

混沌神经网络的控制*

何国光 曹志彤

(浙江大学物理系 杭州 310028)

(2001 年 2 月 15 日收到, 2001 年 6 月 1 日收到修改稿)

提出了一种针对混沌神经网络的钉扎控制方法, 利用此方法对混沌神经网络进行控制, 使网络的输出稳定在神经网络的一个存储的模式上, 实现了混沌神经网络的信息搜索, 并对影响混沌神经网络控制效果的几个因素进行了讨论.

关键词: 混沌控制, 混沌神经网络, 钉扎控制方法

PACC: 0545

1 引 言

混沌神经网络由于其复杂的动力学特性, 在动态联想记忆^[1-3]、系统优化^[4]、信息处理^[5]等领域受到人们极大的关注. 混沌神经网络受到关注的另一个原因是混沌存在于生物体真实神经元及神经网络中, 并且起到一定的作用, 动物学的电生理实验已证实了这一点^[6]. 研究混沌神经网络的动力学特性, 有助于揭示大脑的记忆思维规律.

文献 2 对由有混沌特性的神经元组成的混沌神经网络的非周期联想动力学特性, 作了详尽的讨论, 指出了混沌神经网络具有动态联想记忆功能. 由于动态联想记忆在网络的混沌运动中得以实现, 记忆状态为连续改变的非周期行为, 不能稳定在某个已存储的模式上^[7], 使得混沌神经网络联想记忆的实际应用受到限制. 要实现信息的检索与回忆, 就得改变混沌运动的非周期状态, 这就提出了混沌神经网络的控制问题.

自从 1990 年 Ott, Grebogi 和 Yorke 提出混沌控制方法(OGY 方法)^[8]以来, 混沌控制的研究引起了人们广泛的兴趣, 出现了多种控制方法, 如混沌同步控制法^[9]、自适应控制法^[10]、偶然正比控制法(OPE 法)^[11]、延迟反馈控制法^[12]和外部噪声控制法^[13]等. 但这些方法都是针对低维的时间序列的混沌系统的控制. 1994 年胡岗等人用钉扎控制方法成功地在一维耦合映象格子系统的混沌运动进行控制^[14],

这是第一篇对时空混沌系统进行控制研究的报道. 随后罗晓曙等人也对时空混沌的控制展开了研究^[15].

混沌神经网络各神经元之间具有空间上的相互作用, 时间上的非周期运动, 具有十分复杂的时空混沌特性. 要控制混沌神经网络单纯地从时间或空间上加以控制, 其效果不理想. 由于混沌神经网络中加入了时延项, 使得混沌神经网络的特性与文献 14 所述的耦合映象格子等系统有着较大的区别. 本工作提出了一种针对混沌神经网络的钉扎控制方法, 从时间和空间上对混沌神经网络进行控制, 取得了较满意的结果.

2 混沌神经网络模型

混沌神经网络由混沌神经元、外部输入和内部反馈输入的时空连接而成^[1], 如图 1 所示. 网络的第 i 个神经元的动力学方程为

$$\begin{aligned} x_i(t+1) = & \mathcal{F} \sum_{j=1}^M v_{ij} \sum_{d=0}^t k_c^d A_j(t-d) \\ & + \sum_{j=1}^N w_{ij} \sum_{d=0}^t k_r^d x_j(t-d) - \alpha \sum_{d=0}^t k_r^d g\{x_i(t-d)\} \\ & - \Theta_i, \end{aligned} \quad (1)$$

其中 A_j 为外部输入, $\mathcal{F}(\cdot)$ 和 $g(\cdot)$ 分别为神经元的作用函数和不应性函数, α 为不应性参数, Θ_i 为阈值, v_{ij} 为第 i 个神经元与第 j 外部输入的连接权重,

* 国家自然科学基金(批准号 50077019)资助的课题.

w_{ij} 为第 i 个神经元与第 j 内部反馈输入的连接权重, k_e 、 k_f 和 k_r 分别为外部输入、反馈输入和不应性的衰减参数.

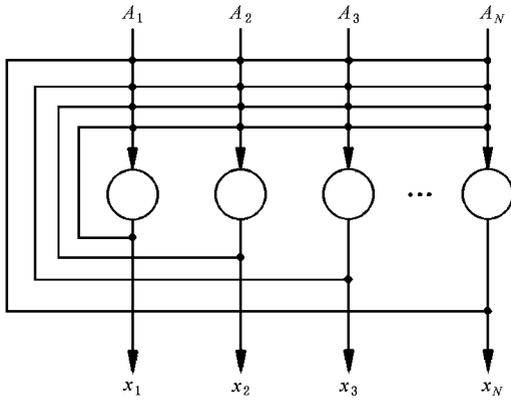


图 1 混沌神经网络模型

方程(1)可以改写成下列递推的联立方程的形式:

$$\xi_i(t+1) = \sum_{j=1}^M v_{ij} A_j(t) + K_e \xi_i(t), \quad (2)$$

$$\eta_i(t+1) = \sum_{j=1}^N w_{ij} x_j(t) + k_f \eta_i(t), \quad (3)$$

$$\zeta_i(t+1) = -\alpha g\{x_i(t)\} + k_r \zeta_i(t) - \theta_i, \quad (4)$$

$$\theta_i \equiv \Theta_i(1 - k_r),$$

$$x_i(t+1) = f\{\xi_i(t+1) + \eta_i(t+1) + \zeta_i(t+1)\}, \quad (5)$$

其中

$$\xi_i(t+1) = \left(\sum_{j=1}^M v_{ij} \sum_{d=0}^t k_e^d A_j(t-d) \right),$$

$$\eta_i(t+1) = \left(\sum_{j=1}^N w_{ij} \sum_{d=0}^t k_f^d x_j(t-d) \right)$$

和

$$\zeta_i(t+1) = \left(-\alpha \sum_{d=0}^t k_r^d g\{x_i(t-d)\} - \theta_i \right)$$

分别为外部输入、反馈输入和不应性的内部状态.

在本文中,混沌神经网络由 100 个神经元构筑而成.由于外部输入 $A_i(t)$ 为常数, $\xi_i(t)$ 项可以归入阈值项,定义新的阈值 a_i 后,则方程可以简化为下列只有两个内部状态的方程:

$$x_i(t+1) = f\{\eta_i(t+1) + \zeta_i(t+1)\}, \quad (6)$$

$$\eta_i(t+1) = k_f \eta_i(t) + \sum_{j=1}^{100} w_{ij} x_j(t), \quad (7)$$

$$\zeta_i(t+1) = k_r \zeta_i(t) - \alpha g\{x_i(t)\} + a_i. \quad (8)$$

在本文中,神经元的作用函数 $f(x)$ 取带陡度参数 ϵ 的 Sigmoid 函数,即

$$f(x) = \frac{1}{\left(1 + \exp\left(\frac{-x}{\epsilon}\right)\right)},$$

不应性函数 $g(x) \equiv x$, 反馈连接权重由图 2 所示的 4 个存储模式根据下式决定:

$$w_{ij} = \frac{1}{4} \sum_{p=1}^4 (2x_i^p - 1)(2x_j^p - 1), \quad (9)$$

其中 x_i^p 为第 p 个存储模式的第 i 个分量.对于神经网络 100 个神经元的输出状态,用 10×10 个点的图形来表示,如果神经元为“兴奋”,对应的点显示黑方块“■”,如果为“抑制”,则显示为点“·”.混沌神经网络的输出与存储模式之间的差异,用汉明距离来描述,对于第 p 个存储模式,汉明距离定义为

$$Hd = \sum_{i=1}^{100} |x_i - x_i^p|.$$

当网络输出为存储模式或反相模式时,其汉明距离分别为 0 或 100.

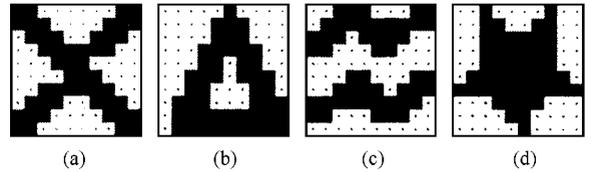


图 2 4 个存储模式

3 混沌神经网络的时空控制

控制混沌运动的目的是要把系统从混沌运动转化为性能最佳的周期运动、不动点,或将周期运动转化为混沌运动.现今已有的混沌控制方法一般分为两类:一类是对混沌系统的参数进行微扰,达到失稳周期轨道的稳定控制;另一类是对系统变量实施反馈和微扰,达到人们期望的目标轨道.本文把混沌神经网络的反馈信号,用钉扎控制的方法,加到被钉扎的神经元上,对系统进行微扰,从而达到稳定输出的控制目的,属于后一种控制类型.

选取(6)–(8)式描述的网络模型,作为控制对象的混沌神经网络.在选取合适的系统参数后,运动呈现出混沌运动^[2].如果对混沌神经网络中的每个神经元都加反馈控制,这使得控制系统过于复杂,甚至不能工作.混沌神经网络每个神经元,都与系统中的其他神经元相互连接、相互作用,存在着空间上的

耦合, 时间上的非线性混沌运动, 完全是一种时空分布的混沌系统. 如果对某一或几个神经元加以反馈激励, 随着时延反馈与空间的耦合, 反馈作用将影响到整个神经网络, 这就是钉扎控制的基本思想. 混沌神经网络的各神经元之间不仅在空间上的全连接, 而且每个神经元的输入状态与自身及其余神经元的历史有关, 即在时间上存在着时延反馈, 从而使得混沌神经网络与文献 14 所述的耦合映象格子系统有着较大的差别, 直接用文献 14 的控制方法, 不能达到控制目的. 为此, 提出了适用混沌神经网络的钉扎控制方法:

1. 混沌神经网络内部状态的反馈输入、不应性作用项决定了网络的时延反馈作用, 改变内部状态, 可以达到控制输出的目的. 因而本工作中将反馈控制量加于神经网络内部状态的反馈输入项上, 不同于文献 14 把反馈控制量直接加于系统的输出端, 控制作用比较如图 3 所示.

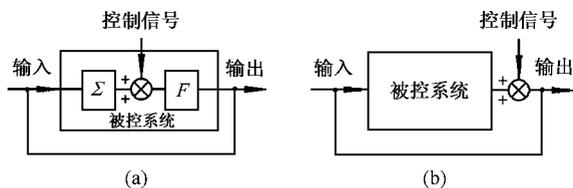


图 3 控制作用比较 (a)为本文的方法 (b)为文献 14 的方法

2. 加于内部状态的反馈控制量, 通过神经元的作用函数作用后, 体现出对系统的影响. 由于神经元的作用函数是非线性的, 即使反馈输入量是线性的, 也能达到非线性的控制作用, 因而取反馈控制量 u_i 为网络的期望值与网络的实际输出之差.

按上述控制方法, 加了控制后的混沌神经网络模型可用以下方程来描述:

$$x_i(t+1) = f\{\eta_i(t+1) + \zeta(t+1)\}, \quad (10)$$

$$\eta_i(t+1) = k_i \eta_i(t) + \sum_{j=1}^{100} w_{ij} \{x_j(t) - \sum_{l=1}^{100/l} \delta(i-l-1) K u_l(t)\}, \quad (11)$$

$$u_i(t) = x_i(t) - \tilde{x}_i, \quad (12)$$

$$\zeta_i(t+1) = k_i \zeta_i(t) - \alpha g\{x_i(t)\} + a_i, \quad (13)$$

其中 l 为被钉扎的二相邻神经元的空间距离, 简称钉扎距离, K 为控制刚度, \tilde{x}_i 为网络的期望值, 而 $\delta(\cdot)$ 为脉冲函数

$$\delta(j) = \begin{cases} 1 & j = 0, \\ 0 & j \neq 0. \end{cases} \quad (14)$$

根据(10)–(13)式, 进行计算机仿真实验.

4 计算机仿真实验

在计算机仿真实验中, 选取 $\alpha = 10.0$, $k_i = 0.20$, $k_i = 0.95$, 该参数下系统处于混沌运动^[21]. 选择如图 4 所示模式, 作为实验的起始状态, 图 2(d) 的存储模式作为我们控制的期望输出, 起始模式与网络期望输出值之间存在 8 点的汉明距离. 在不加任何控制的情况下, 其运动轨迹与期望模式之间的汉明距离随时间的演变如图 5 所示, 可见系统处于混沌运动.

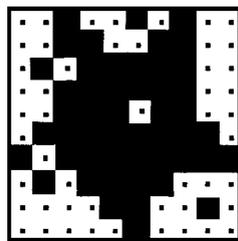


图 4 起始状态

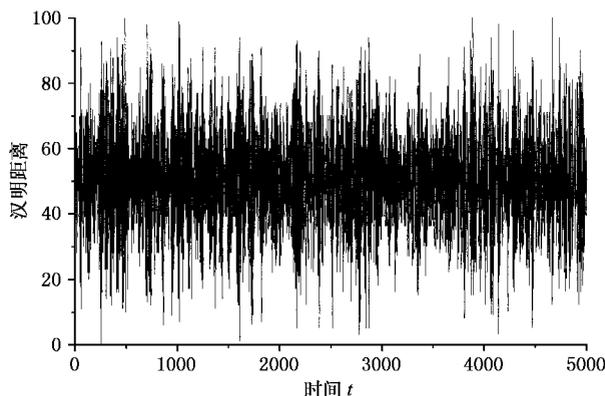


图 5 未加控制下神经网络运动轨迹与期望模式之间的汉明距离

图 6 示出加控制后的神经网络运动轨迹与期望模式之间的汉明距离. 在实验中, 钉扎距离 $l = 2$, 控制刚度 $K = 20.0$, 控制信号在第 1000—4500 之间加入. 从中可见, 在控制期间, 神经网络稳定地收敛于期望模式上, 以反相的形式出现, 如图 7 所示.

为了研究钉扎距离与控制刚度对混沌神经网络控制的影响, 本文选择不同的钉扎距离和控制刚度进行计算机仿真计算. 当钉扎距离一定时, 为了达到期望的控制目标, 控制刚度存在一阈值, 称这阈值为最小控制刚度. 当控制刚度小于阈值, 系统仍作混沌

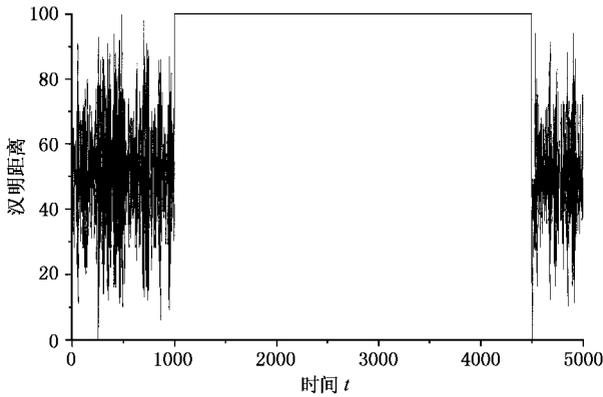


图 6 加控制后神经网络运动轨迹与期望模式之间的汉明距离

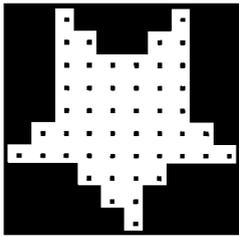


图 7 控制结果

运动,当控制刚度大于这一阈值时,系统被稳定控制在期望的模式上.表 1 列出不同钉扎距离下的最小控制刚度,控制刚度与钉扎距离的关系是非线性的.注意到当钉扎距离为 3 时,控制刚度比其他情况都要小.比较起始状态与期望模式,其差异在于第 6, 22, 23, 46, 52, 62, 72, 89 号神经元的输出状态不同.当钉扎距离为 3 时,在 22, 46, 52 三个有差异的神经元上加了激励,比其他钉扎距离下,在更多有差异的神经元上加了激励,因而控制效果好.因而我们认为,最小控制刚度与钉扎位置有关,如果在有差异的

神经元上施加控制激励,能更容易地实现控制.为了证实这一点,我们通过在第 6, 23, 52, 72 号神经元及所有有差异的神经元上另加了钉扎控制这两种情况来研究钉扎距离与控制刚度的关系,结果如表 2 所示.在 (ii) 情况下,控制刚度明显比在 (i) 情况下要小,证实了我们的观点.因此,在有差异的神经元上专门施加激励,能取得较好的控制效果.

表 1 钉扎距离与最小控制刚度关系

钉扎距离 l	2	3	4	5	6
控制刚度 K	20	18	42	47	48

表 2 在有差异的神经元上加了专门激励情况下钉扎距离与最小控制刚度关系

钉扎距离 l	2	3	4	5	6	
控制刚度 K	(i)	15	17	27	31	31
	(ii)	12	18	19	26	33

注 (i) 为在第 6, 23, 52, 72 号神经元上另加钉扎.(ii) 为在所有有差异的神经元上另加钉扎.

5 结 论

本文在分析了目前混沌控制的主要方法的基础上,根据控制目标与控制要求,提出了一种针对混沌神经网络混沌时空控制的钉扎方法.计算机仿真实验表明,本文的控制方法是可行的,只要选取合适的钉扎距离与控制刚度,混沌神经网络能稳定地控制在我们所期望的模式上.本文对钉扎距离与控制刚度间关系的研究表明,在有差异的神经元上施加控制,效果要比加在其他神经元上要好,钉扎距离与控制刚度间存在一个最佳的配合,本工作中,钉扎距离为 3 是一个较佳的选择.

[1] K. Aihara, T. Takabe, M. Toyoda, *Phys. Lett.*, **A144** (1990), 333.
 [2] M. Adachi, K. Aihara, *Neural Networks*, **10** (1997), 83.
 [3] Z. T. Cao, *J. of Zhejiang University (Natural Science Edition) (Supplement)* (1998), 330 (in Chinese) [曹志彤, 浙江大学学报(自然科学版)增刊(1998) 330].
 [4] I. Tokuda, T. Nagashima, K. Aihara, *Neural Networks*, **10** (1997), 1673.
 [5] B. Y. Wang, J. N. Nie, Z. Y. He, *IEEE Trans. on Neural Networks*, **10** (1999), 1257.
 [6] W. J. Freeman, *Biological Cybernetics*, **56** (1987), 139.

[7] E. R. Kober, K. Ikoda, K. Nakayama, *IEEE International Conference on Neural Networks Conference Proceedings*, **2** (1996), 804.
 [8] E. Ott, C. Grebogi, J. A. Yorke, *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990), 1196.
 [9] L. M. Pecora, T. L. Carroll, *Phys. Rev. Lett.*, **64** (1990), 821.
 [10] B. A. Huberman, E. Lumer, *IEEE Trans. Circuits. Syst. I*, **37** (1990), 547.
 [11] E. R. Hunt, *Phys. Rev. Lett.*, **67** (1991), 1953.
 [12] K. Pyragas, A. Tamascius, *Phys. Lett.*, **A170** (1992), 421.
 [13] S. Fahy, D. R. Hamann, *Phys. Rev. Lett.*, **69** (1992), 761.

[14] G. Hu , Z. L. Qu , *Phys. Rev. Lett.* , **72**(1994) , 68 .

[15] X. S. Luo , J. Q. Fang , *Chin. Phys.* , **9**(2000) , 333 .

CONTROLLING CHAOS IN CHAOTIC NEURAL NETWORK^{*}

HE GUO-GUANG CAO ZHI-TONG

(*Department of Physics , Zhejiang University , Hangzhou 310028 , China*)

(Received 15 February 2001 ; revised manuscript received 1 June 2001)

ABSTRACT

In this paper , a pinning control method focused on a chaotic neural network (CNN) is proposed . The chaos of the CNN can be controlled by using this method , and the output of the CNN is fixed stably in its stored pattern . In this way , the information search in the CNN is realized . In addition , the factors which affect the control of the CNN are discussed .

Keywords : controlling chaos , chaotic neural network , pinning control method

PACC : 0545

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No.50077019) .