_{c(k,l)\in N_r(i,j)}B_{ij,kl}U_{kl}(t)+I_{ij}\end{aligned}\tag{1}$$

[1] 2000-09-25 收到， 2000-12-25 定稿
国家自然科学基金资助 (资助号： 69971018)

其中 $N_r(i,j)$ 表示 $C(i,j)$ 的 r 邻域，x_{ij}, y_{ij}, u_{ij} 分别表示 $C(i,j)$ 的状态，输出和输入。$A^{m}_{ij,kl}$，$(m=0,1)$ 和 $B_{ij,kl}$ 分别表示细胞 $C(k,l)$ 的输出和输入对细胞 $C(i,j)$ 的影响强度。I_{ij} 表示细胞 $C(i,j)$ 的电流偏置．在通常的应用中，总是假设 $B_{ij,kl}$=0．令 $P=M\times N$，则 (1) 式可写为

$$\dot{x}_i(t)=-x_i(t)+\sum_{j=1}^{P}a_{ij}y_j(t)+\sum_{j=1}^{P}b_{ij}y_j(t-\tau)+I_i,\qquad i=1,2,\cdots,P \tag{2}$$

或者写成向量形式

$$\dot{x}=-x+Ay(t)+By(t-\tau)+I \tag{3}$$

一般地，细胞的输出与其状态的关系满足分段线性函数 (PWL):

$$y_i=f_i(x_i)=(1/2)(|x_i+1|-|x_i-1|) \tag{4}$$

在本文的定理 1 中，为了便于将其结果与其它结果相比较，对 $y_i=f_i(x_i)$ 作出如下假设：

(1) $y_i=f_i(x_i)$ 在 R 上满足全局 Lipschitz 连续，即存在一个正常数 $M_i>0$ 对所有的 $x_1,x_2\in R$，有 $|f_i(x_1)-f_i(x_2)|\le M_i|x_1-x_2|$;

(2) $y_i=f_i(x_i)$ 在 R 上单调非降且有界。

显然，通常的 Sigmoid 函数和 PWL 函数均满足上述假设．(2) 式 (或 (3) 式) 是一般的泛函微分方程的一个特例：

$$\mathrm{d}x/\mathrm{d}t=f(x_t) \tag{5}$$

其中 $x_t\in C([-\tau,0],R^P)$ $(C([-\tau,0],R^P)$ 是区间 $[-\tau,0]$ 到 R^P 的连续映射构成的空间，$x_t(\theta)=x(t+\theta)$, C 中范数定义为 $|\phi|=\sup_{\theta\in[-\tau,0]}(|\phi(\theta)|)$．$f$ 是空间 $C([-\tau,0],R^P)$ 到 R^P 的一个连续映射。按照上述概念，(3) 式可写为

$$\dot{x}=-x_t(0)+Ay_t(0)+By_t(-\tau)+I \tag{6}$$

3 DCNN 的稳定性

在进行 DCNN 的稳定性分析之前，先将本文用到的有关引理叙述如下：

引理 DCNN 的平衡点集非空。

注：(1) 因为 DCNN 与 CNN 具有相同的平衡点集，而 CNN 的平衡点集非空可由著名的 Brouwer 不动点定理获得 [6]．(2) Brouwer 不动点定理并不能保证不动点的唯一性，然而，本文中获得的充分条件，不仅可以确保平衡点的唯一性，而且可以保证平衡点的全局渐近稳定性，平衡点的唯一性可由全局渐近稳定性诱导出来。

根据引理，设 $x^*=(x_1^*,x_2^*,\cdots,x_n^*)$ 为 (3) 式的平衡点，令 $x=(x_1,x_2,\cdots,x_n)^T, z=(z_1,z_2,\cdots,z_n)^T, z=x-x^*, g_i(z_i)=f_i(z_i+x_i^*)-f_i(x_i^*), i=1,2,\cdots,n$, 则 (2) 式成为

$$\dot{z}_i(t)=-z_i(t)+\sum_{j=1}^{P}a_{ij}g_j(z_j)+\sum_{j=1}^{P}b_{ij}g_j(z_j(t-\tau)) \tag{7}$$

显然, (3) 式的平衡点的稳定性与 (7) 式 $z=0$ 的稳定性等价. 由 $f_i(x_i)$ 的假设及 $g_i(z_i)$ 的定义知:

$$|g_i(z_i)| \leq M_i|z_i| \tag{8}$$

$$z_i g_i(z_i) \geq 0 \tag{9}$$

在下面的定理中定义: $\forall y \in R, \quad y^+ = \max\{y, 0\}$ 。

定理 1 若 $\max\limits_{1\leq j\leq P}\{M_j(\sum\limits_{i=1}^{P}|b_{ij}| + a_{jj} + \sum\limits_{1\leq i\neq j\leq P}|a_{ij}|)\} < 1$, 则 (7) 式全局渐近稳定.

证明 令 $V(z_t) = \sum\limits_{i=1}^{P}|z_i| + \sum\limits_{i=1}^{P}(M_i\sum\limits_{j=1}^{P}|b_{ji}|)\int\limits_{t-\tau}^{t}|z_i(s)|\mathrm{d}s$, 显然, $V(z_t)$ 正定且径向无界. 下面具体估计 $V(z_t)$ 沿 (7) 式的轨道对 t 的全导数:

$$\begin{aligned}
\dot{V}(z_t)|_{(7)\text{式}} &= \sum_{i=1}^{P}(M_i\sum_{j=1}^{P}|b_{ji}|-1)|z_i| + \sum_{i,j=1}^{P}(\mathrm{sgn}(z_i)a_{ij}g_j(z_j) + b_{ij}g_j(z_j(t-\tau))\mathrm{sgn}(z_i)) \\
&\quad -\sum_{i=1}^{P}(M_i\sum_{j=1}^{P}|b_{ji}|)|z_i(t-\tau)| \\
&\leq \sum_{i=1}^{P}[M_i\sum_{j=1}^{P}|b_{ji}|-1)|z_i| + \sum_{j=1}^{P}[\mathrm{sgn}(z_j)a_{jj}g_j(z_j) + \sum_{1\leq i\neq j\leq P}\mathrm{sgn}(z_i)a_{ij}g_j(z_j)] \\
&\quad +\sum_{i,j=1}^{P}b_{ij}g_j(z_j(t-\tau))\mathrm{sgn}(z_i))] - \sum_{i=1}^{P}(M_i\sum_{j=1}^{P}|b_{ji}|)|z_i(t-\tau)| \\
&\leq \sum_{i=1}^{P}\left(M_i\sum_{j=1}^{P}|b_{ji}|-1\right)|z_i| + \sum_{j=1}^{P}\left(a_{jj} + \sum_{1\leq i\neq j\leq P}|a_{ij}|\right)|g_j(z_j)| \\
&\leq \sum_{i=1}^{P}\left(M_i\sum_{j=1}^{P}|b_{ji}|-1\right)|z_i| + \sum_{j=1}^{P}\left(a_{jj} + \sum_{1\leq i\neq j\leq P}|a_{ij}|\right)^{+}M_j|z_j| \\
&= \sum_{j=1}^{P}\left[\sum_{i=1}^{P}\left(M_j|b_{ij}| + M_j\left(a_{jj} + \sum_{1\leq i\neq j\leq P}|a_{ij}|\right)^{+} - 1\right)\right]|z_j|
\end{aligned}$$

若 $\max\limits_{1\leq j\leq n}\left[M_j\left(\sum\limits_{i=1}^{P}|b_{ij}| + a_{jj} + \sum\limits_{1\leq i\neq j\leq n}|a_{ij}|\right)\right] < 1$, 则有 $\dot{V}(z_t)|_{(7)\text{式}} < 0$ 。因此, 根据时滞系统的 Lyapunov 判稳定理 [7] 知, DCNN (7) 式全局无条件渐近稳定. 证毕

推论 若 $M_j = 1, j = 1, 2, \cdots, P$, 且 $\mu_1(A) + \|B\|_1 < 1$, 其中 $\mu_1(A) = \max\limits_{1\leq j\leq P}\{a_{jj} + \sum\limits_{1\leq i\neq j\leq P}|a_{ij}|\}$ 是矩阵 A 的测度, $\|B\|_1$ 是矩阵 B 的 1- 范数, 则 DCNN (7) 式全局渐近稳定.

注 (1): 在 (7) 式中, 若 $b_{ij} = 0, M_j = 1, (i, j = 1, 2, \cdots, P)$, 则 DCNN 退化为 CNN , 这时定理 1 的条件为 $\mu_1(A) < 1$, 这比文献 [8] 中的 $\mu_1(A) \leq 0$ 要弱.

注 (2)： 定理 1 推论的条件要比文献 [5] 及文献 [9] 的条件: $\|A\|+\|B\|<1$ 弱.

因为 $\forall A\in R^{P\times P}$, 成立 $\mu(A)\le\|A\|$[10], 所以 $\mu(A)+\|B\|\le\|A\|+\|B\|$. 因此, $\|A\|+\|B\|<1$ 蕴涵 $\mu(A)+\|B\|<1$ 。

在 (7) 式中，令 $\tau=0$ ，则 (7) 式成为

$$\dot{z}_i(t)=-z_i(t)+\sum_{j=1}^{P}(a_{ij}+b_{ij})g_j(z_j),\qquad i=1,2,\cdots,P \tag{10}$$

设 $g_j(z_j)$ 为分段线性函数, 令 $R=[r_{ij}]_{P\times P}$, 其中 r_{ij} 定义为 $r_{ij}=\begin{cases}(a_{ii}+b_{ii})^{+}-1, & i=j;\\ |a_{ij}+b_{ij}|, & i\ne j.\end{cases}$

定理 2 若矩阵 R 的测度 $\mu_2(R)=\lambda_{\max}(\frac{R+R^T}{2})<0$, 则 CNN (10) 式是全局渐近稳定的, 且必存在一正数 $\Delta>0$, 使得当 $0<\tau<\Delta$ 时， DCNN (7) 式也是渐近稳定的.

证明 (1) 先证第一部分. 令 $V(z)=\frac{1}{2}\sum\limits_{i=1}^{P}z_i^2$, 则 V(z) 是正定且径向无界的.

$$\begin{aligned}\dot{V}(z)|_{(10)} &= -\sum_{i=1}^{P}z_i^2+\sum_{i,j=1}^{P}z_i(a_{ij}+b_{ij})g_j(z_j)\\ &\le -\sum_{i=1}^{P}z_i^2+\sum_{i=1}^{P}\Big[z_i(a_{ii}+b_{ii})g_i(z_i)+\sum_{j\ne i}|z_i||a_{ij}+b_{ij}||z_j|\Big]\\ &\le \sum_{i=1}^{P}\Big([(a_{ii}+b_{ii})^{+}-1]z_i^2+\sum_{j\ne i}|z_i||a_{ij}+b_{ij}||z_j|\Big)=|z|^TR|z|\\ &\le \lambda_{\max}(\frac{R+R^T}{2})z^Tz\end{aligned}$$

上式中, $|z|=(|z_1|,|z_2|,\cdots,|z_P|)^T$ 。因此, 若 $\lambda_{\max}(\frac{R+R^T}{2})<0$, 则 $\dot{V}(z)|_{(10)\text{式}}<0$ 。所以, CNN (10) 式全局渐近稳定.

(2) 第二部分的证明类似于文献 [2] 中的方法.

首先将 DCNN (7) 式写为 $\dot{z}_i=-z_i+\sum\limits_{i=1}^{P}(a_{ij}+b_{ij})g_j(z_j)+\sum\limits_{i=1}^{P}b_{ij}[g_j(z_j(t-\tau))-g_j(z_j)]$

仿文献 [1]，定义 $\frac{\mathrm{d}y_i}{\mathrm{d}x_i}=n_i(x_i)=\begin{cases}1, & \text{iff } |x_i|\le 1;\\ 0, & \text{iff } |x_i|>1.\end{cases}$

对于 DCNN (7) 式, 仍用上述 $V(z)$ 作为 Lyapunov 函数, 则

$$\begin{aligned}
\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(7)\text{式}} &= \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(10)\text{式}} + \sum_{i=1}^{P}\frac{\partial V}{\partial z_i}\left[\sum_{i=1}^{P} b_{ij}[g_j(z_j(t-\tau)) - g_j(z_j(t))]\right] \\
&\le \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(10)\text{式}} + \sum_{i,j=1}^{P}|z_i||b_{ij}|\Big|\int_{t-\tau}^{t} n_j(z_j)\dot{z}_j(s_j)\mathrm{d}s_j\Big| \\
&\le \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(10)\text{式}} + \tau\sum_{i,j=1}^{P}|z_i||b_{ij}|\Big| - z_j(\xi_j) + \sum_{i=1}^{P}[a_{ji}g_i(\xi_i) + b_{ji}g_i(\xi-\tau)]\Big| \\
&\le \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(10)\text{式}} + \tau\sum_{i,j=1}^{P}|z_i||b_{ij}|\Big[|z_j(\xi_j)| + \sum_{i=1}^{P}(|a_{ji}||g_i(\xi_i)| + |b_{ji}||g_i(\xi-\tau)|)\Big] \\
&\le \frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(10)\text{式}} + \tau\sum_{i,j=1}^{P}|z_i||b_{ij}|\Big[\sum_{j=1}^{P}(|a_{ji}| + |b_{ji}| + 1)\Big]|z_j|
\end{aligned}$$

上式中使用了积分中值定理及 Razumikhin 条件 [2], 其中 $\xi \in [t-\tau, t]$. 因为 CNN (10) 式渐近稳定, 所以 $\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} < 0$. 不妨设 $\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t} = -W(z_1, z_2, \cdots, z_n)$. 显然, 上式第二项正定, 设其为 $\tau U(z_1, z_2, \cdots, z_n)$, 则有 $\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(7)\text{式}} \le -W(z_1, z_2, \cdots, z_n) + \tau U(z_1, z_2, \cdots, z_n)$. 由于 $V(z_1, z_2, \cdots, z_n)$ 正定, $-W(z_1, z_2, \cdots, z_n)$ 负定. 因此, 必存在一正数 $m_1 > 0$, 使得 $-W \le -m_1 V$; 同理, 必存在另一正数 $m_2 > 0$, 使得 $U \le m_2 V$. 于是 $\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(7)\text{式}} \le (\tau m_2 - m_1)V$. 因此, 只要 $\tau \le \frac{m_1}{m_2} = \Delta$, 就有 $\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}t}\Big|_{(7)\text{式}} \le 0$. 根据文献 [7] , 定理 2 获证. 证毕

定理 2 部分回答了下述问题, 即如果 CNN (10) 式是渐近稳定的, 则在什么条件下, DCNN(7) 式仍是渐近稳定的. 然而, 对于一般的情况, 仍需作进一步的研究.

4 3 个例子

在文献 [3] 中, 证明了若 $\min\limits_{1\le i\le P}\left[1 - \frac{1}{3}\sum\limits_{j=1}^{P}(2(|a_{ij} + b_{ij}|) + (a_{ji} + |b_{ji}|))\right] > 0$, 则系统 (1) 式是全局渐近稳定的.

在文献 [9] 中, 证明了如果以下条件满足: (1) 矩阵 A 的非对角线上的元素均为非负的; (2) 矩阵 B 的元素非负; (3) $-(A+B)$ 是行和占优的, 则系统 (1) 式是全局渐近稳定的.

文献 [11] 证明了若 (1) 矩阵 $-(A+A^T)$ 正定; (2) $\|B\|_2^2 \le 1$, 则系统 (1) 式是全局渐近稳定的。

下面我们举 3 个例子说明本文给出的条件是对上述稳定性判据的新的补充.

例 1 考虑以下两个矩阵:

$$A = \begin{bmatrix} -0.5 & 1 \\ 0 & -2 \end{bmatrix} \text{ 及 } B = \begin{bmatrix} 0.5 & 0.5 \\ 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}$$

其中矩阵 A 的非对角线上的元素非负，矩阵 B 的所有元素非负，简单计算可知 $\max\limits_{1\le j\le P}\{(\sum\limits_{i=1}^{P}|b_{ij}|+a_{jj}+\sum\limits_{1\le i\ne j\le P}|a_{ij}|)\}=0.5$，因此根据定理 1，系统 (1) 式是全局渐近稳定的。

矩阵 $-(A+B)$ 为

$$-(A+B)=\begin{bmatrix}0 & -1.5\\ -0.5 & 1.5\end{bmatrix}$$

显然，它不是行和占优的，文献 [9] 中的条件不满足。除此之外，我们对于矩阵 A 和 B 的元素的符号并不作要求。

例 2 考虑下述矩阵：

$$A=\begin{bmatrix}-1 & 0.08\\ 0.9 & -0.09\end{bmatrix} \text{ 及 } B=\begin{bmatrix}0.5 & 0.5\\ 0.5 & 0.5\end{bmatrix}$$

计算可知，$\max\limits_{1\le j\le P}\{(\sum\limits_{i=1}^{P}|b_{ij}|+a_{jj}+\sum\limits_{1\le i\ne j\le P}|a_{ij}|)\}=0.9$，因此根据定理 1，系统 (1) 式是全局渐近稳定的。而矩阵

$$-(A+A^T)=\begin{bmatrix}2 & -0.98\\ -0.98 & 0.18\end{bmatrix}$$

不是正定矩阵。因而文献 [11] 中的条件不满足。

例 3 考虑以下两个矩阵：

$$A=\begin{bmatrix}-0.25 & 0.3\\ 0.15 & -0.25\end{bmatrix} \text{ 及 } B=\begin{bmatrix}0.25 & 0.3\\ 0.15 & 0.25\end{bmatrix}$$

简单计算可知，$\max\limits_{1\le j\le P}\{(\sum\limits_{i=1}^{P}|b_{ij}|+a_{jj}+\sum\limits_{1\le i\ne j\le P}|a_{ij}|)\}=0.6$，因此根据定理 1，系统 (1) 式是全局渐近稳定的，但此时不满足文献 [3] 中定理的条件。

5 结 论

本文运用 Lyapunov 泛函法和 Razumikhin 法分别给出了时滞细胞神经网络全局渐近稳定的两个新的充分条件，举例说明了所获得的条件是对现有结果的补充。这两个定理对于矩阵 A 和 B 未做任何对称的要求，同时对于神经元的激励函数的要求也放宽了，因而使得网络有更宽的适应范围和调整余地，且结果易于检验，可以作为网络综合的准则和判据从而设计出全局渐近稳定的 DCNN，这对某些应用领域如全局优化问题有着重要的意义。

参 考 文 献

[1] L. O. Chua, L. Yang, Cellular neural networks: Theory and applications, IEEE Trans. on Circuits and Syst., 1988, 35(10), 1257–1290.

[2] 张 强，许 进，细胞神经网络的全局指数稳定性，电子科学学刊， 2000, 22(3), 434–438.

[3] 曹进德，具时延的细胞神经网络的全局渐近稳定性分析，电子科学学刊， 2000, 22(2), 253–258.

[4] P. P. Civalleri, M. Gilli, L. Pabdolfi, On stability of cellular neural networks with delay, IEEE Trans. on Circuits and Syst., 1993, 40(3), 157–165.

[5] 卢宏涛，何振亚，带时延的细胞神经网络的无条件稳定性，电子学报， 1997, 25(1), 1–4.

[6] 廖晓昕，细胞神经网络的数学理论 (I)，中国科学， A 辑， 1994, 24(9), 902–910.

[7] 秦元勋，刘永清，王 联，郑祖庥，带有时滞的动力系统的运动稳定性 (第二版)，北京，科学出版社， 1989, 325–330.

[8] 廖晓昕， Hopfield 型神经网络的稳定性，中国科学， A 辑， 1993, 23(10), 1025–1035.

[9] T. Roska, C. W. Wu, L. O. Chua, Stability of cellular neural networks with dominant nonlinear and delay-type templates, IEEE Trans. on Circuits and Syst., 1993, 40(4), 270–272.

[10] C. A. Desoer, M. Vidyasager, Feedback Systems: Input-Output Properties, New York, Academic, 1975, 225–240.

[11] S. Arik, V. Tavsanoglu, A sufficient condition for global stability of cellular neural networks with delay, Proc. IEEE Int. Symp. Circuits and Systems, Hong Kong, 9–12, June 1997, 549–552.

STABILITY OF CELLULAR NEURAL NETWORKS WITH DELAY

Zhang Qiang Ma Runnian Xu Jin*

(*Key Lab. for Radar Signal Processing, Xidian University, Xi'an* 710071, *China*)

*(*Dept. of Control Sci. & Eng. Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan* 420074, *China*)

Abstract In this paper, the problem of stability for the cellular neural networks(CNN's) with delay is studied. Two types of sufficient conditions for global asymptotic stability of cellular neural networks with delay are obtained by means of Lyapunov functional approach and the method of Razumikhin function. One type involves delay dependent results while the other type of results does not involve delays. The conditions obtained improve the existed results and may offer some referrence to the design of CNN's with delay.

Key words Cellular neural networks, Delay, Global asymptotic stability, Lyapynov functional, Method of Razumikhin function

张 强： 男， 1971 年生，硕士，博士生，目前主要研究兴趣为信号处理，神经网络和遗传算法，已发表论文多篇.

马润年： 男， 1963 年生，副教授，硕士，博士生，目前主要研究兴趣为神经网络和图论，已发表学术论文 30 余篇.

许 进： 男， 1959 年生，教授，博士生导师，现华中理工大学特聘教授，主要研究兴趣为神经网络、遗传算法、图论及系统工程，已发表论文 100 多篇，专著三部.