

局部扩散功能缺陷对随机神经网络时空斑图的影响*

刘少宝^{1,2} 吴莹¹ 郝忠文² 李银军² 贾宁²

(1. 西安交通大学航天航空学院机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049)

(2. 西安理工大学土木建筑工程学院工程力学系, 西安 710048)

摘要 采用 Hodgkin - Huxley 神经元模型, 在二维随机神经网络中引入局部扩散功能缺陷, 研究了神经网络中非对称缺陷附近的方形失去扩散功能的缺陷对螺旋波动力学行为的影响. 缺陷使螺旋波降低传播速度的行为与缺陷的位置和尺寸有关: 靠近螺旋波中心的缺陷影响最为显著, 当缺陷远离中心位置时, 缺陷的作用明显减弱; 缺陷尺寸越大, 影响也越显著. 同时观察到, 在弱耦合神经网络中, 缺陷的存在导致了螺旋波的漂移现象. 进一步研究缺陷和通道噪声同时存在时系统时空斑图的演化行为, 结果发现, 噪声作用下缺陷处形成了新的波源. 最后, 通过分析神经元放电节律和平均膜电位的变化揭示了缺陷对神经网络时空行为影响的机理.

关键词 神经网络, 缺陷, 通道噪声, 时空斑图

引言

螺旋波是自然界中普遍存在的一种非平衡斑图^[1], 例如银河系就是一个巨大的螺旋波^[2], 此外它在生物^[3-5]、物理^[6]、化学^[7, 8]等许多系统中被观察到, 如卵细胞中的钙离子波^[9]、黏性霉菌的自组织^[10], 铂催化剂表面的一氧化碳氧化、BZ 反应^[8]等. 生理学实验表明^[11], 在心脏病患者中观察到的一类心律不齐或心动过速现象, 可能是由于心肌电信号出现螺旋波引起的, 而心颤致死的过程则与心肌中螺旋电波的失稳有密切关系^[12-14], 心脏学家一直在寻找有效的方法来消除心脏中的螺旋波电信号及其破碎形成的时空混沌^[6, 14-18]. 因此有关螺旋波的产生、漫游、破碎和控制引起了人们极大的兴趣^[19-24].

局部扩散功能缺陷(以下简称缺陷)是指可激发介质中的局部与系统其他部分失去信息交换能力的一种局部不均匀性^[25]. 组织(如心肌组织)损伤会导致神经系统局部坏死, 从而产生局部扩散功能缺陷^[26]. 近年来局部扩散功能缺陷对螺旋波动力学行为的影响引起了广泛的关注^[25]. 文献[25]采用 Bar 模型研究了均匀分布的局部扩散功能缺陷对螺旋波动力学行为的影响, 研究发现缺陷导致

介质的激发性降低, 螺旋波的传播速度减慢, 并首次观察到激发介质中的螺旋波因 Doppler 效应破碎形成小螺旋波与时空混沌共存的现象; 文献[27]采用 Greenberg - Hastings (GH) 离散激发介质模型研究了异质可激发颗粒对激发介质中螺旋波演化的影响, 发现螺旋波的失稳与小异质性颗粒(均匀分布)的形状、密度和性质有关, 并且首次观察到螺旋波破碎成空间无序的周期变化斑图和破碎成时空有序的迷宫斑图现象; 文献[28]采用 FitzHugh - Nagumo (FH - N) 模型研究了可激发扩散反应系统(an excitable diffusive - reaction system)中局部不均匀性(振荡或稳定)对时空混沌状态的影响, 可使介质中出现单臂或多臂螺旋波, 甚至可观察到靶波出现; 文献[29]采用 Panfilov 和 Luo - Rudy 模型研究了心肌组织中螺旋波动力学的异质(inhomogeneities)敏感依赖性, 指出螺旋波的破碎与异质(或缺陷)的位置、大小及性质有关.

本文采用 Hodgkin - Huxley (H - H) 神经元模型^[30], 在二维随机神经网络中引入局部扩散功能缺陷, 研究了方形缺陷的位置和大小对螺旋波动力学行为的影响以及缺陷与通道噪声相互作用时系统时空斑图演化情况. 研究结果对认识和理解缺陷、噪声及其相互作用在神经信息传递和编码中的

作用机制有重要意义.

1 模型和缺陷

将有关通道噪声的神经元与其邻近的神经元进行扩散耦合,进而构成 $N \times N$ 个节点的神经网络,这种连接可以模拟神经元之间电突触连接.

Hodgkin - Huxley (H - H) 神经网络模型方程^[31]形式如下:

$$\begin{cases} C_m \frac{dV_{ij}}{dt} = -g_{Na}m_{ij}^3h_{ij}(V_{ij} - V_{Na}) - g_L(V_{ij} - V_L) - g_Kn_{ij}^4(V_{ij} - V_K) + I_{ext} \\ \frac{dm_{ij}}{dt} = \alpha_m(V_{ij})(1 - m_{ij}) - \beta_m(V_{ij})m_{ij} + \xi_m(t) \\ \frac{dh_{ij}}{dt} = \alpha_h(V_{ij})(1 - h_{ij}) - \beta_h(V_{ij})h_{ij} + \xi_h(t) \\ \frac{dn_{ij}}{dt} = \alpha_n(V_{ij})(1 - n_{ij}) - \beta_n(V_{ij})n_{ij} + \xi_n(t) \end{cases} \quad (1)$$

方程中,控制量 V_{ij} 是位于 (i, j) 位置神经元膜电位. D 为相邻神经元之间的耦合强度. C 为膜电容, g_{Na}, g_K, g_L 分别为钠离子电导、钾离子电导和漏电导; V_{Na}, V_K, V_L 分别为钠离子逆电位、钾离子逆电位和静息膜电位; 这些参数均由实验^[32]测得: $C = 1\mu F \cdot cm^{-2}$, $g_{Na} = 120mS \cdot cm^{-2}$, $g_K = 36mS \cdot cm^{-2}$, $g_L = 0.3mS \cdot cm^{-2}$, $V_{Na} = 50mV$, $V_K = -77mV$, $V_L = -54.4mV$. 门变量 m, h, n 代表在特定条件下打开或关闭相应离子通道的概率. 实验证实, 钠离子电导在膜静息状态时近似等于零, 但是动作电位期间, 钠通道有一个快速激活和慢速失活化过程, 并且是两个独立的过程, 因此用了两个参数 m 和 h 分别描述钠电导的增加和减小过程. 打开速率 $\alpha_x(V)$ 和关闭速率 $\beta_x(V)$ ($x = m, h, n$) 分别表示为

$$\alpha_m = 0.1(V_{ij} + 40)\phi(T)/(1 - \exp(-(V_{ij} + 40)/10))$$

$$\alpha_h = 0.07\phi(T)\exp(-(V_{ij} + 65)/20)$$

$$\alpha_n = 0.01(V_{ij} + 55)\phi(T)/(1 - \exp(-(V_{ij} + 55)/10))$$

$$\beta_m = 4\phi(T)\exp(-(V_{ij} + 65)/18)$$

$$\beta_h = \phi(T)/(1 + \exp(-(V_{ij} + 35)/10))$$

$$\beta_n = 0.125\phi(T)\exp(-(V_{ij} + 65)/80) \quad (2)$$

其中, $\phi(T) = 3^{(T-63)/10}$ 为温度补偿项. $\xi_x(t)$ ($x = m, h, n$) 是 Gauss 白噪声, 均值为零, 对于包含

了 N_{Na} 个钠离子通道和 N_K 个钾离子通道的离子通道簇面积, 噪声关联满足如下关系^[18]

$$\langle \xi_m(t)\xi_m(t') \rangle = \frac{2\alpha_m\beta_m}{N_K(\alpha_m + \beta_m)}\delta(t - t')$$

$$\langle \xi_h(t)\xi_h(t') \rangle = \frac{2\alpha_h\beta_h}{N_{Na}(\alpha_h + \beta_h)}\delta(t - t')$$

$$\langle \xi_n(t)\xi_n(t') \rangle = \frac{2\alpha_n\beta_n}{N_{Na}(\alpha_n + \beta_n)}\delta(t - t') \quad (3)$$

假定钠离子和钾离子通道密度 $\rho_{Na} = 60\mu m^{-2}$ 和 $\rho_K = 18\mu m^{-2}$, 则离子通道数分别为 $N_{Na} = \rho_{Na}S$ 和 $N_K = \rho_K S$, S 是膜片簇面积. 离子通道数决定了通道噪声的强度, 而簇面积的大小决定离子通道数, 所以随着簇面积的减小打开离子通道数减小, 引起通道噪声增强. 大量的数值结果表明, 当膜片簇面积 $S \geq 200\mu m^2$ 时, 其值的改变对系统时空斑图几乎不产生影响. 也就是说, 当膜片簇面积足够大时, 通道噪声很低, 以致对整个系统产生的影响可以忽略. 所以, 在本文中不强调通道噪声对系统的影响时, 数值仿真所采用的膜片簇面积为 $S = 200\mu m^2$.

为了更好地描述缺陷的位置和大小, 以形成螺旋波的非对称缺陷端点的中心(图中 O 点)为坐标原点建立坐标系, O 点对应神经元位置为 $(50, 45)$, 如图 1(a) 所示, 阴影区 ($a \times a$ 个神经元) 为局部扩散功能缺陷区域, a 表示方形缺陷边上神经元的个数, 缺陷中心 P 点位置用极坐标表示为 (r, θ) . 缺陷内神经元耦合强度 $D = 0$, 缺陷外 $D = 1$.

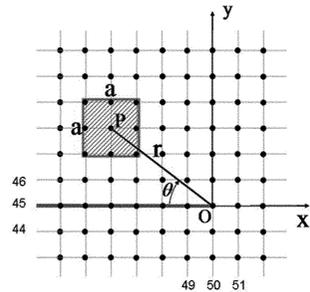


图1 方形局部扩散功能缺陷示分布意图

Fig. 1 The schematic diagram for distribution of square defect

2 数值模拟结果及讨论

本文数值计算采用 Euler 法, 积分步长 0.02, 网络为 100×100 个节点的神经网络, 采用 no-flux 边界条件^[33]. 在方程(1) 中外刺激电流 $I_0 = 6.1\mu A$, 温度 $T = 12^\circ C$. 初值条件为: $V_{ij} = -40.2$, $m_{ij} = 0.1203$, $h_{ij} = 0.9$, $n_{ij} = 0.9$ ($i = 41, 42, 43, j = 1, 2, \dots, 50$);

$V_{ij}=0, m_{ij}=0.5203, h_{ij}=0.7, n_{ij}=0.7 (i=44, 45, 46, j=1, 2, \dots, 50); V_{ij}=40.0, m_{ij}=0.98203, h_{ij}=0.5, n_{ij}=0.5 (i=47, 48, 49, j=1, 2, \dots, 50); V_{ij}=-61.19389, m_{ij}=0.08203, h_{ij}=0.46012, n_{ij}=0.37726$ (其它位置) ($t=0$). 经过 $t=200\text{ms}$ 的演化, 系统放电阵列 (浅色部分) 与静息状态 (深色部分) 相间, 形成螺旋状时空斑图, 由于这种螺旋状斑图以波的形式从中心往外传播, 又称螺旋波.

2.1 不同位置的缺陷对螺旋波的影响

考虑网络中在 $\theta=0$ 的方位存在方形缺陷的情况, 缺陷周边为 $a=11$ 个神经元. 缺陷沿水平方向移动, 缺陷中心距离 O 点分别为 $x=-10, -5, 0, 5, 10$ 时系统时空斑图, 如图 2 所示. 我们看到, 当 $|x| \leq 5$

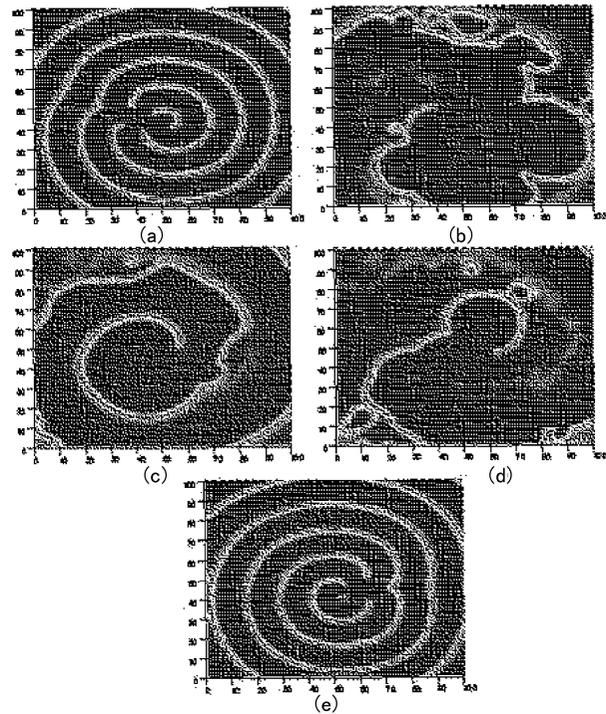


图 2 不同位置的缺陷对系统时空斑图的影响, 缺陷边长 $a=11$, 缺陷中心的位置为 (a) $x=-10$; (b) $x=-5$; (c) $x=0$; (d) $x=5$; (e) $x=10$

Fig. 2 Influence of defects in different positions on spatiotemporal patterns. the size of the defect $a=11$, the positions of the center of defects are (a) $x=-10$; (b) $x=-5$; (c) $x=0$; (d) $x=5$; (e) $x=10$

时螺旋波变得稀疏而不规则, 而 $|x| \geq 5$ 缺陷对螺旋波几乎没有影响. 结果表明缺陷距离 O 点越近, 对螺旋波影响越大, 主要是通过降低螺旋波的传播速度和规则性来影响螺旋波的形成和传播. 已有的研究^[34]表明, 这是由于缺陷降低了系统激发性, 从而导致螺旋波的速度降低, 而螺旋波的不规则性是缺陷对波头的吸引造成的. 研究还发现, 增大缺陷

面积, 缺陷对螺旋波的影响范围增大, 也验证了这一结论. 当改变缺陷方位角 θ 时, 螺旋波并没有随之改变, 说明在以上研究的参数条件下系统对缺陷的方位不敏感.

2.2 不同尺寸的缺陷对螺旋波的影响

缺陷能够降低系统的激发性, 那么缺陷的尺寸对螺旋波的传播会产生怎样的影响呢? 图 3 给出了不同尺寸缺陷作用下系统的时空斑图, 缺陷中心点 P 位于螺旋波波头中心 O 处, 其中图 3(a) 为对照图, 网络中没有缺陷. 图 3(b-g) 缺陷尺寸分别为 $a=3, 5, 7, 9, 11, 13$. 从图中可以看到, 网络中存在缺陷时螺旋波变得稀疏, 而且随着缺陷尺寸的增大螺旋波变得越来越稀疏.

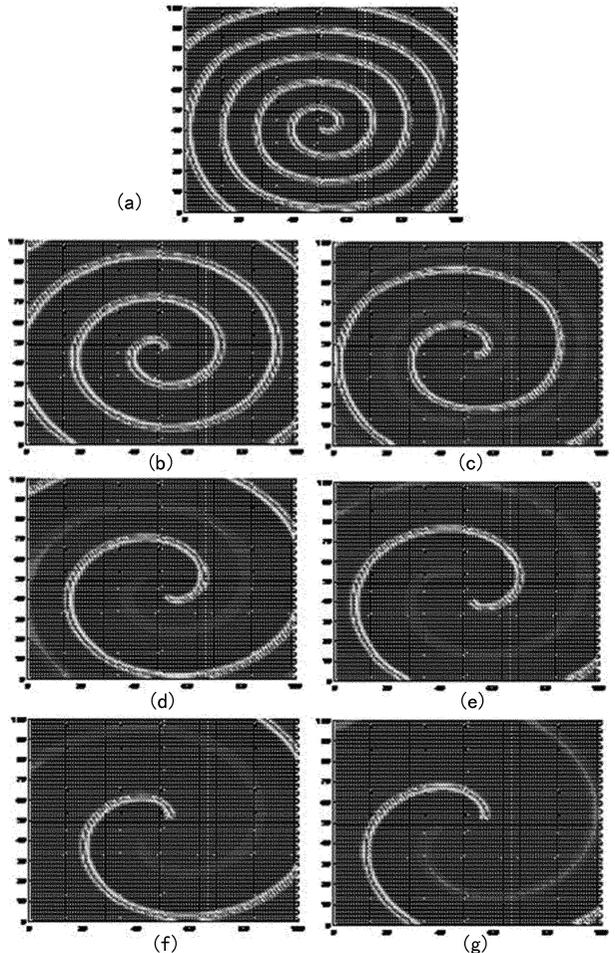


图 3 不同尺寸的缺陷对系统时空斑图的影响, 缺陷中心点 P 位于螺旋波波头中心 O 处, (a) 无缺陷; (b) $a=3$; (c) $a=5$; (d) $a=7$; (e) $a=9$; (f) $a=11$; (g) $a=13$

Fig. 3 Influence of defects with different sizes on spatiotemporal patterns. P (center of the defect) is at the position of O (center of the end of the spiral wave). (a) No defects; (b) $a=3$; (c) $a=5$; (d) $a=7$; (e) $a=9$; (f) $a=11$; (g) $a=13$

当缺陷中心 P 位于坐标原点 O , 耦合强度 $D = 0.15$ 时, 我们发现了螺旋波漂移的现象, 如图 4 所示. 图 4(b) 和 (c) 分别为尺寸 $a = 17$ 和 $a = 25$ 的缺陷作用时系统的时空斑图. 图 4(a) 为对照组, 此时系统不存在缺陷. 明显看到, 局部扩散功能缺陷诱导螺旋波产生了漂移, 而且缺陷越大, 漂移现象越明显. 与前面的结果相比, 此时的缺陷没有使螺旋波变得稀疏. 这是由于耦合强度较小时, 系统信息传递能力减弱, 缺陷作用只能影响到局部范围, 这种局部非均匀性不会导致整体螺旋波变稀疏, 但是影响了缺陷附近螺旋波波源的形成, 从而导致螺旋波整体产生漂移. 关于漂移螺旋波的控制问题在文献 [12] 有所研究.

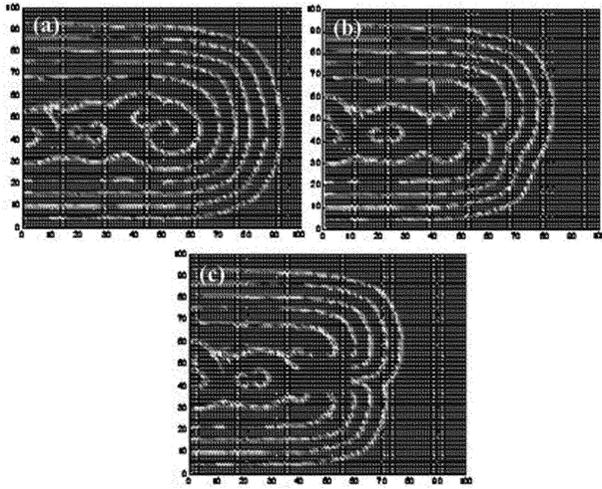


图 4 局部扩散功能缺陷诱导螺旋波漂移现象耦合强度 $D = 0.15$, 缺陷中心 P 位于坐标原点 O , (a) 无缺陷; (b) 缺陷尺寸 $a = 11$; (c) 缺陷尺寸 $a = 17$

Fig. 4 Drift phenomenon of spiral wave induced by the defect.

P (center of the defect) is at the coordinate origin O ,
(a) no defects; (b) $a = 11$; (c) $a = 17$

2.3 缺陷与通道噪声对螺旋波的相互作用

已有的研究表明, 噪声在可激发介质信息传递或斑图形成过程中扮演着重要角色 [18, 32-36]. 为了分析缺陷和通道噪声对神经网络时空动力学行为的共同影响, 分别进行了两组计算, 第一组的结果如图 5(a1-d1) 所示, 此时系统只存在噪声, 无缺陷; 第二组的结果如图 5(a2-d2) 所示, 此时系统存在一个方形缺陷, 缺陷相对 O 点位置为 $r = 25$, $\theta = 90^\circ$, 缺陷尺寸 $a = 11$. 两组数值计算中膜片簇面积分别为 (a) $S = 50\mu\text{m}^2$, (b) $S = 10\mu\text{m}^2$, (c) $S = 5\mu\text{m}^2$, (d) $S = 2\mu\text{m}^2$. 图 5(a1-d1) 显示, 网络中只存在噪声时, 随着噪声强度的逐渐增大, 产生螺旋

波的区域越来越小, 此时噪声抑制了螺旋波的形成. 但是当网络中存在缺陷时, 在缺陷附近螺旋波产生凸起, 而且随着噪声强度的增大, 螺旋波的凸起部分越加明显, 在图 5(d2) 中, 凸起的部分完全变成了以缺陷为波源的新的波. 以上结果表明, 单纯的缺陷会降低系统的激发性, 使螺旋波变得稀疏, 单纯噪声也会抑制螺旋波形成, 但是两者同时存在时, 缺陷反而成为激发源, 激发其外围形成新的波.

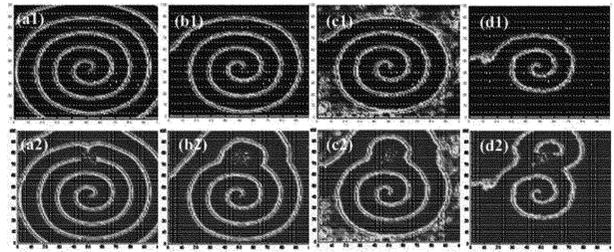


图 5 不同膜片簇面积时系统的时空斑图, (a) $S = 50\mu\text{m}^2$; (b) $S = 10\mu\text{m}^2$; (c) $S = 5\mu\text{m}^2$; (d) $S = 2\mu\text{m}^2$, 其中 (a1-d1) 系统中无缺陷,

(a2-d2) 中存在缺陷: 缺陷位置 $r = 25$, $\theta = 90^\circ$, 缺陷尺寸为 $a = 11$

Fig. 5 The spatiotemporal patterns for systems with different patch

sizes (a) $S = 50\mu\text{m}^2$; (b) $S = 10\mu\text{m}^2$; (c) $S = 5\mu\text{m}^2$; (d) $S = 2\mu\text{m}^2$,

(a1-d1) no defects, (a2-d2) with defects $r = 25$, $\theta = 90^\circ$ and $a = 11$

3 缺陷作用机理探讨

神经元放电阵列是由神经元所产生的间歇性放电形成的, 也就是神经细胞的激发行为, 或者神经细胞膜的去极化行为. 一般情况下, 神经元细胞膜处于静息电位, 只有当外界刺激达到神经元放电阈值时, 神经元才产生放电现象. 而放电频率的高低与刺激强度有关. 系统时空斑图是由网络中不同位置处神经元放电阵列形成的, 所以神经元放电阵列反映了系统时空斑图形成和演化的内部机制. 图 6 为系统在不同尺寸的缺陷 (缺陷中心 P 位于波头中心 O 点) 影响下, 位于 (9, 10) 位置的神经元放电阵列图, 图 6(b-g) 对应的缺陷尺寸分别为 $a = 3, 5, 7, 9, 11, 13$, 而图 6(a) 为无缺陷影响的对照图. 从图中可以看到, 系统有缺陷时神经元放电阵列明显变稀疏. 例如, 在 200ms 时间内, 系统无缺陷时神经元放电次数 $N = 28$ (图 6a), 而随着缺陷尺寸的增大, 神经元放电次数依次减小, 相同时间段内的放电次数分别为 $N = 22, 13, 11, 9, 8, 7$ (图 6(b-g)). 由于局部缺陷的作用, 整个系统的激发性降低, 从而降低了每一个神经元的放电频率. 单个神

经元放电频率的降低直接影响到系统时空斑图的演化规律,所以我们看到螺旋波随着缺陷尺寸增大而变得稀疏(如图 3 所示).或者说缺陷降低了螺旋波的传播速度.

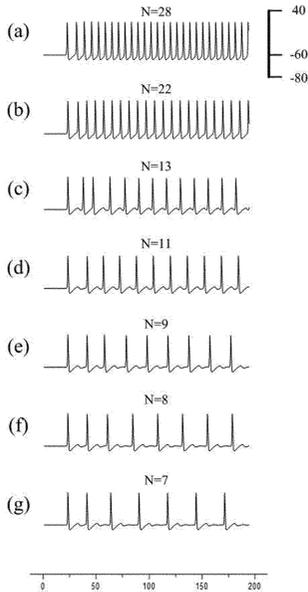


图 6 位于(9,10)位置的神经元放电时程图,缺陷中心 P 位于螺旋波波头中心 O , (a) 无缺陷; (b) $a=3$; (c) $a=5$; (d) $a=7$; (e) $a=9$; (f) $a=11$; (g) $a=13$

Fig. 6 The time history curve of membrane voltage of the neuron at (9, 10). P (center of the defect) is at the position of O (center of the end of the spiral wave), (a) No defects; (b) $a=3$; (c) $a=5$; (d) $a=7$; (e) $a=9$; (f) $a=11$; (g) $a=13$

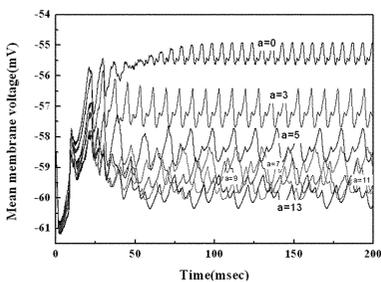


图 7 缺陷中心 P 位于螺旋波波头中心 O 时,不同尺寸

($a=0,5,7,9,11,13$)的缺陷影响下,神经网络平均膜电位时程图
Fig. 7 The time history curves of mean membrane voltages of the neural networks with the defects sizes $a=0,5,7,9,11,13$, and P (center of the defect) is at the position of O (center of the end of the spiral wave)

在网络水平上,系统平均膜电位 (Mean membrane voltage) 也可以很好的反应缺陷对系统的影响.图 7 给出了缺陷中心 P 位于螺旋波波头中心 O 时,不同尺寸缺陷影响下系统平均膜电位时程图.从图中可以看到,随着缺陷尺寸的增大($a=3,5,7,$

$9,11,13$),系统平均膜电位依次降低,而无缺陷影响的系统平均膜电位最高.缺陷影响导致系统平均膜电位降低,说明缺陷降低了整个系统的激发性,使得处于静息电位的神经元比例增大.这与图 3 所观察到的系统时空斑图一致.

4 结论

研究了方形局部扩散功能缺陷的位置、大小及其与噪声相互作用对二维神经网络螺旋波动力学行为的影响.结果发现,随着缺陷向螺旋波波头靠近,螺旋波会变得稀疏和不规则,通过改变缺陷的大小,同样发现随着缺陷面积增大,系统螺旋波会变得越加稀疏.分析缺陷存在时系统神经元放电频率的变化和平均膜电位的变化,随着缺陷尺寸的增大,单个神经元放电频率逐渐减小,系统平均膜电位逐渐降低,说明缺陷降低了整个系统的激发性,使得处于静息电位的神经元比例增大,从而使得系统螺旋波变得稀疏.而缺陷对波头的吸引作用致使螺旋波变得不规则.进一步研究通道噪声和缺陷同时存在对系统时空斑图的影响,结果发现单纯的缺陷会降低系统的激发性,使螺旋波变得稀疏,但是当噪声存在时,缺陷处反而成为波源,激发其外围形成新的波.表明,原本抑制信号传递的噪声反而增强了缺陷附近神经元信号的传递.最后,我们观察到局部扩散功能缺陷诱导螺旋波的漂移现象.在耦合强度较弱的网络中,由于较小的耦合强度使得系统信息传递能力减弱,造成缺陷对局部范围的影响,这种局部的不规则性对整个系统螺旋波产生吸引,从而导致了螺旋波漂移.研究结果对认识和理解缺陷、噪声在神经信息传递和编码中的作用机制有重要意义.

参 考 文 献

- 1 欧阳颀. 反应扩散系统中螺旋波的失稳. 上海:上海科技教育出版社, 2000 (Ou Y X. The instability of spiral wave in reaction-diffusion system. Shanghai: shanghai education press of science and technology, 2000(in Chinese))
- 2 Van D K. Comparison of the Galaxy with external spiral galaxies The Smithsonian/NASA Astrophysics Data System, 1987
- 3 Huang X, Troy W C, Yang Q, Ma H, et al. Spiral waves

- in mammalian neocortex. *Journal of neuroscience*, 2004, 24: 9897 ~ 9905
- 4 Cabo C, Pertsov A M, Davidenko J M, Baxter W T, et al. Vortex shedding as a precursor of turbulent electrical activity in cardiac muscle. *Biophysical Journal*, 1996, 70: 1105 ~ 1111
 - 5 Luo C, Rudy Y. A model of the ventricular cardiac action potential. Depolarization, repolarization, and their interaction. *Circulation research*, 1991, 68: 1501 ~ 1526
 - 6 Steinbock O, Zykov V. Control of spiral-wave dynamics in active media by periodic modulation of excitability. *Nature*, 1993, 366: 322 ~ 324
 - 7 Zaikin A, Zhabotinsky A. Concentration Wave Propagation in Two-dimensional Liquid-phase Self-oscillating System. *Nature*, 1970, 225: 535 ~ 537
 - 8 Gray R A, Pertsov A M, Jalife J. Spatial and temporal organization during cardiac fibrillation *Nature*, 1998, 392: 75 ~ 78
 - 9 Lechleiter J, Girard S, Peralta E, Clapham D. Spiral calcium wave propagation and annihilation in *Xenopus laevis* oocytes. *Science*, 1991, 252: 123 ~ 126
 - 10 Vasiev B, Siegert F, Weijer V. Multiarmed spirals in excitable media. *Physical Review Letter*, 1997, 78 (12): 2489 ~ 2493
 - 11 Karagueuzian H S, Khan S S, Hong K, Kobayashi Y, et al. Action potential alternans and irregular dynamics in quinidine-intoxicated ventricular muscle cells. Implications for ventricular proarrhythmia. *Circulation*, 1993, 87: 1661 ~ 1672
 - 12 Samie F H, Berenfeld O, Anumonwo J, Mironov S F, et al. Rectification of the background potassium current: a determinant of rotor dynamics in ventricular fibrillation. *Circulation research*, 2001, 89: 1216 ~ 1223
 - 13 Garfinkel A, Kim, Y H, Voroshilovsky O, Qu Z, Kil J R, et al. Preventing ventricular fibrillation by flattening cardiac restitution. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2000, 97: 6061 ~ 6066
 - 14 Bursac N, Aguel F, Tung L. Multiarm spirals in a two-dimensional cardiac substrate. *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 2004, 101: 15530 ~ 15534
 - 15 Ma J, Wang C N, Jin W Y, Wu Y. Transition from spiral wave to target wave and other coherent structures in the networks of Hodgkin-Huxley Neurons. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, 217: 3844 ~ 3852
 - 16 Zhang H, Cao Z, Wu N J, Ying H P, et al. Suppress winfree turbulence by local forcing excitable systems. *Physical Review Letter*, 2005, 94: 188301 ~ 188305
 - 17 Fenton F H, Cherry E M, Hastings H M, Evans S J. Multiple mechanisms of spiral wave breakup in a model of cardiac electrical activity. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2002, 12: 852 ~ 893
 - 18 Ma J, Wu Y, Ying H P, Jia Y. Channel noise-induced phase transition of spiral wave in networks of Hodgkin-Huxley neurons. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 151 ~ 157
 - 19 刘少宝、吴莹. 通道扰动对神经元网络动力学行为的影响. *动力学与控制学报*, 2010, 08(3): 284 ~ 289 (Liu S B, Wu Y. Effect of channel Gauss noise on the neuronal network dynamic behavior. *Journal of Dynamics and Control*, 2010, 08(3): 284 ~ 289 (in Chinese))
 - 20 Du M M, Wu Y, Pang J Z. The noise effect on spatiotemporal patterns in neural network, The Third International Conference on Dynamics, Vibration and Control, 2010, Hangzhou
 - 21 马军、靳伍银、易鸣、李延龙. 时变反应扩散系统中螺旋波和湍流的控制. *物理学报*, 2008, 57: 2832 ~ 2842 (Ma J, Jin W Y, Yi M, Li Y L. Control of spiral wave and turbulence in the time-varied reaction-diffusion system. *Acta Phys. Sin.*, 2008, 57: 2832 ~ 2842 (in Chinese))
 - 22 马军、靳伍银、李延龙、陈勇. 随机相位扰动抑制激发介质中漂移的螺旋波. *物理学报*, 2007, 56: 2456 ~ 2466 (Ma J, Jin W Y, Li Y L, Chen Y. Suppression of meandering spiral waves in the excitable media due to a perturbation with stochastic phase. *Acta Physical Sinica*, 2007, 56: 2456 ~ 2466 (in Chinese))
 - 23 李玉叶、张慧敏、魏春玲、杨明浩等. 随机信号在神经元网络中诱发的双空间相干共振. *动力学与控制学报*, 2009, 07(3): 230 ~ 235 (Li Y Y, Zhang H M, Wei C L, Yang M H, et al. Stochastic signal induced double spatial coherence resonance in neuronal network. *Journal of Dynamics and Control*, 2009, 07(3): 230 ~ 235 (in Chinese))
 - 24 Li Y Y, Hang H M, Wei C L, Yang H M, et al. Stochastic signal induced multiple spatial coherence resonances and spiral waves in excitable media. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26: 030504 ~ 030508
 - 25 唐冬妮、唐国宁. 无扩散功能的缺陷对螺旋波动力学行为的影. *物理学报*, 2010, 59: 2319 ~ 2326 (Tang D N, Tang G N. The influence of the defects without diffusion function on dynamics of spiral wave. *Acta Physical Sinica*, 2010, 59: 2319 ~ 2326 (in Chinese))

- 26 Verma A, Marrouche N F, Schweikert R A, Saliba W, et al. Relationship Between Successful Ablation Sites and the Scar Border Zone Defined by Substrate Mapping for Ventricular Tachycardia Post - Myocardial Infarction. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 2005, 16(5) 465 ~ 471
- 27 戴瑜, 韦海明, 唐国宁. 非均匀激发介质中螺旋波的演化. *物理学报*, 2009, 59: 5979 ~ 5984 (Dai Y, Wei H M, Tang G N. The evolution of spiral waves in inhomogeneous excitable media. *Acta Physical Sinica*, 2009, 59: 5979 ~ 5984 (in Chinese))
- 28 Li B W, Zhang H, Ying H P, Hu G. Coherent wave patterns sustained by a localized inhomogeneity in an excitable medium. *Physical Review E*, 2009 79(2): 026220 ~ 026227
- 29 Shajahan T, Sinha S, Pandit R. Spiral-wave dynamics depend sensitively on inhomogeneities in mathematical models of ventricular tissue. *Physical Review E*, 2007. 75(1): 011929 ~ 011939
- 30 Hodgkin A L, Huxley A F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve. *Journal of physiology*, 1952, 117: 500 ~ 544
- 31 Ma J, Wang C N, Jin W Y, Wu Y. Transition from spiral wave to target wave and other coherent structures in the networks of Hodgkin-Huxley Neurons. *Applied Mathematics and Computation*, 2010, 217(8): 3844 ~ 3863
- 32 Stimberg M, Hoch T, Obermayer K. The effect of background noise on the precision of pulse packet propagation in feed-forward networks. *Neurocomputing*, 2007, 70(10): 1824 ~ 1828
- 33 Izús G G, Sánchez A D, Deza R R. Noise-driven synchronization of a FitzHugh-Nagumo ring with phase-repulsive coupling: A perspective from the system's nonequilibrium potential. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2009, 388(6): 967 ~ 976
- 34 Huang J. The random attractor of stochastic FitzHugh-Nagumo equations in an infinite lattice with white noises. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2007, 233(2): 83 ~ 94
- 35 Hasegawa H. Stochastic bifurcation in FitzHugh-Nagumo ensembles subjected to additive and/or multiplicative noises. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2008, 237(2): 137 ~ 155
- 36 Gong, Y B, Hao Y H, Xie Y H, et al. Non-Gaussian noise optimized spiking activity of Hodgkin-Huxley neurons on random complex networks. *Biophysical Chemistry*, 2009, 144(1): 88 ~ 93

THE EFFECT OF LOCAL DEFECT WITHOUT DIFFUSION FUNCTION ON SPATIOTEMPORAL PATTERNS OF RANDOM NEURAL NETWORK*

Liu Shaobao^{1,2} Wu Ying¹ Hao Zhongwen² Li Yinjun² Jia Ning²

(1. State key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, School of Aerospace, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

(2. Department of Engineering Mechanics, School of Civil Engineering and Architecture, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract The effects of the position and size of local defects without diffusion function on patterns of two-dimensional random neural network were investigated by using the Hodgkin-Huxley model. The result shows that the spiral wave becomes more scattered when the size of defect gets bigger, significantly near to the center of the spiral waves, which means the defect impact is correlated with the defect size positively. Furthermore, it is found that the drift phenomenon of spiral wave is induced by defect in weakly coupled neural network. Study on the behavior of spatiotemporal patterns with the coexistence of channel noise and defect shows that the new wave source is made by the effect of noise. Finally, the physical mechanisms for these phenomena were briefly discussed by analyzing the discharge frequency and the mean membrane voltage of neurons.

Key words neural network, defect, channel noise, spatiotemporal pattern