

## 基于轨道空间压缩的混沌神经网络控制<sup>1</sup>

何国光 曹志彤 陈宏平 朱萍

(浙江大学物理系 杭州 310028)

**摘要:** 该文提出了基于轨道空间压缩的混沌神经网络控制方法, 利用该方法对混沌神经网络进行控制, 使神经网络的输出稳定地收敛于与网络起始模式有最小汉明距离的存储模式或其反相模式上。该控制方法简单易行, 物理意义明确。

**关键词:** 混沌控制, 混沌神经网络, 轨道空间压缩

**中图分类号:** TN-052 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-5896(2004)01-0142-04

## Controlling Chaos in a Neural Network Based on the Orbit Space Compression

He Guo-guang Cao Zhi-tong Chen Hong-ping Zhu Ping

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

**Abstract** In this paper, a controlling chaos method of the orbit space compression is proposed for a Chaotic Neural Network(CNN). The computer simulation of the chaotic behaviors of the CNN proves that each pattern can be controlled using the orbit space compression. Starting from any initial state the CNN can converge in a stored pattern or its inverse pattern, which has the smallest Hamming distance with the initial state. The controlling method of the orbit space compression shows clear physical meaning and can be easily carried out.

**Key words** Controlling chaos, Chaotic neural network, Orbit space compression

### 1 引言

混沌神经网络由于其复杂的动力学特性, 与 Hopfield 等神经网络相比, 具有较大的记忆容量与较强的容错性等特性<sup>[1]</sup>, 因而在动态联想记忆、系统优化、信息处理<sup>[1-3]</sup>等领域中受到人们极大的关注。由混沌神经元组成的混沌神经网络, 具有非周期的动态联想记忆功能, 但由于动态联想记忆是在网络的混沌运动中得以实现, 网络的输出为连续改变的非周期状态, 不能稳定在某个已存储的模式上<sup>[4]</sup>, 使得混沌神经网络的联想记忆功能在实际问题中难以得到应用。要实现记忆模式的检索与回忆, 必须改变混沌运动的非周期状态, 这就要对混沌神经网络进行控制。我们已将钉扎控制方法成功地应用于混沌神经网络控制中<sup>[5]</sup>, 取得了较好的控制效果, 但该方法需要事先指定控制目标, 使得该方法在实际应用中受到限制。本文中, 根据混沌运动的特性, 通过压缩混沌运动的轨道空间, 达到控制神经网络的混沌运动目的。计算机仿真结果表明, 该控制方法简单易行, 物理意义明确。

### 2 混沌神经网络模型与动力学特性

本文所采用的混沌神经网络由 100 个混沌神经元、外部输入和内部反馈输入的时空连接而成<sup>[2,5]</sup>, 如图 1 所示。 $A_i(t)$  为外部输入, 由于在信息检索过程中, 外部输入  $A_i(t)$  为常数, 因而可以将  $A_i(t)$  归入到阈值项  $a_i$  中, 经简化后混沌神经网络只包含反馈输入项  $\eta_i$  和不应性项

<sup>1</sup> 2002-10-22 收到, 2003-02-10 改回

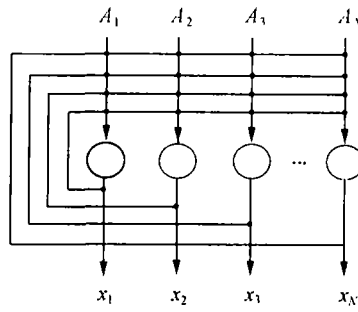


图 1 混沌神经网络模型

$\xi_i$  的内部状态，其第  $i$  个神经元的动力学方程为

$$x_i(t+1) = f\{\eta_i(t+1) + \xi_i(t+1)\} \tag{1}$$

$$\eta_i(t+1) = k_f \eta_i(t) + \sum_{j=1}^{100} w_{ij} x_j(t) \tag{2}$$

$$\xi_i(t+1) = k_r \xi_i(t) - \alpha g\{x_i(t)\} + a_i \tag{3}$$

其中  $\alpha$  为不应性参数， $a_i$  为阈值， $k_f$  和  $k_r$  分别为反馈输入和不应性的衰减参数， $f(\bullet)$  为神经元的作用函数，取带陡度参数  $\varepsilon$  的 Sigmoid 函数，即  $f(y) = 1/(1 + \exp(-y/\varepsilon))$ ， $g(\bullet)$  为不应性函数，取  $g(x) = x$ 。式 (2) 中的  $w_{ij}$  为第  $i$  个神经元与第  $j$  内部反馈输入的连接权重，由图 2 所示的 4 个存储模式根据如下所述的外积求和学习算法决定：

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

其中  $x_i^p$  为第  $p$  个存储模式的第  $i$  个分量。对于 100 个神经元的神经网络的输出状态，我们用  $10 \times 10$  个点的图形来显示，如果神经元的输出接近于 1，即神经元为“兴奋”状态，对应的点用黑方块“■”来显示，如果神经元的输出接近于 0，即为“抑制”状态，则用点“·”来显示。

对于式 (1)–(3) 所描述的混沌神经网络，选取参数  $\alpha = 10.0$ ， $k_f = 0.20$ ， $k_r = 0.95$ ， $a_i = 2.0 (i = 1, 2, \dots, 100)$ ，网络按式 (4) 给出的外积求和学习规则对图 2 的样本训练学习后，网络神经元之间的连接权值便确定，网络的性质也随之确定，文献 [3] 已对该网络的混沌运动及动态联想记忆特性作了详尽的讨论。为了考察网络的信息检索能力，用存储样本中图 2(c) 的带有误差的模式 (如图 3 所示)，作为网络的起始状态，观察随着时间推移的网络输出是否稳定地收敛于某一状态。图 4 为混沌神经网络神经元随时间输出的时序图，图中黑色块表示神经元输出为“1”，白色块则表示输出为“0”。从中可以看出，该网络的输出在时间和空间上表现出极其复杂的动力学行为，无法收敛于某一模式或某一模式附近，信息检索功能无法实现。要将记忆信息从记忆模式中检索出来，就得改变系统的混沌运动，也就是说要控制混沌神经网络的混沌状态。

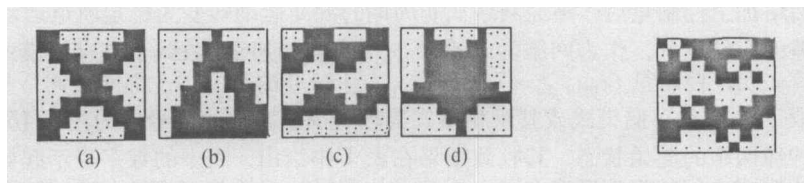


图 2 4 个存储模式

图 3 起始状态

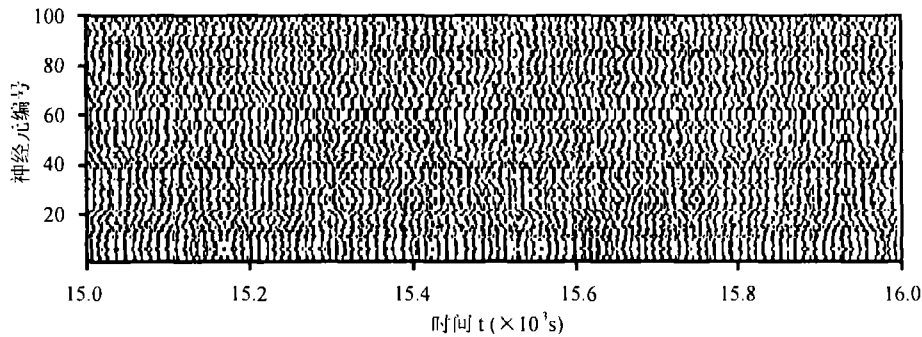


图 4 神经元的输出时序图

### 3 轨道空间压缩控制

自从 1990 年 Ott, Grebogi 和 Yorke 提出混沌控制方法 (OGY 法)<sup>[6]</sup> 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, 自适应控制法, 延迟反馈控制法, 钉扎控制法, 相空间压缩法<sup>[7]</sup> 等等。综观混沌控制方法, 可分为两类: 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。本文选用对系统参数进行微扰, 即对混沌系统的轨道演化空间进行限制, 限制其相轨道在空间中的自由伸缩和扩张, 从而达到控制混沌的目的。

对于式 (1)–(3) 描述的系统, 反馈输入项  $\eta_i$  和不应性项  $\xi_i$ , 撑起了混沌神经网络的状态空间。对该系统进行轨道空间压缩有 3 条途径: 一是只对反馈输入项  $\eta_i$  压缩; 二是只对不应项  $\xi_i$  压缩; 三是对  $\eta_i$  和  $\xi_i$  同时压缩。  $\xi_i$  反映的是对混沌神经元自身性质的影响, 直接影响网络的输出, 而  $\eta_i$  反映的是混沌神经元相互连接之间的影响, 随着系统的运动和时间的推移才能影响到整个系统。因而我们认为对  $\xi_i$  进行压缩比对  $\eta_i$  进行压缩有更好的控制效果, 同时认为只对不应性项  $\xi_i$  压缩已可达到控制目的, 从而使控制更简捷。加了控制后的混沌神经网络模型可以用以下的方程来描述:

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

$$\eta_i(t+1) = k_f \eta_i(t) + \sum_{j=1}^{100} w_{ij} x_j(t) \quad (6)$$

$$\xi_i(t+1) = k_r \xi_i(t) - \alpha g\{x_i(t)\} + a_i \quad (7)$$

$$\xi_i(t+1) = \begin{cases} \xi_i(t+1), & \xi_{i \min} < \xi_i(t+1) < \xi_{i \max} \\ \xi_{i \max}, & \xi_i(t+1) \geq \xi_{i \max} \\ \xi_{i \min}, & \xi_i(t+1) \leq \xi_{i \min} \end{cases} \quad (8)$$

对以上描述的控制系统, 选取合适的  $\xi_{i \max}$  和  $\xi_{i \min}$  便可以达到控制效果。本工作的计算机仿真实验中, 取  $\xi_{i \max} = 5.0$ ,  $\xi_{i \min} = -5.0$ 。图 5 是以图 3 作为网络的起始状态时的神经网络输出时序图。可以看出, 只需几个时间步, 网络输出即稳定于某一模式, 该模式为存储模式图 2(c)。即当网络加上控制量后, 神经网络从非周期的混沌运动转变为稳定轨道运动。用图 2(c) 以外带有误差的存储模式, 作为网络的起始状态, 同样能使网络收敛于其存储模式上。进一步通过数值计算表明, 控制量  $\xi_{i \min} \geq -7.4$  和  $\xi_{i \max} \leq 11.0$  的范围内, 都能使网络收敛。

我们选取了 4 个与存储模式或其反相模式有较大汉明距离的信号作为用式 (5)–(8) 描述的被控制混沌神经网络的起始状态, 其收敛结果在表 1 中给出。表中的数字表示起始状态与存储模式或其反相模式之间的汉明距离。可以看出, 从不同的起始状态出发, 被控制网络很快稳定地收敛于与之汉明距离最小的网络的存储模式或其反相模式上, 达到控制效果, 从而实现了动态联想记忆神经网络的信息的搜索。

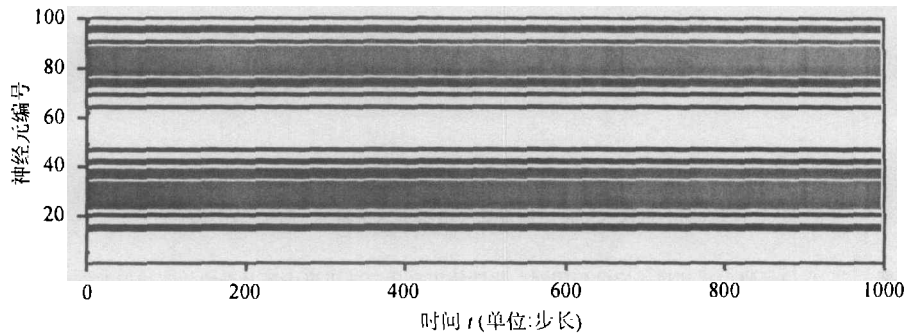


图 5 加了控制后的神经元的输出时序图

表 1 不同起始状态的控制结果

存储模式 或反模式										收敛 模式
起始状态		46	62	42	59	54	38	58	41	
		41	53	41	52	59	47	59	48	
		44	42	50	33	56	58	50	67	
		48	56	36	55	52	44	64	45	

\* 表中数字为起始状态与相应模式间的汉明距离

#### 4 结论

混沌神经网络具有较好的记忆容量与较强的容错性, 但网络的混沌运动, 使得网络很难直接应用于诸如信息搜索等任务, 要改变这种状态, 必须对混沌神经网络进行控制. 计算机仿真实验结果表明, 本文提出的轨道空间压缩方法能较好地控制混沌神经网络, 使网络稳定地收敛与起始信号汉明距离最小的网络存储模式或其反相模式上, 从而实现动态联想记忆神经网络的信息的搜索.

轨道空间压缩控制方法简单易行, 物理含义明确, 不必获取诸如截面映像不稳定周期轨道的某些线性化特征等信息. 此外, 由于控制条件比较宽松, 使得  $\xi_{i \max}$  和  $\xi_{i \min}$  在较大范围内取值, 都能达到很好的控制效果.

#### 参 考 文 献

- [1] 曹志彤. 混沌神经网络的动态联想记忆. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 增刊: 330-335.
- [2] Aihara K, Takabe T, Toyoda M. Chaotic neural networks. *Phys. Lett.*, 1990, 144(6,7): 333-340.
- [3] Adachi M, Aihara K. Associative dynamics in a chaotic neural network. *Neural Networks*, 1997, 10(1): 83-98.
- [4] Kobori E R, Ikoda K, Nakayama K. A model of dynamic associative memory. *IEEE International Conference on Neural Networks Conference Proceedings*, Washington, DC, USA, 1996, 2: 804-809.
- [5] 何国光, 曹志彤. 混沌神经网络的信息搜索. *物理学报*, 2001, 50(11): 2103-2107.
- [6] Ott E, Grebogi C, Yorke J A. Controlling chaos. *Phys. Rev. Lett.*, 1990, 64: 1196-1199.
- [7] 罗晓曦. 利用相空间压缩实现混沌与超混沌控制. *物理学报*, 1999, 48(3): 402-407.

何国光: 男, 1965 年生, 讲师, 研究方向: 人工神经网络与脑科学.  
 曹志彤: 男, 1945 年生, 教授, 研究方向: 非线性物理.  
 陈宏平: 男, 1955 年生, 副教授, 研究方向: 光学小波分析.  
 朱 萍: 女, 1964 年生, 副教授, 研究方向: 凝聚态物理.