

文章编号:1004-7220(2012)02-0233-06

H-R 神经元的正弦函数-延迟反馈反控制

于洪洁, 张文龙, 童伟君

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院, 工程力学系, 上海 200240)

摘要: **目的** 研究单个 Hindmarsh-Rose(H-R) 神经元模型从周期动力学模式转向混沌模式的自适应反控制问题。**方法** 利用施加正弦函数延迟自反馈方法进行数值模拟分析, 分别将耦合强度和延迟时间作为控制参数。**结果** 通过大量的数值模拟计算, 给出神经元的膜电位变量随耦合强度和延迟时间两个参数变化的分岔图, 发现在耦合强度值和延迟时间两个参数组合的一些范围内, 本来是 3 峰周期动力学模式的 H-R 神经元运动可被反控制成混沌模式及其他周期模式的运动。**结论** 对 H-R 神经元进行反控制的正弦延迟自适应反馈法是有效的, 耦合强度和延迟时间均为反控制的重要参数。控制过程反映了神经独有的自适应的信息识别的动力学特性。

关键词: H-R 神经元; 正弦函数; 自延迟反馈; 反控制; 混沌; 数值模拟

中图分类号: O 322, R 318.01, R 318.04, R 338 **文献标志码:** A

Anti-control of sine function-delay feedback for H-R neuron

YU Hong-jie, ZHANG Wen-long, TONG Wei-jun (*Department of Engineering Mechanics, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China*)

Abstract: Objective To study the self-adaptive anti-control of a single H-R neuronal system transformed from periodic dynamics pattern to chaos. **Methods** Numerical analysis was performed by adding sine function self-delay feedback while coupling intensity and time-delay, respectively, as the control parameters. **Results** By numerical simulation and analysis, it was found that in a certain range of the combination of coupling intensity and time-delay, the time-interval sequences of the dynamical pattern of a single H-R neuronal system could be controlled from a periodical pattern of 3 spikes onto chaos and other periodical patterns. **Conclusions** The method of self-adaptive feedback of sine function is effective for the anti-control of H-R neuron, and the coupling intensity and time-delay are both important parameters. The particular self-adaptive dynamics of information identification to neuron is reflected in the control process.

Key words: H-R neuron; Sin function; Self-delay feedback; Anti-control; Chaos; Numerical simulation

对混沌的研究已经有 40 多年的历史,对混沌问题的研究从最初的发现和解释混沌发展到近年的控制和利用混沌。对于混沌的控制问题,自 1990 年著名的 OGY^[1]方法被提出后,已陆续发展出很多新的控制方法并得到了广泛的应用^[2-6]。当混沌的存在对系统有害时,这些方法能够消除混沌。与混沌的控制问题相反,混沌的反控制是指当混沌的存在对系统有益时,需要人为地产生或加强混沌,如利用混

沌提高信号和图像传输中的编码效率等^[7]。

相对于混沌控制,有关混沌的反控制研究起步较晚。1998 年,Chen 等^[8]提出针对离散系统进行混沌反控制的反馈控制方法,使离散混沌系统产生了 Li-Yorke 意义下的混沌现象。2000 年,Wang 等^[9]提出具有小幅值正弦函数形式的延迟反馈控制—间接延迟反馈控制,并将其用于线性最小相位系统中,使它们产生了混沌现象。2006 年,任海鹏

收稿日期:2011-05-05; 修回日期:2011-07-18

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(11002087),高等学校博士学科点专项科研基金资助课题(20100073110007)。

通讯作者:于洪洁,E-mail: yuhongjie@sjtu.edu.cn。

等^[10]提出基于直接延迟反馈的混沌反控制用于Chen系统。

近年来,神经元的混沌控制问题也吸引了特别的关注^[11-18]。文献[15, 17]利用施加时间延迟耦合项的方法,研究 Hindmarsh-Rose (H-R) 神经元在完全连接网络下的同步情况及神经元混沌放电模式的控制问题。本文在前期的研究基础上^[8, 15, 17],探讨神经元周期放电活动的反控制问题。将正弦函数形式的延迟自反馈方法应用于 H-R 神经元,将膜电压变量通过一定时间延迟及正弦调和产生的反馈直接作用于自身,通过将耦合强度和延迟时间作为控制参数。经过数值模拟分析,发现在耦合强度值和时间延迟两个参数组合的一些范围内,本来是3峰周期动力学模式的 H-R 神经元运动可被反控制成平衡点、2峰周期、4峰周期等周期运动模式以及混沌运动模式。

1 H-R 神经元模型

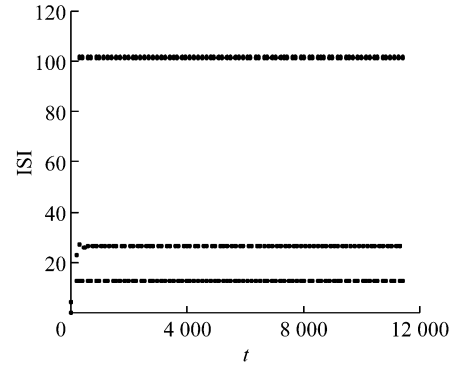
H-R 神经元模型由电压钳数据构造,是在软体动物神经中所见到的自兴奋神经元系统的簇放电模式活动的一个简单的描述。最近,在耦合神经网络放电的动力学行为、相同步、混沌控制、通过混沌振荡转换慢规则振荡、通过时间延迟使神经同步活动的增强等都利用 H-R 神经模型进行广泛的神经非线性动力学的探索研究。H-R 神经元模型具有包括周期、混沌的丰富的放电模式,它的动力性是多尺度的,变量能被分成快变量和慢变量。

H-R 神经元具有几种可兴奋细胞生物物理模型的特性且具有简单的方程形式。单个 H-R 神经元模型的运动微分方程为

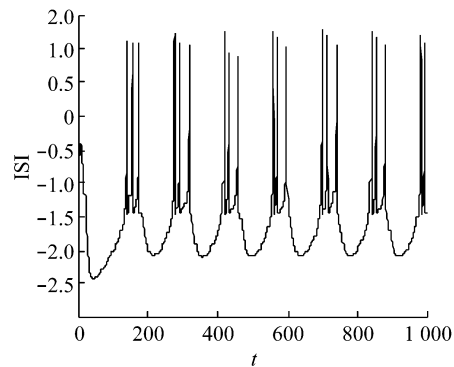
$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y - ax^3 + bx^2 + I_{\text{ext}} - z \\ \dot{y} &= c - dx^2 - y \\ \dot{z} &= r(S(x - \bar{x}) - z) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: x 表示膜电压; y 是1个恢复变量、快电流; z 表示1个慢变适应电流; a, b, c, d, r, S 和 \bar{x} 是常数, I_{ext} 是外部输入。系统在 $2.92 < I_{\text{ext}} < 3.4$ 区间存在1个多尺度爆发-峰混沌行为。当 $a = 1.0, b = 3.0, c = 1.0, d = 5.0, S = 4.0, r = 0.006, \bar{x} = -1.56, I_{\text{ext}} = 2.15$ 时,单个神经元模型的动力特性在时间间隔上处于3峰周期状态。单个 H-R 膜电位 x 的时间间隔图及时间历程图如图 1(a)、(b)所示。由图 1 可

知,在未施加反馈时 H-R 神经元为 3 峰周期状态。



(a)



(b)

图1 单个 H-R 神经元膜电位 x 的 3 峰周期时间间隔图 (a) 和时间历程图 (b)

Fig.1 Inter-spike interval (a) and time-history (b) of 3-spike-period pattern for membrane potential x of the single neuron

2 单个神经元周期运动的正弦函数自延迟反馈实现反控制

本节对单个 H-R 神经元模型的周期运动施加正弦函数自延迟反馈并进行详细的分析与数值模拟,给出了使周期行为神经元产生混沌行为的时间延迟和耦合强度的范围。

对方程(1)表示的单个 H-R 神经元系统施加膜电位的正弦延迟反馈:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= y - ax^3 + bx^2 + I_{\text{ext}} - z + \varepsilon \sin(x(t - \tau)) \\ \dot{y} &= c - dx^2 - y \\ \dot{z} &= r(S(x - \bar{x}) - z) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中, $\varepsilon \geq 0$ 是耦合强度, $\tau \geq 0$ 是时间延迟量,该神经元收到来自自身的 τ 之后的正弦反馈信号。取初值

$x(0) = 0.3, y(0) = 0.3, z(0) = 3.0$, 此时在没有施加时间延迟的情况下是周期 3 峰运动。

首先考虑 ε 作为定值时, τ 对 H-R 神经元动力学行为的影响。这里分别取 $\varepsilon = 0.62, 0.98, 25.0$, 取 $\tau \in [4.0, 15.1]$, 通过计算峰峰时间间隔数值模拟分析其周期状态是否能被反控制成混沌状态。

当取 $\varepsilon = 0.62, 0.98, 25.0$ 时, 神经元膜电位放电活动的峰与峰之间的时间间隔 (inter-spike interval, ISI) 随时间延迟变化的分岔图如图 2 所示。由图 2(a) 及数值结果可知, 对于 $\varepsilon = 0.62$, 单个神经元的动力学行为从周期 3 峰被控制成 4 峰周期及 2 峰周期模式。图 3(a) 为 $\varepsilon = 0.62, \tau = 4.6$ 时的神经元的膜电位随时间变化的 4 峰周期的时间历程图, 图 3(b) 为 $\varepsilon = 0.62, \tau = 11.2$ 时的神经元的膜电位随时间变化的 2 峰周期的时间历程图。

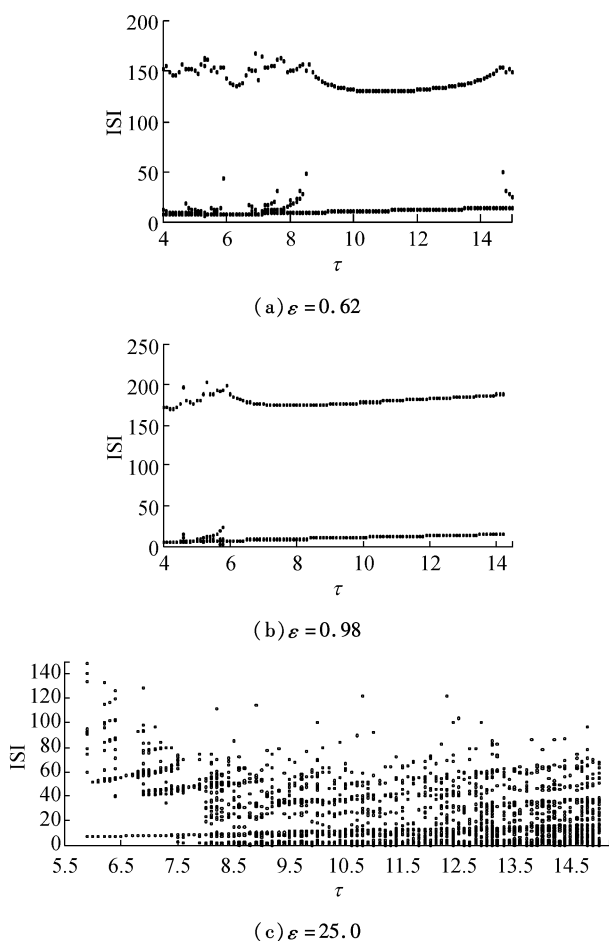
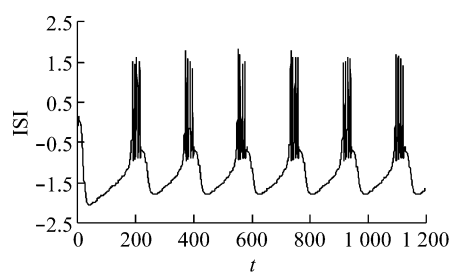
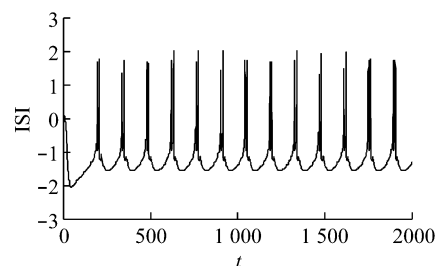


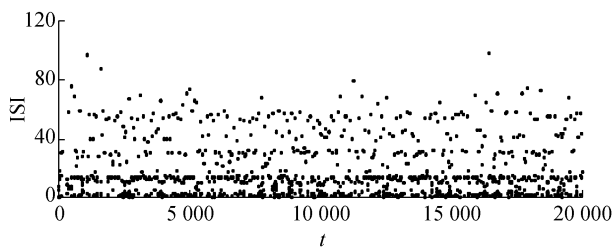
图 2 单个神经元膜电位峰峰间隔随时间延迟的分岔图
 Fig.2 Branch diagram of the ISI for membrane potential of the single neuron with time-delay



(a) 4 峰周期, $\varepsilon = 0.62, \tau = 4.6$



(b) 2 峰周期, $\varepsilon = 0.62, \tau = 11.2$



(c) 膜电位的混沌峰峰间隔图, $\varepsilon = 25.0, \tau = 12.3$

图 3 神经元膜电位的峰峰间隔与时间历程图

Fig.3 Diagram of the ISI and time-history of membrane potential for the single neuron (a) 4-spike-period, $\varepsilon = 0.62, \tau = 4.6$; (b) 2-spike-period, $\varepsilon = 0.62, \tau = 11.2$; (c) Diagram of chaotic ISI of membrane potential, $\varepsilon = 25.0, \tau = 12.3$

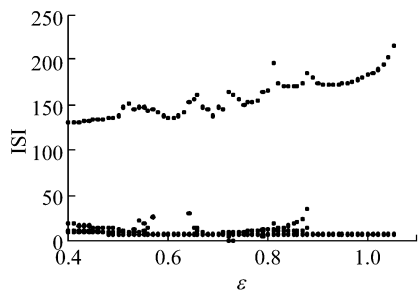
由图 2(b) 及数值结果可知, 对于 $\varepsilon = 0.98$, 单个神经元的动力学行为从 3 峰周期模式被控制成以 2 峰周期模式为主的动力学行为。在 τ 较小时存在着 3、4、5 峰周期模式情况。没有发现能反控制成混沌的区间。

由图 2(c) 及数值结果可知, 对于 $\varepsilon = 25.0$, 耦合强度比较大, 单个神经元的动力学行为从 3 峰周期模式被反控制成以混沌为主的模式。除 $\tau \leq 5.8$ 时没有混沌爆发行为, 在这个区间, 膜电位变量迅速趋向于 1 个平衡点。当 $\tau > 5.8$ 时神经元的动力学行为均能被反控制成混沌状态。图 3(c) 为 $\varepsilon = 25.0, \tau = 12.3$ 时的神经元的膜电位的峰峰间隔图。

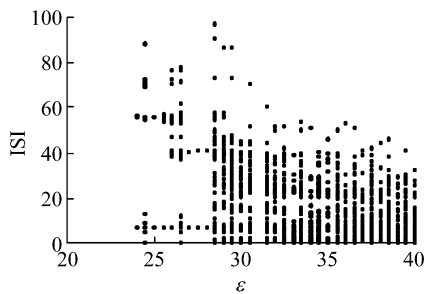
下面讨论当延迟反馈控制的 τ 不变时, ε 的变

化对 H-R 神经元动力学特性的影响。分别取 $\tau = 6.5, 8.2, 15.2, \varepsilon \in [0.40, 40]$, 数值模拟分析比较神经元的 3 峰周期状态是否能被反控制成混沌状态或其他峰周期状态。

图 4(a)、(b) 分别是 $\tau = 6.5, \varepsilon \in [0.40, 1.05]$ 及 $\varepsilon \in [23, 40]$ 神经元膜电位的峰峰间隔随耦合强度变化分岔图。由图 4 可知, 当 $\varepsilon \in [0.40, 1.05]$ 时, 神经元的放电模式均为周期运动, 但周期模式受到控制影响, 由未施加控制的 3 峰周期运动被反控制成 4、5、6 峰, 以及 2 峰周期运动模式。而当 $\varepsilon \in [23, 40]$ 时, 神经元的动力学模式被反控制成 2 峰周期及混沌状态。由于 ε 在 $[23, 40]$ 内变化, 跨度较大, 故分岔图只给出部分 ε 值对应的时间间隔值, 在这一区间内能被反控制成混沌状态。当 $\varepsilon \in (1.05, 19)$ 时, 神经元没有放电行为, 膜电位迅速趋向于 1 个平衡点, 处于静息状态。当 $\varepsilon \in [19, 23)$ 时, 神经元的时间历程为周期运动模式, 但膜电位变量均为负值。



(a) $\varepsilon \in [0.40, 1.05]$



(b) $\varepsilon \in [23, 40]$

图 4 $\tau = 6.5$ 时, 神经元膜电位的峰峰间隔随耦合强度变化分岔图
Fig. 4 Branch diagram of the ISI for membrane potential of the single neuron with coupled strength when $\tau = 6.5$ (a) $\varepsilon \in [0.40, 1.05]$, (b) $\varepsilon \in [23, 40]$

$\tau = 8.2$ 时, 在耦合强度属于区间 $\varepsilon \in [0.40, 1.04]$, H-R 神经元的放电行为由 3 峰周期模式被

控制成 4 峰、2 峰周期模式(见图 5)。当 $\varepsilon \in (1.05, 20)$ 时, 神经元没有峰-谷变化的神经放电行为, 膜电位迅速趋向于 1 个平衡点。随着耦合强度的提高, 当 $\varepsilon \in [20, 25]$ 时, 神经元的动力学放电模式被反控制成混沌簇放电状态。

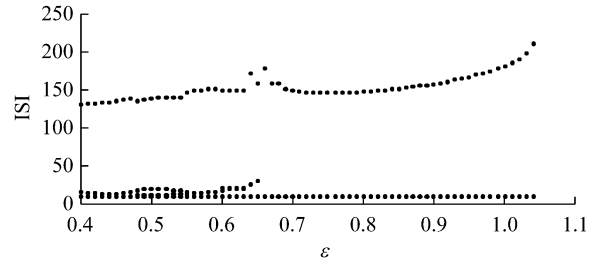


图 5 $\tau = 8.2$ 时, 神经元膜电位的峰峰间隔随耦合强度变化分岔图
Fig. 5 Branch diagram of the ISI for membrane potential with coupled strength when $\tau = 8.2$

$\tau = 15.2$ 时, 在耦合强度属于区间 $\varepsilon \in [0.40, 1.02]$, H-R 神经元的放电行为主要由 3 峰周期模式被控制成 2 峰周期模式(见图 6(a))。当 $\varepsilon \in (1.03, 12)$ 时, 神经元没有放电爆发行为, 膜电位迅速趋向于 1 个平衡点(见图 6(b))。随着耦合的增强, 当 $\varepsilon \in (12, 16)$ 时, 神经元的时间历程为周期运动模式, 但膜电位变量均为负值(见图 6(c))。当 $\varepsilon \in [16, 25]$ 时, 神经元的动力学模式被反控制成混沌状态(见图 6(d))。

下面将 $\tau = 6.5, 8.2, 15.2$ 时, 实施延迟正弦函数反馈控制后, 神经元由 3 峰周期放电模式转变为其他放电峰-周期模式和混沌动力学模式的耦合强度取值范围列在表 1。

3 结论

神经系统的放电活动和信息识别提出了一系列崭新的问题。人们尝试将混沌同步、去同步、控制及反控制的理论方法引入神经科学去揭示大脑中的混沌现象、进行信息处理及对癫痫等疾病进行可能的预报和治疗。目前对生理系统的混沌控制、去同步、反控制的研究尚处于初级阶段。开展生理系统的非线性动力学研究意义是深远的, 不仅为物理学和数学的非线性理论提供实验依据, 还可借助非线性理论的指导, 进一步认识各种复杂性生理过程的本质和内在联系。本文利用正弦延迟反馈法对单个 H-R

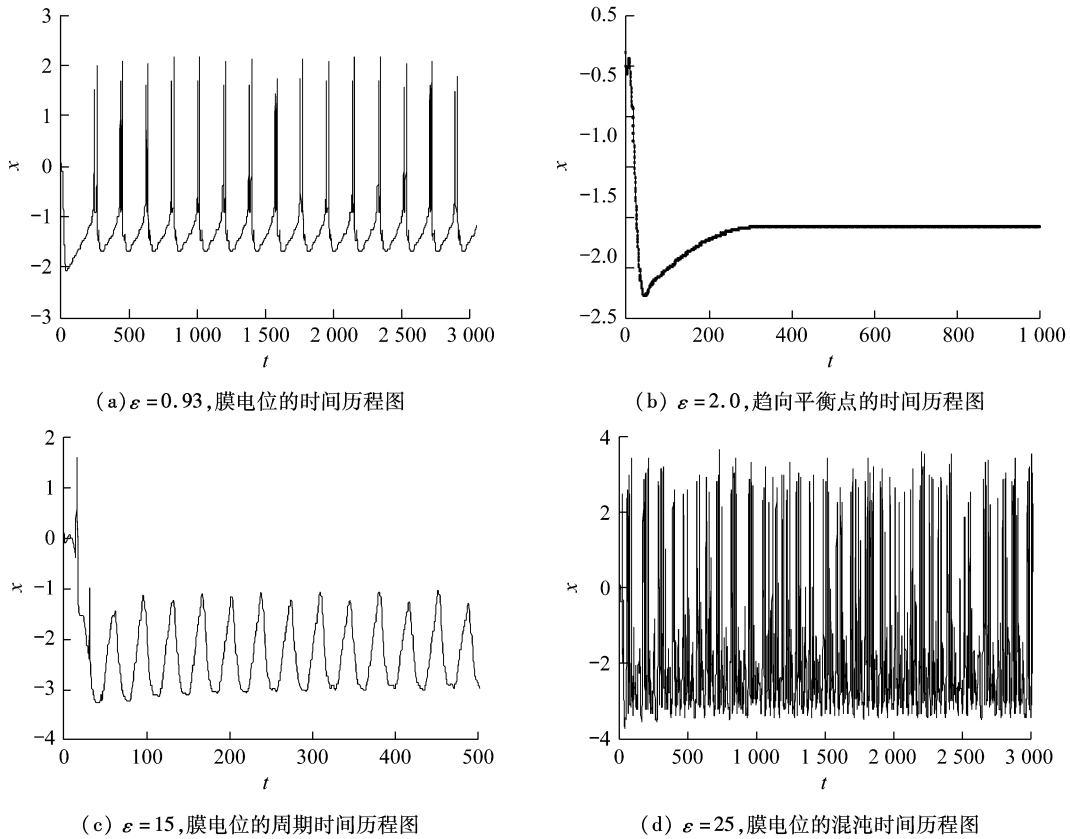


图 6 $\tau = 15.2$ 时,不同耦合强度时神经元膜电位的时间历程图

Fig.6 Time-history diagram of membrane potential with different coupled strength when $\tau = 15.2$ (a) Periodic time-history of membrane potential, $\varepsilon = 0.93$; (b) Time-history of membrane potential tended to equilibrium point, $\varepsilon = 2.0$; (c) Periodic time-history of membrane potential, $\varepsilon = 15$; (d) Chaotic time-history of membrane potential, $\varepsilon = 25$

表 1 $\tau = 6.5, 8.2, 15.2$ 时, ε 与神经元放电动力学模式对应表

Tab.1 The corresponding relation between parameter ε and dynamical pattern of neuron, $\tau = 6.5, 8.2, 15.2$

$\tau = 6.5$	$\varepsilon \in [0.40, 1.05]$	$\varepsilon \in (1.05, 19) \cup [19, 23]$	$\varepsilon \in [23, 40]$
	2,4,5 峰周期	静息状态平衡点和负值周期状态	混沌
$\tau = 8.2$	$\varepsilon \in [0.40, 1.04]$	$\varepsilon \in (1.04, 17) \cup [17, 20]$	$\varepsilon \in [20, 25]$
	2,4 峰周期	静息状态平衡点和负值周期状态	混沌
$\tau = 15.2$	$\varepsilon \in [0.40, 1.03]$	$\varepsilon \in (1.03, 12) \cup (12, 16)$	$\varepsilon \in [16, 25]$
	2 峰周期	静息状态和负值周期状态	混沌

神经元模型周期动力学特性进行自适应反控制研究,发现时间延迟和耦合强度可使 H-R 神经元的 3 峰周期动力学模式转变为 2 峰、4 峰等周期模式及混沌放电模式。通过大量的数值模拟计算,讨论耦合强度及时间延迟对周期运动反控制的影响程度和效果,给出神经元的膜电位变量随耦合强度和时间延迟两个参数变化的分岔图。发现在耦合强度值和时间延迟两个参数组合的一些范围内,本来是周期

动力学模式的 H-R 神经元运动可被反控制成混沌模式及其他周期模式。

参考文献:

- [1] Ott E, Grebogi C, Yorke JA. Controlling chaos [J]. Phys Rev Lett, 1990, 64: 1196-1199.
- [2] Pyragas K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback [J]. Phys Lett A, 1992, 170(6): 421-427.

- [3] Ghosh D, Chowdhury AR, Saha P. Bifurcation continuation, chaos and chaos control in nonlinear Bloch system [J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, 2008, 13(8): 1461-1471.
- [4] Yu HJ, Peng JH. Chaotic synchronization and control in nonlinear-coupled Hindmarsh-Rose neural systems [J]. Chaos Soliton Fractal, 2006, 29(2): 342-348.
- [5] 颜森林. 外腔延时反馈半导体激光器混沌偏振可调制控制方法研究[J]. 物理学报, 2008, 57(11): 6878-6882.
- [6] 崔宝同, 楼旭阳. 混沌时滞神经网络系统的反同步[J]. 物理学报, 2008, 57(4): 2060-2066.
- [7] Chen GR, Mao YB, Chui CK. A symmetric image encryption scheme based on 3D chaotic cat maps [J]. Chaos Soliton Fractal, 2004, 21(3): 749-761.
- [8] Chen GR, Lai D. Feedback anticontrol of discrete chaos [J]. Int J Bifurcation Chaos, 1998, 8(7): 1585-1590.
- [9] Wang XF, Chen G, Yu X. Anticontrol of chaos in continuous-time systems via time-delay feedback [J]. Chaos, 2000, 10(4): 771-779.
- [10] 任海鹏, 刘丁, 韩崇. 基于直接延迟反馈的混沌反控制[J]. 物理学报, 2006, 55(6): 2694-2701.
- [11] Rosa M La, Rabinovich MI. Slow regularization through chaotic oscillation transfer in an unidirectional chain of Hindmarsh-Rose models [J]. Pyhs Lett A, 2000, 266(N1): 88-93.
- [12] Dhamala M, Jirsa VK, Ding M. Enhancement of neural synchrony by time delay [J]. Phys Rev Lett, 2004, 92(7): 074101-104.
- [13] 于洪洁, 彭建华. Hindmarsh-Rose 神经元模型的混沌控制[J]. 生物物理学报, 2005, 21(4): 295-300.
- [14] 于洪洁, 林晨. Hindmarsh-Rose 神经网络的混沌同步[J]. 生物物理学报, 2006, 22(5): 383-388.
- [15] 林晨, 于洪洁. 延迟-完全连接 H-R 神经网络的同步[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(6): 1017-1021.
- [16] Nowotny T, Huerta R, Rabinovich MI. Neuronal synchrony: Peculiarity and generality [J]. Chaos, 2008, 18(3): 037119.
- [17] 于洪洁, 童伟君. 延迟自反馈控制 Hindmarsh-Rose 神经元的混沌运动[J]. 物理学报, 2009, 58(5): 2977-2982.
- [18] Shi XR. Bursting synchronization of Hind-Rose system based on a single controller [J]. Nonlinear Dyn, 2010, 59(1-2): 95-99.

· 致读者 ·

关于文稿中法定计量单位的书写要求

本刊法定计量单位实行国务院 1984 年 12 月颁布的《中华人民共和国法定计量单位》，并以单位符号表示，具体使用参照中华医学会杂志社编写的《法定计量单位在医学上的应用》。注意单位名称与单位符号不可混用。如 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{天}^{-1}$ 应改为 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ；组合单位符号中表示相除的斜线多于 1 条时，应采用负数幂的形式表示，如 $\text{ng}/\text{kg}/\text{min}$ 应采用 $\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 的形式；组合单位中斜线和负数幂亦不可混用，如前例不宜采用 $\text{ng}/\text{kg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 的形式。在首次出现不常用的法定计量单位时加注与旧制单位的换算系数，下文再出现时只列法定计量单位。人体及动物体内的压力单位使用 mmHg 或 cmH_2O ，但文中首次出现使用括号加注 ($1 \text{ mmHg} = 0.133 \text{ kPa}$)。正文中时间的计量单位表达，凡表示时间的具体数据时，数据后的计量单位应采用 d、h、min、s，而不用天、小时、分钟、秒。量的符号一律用斜体字，如吸光度（旧称光密度）的符号 A，“A”为斜体。

本刊编辑部
2012-04-25