

# 随机细胞神经网络的指数稳定性

沈 轶, 张玉民, 廖晓昕

(华中科技大学控制科学与工程系, 湖北武汉 430074)

摘 要: 本文研究了随机时滞细胞神经网络的指数稳定性, 建立了这种细胞神经网络均方指数稳定与几乎必然指数稳定的充分条件, 其条件分为时滞无关与时滞相关两种.

关键词: 细胞神经网络; 指数稳定性; Lyapunov 泛函; Lyapunov 函数

中图分类号: TP183 文献标识码: A 文章编号: 0372-2112 (2002) 11-1672-04

## Exponential Stability of Stochastic Cellular Neural Networks

SHEN Yi, ZHANG Yu-min, LIAO Xiao-xin

(Department of Control Science and Engineering, HUST, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: The exponential stability of stochastic cellular neural networks with delay was investigated. For such neural networks, we establish two types of sufficient conditions for the exponential stability in the mean square and surely exponential stability. One type involves delay independent results while the other type involves delay dependent results.

Key words: cellular neural network; exponential stability; Lyapunov functional; Lyapunov function

### 1 引言

Hopfield 神经网络要求每个神经元与其他神经元全联接, 可是在真实神经网络里, 并没有这种要求, 在由  $10^{11}$  数量的神经细胞组成的人脑中, 每个神经细胞与其周围的  $10^3$  左右的神经细胞相联, 在视觉初级加工的神经网络里, 每个神经细胞与其相近的神经细胞之间的联接较强, 而与离该神经细胞的联接较弱, 视觉处理就是利用这种联接权的方向检测、边缘提取等工作, 1988 年美国加州大学贝克莱分校的 Chua 与 Yang 提出的细胞神经网络 (Cellular Neural Network) [1] 就是以神经细胞的这种联接方式为背景, 来实现一种局部联接的、权可设计的人工神经网络. 这种网络对二维图像的初级加工特别有用, 现已形成了一个新的学科分支. 它的实现也比 Hopfield 网络容易, 网络的芯片也已不断出现, 是一个值得注意的领域. 细胞神经网络的基本单元称为人工细胞, 它是由线性电容、线性电阻、线性控制元件和非线性控制元件组成, 如同一个细胞自动机, 它只同它周围的神经元相接, 是一个连续的动态系统. 细胞神经网络应用于运动图像处理时, 需要引入细胞间信号传递的时间延迟, 因此 1992 年 Chua 与 Roska 引入了带时滞细胞神经网络 [2], 关于细胞神经网络与时滞细胞神经网络的动力学行为, 已有许多作者进行研究 [1~9], 但对具有随机扰动的细胞神经网络与时滞细胞神经网络方面的研究却很少, 且主要集中在算法方面 [10~12]. 基于这种状况, 本文主要在理论上研究了时滞的随机细胞神经网络的指数稳定性. 利用 Lyapunov 泛函或 Lyapunov 函数与 Itô 公式, 建立了这种细胞神经

网络的均方指数稳定与几乎必然指数稳定 [7] 的判据, 所得判据分为时滞无关与时滞相关两种.

### 2 时滞无关的稳定条件

考虑时滞的随机细胞型神经网络

$$dx(t) = [-Dx(t) + Ax(t) + Bx(t - \tau)] dt + f(t, x(t), x(t - \tau)) dw(t) \quad (1)$$

其中  $x = (x_1, \dots, x_n)^T \in R^n$ ,  $D = \text{diag}(d_1, \dots, d_n)$ ,  $d_i > 0$  ( $1 \leq i \leq n$ ),  $A = (a_{ij})_{n \times n} \in R^{n \times n}$ ,  $B = (b_{ij})_{n \times n} \in R^{n \times n}$ ,  $\tau > 0$  是时滞,  $\sigma(x) = (\sigma_1(x_1), \dots, \sigma_n(x_n))^T$ ,  $\sigma_i(x_i) = \frac{1}{2} \left( |x_i + 1| - |x_i - 1| \right)$  ( $1 \leq i \leq n$ ),  $f(t, x(t), x(t - \tau)) dw(t)$  表示随机扰动, 并且  $w = (w_1(t), \dots, w_n(t))^T$  是定义在完备的概率空间  $(\Omega, F, P)$  上具自然滤波  $\{F_t\}_{t \geq 0}$  的  $m$  维 Brown 运动,  $f: R_+ \times R^n \times R^n \rightarrow R^{n \times m}$  是局部 Lipschitz 连续的且满足线性增长条件 [7], 并设系统 (1) 有初始条件,  $x(s) = \xi(s)$ ,  $-\tau \leq s \leq 0$ ,  $\xi \in L^2_{F_0}([-\tau, 0], R^n)$ , 这里  $L^2_{F_0}([-\tau, 0], R^n)$  是  $R_n$  值的随机过程, 且  $\xi(s)$ ,  $-\tau \leq s \leq 0$ , 且  $\xi(s)$  是  $F_0$  可测,  $\int_{-\tau}^0 E|\xi(s)|^2 ds < \infty$  由文献 [13] 知系统 (1) 有唯一解, 记为  $x(t; \xi)$  或  $x(t)$ , 并且它平方可积的. 为研究系统 (1) 的稳定性, 下面均设  $\forall t \in R_+ : f(t, 0, 0)$ , 并设存在  $a_1, a_2 \geq 0$ , 使:  $\forall (t, x, y) \in R_+ \times R^n \times R^n$ :

$$\text{trace} f^T(t, x, y) f(t, x, y) \leq a_1 |x|^2 + a_2 |y|^2 \quad (2)$$

定理 1 设存在正定阵  $G, \bar{G}$ , 正对角阵  $Q, \bar{Q}$ , 使

$$(GD + D^T G) + Q + \bar{Q} + GA\bar{Q}^{-1}A^T G + GBQ^{-1}B^T G = -\bar{G} \quad (3)$$

则  $\lambda_{\min}(\bar{G}) > \|G\| (a_1 + a_2)$  (4)

蕴涵系统(1)的平凡解均方指数稳定, 且几乎必然指数稳定.

证明 将系统(1)重新写成

$$dx(t) = [-Dx(t) + AH(x(t))x(t) + BH(x(t-\tau))]dt + f(t, x(t), x(t-\tau))dw(t) \quad (5)$$

其中

$$H(x(t)) = \text{diag}(\phi_1(x_1), \dots, \phi_n(x_n)),$$

$$\Psi_i(x_i) = x_i^{-1} \sigma_i(x_i) (1 \leq i \leq n).$$

作 Lyapunov 泛函

$$V(x_t) = x^T(t)Gx(t) + \int_{-\tau}^t x_i^T(\theta)Qx_i(\theta)d\theta,$$

则由 Itô 公式有

$$LV(x_t) = 2x^T(t)G(-Dx(t) + AH(x(t))x(t) + BH(x(t-\tau))x(t-\tau)) + \text{trace}f^T Gf + x^T(t)Qx(t) - x^T(t-\tau)Qx(t-\tau) \quad (6)$$

因

$$2x^T(t)GBH(x(t-\tau))x(t-\tau) \leq x^T(t-\tau)Qx(t-\tau) + x^T(t)GBHQ^{-1}HB^T Gx(t) \leq x^T(t-\tau)Qx(t-\tau) + x^T(t)GBQ^{-1}B^T Gx(t) \quad (7)$$

$$2x^T(t)GAH(x(t))x(t) \leq x^T(t)\bar{Q}x(t) + x^T(t)GA\bar{Q}^{-1}A^T Gx(t) \quad (8)$$

$$\text{trace}f^T(t, x(t), x(t-\tau))Gf(t, x(t), x(t-\tau)) \leq \|G\| (a_1 |x(t)|^2 + a_2 |x(t-\tau)|^2) \quad (9)$$

将式(7)~(9)代入式(6)中应用已知条件式(3), 有

$$V(x_t) \leq -\lambda_{\min}(\bar{G})|x(t)|^2 + \|G\| (a_1 |x(t)|^2 + a_2 |x(t-\tau)|^2) \quad (10)$$

由已知条件式(4), 必存在唯一的  $\varepsilon > 0$ :

$$\lambda_{\min}(\bar{G}) = \|G\| (a_1 + \varepsilon) + (\|G\| a_2 + \|Q\| \tau) e^{\varepsilon\tau} \quad (11)$$

再一次应用 Itô 公式, 从式(10)可推出:

$$E(e^{\varepsilon t} V(x_t)) \leq E[\xi^T(0)G\xi(0)] + \|Q\| C_1 - [\lambda_{\min}(\bar{G}) - \|G\| (a_1 + \varepsilon)] \int_0^t e^{\varepsilon s} E|x(s)|^2 ds + \|G\| a_2 \int_0^t e^{\varepsilon s} E|x(s-\tau)|^2 ds + \varepsilon \int_0^t e^{\varepsilon s} ds \int_{-\tau}^0 E x_s^T(\theta) Q x_s(\theta) d\theta \quad (12)$$

其中,  $C_1 = \int_{-\tau}^0 E|x(s)|^2 ds$ , 且当  $t \geq \tau$  时,

$$\int_0^t e^{\varepsilon s} E|x(s-\tau)|^2 ds \leq e^{\varepsilon\tau} C_1 + e^{\varepsilon t} \int_0^{\tau-t} e^{\varepsilon r} E|x(r)|^2 dr,$$

$$\int_0^t e^{\varepsilon s} ds \int_{-\tau}^0 E x_s^T(\theta) Q x_s(\theta) d\theta = \int_0^t e^{\varepsilon s} ds \int_{-\tau}^s E x^T(r) Q x(r) dr = \int_{-\tau}^t E x^T(r) Q x(r) dr \int_{0 \vee r}^{t \wedge (r+\tau)} e^{\varepsilon s} ds \leq \tau \|Q\| C_1 e^{\varepsilon t} + \|Q\| \tau e^{\varepsilon\tau} \int_0^t e^{\varepsilon r} E|x(r)|^2 dr, \quad (14)$$

将式(13)、(14)代入式(12)并应用式(11), 有

$$E(e^{\varepsilon t} V(x_t)) \leq C_2, t \geq \tau$$

其中

$$C_2 = E[\xi^T(0)G\xi(0)] + \|Q\| C_1 + (\|G\| a_2 + \|Q\| \tau) C_1 e^{\varepsilon\tau}$$

因此当  $t \geq \tau$ , 由  $V$  的定义, 有

$$E|x(t)|^2 \leq [\lambda_{\min}(G)]^{-1} C_2 e^{-\varepsilon t}$$

这说明系统(1)的平凡解均方指数稳定. 系统(1)的平凡解的几乎必然指数稳定易由文献[8]中定理 10.7.2 推出. 证毕

定理 2 设存在定阵  $G, \bar{G}$ , 正对角阵  $Q$ , 使

$$-(GD + D^T G) + Q + GBQ^{-1}B^T G = -\bar{G}, \quad (15)$$

若

$$\lambda_{\min}(\bar{G}) > \|G\| (a_1 + a_2) + 2\|GA\|$$

则系统(1)的平凡解均方指数稳定, 也几乎必然指数稳定.

证明 作 Lyapunov 泛函

$$V(x_t) = x^T(t)Gx(t) + \int_{-\tau}^t x_i^T(\theta)Qx_i(\theta)d\theta,$$

由 Itô 公式, 有

$$V(x_t) = 2x^T(t)G(-Dx(t) + AH(x(t))x(t) + BH(x(t-\tau))x(t-\tau)) + \text{trace}f^T Gf + x^T(t)Qx(t) - x^T(t-\tau)Qx(t-\tau) \quad (16)$$

因为

$$2x^T(t)GAH(x(t))x(t) \leq 2\|GA\| |x(t)|^2 \quad (17)$$

将式(7)、(9)、(17)代入式(16)并应用(15), 有

$$V(x_t) \leq (-\lambda_{\min}(\bar{G}) + 2\|GA\| + \|G\| a_1) |x(t)|^2 + \|G\| a_2 |x(t-\tau)|^2.$$

其余部分的证明类似于定理 1, 略. 证毕

定理 3 若存在正定阵  $G$ , 使

$$\lambda_{\min}(GD + D^T G) > 2(\|GA\| + \|GB\|) + \|G\| (a_1 + a_2) \quad (18)$$

则系统(1)的平凡解均方指数稳定, 也几乎必然指数稳定.

证明 作 Lyapunov 泛函

$$V(x_t) = x^T G x + \|GB\| \int_{-\tau}^0 x_i^T(\theta) x_i(\theta) d\theta,$$

则由 Itô 公式, 有

$$V(x_t) = 2x^T(t)G(-Dx(t) + A^\sigma(x(t)) + B^\sigma(x(t-\tau))) + \text{trace}f^T Gf + \|GB\| (|x(t)|^2 - |x(t-\tau)|^2) \leq -\lambda_{\min}(GD + D^T G) |x(t)|^2 + 2\|GA\| |x(t)|^2 + \|GB\| (|x(t)|^2 + |x(t-\tau)|^2) + \|G\| (a_1 |x(t)|^2 + a_2 |x(t-\tau)|^2) + \|GB\| (|x(t)|^2 + |x(t-\tau)|^2) = (-\lambda_{\min}(GD + D^T G) + 2\|GA\| + 2\|GB\| + \|G\| a_1) |x(t)|^2 + \|G\| a_2 |x(t-\tau)|^2.$$

其余的证明类似于定理 1, 略. 证毕.

注 1 若定量 1~ 定理 3 中  $G, Q$  与  $\bar{Q}$ , 取特殊矩阵, 比如单位矩阵等, 可以得到一系列的简单判据.

注 2 若系统(1)中  $a_1 = a_2 = 0, D = I$  (单位阵). 则对时滞细胞神经网络

$$\dot{x}(t) = -x(t) + A^\sigma(x(t)) + B^\sigma(x(t-\tau)) \quad (19)$$

文献[6]已在条件  $\|A\| + \|B\| < 1$  之下, 证明系统(19)渐

近稳定, 显然条件  $\|A\| + \|B\| < 1$  可在条件(18)中取得  $G = D = I, a_1 = a_2 = 0$ , 因而文献[6]的结果是定时 3 的特例.

注 3 文献[3, 4]讨论了当  $D = I$  时, 系统(19)的渐近稳定性, 其中稳定条件分别是 ①  $B$  可逆,  $G = -I + A + B$  对称,

且  $\|B\| \leq \frac{2}{3}\tau^{1/3}$ ; ② 存在对角阵  $Q$ , 使  $QA, QB$  对称,  $\|B\|$

$\leq \frac{2}{3}\tau^{1/4}$ . 若在系统(19)中令  $D = I, B = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{2} \\ \frac{1}{2} & 0 \end{bmatrix}, A = 0$ ,

易验证条件 ①、②均不满足, 这说明利用文[3, 4]的结果不能判断系统(19)的稳定性, 但在定理 3 中取  $G = D = I, a_1 = a_2 = 0$ , 则条件(18)满足, 这说明对任意时滞  $\tau$ , 系统(19)指数稳定, 因此定时 3 的结果要优于文献[3, 4]的结果.

### 3 时滞相关的稳定条件

上面的定理 1~ 定理 3 是时滞无关的稳定条件. 为建立时滞相关的稳定条件, 首先证明一个引理.

引理 1 设  $x(t)$  为(1)的解, 则  $\forall \varepsilon > 0$ , 有

$$\int_0^t e^{\varepsilon s} E \|x(s) - x(s - \tau)\|^2 ds \leq C_2 + 4(\tau \|B\|^2 + a_2) \tau C_1 e^{2\varepsilon\tau} + C_3 \int_0^t e^{\varepsilon s} E \|x(r)\|^2 dr, t \geq 0 \quad (20)$$

其中

$$C_1 = \int_{-\tau}^0 E \|\xi(s)\|^2 ds,$$

$$C_2 = \int_0^{\tau} e^{\varepsilon s} E \|x(s) - x(s - \tau)\|^2 ds,$$

$$C_3 = 4\tau e^{\varepsilon\tau} [\tau (\|D\|^2 + \|A\|^2) + a_1 + (\tau \|B\|^2 + a_2) e^{\varepsilon\tau}].$$

这里  $C_3$  中  $a_1, a_2$  由式(2)确定.

证明 显然当  $t \leq \tau$  时, 式(20)成立, 故只需考虑  $t \geq \tau$  的情形, 而当  $t \geq \tau$  时, 由 Holder 不等式与文献[9]中引理 2.3, 有

$$\begin{aligned} E \|x(s) - x(s - \tau)\|^2 &\leq 4 \left( E \left\| \int_{s-\tau}^s D x(r) dr \right\|^2 \right. \\ &+ E \left\| \int_{s-\tau}^s A \sigma(x(r)) dr \right\|^2 + E \left\| \int_{s-\tau}^s B \sigma(x(r - \tau)) dr \right\|^2 \\ &+ E \left\| \int_{s-\tau}^s f dv \right\|^2 \leq 4[\tau (\|D\|^2 + \|A\|^2) + a_1] \\ &\cdot \int_{s-\tau}^s E \|x(r)\|^2 dr + 4(\tau \|B\|^2 + a_2) \\ &\cdot \int_{s-\tau}^s E \|x(r - \tau)\|^2 dr, \end{aligned}$$

因此, 当  $t \geq \tau$  时

$$\begin{aligned} \int_0^t e^{\varepsilon s} E \|x(s) - x(s - \tau)\|^2 ds &\leq C_2 + 4(\tau \|D\|^2 \\ &+ \tau \|A\|^2 + a_1) \int_{-\tau}^t e^{\varepsilon s} ds \int_{s-\tau}^s E \|x(r)\|^2 dr \\ &+ 4(\tau \|B\|^2 + a_2) \int_{-\tau}^t e^{\varepsilon s} ds \int_{s-\tau}^s E \|x(r - \tau)\|^2 dr \quad (21) \end{aligned}$$

而

$$\int_{-\tau}^t e^{\varepsilon s} ds \int_{s-\tau}^s e^{\varepsilon t} E \|x(r)\|^2 dr \leq \tau e^{\varepsilon t} \int_0^t e^{\varepsilon r} E \|x(r)\|^2 dr \quad (22)$$

$$\int_{-\tau}^t e^{\varepsilon t} ds \int_{s-\tau}^s E \|x(r - \tau)\|^2 dr \leq \tau C_1 e^{2\varepsilon t}$$

$$+ \tau e^{2\varepsilon t} \int_0^t e^{\varepsilon r} E \|x(r)\|^2 dr \quad (23)$$

将式(22)、(23)代入式(21)即可得式(20), 证毕

定理 4 若存在正定阵  $G$ , 使

$$\begin{aligned} \lambda_{\min}(GD + D^T G) &> 2 \|G(A + B)\| \\ &+ 2 \|GB\| \beta + \|G\| (a_1 + a_2) \quad (24) \end{aligned}$$

其中  $\beta = 2 \sqrt{\tau[\tau(\|D\|^2 + \|A\|^2 + \|B\|^2) + a_1 + a_2]}$ , 则系统(1)的平凡解均方指数稳定, 也几乎必然指数稳定.

证明 作 Lyapunov 函数  $V(x) = x^T G x$ , 则由 Itô 公式及条件(2), 有

$$\begin{aligned} LV(x(t)) &= 2x^T(t)G(-Dx(t) + (A + B)\sigma(x(t))) \\ &+ 2x^T(t)GB(\sigma(x(t - \tau)) - \sigma(x(t))) \text{trace} f^T G f \\ &\leq \lambda \|x(t)\|^2 + \|GB\| \beta^{-1} |x(t - \tau) - x(t)|^2 \\ &+ \|G\| a_2 |x(t - \tau)| \quad (25) \end{aligned}$$

其中  $\lambda = -\lambda_{\min}(GD + D^T G) + 2 \|G(A + B)\| + \|GB\| \beta + \|G\| a_1$ , 由已知条件(24), 必存在唯一的  $\varepsilon > 0$ :

$$\lambda + \|G\| \varepsilon + \|GB\| \beta^{-1} C_3 + G a_2 e^{\varepsilon\tau} = 0 \quad (26)$$

这里  $C_3$  见引理 1, 由引理 1 与式(13)从式(25)可推出

$$\begin{aligned} E e^{\varepsilon t} V(x(t)) &\leq (\lambda + \|G\| \varepsilon + \|GB\| \beta^{-1} C_3 \\ &+ \|G\| a_2 e^{\varepsilon\tau}) \int_0^t e^{\varepsilon r} E \|x(r)\|^2 dr = C_4 \quad (27) \end{aligned}$$

其中  $C_4 = \|GB\| \beta^{-1} (C_2 + 4(\tau \|B\|^2 + a_2) \tau C_1 e^{\varepsilon\tau}) + \|G\| a_2 C_1 e^{\varepsilon\tau} + E \|x(0)\|^T G x(0)$ , 且式(27)中已应用式(26). 由  $V$  的定义及式(27)易推出.

$$E \|x(t)\|^2 \leq [\lambda_{\min}(G)]^{-1} C_4 e^{-\varepsilon t}, t \geq 0$$

这说明系统(1)的平凡解是均方指数稳定. 系统(1)的平凡解几乎必然指数稳定性易由文献[14]中定理 10.7.2 推出.

注 4 当时滞较小时, 定理 4 往往优于定理 1~ 定理 3. 对于随机扰动的时滞细胞神经网络(19), 定理 4 有时也优于文献[3, 4]的结果, 注 3 的例子可说明这点.

### 4 结论

本文首次建立了时滞的随机细胞神经网络指数稳定的判据, 其判据分为时滞无关与相关两种, 值得注意的是细胞神经网络中激活函数是不可导的, 本文所用的方法不同于文献[16, 17]中 Hopfield 型随机神经网络所采取的方法.

参考文献:

- [1] Chua L O, Yang L. Cellular neural network: theory[J]. IEEE Trans. Circuits Systems, 1988, 35(10): 1257-1272.
- [2] Chua L O, Roska. Cellular neural networks with nonlinear and delay-type template elements[J]. Int. J. Circuit Theory Appl., 1992, 20(4): 469-481.
- [3] Civaleri P P, Gilli M, Pandolfi L. On stability of cellular neural networks with delay[J]. IEEE Trans. Circuits System I, 1993, 40(3): 157-165.
- [4] Gilli M. Stability of cellular networks and delayed cellular neural networks with nonpositive templates and nonmonotonic functions[J]. IEEE Trans. Circuits Systems I, 1994, 41(8): 518-528.
- [5] 廖晓昕. 细胞神经网络的数学理论(1)[J]. 中国科学(A 辑).

- 1994, 24(9): 902- 910.
- [ 6 ] 卢宏涛, 何振亚. 带时延的细胞神经网络的无条件稳定性[ J ]. 电子学报, 1997, 25(1): 1- 4.
- [ 7 ] 钟守铭, 等. 具有无穷时滞的细胞神经网络的稳定性[ J ]. 电子学报. 2001, 29(5): 626- 629.
- [ 8 ] 廖晓昕, 等. 具有反应扩散的 Hopfield 神经网络的稳定性[ J ]. 电子学报, 2000, 28( 1 ): 78- 80.
- [ 9 ] 廖晓昕, 等. 具有变时滞 Hopfield 神经网络的全局指数稳定性 [ J ]. 电子学报, 2000, 28( 4 ): 87- 90.
- [ 10 ] Seongwon Cho, Jinwesk Seok. Self organizing map with time invariant learning rate and its exponential stability analysis[ J ]. Neurocomputing, 1998, 19( 1 ): 1- 1.
- [ 11 ] Danishi A M, et al. Robust high gain DNN observe for nonlinear stochastic continuous time systems[ A ]. Proceeding of the 40th IEEE conference on on decision and control[ C ]. Orlando, Florida USA, 2001, 12.
- [ 12 ] Wang Y, Wang H. Suboptimal mean controllers for bounded and dynamic stochastic distributions[J]. Journal of Process Control, 2002, 12( 4 ): 445- 452.
- [ 13 ] Mao X. Exponential Stability of Stochastic Differential Equations[M]. New York: Marcel Dekker, 1994.
- [ 14 ] 廖晓昕. 动力系统的稳定性理论和应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [ 15 ] Mao X, Shah A. Exponential stability of stochastic differential delay equations[ R ]. Stochastics and Stochastics Reports, 1997, 60( 1 ): 135- 153.

- [ 16 ] Liao X X, Mao X. Stability of stochastic neural networks[ J ]. Neural. Parallel & Scientific Computations, 1996, 4: 205- 224.
- [ 17 ] Liao X X, Mao X. Exponential stability and instability of stochastic neural networks [ J ]. Stochastic Analysis and Application, 1996, 14( 2 ): 165- 185.

## 作者简介:



沈 轶 男, 1964 年生于湖南, 1998 年获华中科技大学工学博士学位, 1999 年至 2001 年在华中科技大学从事博士后研究, 现为该校控制系副教授, 已发表论文 20 余篇, 研究领域: 随机系统, 神经网络.



张玉民 男, 1971 年生于山东, 华中科技大学控制科学与工程系博士, 研究领域: 非线性系统, 神经网络.