

钠离子和钾离子通道噪声扰动对神经网络时空模式的影响*

刘少宝¹⁾²⁾ 吴莹^{1)2)†} 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) (西安理工大学理学院工程力学系, 西安 710048)

(2011年3月1日收到; 2011年5月19日收到修改稿)

研究了钠离子和钾离子通道噪声扰动对 Hodgkin-Huxley 神经网络放电时空模式的影响. 发现无论钠离子通道噪声还是钾离子通道噪声扰动, 当取定一组温度、噪声强度, 随着耦合强度的增大, 神经网络放电时空斑图总能演化出螺旋波, 而且存在形成螺旋波所需的临界耦合强度. 分析发现钠离子通道噪声有利于神经网络螺旋波的形成, 而钾离子通道噪声不利于螺旋波形成. 结果还表明较低的温度能够使神经网络对噪声更加敏感. 最后, 讨论了特定参数下螺旋波与靶波之间的转化现象.

关键词: Hodgkin-Huxley(H-H) 模型, 离子通道噪声, 时空斑图, 螺旋波

PACS: 05.45.-a, 87.19.lc, 87.18.Sn

1 引言

离子通道是神经系统中信号传导的基本元件. 它能够产生神经元的电信号, 调节神经递质的分泌, 也能将细胞外的电刺激、化学刺激 (如外激励噪声) 及细胞内产生的化学信号 (如通道扰动) 转变成电反应^[1,2]. 离子通道具有对离子通透的特异性, 因此不同离子能够通过不同通道实现跨膜流动, 如 Na^+ , K^+ 通过不同的离子通道实现跨膜流动, 从而产生动作电位. 大量实验证明, 不同离子有各自独立的通道, 互不影响. 例如, 钠电流和钾电流可以用河豚毒素 (tetrodotoxin, TTX) 和四乙胺 (tetraethylammonium, TEA) 等药物将它们分离出来, 而互不影响^[3,4]; 钠电流和钾电流有各自不同的动力学行为; 用链霉蛋白酶处理神经后, 对钠通道的失活化产生影响, 甚至失活化效应消失, 而对钾电流无影响. 因此, 研究某一种离子通道对神经网络动力学行为的独立作用, 可以更好的揭示信息传递过程中不同离子通道所起的作用, 有着重要的理论指导意义^[5,6].

20 世纪 50 年代, Hodgkin 和 Huxley 做了“钠离子对枪乌贼大纤维产生的动作电位的作用”的实验, 根据一系列实验结果的分析, 他们确认轴突膜上具有两种主要离子通过的通道, 即钾离子通道和钠离子通道. 基于等效电路和枪乌贼巨轴突的实验结果, 提出了神经元放电活动的离子机理, 并由此建立了著名的 Hodgkin-Huxley(H-H) 模型^[7,8]. 这一模型是基于钠离子通道电流、钾离子通道电流和漏电流的等效闭合回路建立的, 科学家们借助于这一模型对各种离子通道对神经网络的动力学行为进行了广泛的研究. 文献 [9] 研究了枪乌贼巨轴突上作用了 Battachoxin (箭毒) 的 Na^+ 离子通道的门动力学, 并考虑了电压和温度的影响. 文献 [10] 研究了随机 Hodgkin-Huxley 系统在通道噪声影响下电容的波动. 文献 [11—14] 研究了钠离子和钾离子通道中毒对耦合随机 H-H 神经元集体激发行爲的影响. 文献 [15] 的结论表明弱激光可以改变神经元瞬时外向钾离子通道特性. 文献 [16] 研究了青蛙表皮的钾离子通道的生理作用. 生理学实验发现^[17], 心脏病变时会发出的螺旋波信号是非常

* 国家自然科学基金 (批准号: 10972179, 10872155, 10602003) 资助的课题.

† E-mail: wying36@163.com

有害的^[18], 因此有必要研究抑制、控制和消除螺旋波的新途径和新方法^[19-21]. 本文基于 H-H 模型, 研究了钠离子和钾离子通道噪声扰动对神经网络时空动力学行为的影响, 进一步探讨了不同离子通道的功能. 研究结果对认识生物神经元之间的耦合连接形式、离子通道打开和关闭产生的通道噪声扰动作用、神经系统螺旋波形成及转化条件有重要意义.

2 神经网络模型

将二维含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耦合, 方程形式如下:

$$\begin{aligned}
 C_m \frac{dV_{ij}}{dt} &= -g_{Na}m_{ij}^3h_{ij}(V_{ij} - V_{Na}) \\
 &\quad -g_L(V_{ij} - V_L) - g_Kn_{ij}^4(V_{ij} - V_K) \\
 &\quad +I_{ext} + D(V_{i-1j} + V_{i+1j} \\
 &\quad +V_{ij-1} + V_{ij+1} - 4V_{ij}), \\
 \frac{dm_{ij}}{dt} &= \alpha_m(V_{ij})(1 - m_{ij}) \\
 &\quad -\beta_m(V_{ij})m_{ij} + S\xi(t), \\
 \frac{dh_{ij}}{dt} &= \alpha_h(V_{ij})(1 - h_{ij}) - \beta_h(V_{ij})h_{ij}, \\
 \frac{dn_{ij}}{dt} &= \alpha_n(V_{ij})(1 - n_{ij}) - \beta_n(V_{ij})n_{ij}; \quad (1) \\
 C_m \frac{dV_{ij}}{dt} &= -g_{Na}m_{ij}^3h_{ij}(V_{ij} - V_{Na}) \\
 &\quad -g_L(V_{ij} - V_L) - g_Kn_{ij}^4(V_{ij} - V_K) \\
 &\quad +I_{ext} + D(V_{i-1j} + V_{i+1j} + V_{ij-1} \\
 &\quad +V_{ij+1} - 4V_{ij}), \\
 \frac{dm_{ij}}{dt} &= \alpha_m(V_{ij})(1 - m_{ij}) - \beta_m(V_{ij})m_{ij}, \\
 \frac{dh_{ij}}{dt} &= \alpha_h(V_{ij})(1 - h_{ij}) - \beta_h(V_{ij})h_{ij}, \\
 \frac{dn_{ij}}{dt} &= \alpha_n(V_{ij})(1 - n_{ij}) \\
 &\quad -\beta_n(V_{ij})n_{ij} + S\xi(t). \quad (2)
 \end{aligned}$$

其中, α 为离子通道从关闭状态到开启状态的速率常数, β 表示从开启状态到关闭状态的速率常数. α_k 与 β_k ($k = m, h, n$) 表达式为

$$\alpha_m(V_{ij}) = 0.1(V_{ij} + 40)\varphi(T)/(1$$

$$\begin{aligned}
 &\quad -\exp(-(V_{ij} + 40)/10)), \\
 \alpha_h(V_{ij}) &= 0.07\varphi(T)\exp\left(\frac{(-V_{ij} + 65)}{20}\right), \\
 \alpha_n(V_{ij}) &= 0.01(V_{ij} + 55)\varphi(T)/(1 \\
 &\quad -\exp(-(V_{ij} + 55)/10)), \\
 \beta_m(V_{ij}) &= 4\varphi(T)\exp\left(-\frac{(V_{ij} + 65)}{18}\right), \\
 \beta_h(V_{ij}) &= \frac{\varphi(T)}{(1 + \exp(-(V_{ij} + 35)/10))}, \\
 \beta_n(V_{ij}) &= 0.125\varphi(T)\exp\left(-\frac{(V_{ij} + 65)}{80}\right). \quad (3)
 \end{aligned}$$

方程中 V_{ij} ($i = 1 : N, j = 1 : N$) 是位于 (i, j) 位置神经元膜电位, D 为耦合强度, S 为噪声强度. 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; C_m 为膜电容; g_{Na} , g_K , g_L 分别为钠离子电导最大值、钾离子电导最大值和漏电导; 实验证实, 钠离子电导 g_{Na} 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. 结合膜通道的结构和离子运输的机理, Hodgkin 和 Huxley 对门变量做了如下解释: m, h 代表在特定条件下打开或关闭相应离子通道的概率, 其中 m 为钠离子通道活化过程参数, 表示激活过程中某一特性粒子处于钠通道中正确位置的概率, 需要 3 个粒子同时处于通道正确位置才能打开钠离子通道; h 为钠通道失活化过程参数, 表示某一特性粒子或集团移动的结果关闭钠离子通道的概率, 所以一个钠离子通道打开和关闭的概率为 m^3h ; 钾离子电导的最大值为 g_K , 根据实验结果, 可以拟合出一参数 n 的四次方函数表示打开一个钾离子通道的概率: n 代表了某种离子或过程处于正确位置时才能打开钾离子通道的概率, 4 个基本粒子在膜电场作用下移动到某一位置时 (如通道位置), 才能打开一个钾离子通道, 因此打开一个钾离子通道的概率可以表示为 n^4 .

由于 m 代表钠离子失活化过程参数, n 反映钾离子通道打开概率的参数, 因此方程 (1) 和 (2) 分别反映了噪声对钠离子和钾离子通道的影响. 方程中 $I_{ext} = I_0 + \sin \omega t$ 为外刺激电流, 本文中取 $I_0 = 1.5$, $\omega = 0.0013 \times 2\pi$. 其他参数分别取值 $C = 1\mu F/cm^2$, $g_{Na} = 120 mS/cm^2$, $g_K = 36 mS/cm^2$, $g_L = 0.3 mS/cm^2$, $V_{Na} = 50 mV$, $V_K = -77 mV$, $V_L = -54.4 mV$. 方程中的 $\varphi(T) = 3^{(T-6.3^\circ C)/10}$ 反映温度对神经元的影响.

3 数值计算与讨论

采用 Euler 法对方程 (1) 和 (2) 进行数值计算, 积分步长为 0.02 s. 初值条件为 $V_{ij} = -40.2$, $m_{ij} = 0.1203$, $h_{ij} = 0.9$, $n_{ij} = 0.9$ ($i = 41 : 43$, $j = 1 : 50$); $V_{ij} = 0$, $m_{ij} = 0.5203$, $h_{ij} = 0.7$, $n_{ij} = 0.7$ ($i = 44 : 46$, $j = 1 : 50$); $V_{ij} = 40.0$, $m_{ij} = 0.98203$, $h_{ij} = 0.5$, $n_{ij} = 0.5$ ($i = 47 : 49$, $j = 1 : 50$); $V_{ij} = -61.19389$, $m_{ij} = 0.08203$, $h_{ij} = 0.46012$, $n_{ij} = 0.37726$ (其他位置). 数值结果发现, 无论噪声对钠离子通道还是钾离子通道进行扰动, 当取定一组温度、噪声强度, 随着耦合强度的增大, 神经网络放电时空斑图形成的时空斑图总能从其他形式 (包括线状波、靶波、均匀态) 演化为螺旋波. 图 1 给出了噪声对钠离子通道进行扰动时, 噪声强度为 0.02, 温度分别为 1 °C, 6 °C, 12 °C, 时间

为 200 s 的神经网络放电时空斑图随耦合强度的演化过程. 当温度为 1 °C 时, 随着耦合强度的增大, 神经网络放电时空斑图开始呈现一线状波, 随后时空斑图发生了从螺旋到靶波再到螺旋波的演化过程; 当温度为 6 °C 时, 较小的耦合强度使系统呈现线状波, 增大耦合强度, 系统时空斑图演化为螺旋波; 当温度为 12 °C 时, 较小的耦合强度使系统时空斑图呈现均匀态, 增大耦合强度, 系统时空斑图演化为螺旋波.

噪声对钾离子通道进行扰动时, 图 2 给出了噪声强度为 0.02, 温度分别为 1 °C, 6 °C, 12 °C, 时间为 200 s 时的神经网络放电时空斑图随耦合强度的演化过程. 当温度为 1 °C 时, 随着耦合强度的增大, 系统时空斑图从线状波演化为螺旋波; 当温度为 6 °C 和 12 °C 时, 较小的耦合强度使系统呈现均匀态, 增大耦合强度, 系统时空斑图演化为螺旋波.

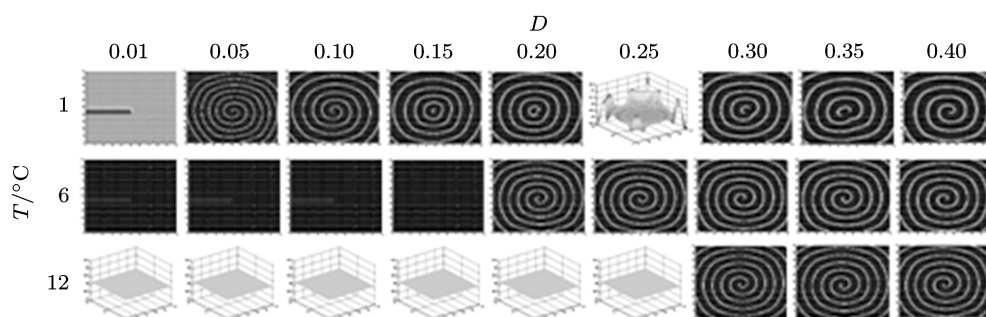


图 1 噪声扰动钠离子通道, 噪声强度 $S = 0.02$, 时间 $t = 200$ s 时神经网络放电的时空斑图随耦合强度的演化图

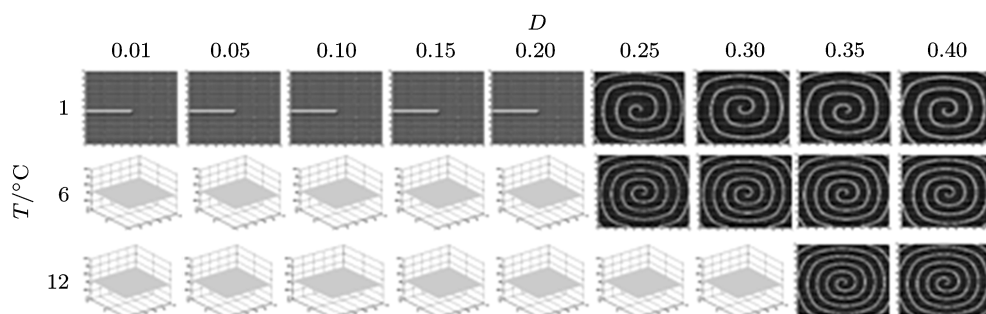


图 2 噪声扰动钾离子通道, 噪声强度 $S = 0.02$, 时间 $t = 200$ s 时神经网络放电的时空斑图随耦合强度的演化图

通过前面的分析发现, 无论噪声扰动钠离子通道还是钾离子通道, 取定一组参数值, 增大耦合强度, 总能诱导系统形成规则的螺旋波. 为了探究钠离子和钾离子通道噪声在螺旋波形成过程中所起的作用, 分别取温度为 1 °C, 6 °C, 12 °C, 噪声强度为 0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05, 计算出每一组参数

下形成螺旋波所需临界耦合强度, 见表 1.

将表 1 中的数据描绘成曲线. 图 3 给出了 $T = 1$ °C, 6 °C, 12 °C 三组温度下, 临界耦合强度随噪声强度变化曲线图. 图中实线为钠离子通道噪声影响, 神经网络放电时空斑图从其他形式向螺旋波演化所需临界耦合强度随噪声强度的变化曲线. 增大

噪声强度, 曲线呈现出下降趋势, 说明钠离子通道噪声降低了螺旋波形成所需的最低耦合强度, 有利于螺旋波的形成. 虚线为钾离子通道噪声影响时, 临界耦合强度随噪声强度的变化曲线. 随着噪声强度的增大, 曲线呈现出上升趋势, 说明钾离子通道噪声使螺旋波形成所需的最低耦合强度值增大,

所以钾离子通道噪声不利于螺旋波的形成. 如果螺旋波的形成是一种去相干共振 (firing coherence) 现象, 那么上述结果与文献 [19] 的结果一致, 即钠离子通道噪声降低了神经网络激发行为的相干共振, 而钾离子通道噪声加强了神经网络激发行为的相干共振.

表 1 噪声扰动不同离子通道时神经网络形成螺旋波所需的临界耦合强度

$T/^{\circ}\text{C}$		噪声强度 S					
		0	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05
Na^+ 通道	1	0.2503	0.0596	0.0452	0.0352	0.0364	0.0217
	6	0.1919	0.1850	0.1692	0.1581	0.1474	0.1368
	12	0.2684	0.2595	0.2508	0.2422	0.2337	0.2253
K^+ 通道	1	0.2503	0.2997	0.3531	0.3512	0.3605	0.3439
	6	0.1919	0.2185	0.2453	0.2739	0.3049	0.3514
	12	0.2684	0.2886	0.3089	0.3309	0.3589	0.3898

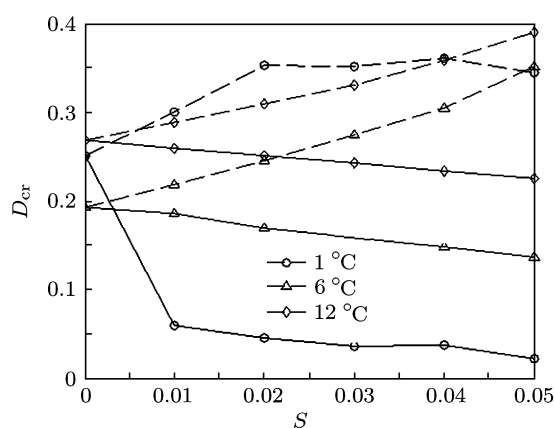


图 3 形成螺旋波所需临界耦合强度随噪声强度变化曲线图, 其中实线代表钠离子通道噪声影响下形成螺旋波所需临界耦合强度变化曲线, 虚线代表钾离子通道噪声影响下临界耦合强度变化曲线

基于这一研究结果, 我们可以对文献 [20] 的研究结果, 既相关联的通道噪声作用下, 随着噪声强度的增加螺旋波形成, 继续增大噪声强度螺旋波又消失的演化过程做出解释. 取定适当的温度、耦合强度, 当噪声强度较小时, 钠离子和钾离子通道噪声作用下的神经网络都没有达到形成螺旋波所需的耦合强度值, 因此螺旋波不能形成; 继续增大噪声强度到某一合适值, 钠离子通道噪声影响下, 神经网络的耦合强度值已经达到了使系统形成螺旋波所需的最低耦合强度, 而钾离子通道影响下神经网络的耦合强度值还没有达到形成螺旋波所需的最低耦合强度, 即钠离子通道噪声和钾离子通道

噪声在对系统的影响过程形成了竞争, 首先钠离子通道噪声在竞争中占优势, 螺旋波形成; 继续增大噪声强度, 由于钾离子通道噪声影响下形成螺旋波所需的临界耦合强度随噪声强度变化呈现上升趋势, 而钠离子通道噪声影响下形成螺旋波所需的临界耦合强度随噪声强度变化的下降量却是有限的, 故在竞争过程中, 当噪声强度达到某一较大值时, 钾离子通道噪声占主导地位, 使螺旋波不能形成.

分析发现, 温度影响着神经网络系统对噪声的敏感性. 图 3 中, 同一温度对应的一组实线与虚线的夹角随温度的增大而减小, 即在较低的温度下, 较小的噪声强度改变就能引发临界耦合强度较大的改变. 说明降低温度能够使神经网络系统对噪声影响更加敏感. 此外, 从图 3 中还可以发现, 当噪声强度 $S = 0$, 即整个系统没有噪声影响, 温度分别为 1°C , 6°C , 12°C 时, 系统形成螺旋波所需的临界耦合强度分别为 0.2503, 0.1919, 0.2684, 随温度的变化规律是由高到低再到高的过程, 说明较低和较高的温度都不利于螺旋波的形成, 而是存在一个适当温度区域最有利于螺旋波的形成. 如果给定合适的耦合强度和噪声强度, 改变温度, 可以观察到神经网络时空斑图从非螺旋波到螺旋波再到非螺旋波的演化过程, 即存在适当温度区域, 可以诱导螺旋波形成, 过大或过小的温度都将使螺旋波破碎. 这一结论在文献 [22—25] 中得到验证.

通道噪声扰动不仅影响形成螺旋波所需的临

界耦合强度, 而且在特定参数条件下还影响螺旋波的传播速度. 图 4 给出了钾离子通道噪声作用下, 耦合强度 $D = 0.4$ 时, 神经网络系统放电时空斑图. 较低的温度 ($1\text{ }^{\circ}\text{C}$, $6\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 随着噪声强度增大螺旋波变得稀疏, 说明噪声降低了螺旋波的传播速度;

而较高温度 ($12\text{ }^{\circ}\text{C}$) 时, 螺旋波的传播速度受噪声的影响很小. 也进一步说明了较低温度使系统对噪声的影响更加敏感. 但是, 研究发现钠离子通道噪声对螺旋波传播速度几乎没有影响. 进一步体现了不同通道噪声扰动对神经系统影响不同.

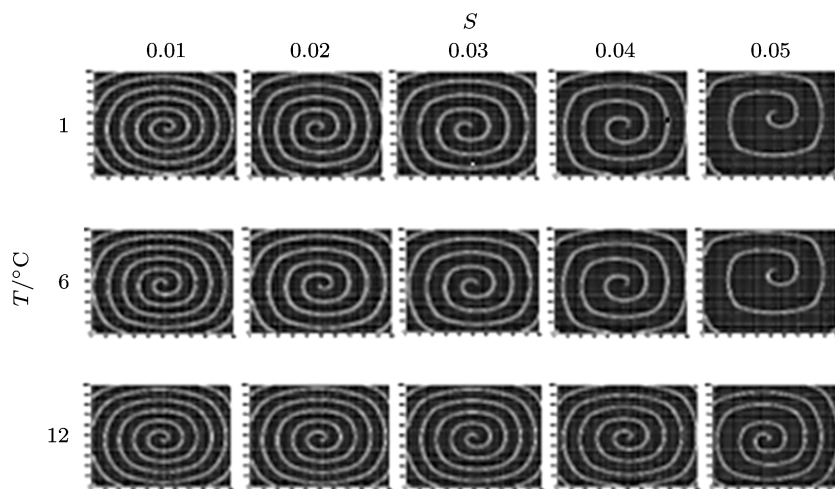


图 4 钾离子通道噪声影响, 耦合强度 $D = 0.4$ 时, 不同参数下神经网络系统放电时空斑图

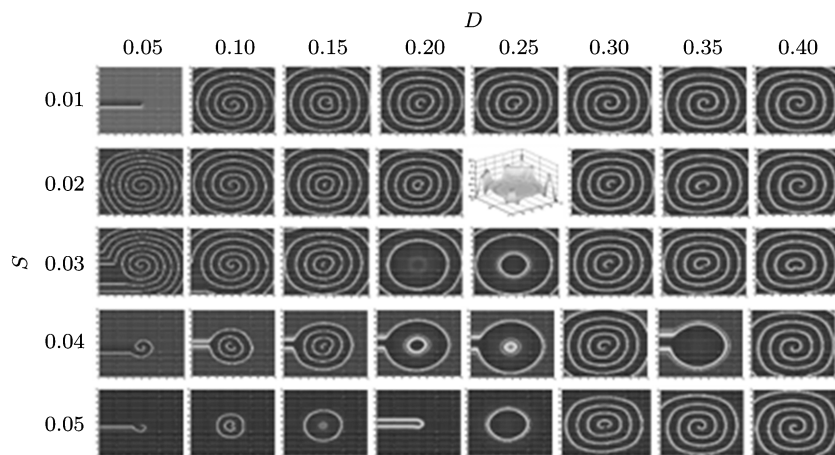


图 5 钠离子通道噪声影响, 温度 $T = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 不同参数下神经网络系统放电时空斑图

非对称初始条件下, 系统将以缺陷点为波头演化为螺旋波. 但是, 适当的耦合强度和温度, 钠离子通道噪声能够消除神经网络系统中的缺陷点和非对称性, 从而消除螺旋波, 被靶波取而代之, 如图 5 所示. 图 5 给出了噪声扰动钠离子通道, 温度为 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 神经网络系统放电时空斑图. 改变噪声强度时, 靶波存在的耦合强度范围发生了变化, 例如, 噪声强度为 0.01 时, 靶波出现在耦合强度为 $0.15\text{--}0.25$ 区域; 噪声强度为 0.02 时, 靶波出现在耦合强度为 $0.15\text{--}0.35$ 区域; 噪声强度为 0.03 时, 靶波出现在耦合强度为 $0.15\text{--}0.40$ 区域; 噪声

强度为 0.04 时, 靶波出现在耦合强度为 $0.10\text{--}0.35$ 区域; 噪声强度为 0.05 时, 靶波出现在耦合强度为 $0.15\text{--}0.30$ 区域. 数值结果表明存在最佳噪声强度, 使得靶波存在的耦合强度范围最大. 研究结果还发现, 当温度为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$, $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 钠离子通道噪声扰动不会使系统出现螺旋波转化为靶波的现象, 图 1 中 $S = 0.02$ 的结果也说明这样的现象. 分析钾离子通道噪声扰动, 系统也没有出现靶波的现象. 由此可见螺旋波转化为靶波需要极为苛刻的条件. 而螺旋波与靶波之间的转化是一个非常有趣的现象. 例如, 心颤和心动过速就是由于心脏中的靶

波(正常)失稳转化为螺旋波所致[26—33]. 因此, 研究螺旋波和靶波之间的转换对控制和消除心脏中的螺旋波有理论指导意义.

4 结 论

分别研究了 H-H 神经元网络在钠离子和钾离子通道噪声扰动下, 神经网络放电时空斑图的演化规律. 发现无论噪声扰动钠离子通道还是钾离子通道, 当取定一组温度、噪声强度, 随着耦合强度增大到某一临界值, 神经网络放电时空斑图总能从其它形式(包括线状波、靶波、均匀态)演化为螺旋波. 但是, 噪声分别通过钾离子通道和钠离子通道对神经系统实行影响, 结果有显著的区别. 分别作出钠离子和钾离子通道噪声扰动下临界耦合强度

随噪声强度的变化曲线, 分析发现钠离子通道噪声有利于神经网络系统螺旋波的形成, 而钾离子通道噪声不利于螺旋波的形成. 基于这一研究结果, 我们对相关联通道噪声作用下神经网络时空斑图的演化规律做出了合理的解释. 此外, 还发现温度影响着神经网络对噪声作用的敏感性, 较低的温度使得神经系统对噪声的影响更加敏感; 本文结果还验证了无噪声情况下神经网络时空斑图受温度的影响规律, 即较低和较高的温度都不利于螺旋波的形成, 而是存在一个适当温度区域最有利于螺旋波的形成. 最后, 数值结果表明, 在合适的温度下钠离子通道噪声的影响可以消除系统原有的非对称性和缺陷点, 从而消除系统中原有的螺旋波, 形成靶波. 而且存在适当噪声强度, 使得能够形成靶波的耦合强度范围最大.

-
- [1] Narahashi T, Anderson C N, Moore W J 1967 *The Journal of General Physiology* **50** 1413
 - [2] Song Y L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2334 (in Chinese) [宋艳丽 2010 物理学报 **59** 2334]
 - [3] Armstrong M C, Binstock L 1665 *The Journal of General Physiology* **48** 859
 - [4] Steinmetz N P, Manwaniand A, Koch C 2000 *Journal of Computational Neuroscience* **9** 133
 - [5] Shou T D 2001 *Neurobiology* (Beijing: Higher Education Press) p40 (in Chinese) [寿天德 2001 神经生物学(北京: 高等教育出版社) 第 40 页]
 - [6] Shepherd G M 1998 *Neurobiology* 2nd ed. (New York: Oxford University Press) p42
 - [7] Hodgkin A L, Huxley A F 1952 *J. Physiol.* **116** 449
 - [8] Hodgkin A L, Huxley A F 1952 *J. Physiol.* **117** 500
 - [9] Correa A M, Bezanilla F, Latorre R 1992 *Biophys. J.* **61** 1332
 - [10] Gerhard Schmid, Igor Goychuk 2004 *Physica A* **344** 665
 - [11] Armstrong M C, Hille B 1972 *The Journal of General Physiology* **59** 388
 - [12] Schmid G, Goychuk I, Hanggi P 2001 *Europhys. Lett.* **56** 22
 - [13] Gong Y B, Xie Y H, Xu B and Ma X G 2009 *Sci China Ser B* **52** 20.
 - [14] Gong Y B, Xu B, Ma X G, Han J Q, 2008 *Sci China Ser B* **38** 104 (in Chinese) [龚玉兵, 徐舶, 马晓光, 韩吉衢 2008 中国科学 B **38** 104]
 - [15] Qiao X Y, Li G, Lin L, He B J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 2448 (in Chinese) [乔晓艳李刚林凌贺秉军 物理学报 **56** 2448]
 - [16] Driessche W V 1984 *J. Physiol.* **356** 79
 - [17] Martyn P N, Alexander V P 2004 *Prog. Biophys. Mol. Bio.* **85** 501
 - [18] Fenton F H, Cherry E M, Hasting H M 2002 *Chaos* **12** 852
 - [19] Liu S Q, Lu Q S, Wang Q 1998 *Acta. Phys. Sin.* **47** 1057 (in Chinese) [刘深泉, 陆启韶, 王琪 1998 物理学报 **47** 1057]
 - [20] Zhang G Y, Ma J, Gan Z N, Chen Y 2008 *Acta. Phys. Sin.* **57** 6815 (in Chinese) [张国勇, 马军, 甘正宁, 陈勇 2008 物理学报 **57** 6815]
 - [21] Li Y Y, Zhang H M, Wei C L, Yang M H, Gu H G, Ren W 2009 *Journal of Dynamics and Control.* **7** 230 (in Chinese) [李玉叶, 张慧敏, 魏春玲, 杨明浩, 古华光, 任维 2009 动力学与控制学报 **7** 230]
 - [22] Liu S B, Wu Y, 2010 *Journal of Dynamics and Control* **8** 284 (in Chinese) [刘少宝, 吴莹 2010 动力学与控制学报 **8** 284]
 - [23] Du M M, Wu Y, Pang J Z 2010 *The Third International Conference on Dynamics, Vibration and Control (ICDVC-2010)*
 - [24] Sun X J, Lei J Z, Perc M, Lu Q S, Lv S J 2011 *Eur. Phys. J. B* **79** 61
 - [25] Yu G, Ma J, Tang J, Yi M, Jia Y 2008 *Int. J. Mod. Phys. B* **69** 22
 - [26] Rappel W J 2001 *Chaos* **11** 71
 - [27] Qu Z L, Kil J, Xie F G, Garfinel A, N. Weiss J 2000 *Biophysical Journal* **78** 2761
 - [28] Martyn P N, Alexander V P 2004 *Rrog. Biophys. Mol. Bio.* **85** 501
 - [29] Sinha S, Pande A, Pandit R 2001 *Phys. Rev. Lett.* **86** 3678
 - [30] Yang J Z, Garfinkel A 2003 *Phys. Rev. E* **68** 066312
 - [31] Yang J Z, Xie F G, Qu Z L 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 148302
 - [32] Martin Hall G, Daniel J. Gauthier 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 198102
 - [33] Hu G, Xiao J H, Chua L O, Ladislav Pivka 1998 *Phys. Rev. Lett.* **80** 1884

Effects of sodium and potassium ion channel fluctuation on the spatiotemporal patterns of neuronal network*

Liu Shao-Bao¹⁾²⁾ Wu Ying^{1)2)†} Hao Zhong-Wen²⁾ Li Yin-Jun²⁾ Jia Ning²⁾

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

2) (Department of Engineering Mechanics, School of Sciences, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

(Received 1 March 2011; revised manuscript received 19 May 2011)

Abstract

Taking into account sodium and potassium ion channel noises, the evolution of the patterns of neuronal networks is investigated. No matter what kind of ion channel noise is working, with coupling coefficient increasing, the spatiotemporal patterns of the neuronal network can be evolved into spiral waves when temperature and noise strength are given, and there is a coupling coefficient threshold for forming a spiral wave. The analysis shows that sodium ion channel noise contributes to the formation of spiral waves in neurons network, while the potassium ion channel noise is not conducive to the formation of spiral waves. In addition, it is found that lower temperature can make the neurons network more sensitive to noise. Finally, the transformation of spiral waves into target waves, in the case of specific parameters is discussed.

Keywords: Hodgkin-Huxley model, ion channel noise, spatiotemporal patterns, spiral waves

PACS: 05.45.-a, 87.19.lc, 87.18.Sn

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10972179, 10872155, 10602003).

† E-mail: wying36@163.com