

神经网络螺旋波诱发机理研究*

赵龙^{1)†} 杨继平²⁾ 郑艳红¹⁾

1) (北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

2) (北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100191)

(2012年7月5日收到; 2012年8月7日收到修改稿)

实验研究发现大脑皮层电活动和信号传播有类似螺旋波的特征. 本文利用包含离子通道效应的 Hodgkin-Huxley 神经元构造规则网络来研究螺旋波的形成机理, 利用缺陷阻挡行波的方法在神经网络中诱导到不同周期的螺旋波, 分析了螺旋波产生条件和耦合强度对螺旋波的影响. 同时, 对脑皮层中螺旋波形成的机理进行了讨论.

关键词: 神经网络, 行波, 缺陷, 螺旋波

PACS: 87.19.lq, 87.19.lp, 05.45.Xt, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.62.028701

1 引言

螺旋波是系统远离平衡态下形成的一类时空斑图, 在化学、物理和生物系统中都可以观察到螺旋波的存在^[1-7]. 研究表明: 如果心脏中的窦房结射出的电信号在心肌组织中传播受到阻挡则形成螺旋波, 临床上表现为心动过速; 如果受到强烈刺激则可能诱发心脏猝死, 医学上称之为心颤. 通常用药物或者强电压电击方法来消除心颤. 对心肌组织中螺旋波的研究, 主要以控制反应扩散方程中的螺旋波为主, 通常采用电场极化, 外信号 (例如电信号) 刺激来抑制螺旋波破裂, 达到预防心颤的目的^[8-19]. 但在实际控制中总遇到一些问题, 例如外界电刺激如何内化为膜内电流来改变细胞膜电位, 如何刻画心肌的弹性、收缩节律性和各向异性等. 文献 [17—19] 利用弹性理论将心肌组织收缩效应等效为横向和纵向扩散系数的反向变化 (横向变大, 纵向等幅变小, 反之亦然), 将各向异性利用横向和纵向系数的相位随机延迟来刻画.

实验研究结果也发现大脑皮层也存在螺旋波^[20,21], 已经有部分学者利用复杂网络方法构造不同结构的网络来研究各类分岔参数对螺旋波的演化影响, 例如刺激电流强度、耦合强度以及通道

噪声等^[22-31]. 文献 [22] 分析了远程连接概率对局部异性的影响; 文献 [23] 以 Hindmarsh-Rose(HR) 神经元模型构造规则网络, 研究耦合强度和次近邻连接对螺旋波演化的影响; 文献 [24] 研究了小世界连接网络在加性白噪声下螺旋波演化; 文献 [25] 研究了延迟效应对螺旋波的积极作用; 文献 [26] 在一维空间定义了同步统计因子来研究振子同步节律问题; 文献 [27—31] 在二维空间定义了空间统计同步因子, 分别研究了不同拓扑结构下, 乘性噪声、离子通道噪声、耦合强度以及离子通道中毒等因素对螺旋波破裂和鲁棒性影响, 分析了神经网络中螺旋波传播方式和生物意义等.

螺旋波的波头是个拓扑缺陷, 即数学上的奇点. 以往的研究结果在模拟螺旋波演化时通常以稳定旋转的螺旋波作为初始条件, 然后引入各类控制手段来对螺旋波进行控制. 心肌组织中螺旋波形成机理已经很清楚, 但大脑皮层螺旋波如何形成的尚不清楚. 一种说法是大脑皮层血管局部异常 (例如血管肿瘤) 可能诱发螺旋波, 其可能机理在于血管异常部分对脑皮层行波进行阻挡诱发螺旋波. 本文将以 Hodgkin-Huxley 神经元规则网络^[27,28] 为研究对象, 研究缺陷对行波阻挡诱导螺旋波问题, 希望研究结果对诊断脑皮层的相关疾病提供部分理论依

* 国家自然科学基金 (批准号: 11102041) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: buaa_dnc@buaa.edu.cn

据和参考.

2 模型和方法

二维空间下 Hodgkin-Huxley 神经元规则网络 [27,28] 动力学方程为

$$C_m \frac{dV_{ij}}{dt} = g_K n_{ij}^4 (V_K - V_{ij}) + g_{Na} m_{ij}^3 h_{ij} (V_{Na} - V_{ij}) + g_L (V_L - V_{ij}) + I_{ij} + D(V_{i-1j} + V_{i+1j} + V_{ij-1} + V_{ij+1} - 4V_{ij}), \quad (1)$$

$$\frac{dm_{ij}}{dt} = \alpha_m(V_{ij})(1 - m_{ij}) - \beta_{|mm}(V_{ij})m_{ij}, \quad (2a)$$

$$\frac{dh_{ij}}{dt} = \alpha_h(V_{ij})(1 - h_{ij}) - \beta_h(V_{ij})h_{ij}, \quad (2b)$$

$$\frac{dn_{ij}}{dt} = \alpha_n(V_{ij})(1 - n_{ij}) - \beta_n(V_{ij})n_{ij}, \quad (2c)$$

$$\alpha_m(V_{ij}) = \frac{0.1(V_{ij} + 40)\varphi(T)}{1 - e^{-\frac{V_{ij}+40}{10}}}, \quad (3a)$$

$$\beta_m(V_{ij}) = 4\varphi(T)e^{-\frac{V_{ij}+65}{18}}, \quad (3b)$$

$$\alpha_h(V_{ij}) = 0.07\varphi(T)e^{-\frac{V_{ij}+65}{20}}, \quad (4a)$$

$$\beta_h(V_{ij}) = \frac{\varphi(T)}{1 + e^{-\frac{V_{ij}+35}{10}}}, \quad (4b)$$

$$\alpha_n(V_{ij}) = \frac{0.1(V_{ij} + 55)\varphi(T)}{1 - e^{-\frac{V_{ij}+55}{10}}}, \quad (5a)$$

$$\beta_n(V_{ij}) = 0.125\varphi(T)e^{-\frac{V_{ij}+65}{80}}, \quad (5b)$$

式中, 温度因子 $\varphi(T) = 3^{\frac{T-6.3^\circ\text{C}}{10^\circ\text{C}}}$; V_{ij} 是神经元膜电位, 下标 (i, j) 表示神经元在网络中的位置; 变量 m, n, h 是描述门通道的参量; 膜电容 $C_m = 1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$; 钾离子最大电导 $g_K = 36 \text{ mS}/\text{cm}^2$; 钠离子最大电导 $g_{Na} = 120 \text{ mS}/\text{cm}^2$; 漏流最大电导 $g_L = 0.3 \text{ mS}/\text{cm}^2$; 刺激电流 $I_{ij} = I = 6.1 \mu\text{A}$; 反转电位 $V_K = 77 \text{ mV}$, $V_{Na} = 50 \text{ mV}$ 和 $V_L = 54 \text{ mV}$. 以下讨论中选择膜片温度为 6.3°C . 为研究螺旋波统计特性, 基于平均场理论, 采用文献 [27—31] 中定义的统计同步因子来分析螺旋波演化和形成特性, 即

$$F = \frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N V_{ij} = \langle V \rangle, \quad (6)$$

$$R = \frac{\langle F^2 \rangle - \langle F \rangle^2}{\frac{1}{N^2} \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N (\langle V_{ij}^2 \rangle - \langle V_{ij} \rangle^2)}. \quad (7)$$

网络的振子数量为 N^2 个, V_{ij} 为采样格点的膜片电位, 同步因子是对时间和空间 (所有神经元) 的平均. 当同步因子 R 趋近于 1 时, 表示系统完美同步; 当 R 逼近于 0 时, 表示系统非完美同步; 同步因子比较小的情况下, 一般表示系统是有序态, 例如螺旋波存在.

缺陷阻挡螺旋波可以通过以下两个步骤来完成:

1) 行波的诱导

常见的行波有平面波和靶波, 通常可以在局部区域输入周期信号来诱导靶波, 但诱导靶波需要事先确定周期刺激信号的幅度和频率, 而脑皮层没有如心脏窦房结一样的信号源, 所以这里采用平面波行波阻挡. 在局部区域和其他区域输入两种不等幅的恒定信号则可以产生行波.

2) 缺陷区域

螺旋波波头在数学上是个奇点, 本文选择部分区域设置系统变量为 0 来模拟缺陷区域.

3 数值计算和讨论

数值计算中时间步长为 0.001, 网络尺寸为 250×250 , 产生行波区域为 $110 \leq i \leq 115, 1 \leq j \leq 250$, 在此区域选择的电流分别为 $I_0 = 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17$ 和 18 , 其他区域刺激电流 $I_{ij} = 6.1$. 缺陷区域为 $120 \leq i \leq 125, 1 \leq j \leq 125$. 图 1 给出了无流边界条件下同步因子随局部刺激电流 I_0 的分布, 图 2 给出了几种局部电流刺激下行波被缺陷阻挡形成的螺旋波. 图 3 和图 4 给出了周期边界条件下的情况.

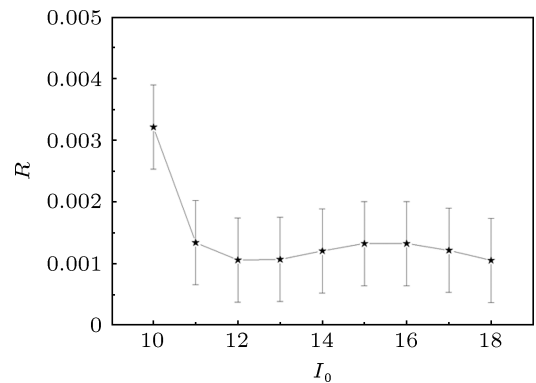


图 1 不同局部刺激电流下的同步因子, 这里当 $110 \leq i \leq 115, 1 \leq j \leq 250, I_{ij} = I_0$, 其他各点刺激电流 $I_{ij} = 6.1$, 耦合强度 $D = 6$, 计算时间为 800 时间单位, 边界条件为无流边界

图 1 结果表明同步因子比较接近且比较小, 当

局部刺激电流比较小时同步因子相对比较大,进一步观测其对应的时空图则发现在局部刺激电流比较小的情况下系统只形成螺旋波片断,对应的数值计算结果如图2所示.

图2的闪图表明,行波经过缺陷阻挡后可以形成行波,对其中各点采样时间序列分析后发现其时间序列具有一定的周期性,这和螺旋波自身周期性特性相一致.通过进一步减少电流刺激区域和缩小缺陷区域,发现只要能形成行波,线性缺陷区域仍

然可以阻挡行波形成螺旋波.下面进一步分析周期边界条件下对形成的螺旋波的影响,图3给出对应的同步因子分布.

图3的结果表明,周期边界条件下,分布式局部刺激电流诱导出行波,行波在被缺陷阻挡后仍然可以使系统同步因子取得比较小的数值,系统处于有序态.对应曲线转折点附近参数值下,局部刺激电流对应的时空斑图在800时间单位的分布结果如图4所示.

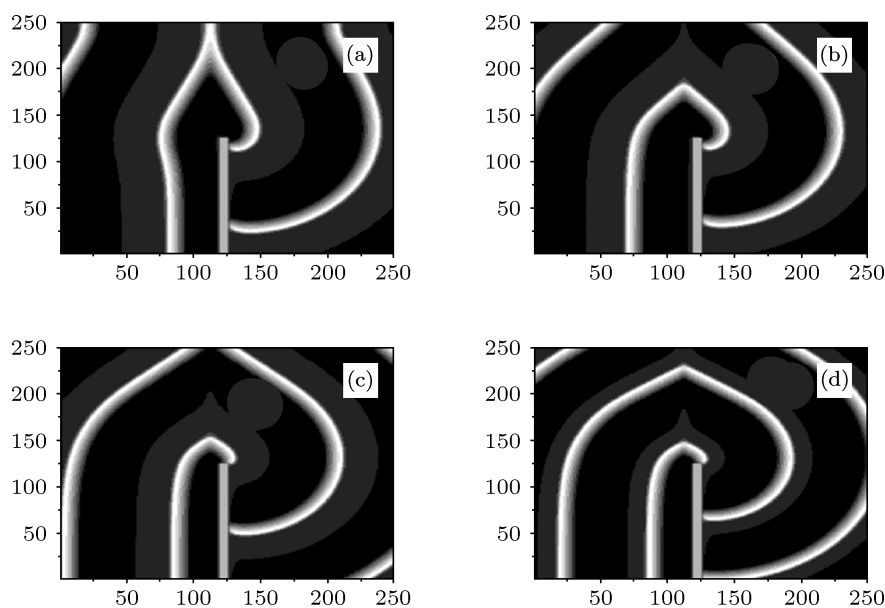


图2 不同局部刺激电流下在800时间单位对应的螺旋波演化图, (这里 $110 \leq i \leq 115$, $1 \leq j \leq 250$, $I_{ij} = I_0$, 其他各点刺激电流 $I_{ij} = 6.1$, 耦合强度 $D = 6$, 边界条件为无流边界) (a) $I_{ij} = I_0 = 10$; (b) $I_{ij} = I_0 = 11$; (c) $I_{ij} = I_0 = 12$; (d) $I_{ij} = I_0 = 18$

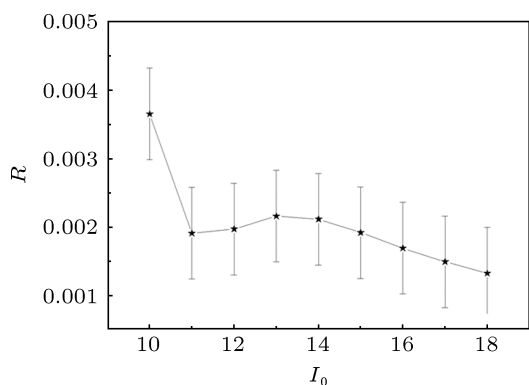


图3 不同局部刺激电流下的同步因子, 这里 $110 \leq i \leq 115$, $1 \leq j \leq 250$, $I_{ij} = I_0$, 其他各点刺激电流 $I_{ij} = 6.1$, 耦合强度 $D = 5$, 计算时间为800时间单位, 边界条件为周期边界

陷阻挡后形成明显的螺旋波,分析其对应各点的采样序列后发现显著的周期特性.通过进一步改变局部刺激电流大小和缺陷区域,发现局部 ($110 \leq i \leq 115$, $1 \leq j \leq 250$) 刺激电流 I_0 和其他区域刺激电流 (例如 $I_{ij} = 6.1$) 偏差不能太小,否则不能形成行波,也就没有螺旋波了,缺陷区域 $120 \leq i \leq 125$, $1 \leq j \leq 125$ 即使进一步缩小 (例如 $120 \leq i \leq 121$, $1 \leq j \leq 125$),也可以阻挡行波且形成明显的螺旋波.

以上分析了无流和周期边界条件下行波阻挡形成螺旋波问题,分布式电流决定行波强度,缺陷决定了螺旋波轮廓.进一步数值计算结果表明,比较大的耦合强度导致螺旋波变得稀疏,比较小的耦合强度则导致螺旋波变得稠密.

图4结果表明,局部刺激下形成的行波被缺

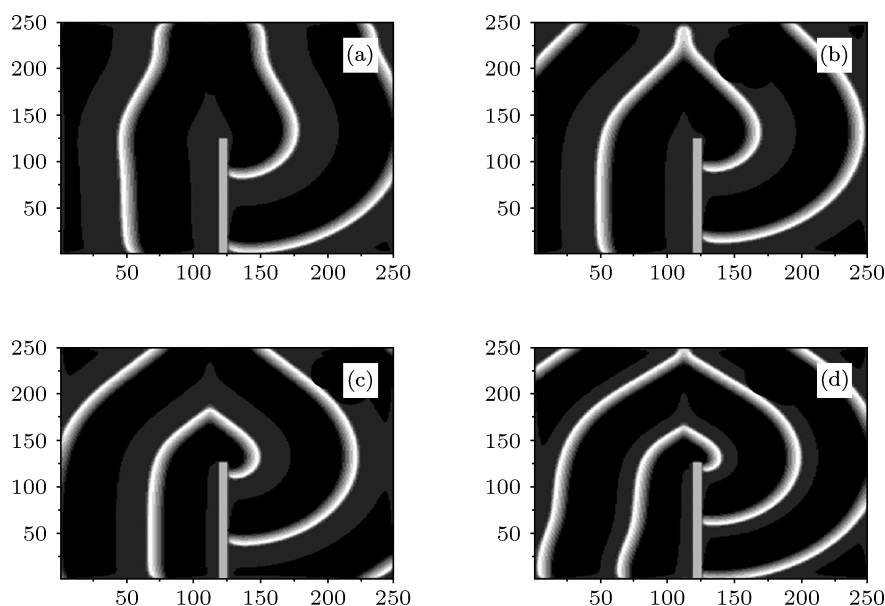


图4 不同局部刺激电流下在800时间单位对应的螺旋波演化图, $110 \leq i \leq 115$, $1 \leq j \leq 250$, $I_{ij} = I_0$, 其他各点刺激电流 $I_{ij} = 6.1$, 耦合强度 $D = 5$ (a) $I_{ij} = I_0 = 10$; (b) $I_{ij} = I_0 = 11$; (c) $I_{ij} = I_0 = 12$; (d) $I_{ij} = I_0 = 18$, 边界条件为周期边界

4 结 论

基于 Hodgkin-Huxley 规则神经网络, 利用分布式电流刺激形成行波, 进一步采用缺陷阻挡来分别研究无流边界和周期边界条件下螺旋波成形问

题. 这和已有文献报道的螺旋波动力学相关结果一致, 即缺陷是诱发螺旋波产生的机理. 研究结果表明, 缺陷阻挡可以在神经网络内诱导出显著的螺旋波, 其可能为临床诊断脑皮层缺陷 (例如血管瘤等缺陷压迫神经) 形成的各类电活动规律提供依据.

- [1] Biktashev V N, Holden A V 1998 *Chaos* **8** 48
- [2] Ouyang Q, Felesselles J M 1996 *Nature* **379** 143
- [3] Ouyang Q, Swinney H L, Li G 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 1047
- [4] Zhou L Q, Ouyang Q 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 1650
- [5] Fenton F H, Cherry E M, Hastings H M 2002 *Chaos* **12** 852
- [6] Stamp A T, Osipov G V, Collins J J 2002 *Chaos* **12** 931.
- [7] Bär M, Brusch L, Or-Guil M 2004 *Phys. Rev. Lett.* **92** 119801
- [8] Fu Y Q, Zhang H, Cao Z J 2005 *Phys. Rev. E* **72** 046206.
- [9] Zhang H, Chen J X, Li Y Q 2006 *J. Chem. Phys.* **125** 204503
- [10] Ma J, Ying H, Li Y L 2007 *Chin. Phys.* **16** 955
- [11] Chen J X, Hu B B 2008 *Europhys Lett.* **84** 34002
- [12] Chen J X, Xu J R, Yuan X P 2009 *J. Phys. Chem. B* **11** 849
- [13] Tang D N, Zhang X, Ren W 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 2319 (in Chinese) [唐冬妮, 张旭, 任卫等 2010 物理学报 **59** 2319]
- [14] Wei H M, Tang G N 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 030501 (in Chinese) [韦海明, 唐国宁 2011 物理学报 **60** 030501]
- [15] Wei H M, Tang G N 2011 *Acta. Phys. Sin.* **60** 040504 (in Chinese) [韦海明, 唐国宁 2011 物理学报 **60** 040504]
- [16] Dong L F, Bai Z G, He Y F 2012 *Acta. Phys. Sin.* **61** 120509 (in Chinese) [董丽芳, 白占国, 贺亚峰 2012 物理学报 **61** 120509]
- [17] Ma J, Jia Y, Wang C N 2008 *J. Phys. A* **41** 385105
- [18] Wang C N, Yang L J, Yuan L H 2010 *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation* **15** 3913
- [19] Ma J, Tang J 2011 *Optimal Control for Patterns in Space-time System* (Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing House) p12 (in Chinese) [马军, 唐军, 时空系统斑图优化控制 (武汉: 华中科技大学出版社) 第 12 页]
- [20] Huang X Y, Troy W C, Yang Q 2004 *J. Neurosci* **24** 9897
- [21] Schiff S J, Huang X Y, Wu J Y 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 178102
- [22] He D H, Shi P L, Stone L W 2003 *Phys. Rev. E* **67** 27201
- [23] Ma J, Ying H P, Liu Y 2009 *Chin. Phys. B* **18** 98
- [24] Perc M 2007 *Chaos, Solitons & Fractals* **31** 280
- [25] Wang Q Y, Perc M, Duan Z S 2008 *Phys. Lett. A* **372** 5681
- [26] Gonze D, Bernard S, Waltermann C 2005 *Bio. Phys. J.* **89** 120
- [27] Wang C N, Ma J, Tang J 2010 *Commun. Theor. Phys.* **53** 382
- [28] Ma J, Wang C N, Jin W Y 2010 *Appl. Math. Comput.* **217** 3844
- [29] Ma J, Tang J, Zhang A H 2010 *Sci. China Phys. Mech. Astro.* **53** 672
- [30] Ma J, Wu Y, Ying H P 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 151
- [31] Ma J, Huang L, Ying H P 2012 *Chin. Sci. Bull.* **57** 2094

Modulation of nonlinear coupling on the synchronization induced by linear coupling*

Zhao Long[†] Yang Ji-Ping²⁾ Zheng Yan-Hong¹⁾

1) (School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

2) (School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China)

(Received 5 July 2012; revised manuscript received 7 August 2012)

Abstract

The experimental results confirm that spiral wave can be observed in the cortex of brain and the electric signals in neurons can propagate with spiral wave. The mechanism for the formation of spiral wave is investigated in the regular network of Hodgkin-Huxley, which can measure the effect of ion channels, and the spiral waves with different periods are developed to occupy the network by blocking the travelling wave with defects. The basic condition for inducing spiral wave and the effect of the coupling intensity are analyzed. The potential mechanism for developing spiral wave is discussed.

Keywords: neuronal network, travelling wave, defects, spiral wave

PACS: 87.19.lq, 87.19.lp, 05.45.Xt, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.62.028701

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11102041).

[†] Corresponding author. E-mail: buaa.dnc@buaa.edu.cn