

电磁辐射诱发神经元放电节律转迁的动力学行为研究

李佳佳 吴莹 独盟盟 刘伟明

Dynamic behavior in firing rhythm transitions of neurons under electromagnetic radiation

Li Jia-Jia Wu Ying Du Meng-Meng Liu Wei-Ming

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 030503 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.030503

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.030503>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I3>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

一类自突触作用下神经元电路的设计和模拟

[Simulation of electric activity of neuron by setting up a reliable neuronal circuit driven by electric autapse](#)

物理学报.2015, 64(5): 058702 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.058702>

耦合分数阶双稳态振子的同步、反同步与振幅死亡

[Synchronization, antisynchronization and amplitude death in coupled fractional order bistable oscillators](#)

物理学报.2013, 62(21): 210504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.210504>

三个不同时间尺度的电耦合模型的组合簇放电

[Compound bursting in an electrical coupling model with three different time scales](#)

物理学报.2013, 62(17): 170508 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.170508>

神经网络螺旋波诱发机理研究

[Modulation of nonlinear coupling on the synchronization induced by linear coupling](#)

物理学报.2013, 62(2): 028701 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.028701>

"Hopf/homoclinic" 簇放电和 "SubHopf/homoclinic" 簇放电之间的同步

[Synchronization of "Hopf/homoclinic" bursting with "SubHopf/homoclinic" bursting](#)

物理学报.2013, 62(2): 020509 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.020509>

电磁辐射诱发神经元放电节律转迁的动力学行为研究*

李佳佳 吴莹† 独盟盟 刘伟明

(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)

(2014年8月12日收到; 2014年9月10日收到修改稿)

本文首先根据能量转换理论建立了电磁辐射影响下神经元电流变量模型, 然后结合Hodgkin-Huxley(HH)神经元模型研究了电磁辐射对单个神经元以及耦合神经元放电行为的影响. 结果表明, 随着电磁辐射强度的增大, 神经元放电率逐渐减小, 最后达到一个比较稳定的值. 神经元原有的周期型放电由于辐射强度的增大而逐步过渡到簇放电状态, 并借助动态分岔理论解释了这种放电模式的转换. 同时证明了磁辐射对单个神经元放电的影响可以通过神经元间的耦合传递到临近其他神经元中.

关键词: 神经动力学, 电磁辐射, 簇放电, 动态分岔

PACS: 05.45.a, 87.19.lq, 87.19.lp, 87.19.lj

DOI: 10.7498/aps.64.030503

1 引言

近年来非线性科学的快速发展使得非线性科学知识和方法被应用到各个领域, 如生物物理学家基于一些神经元模型开创了计算神经科学领域. 从经典的HH神经元模型^[1]开始, 人们提出了许多神经元模型^[2]来研究神经元电活动的动力学行为, 神经元对外界刺激的响应, 神经元放电模式的迁移等^[3-7]. 神经系统往往包含千万计的神经元, 因此, 神经元的集群动力学行为^[8], 如神经网络斑图动力学研究^[9-11]可为认知神经系统对外界信号响应, 神经系统疾病研究提供重要的理论指导. 研究表明: 神经元的突触结构特别是自突触结构^[12], 神经元的网络连接方式, 以及噪声都可以影响神经元群体放电行为的迁移^[13,14].

近年来许多研究表明电磁辐射对于大脑会产生直接的影响, 借助非线性理论方法研究电磁辐射和大脑神经放电具有很重要的意义. Kesari等科学家研究发现长期的电磁辐射和儿童白血病的

高发、脑瘤的产生、基因编码的异常, 以及脑血屏障的破坏都有直接或间接的关系^[15-20]. Wachtel等的神经实验研究发现电磁辐射可以使神经元放电率变小^[21]. 近年来的研究也表明了电磁辐射和大脑神经放电节律有很大关系(科学家在长期受磁辐射作用的神经组织中发现了类似阿尔兹海默症(Alzheimer's disease, AD)^[22]和帕金森氏症(Parkinson's disease, PD)^[23-26]的神经放电形式, 特别指出PD的一种产生原因被发现和神经放电节律的改变有直接关系^[27-29]). 因此, 研究电磁辐射对神经元放电节律的影响具有重要的意义.

文献^[21]提出的电磁能和神经元放电能量转换的假设——电磁辐射一部分能量被神经元吸收, 并转化为神经元膜电流——为我们从模型角度来研究电磁辐射对大脑的影响提供了可能性. 基于以上假设和电学基本定律建立了数学模型来描述这一能量转化过程, 并利用HH神经元模型研究电磁辐射对神经元放电节律的影响. 同时研究了电磁辐射影响下神经放电模式的改变在双向电突触耦合下的传播特性.

* 国家自然科学基金(批准号: 11272242)和陕西省自然科学基金(批准号: S2014JC12575)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wying36@163.com

2 考虑电磁辐射的神经元模型

根据文献[21], 电磁辐射一部分能量被神经元吸收, 并转化为神经元膜电流改变量 ΔI , 我们称为辐射膜电流. 根据电学基本理论, 给出 ΔI 的表达式如下:

$$\Delta I = \sqrt{g_m}(\sqrt{|P|} - \sqrt{|P - P_o|}), \quad (1)$$

其中 g_m 表示神经元对电磁能量的吸收率, 是神经元膜的固有属性, 它和电导具有相同的量纲, 文中取 $g_m = 90 \text{ mS/cm}^2$ (g_m 具有电导的性质, 选取 $g_L < g_m < g_{Na}$). P 为单个神经元电路总功率, 根据神经元能量理论[30–33], 神经元功率表达式为

$$P = vI_{\text{stim}} - g_{Na}m^3h(v - v_{Na})^2 - g_Kn(v - v_K)^2 - g_L(v - v_L)^2 + P_o, \quad (2)$$

其中 v , m , h , n 分别对应神经元膜电压、钾和钠离子通道打开或关闭的概率. 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; 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. 方程中 $P_o = S \sin(2\pi ft)$ 表示神经元吸收电磁辐射并转化为自身电能的功率, f 表示电磁辐射的频率, S 代表电磁辐射强度, 单位为 nW, 取值范围为 0–100 nW (考虑到电磁辐射的辐射总强度在 mW 的数量级上[34], 分布到单个神经元上并且被单个神经元吸收的辐射功率的数量级可以小到 nW 的程度).

本文采用 Yu 等[35,36] 改进后的 HH 神经元模型, 这种模型可以很好地适应哺乳动物皮层 37 °C 左右的温度, 并且可以反映人体温度下大脑代谢能量的最优利用. 在 HH 神经元中施加磁辐射影响的膜片电流改变量辐射膜电流 ΔI , 则考虑电磁辐射的神经元模型方程如下:

$$C \frac{dv}{dt} = I_{\text{stim}} - g_{Na}m^3h(v - v_{Na}) - g_Kn(v - v_K) - g_L(v - v_L) + \Delta I, \quad (3)$$

$$\frac{dy}{dt} = \alpha_y(1 - y) - \beta_y y, \quad y = m, n, \quad (4)$$

$$\frac{dh}{dt} = \left(\frac{1}{1 + e^{(v+60)/6.2}} - h \right) (\alpha_h + \beta_h), \quad (5)$$

其中,

$$\alpha_m = \phi \frac{0.182(v + 30)}{1 - e^{-(v+30)/8}};$$

$$\beta_m = -\phi \frac{0.124(v + 30)}{1 - e^{(v+30)/8}},$$

$$\alpha_h = \phi \frac{0.028(v + 45)}{1 - e^{-(v+45)/6}};$$

$$\beta_h = -\phi \frac{0.0091(v + 70)}{1 - e^{(v+70)/6}},$$

$$\alpha_n = \phi \frac{0.01(v - 30)}{1 - e^{-(v-30)/9}};$$

$$\beta_n = -\phi \frac{0.002(v - 30)}{1 - e^{(v-30)/9}},$$

方程中 v 表示神经元膜电位, 单位为 mV. 神经元膜容抗 $C = 0.75 \text{ } \mu\text{F/cm}^2$. 钠离子通道、钾离子通道、漏通道最大电导分别取 $g_{Na} = 150 \text{ mS/cm}^2$, $g_K = 40 \text{ mS/cm}^2$, $g_L = 0.033 \text{ mS/cm}^2$, 这些通道的反转电位分别为 $v_{Na} = 60 \text{ mV}$, $v_K = -90 \text{ mV}$, $v_L = -70 \text{ mV}$. $\phi = Q_{10}^{(T^\circ\text{C}-23)/10}$ 表示神经系统的温度影响因子, 其中温度 $T = 37 \text{ }^\circ\text{C}$, $Q_{10} = 2.3$. I_{stim} 为外加刺激电流, 在数值仿真中, 一般取 $I_{\text{stim}} = 5 \text{ } \mu\text{A/cm}^2$.

3 数值分析

3.1 手机电磁辐射对单个神经元节律的影响

考虑辐射强度变化对神经放电影响时, 我们着重考虑 900 MHz 和 1800 MHz 两种辐射频率 (参考全球通讯系统 GSM 电磁波频率[15]). 图 1 给出了神经元放电率随磁辐射强度 S 增大的变化曲线. 可以看出, 随着辐射强度增大, 神经元放电率逐渐减小, 而且当辐射频率为 1800 MHz 时放电率降低的幅度更大. 进一步分析发现, 两条放电率变化曲线

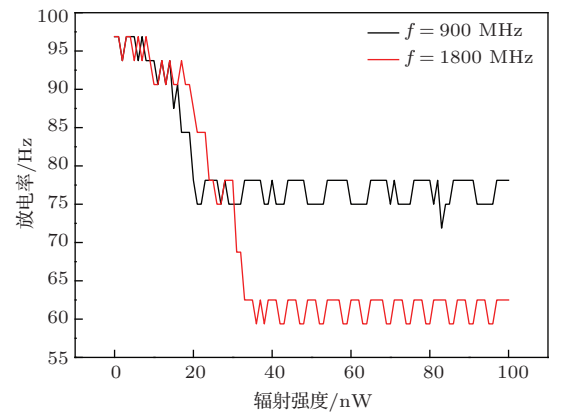


图 1 神经元放电率随辐射强度 S 增加的变化规律 (其中辐射频率 f 分别取 900 MHz 和 1800 MHz)

都存在一个台阶式的突降阶段和稳定的微幅振荡阶段. 分析磁辐射影响下神经元放电模式的改变, 我们发现, 神经元放电率变化曲线中台阶式的突降阶段对应神经元由周期放电经非周期放电转化为簇放电的过程, 一旦形成稳定的簇放电, 神经元放电率相对于 S 变化具有一定的鲁棒性, 此时曲线出现稳定的微幅振荡阶段, 结果如图 2 所示.

图 2 分别给出了 900 MHz 和 1800 MHz 磁辐射下, 神经元放电模式随辐射强度 S 的变化过程. 对应 900 MHz 磁辐射, 神经元首先是周期放电, 随着 S 增大, 神经元出现非周期放电, 大约在 $S = 20$ 时

神经元产生稳定形式的周期 5 簇放电; 磁辐射为 1800 MHz 时, 有同样的现象, 神经元由当初的周期放电, 随着 S 增大, 出现非周期放电, 大约在 $S = 40$ 时神经元形成稳定的周期二簇放电. 两种磁辐射情况下, 神经元形成稳定的周期簇放电. 图 2 中神经元形成稳定的簇放电对应的 S 值与图 1 中放电率变化曲线发生台阶式突降对应的 S 值相符合. 磁辐射影响下神经元形成稳定的周期簇放电后, 神经元放电模式基本保持不变, 放电率只会在较小的范围波动.

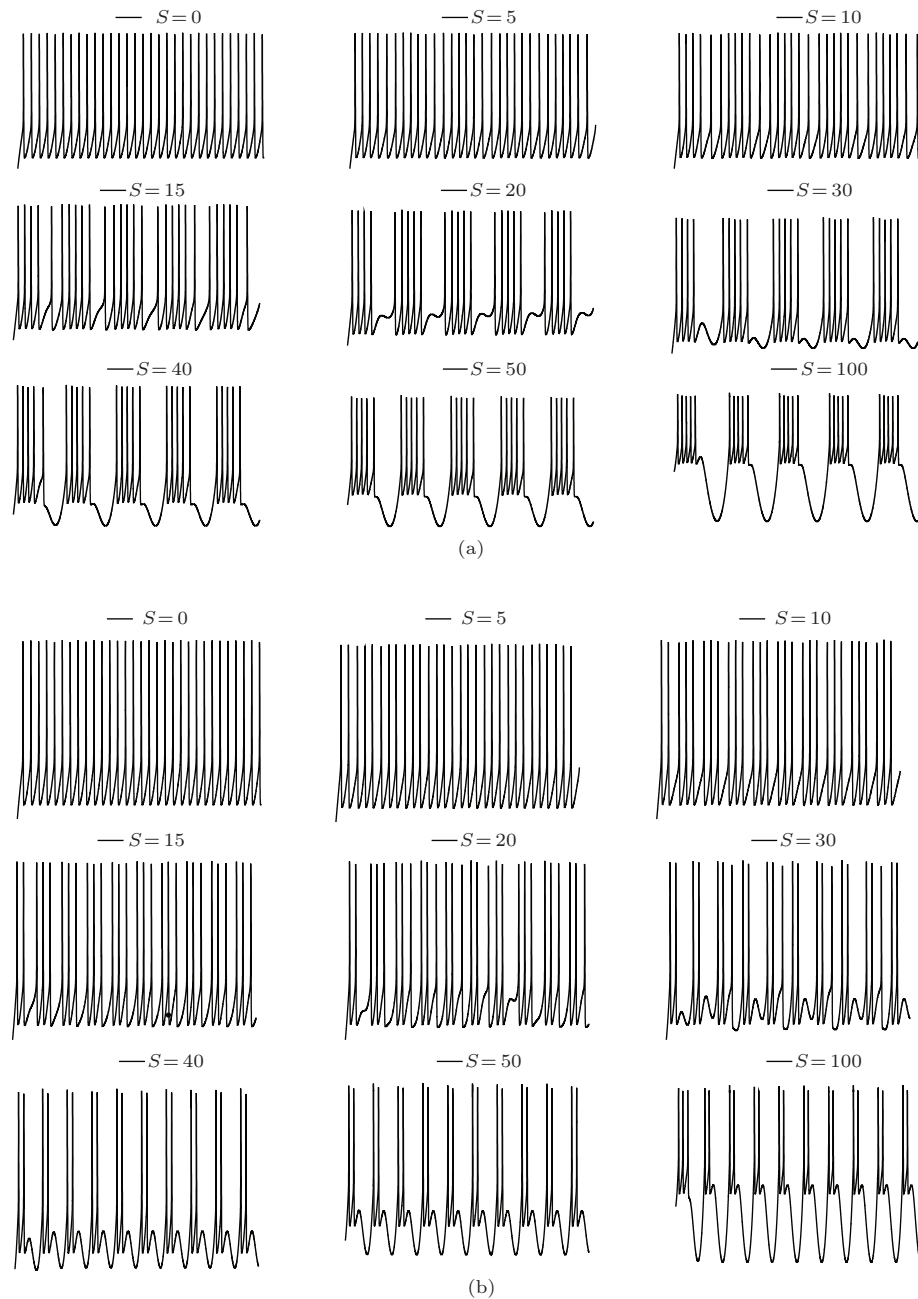


图 2 电磁辐射影响下神经放电模式的转化过程 (a) 辐射频率 f 为 900 MHz 时, 辐射强度 S 分别取 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100 对应的放电模式; (b) 辐射频率 f 为 1800 MHz 时, 辐射强度 S 分别取 0, 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 100 对应的放电模式

关于簇放电产生的原因有许多种解释, Terman 等^[37]通过依赖钙的钾电流解释了神经系统簇放电产生的机理. 本文将结合神经系统动态分岔理论解释簇放电产生的原因.

图3给出了电磁辐射强度为零(此时 $\Delta I = 0$) 时神经元动作电位随 I_{stim} 变化的分岔图, 根据神经元不同放电类型, 可以分为三个区域: A 区, $I_{\text{stim}}[-12, 0.3]$, 系统在该参数区域存在三个或两个平衡点, 神经元对应静息态; B 区, $I_{\text{stim}} [0.3, 6]$, 存在不稳定平衡点和稳定的极限环, 极限环对应神经元周期放电; C 区, $I_{\text{stim}} [6, 53]$, 存在一个稳定的平衡点、不稳定极限环和稳定的极限环组成的双稳态, 神经元放电状态依赖不同的初始条件. D 区, $I_{\text{stim}} [53, +\infty]$, 系统只有一个稳定的平衡点, 神经元对应静息态, 由于 D 区刺激电流已经将近达到 60, 在本文的研究中讨论意义不大. 文中初始值取 $v_0 = -100 \text{ mV}$, 当 I_{stim} 取值位于 B 区和 C 区时神经元周期放电.

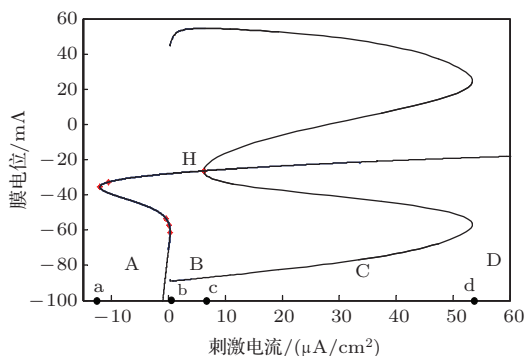


图3 电磁辐射强度 S 为零时神经膜电位 v 关于刺激电流 I_{stim} 的分岔图(点 a, b, c, d 将横坐标轴分为 4 个区间: A 表示稳定的平衡态; B 表示含有一个极限环的单稳态; C 表示双稳态; D 表示静息状态)

在方程(3)中, 将 $I_{\text{stim}} + \Delta I$ 看作神经系统受到的外界总刺激电流, 其中 I_{stim} 是常数, 而 ΔI 为周期变化, 如图4所示(辐射频率 1800 MHz, 辐射强度 50 nW). 当取 $I_{\text{stim}} = 5$, $\Delta I = 0$ 时, 神经元状态对应图3中 B 区域, 初始阶段($\Delta I = 0$) 神经元周期放电, 随着 ΔI 的增加神经元状态由 B 区域过渡到 C 区域, 仍然为周期放电, 由于 ΔI 的周期性, 当 ΔI 升到最大值后会减小, 神经元状态又从 C 区域经过 B 返回到 A 区域, 在 A 区域时神经元呈现静息状态. ΔI 再次周期变化, 神经元放电状态也重复前一个过程, 周而复始, 形成了周期簇放电过程.

事实上, 只有当神经元状态经历 A 区域, 导致

静息状态出现, 才可能形成簇放电, 即簇放电产生的条件是 $(I_{\text{stim}} + \Delta I_{\text{min}}) < 0.3$. 根据图4中 ΔI 时间历程曲线, $\Delta I_{\text{min}} \approx -10$, $(I_{\text{stim}} + \Delta I_{\text{min}}) \approx -5$, 满足神经元形成簇放电的条件. 图5给出 $I_{\text{stim}} = 20$, $(I_{\text{stim}} + \Delta I_{\text{min}}) \approx 10$ 时神经元放电时间历程, 由于不满足产生簇放电的条件, 神经元仅仅处于非周期放电.

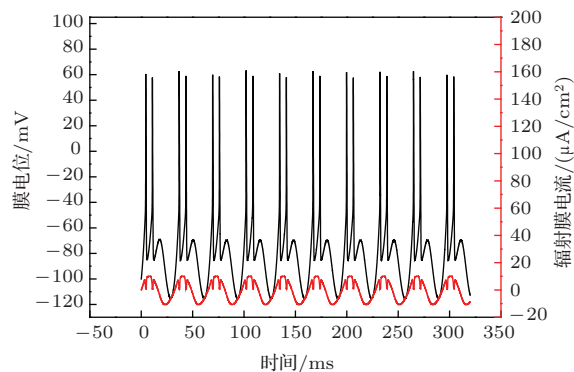


图4 神经元膜电位 (v) 和电磁辐射产生的辐射膜电流 (ΔI) 的时间序列(其中电磁辐射强度 $S = 50$, 电磁辐射频率 $f = 1800 \text{ MHz}$, 刺激电流 $I_{\text{stim}} = 5$)

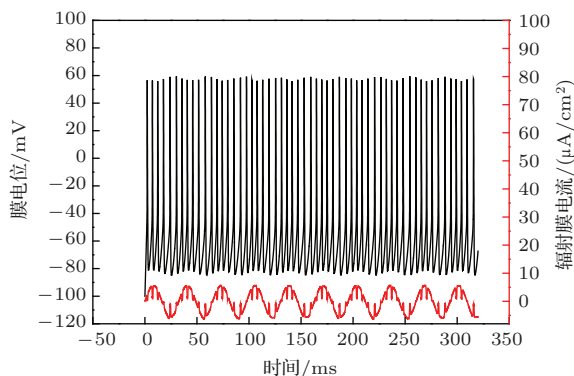


图5 神经元膜电位 (v) 和电磁辐射产生的辐射膜电流 (ΔI) 的时间序列(其中电磁辐射强度 $S = 50$, 电磁辐射频率 $f = 1800 \text{ MHz}$, 刺激电流 $I_{\text{stim}} = 20$)

为了研究电磁辐射诱导单个神经元放电模式转迁对神经网络的影响, 我们引入神经元1和神经元2双向电耦合连接的模型如下:

$$C \frac{dv_{N1}}{dt} = I_{\text{stim}} - g_{\text{Na}} m_{N1}^3 h_{N1} (v_{N1} - v_{\text{Na}}) - g_{\text{K}} n_{N1} (v_{N1} - v_{\text{K}}) - g_{\text{L}} (v_{N1} - v_{\text{L}}) + \Delta I_{N1} + D(v_{N2} - v_{N1}), \quad (6)$$

$$C \frac{dv_{N2}}{dt} = I_{\text{stim}} - g_{\text{Na}} m_{N2}^3 h_{N2} (v_{N2} - v_{\text{Na}}) - g_{\text{K}} n_{N2} (v_{N2} - v_{\text{K}}) - g_{\text{L}} (v_{N2} - v_{\text{L}}) + \Delta I_{N2} + D(v_{N1} - v_{N2}), \quad (7)$$

$$P_{N1} = v_{N1} I_{\text{stim}} - g_{\text{Na}} m_{N1}^3 h_{N1} (v_{N1} - v_{\text{Na}})^2 - g_{\text{K}} n_{N1} (v_{N1} - v_{\text{K}})^2 - g_{\text{L}} (v_{N1} - v_{\text{L}})^2 + P_{\text{o}}^{N1} + D v_{N1} (v_{N2} - v_{N1}), \quad (8)$$

$$P_{N2} = v_{N2} I_{\text{stim}} - g_{\text{Na}} m_{N2}^3 h_{N2} (v_{N2} - v_{\text{Na}})^2 - g_{\text{K}} n_{N2} (v_{N2} - v_{\text{K}})^2 - g_{\text{L}} (v_{N2} - v_{\text{L}})^2 + P_{\text{o}}^{N2} + D v_{N2} (v_{N1} - v_{N2}), \quad (9)$$

其中 v_{N1} 表示神经元1的膜电位, v_{N2} 表示神经元2的膜电位. P_{N1} 和 P_{N2} 分别为神经元1和神经元2的磁辐射功率值, D 是两个神经元间的耦合强度.

分别将 900 MHz 和 1800 MHz 电磁辐射施加到神经元1上, 同时观察两个神经元耦合前 ($D = 0$) 和耦合后 ($D = 1$) 放电模式的变化. 可以看到, 耦合前神经元1都是簇放电, 而神经元2为周期放电, 如图 6(a), 图 7(a) 所示, 耦合后两个神经元同步于相同的周期簇放电, 如图 6(b), 图 7(b) 所示. 说明电磁辐射可以通过神经元间的相互耦合影响神经网络中的其他神经元.

进一步分析发现, 即使两个耦合神经元分别受到不同频率磁辐射影响, 同样也可以产生同步簇放电, 如图 8 所示.

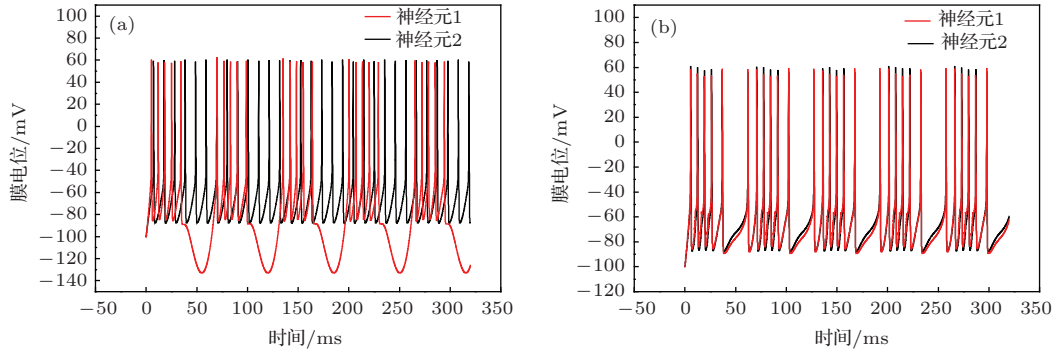


图6 神经元1(受到 $S = 50$, $f = 900$ MHz 的磁辐射)的簇放电模式对神经元2(无电磁辐射影响)放电的影响 (a) 耦合强度 $D = 0$; (b) 耦合强度 $D = 1$

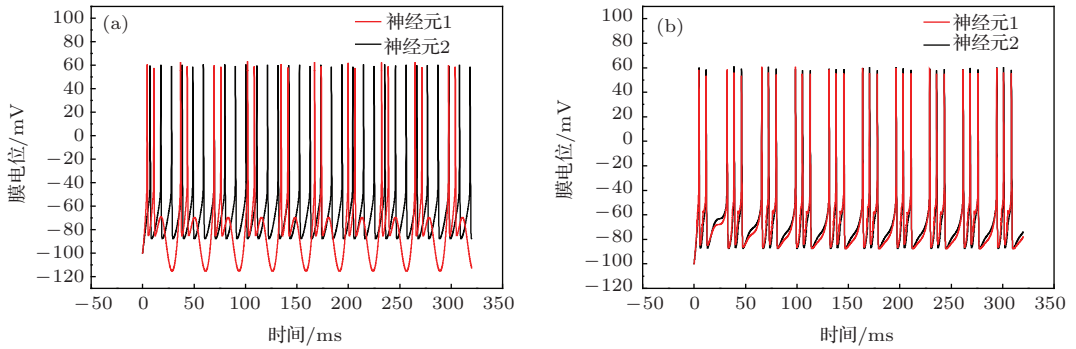


图7 神经元1(受到 $S = 50$, $f = 1800$ MHz 的磁辐射)的簇放电模式对神经元2(无电磁辐射影响)放电行为的影响 (a) 耦合强度 $D = 0$; (b) 耦合强度 $D = 1$

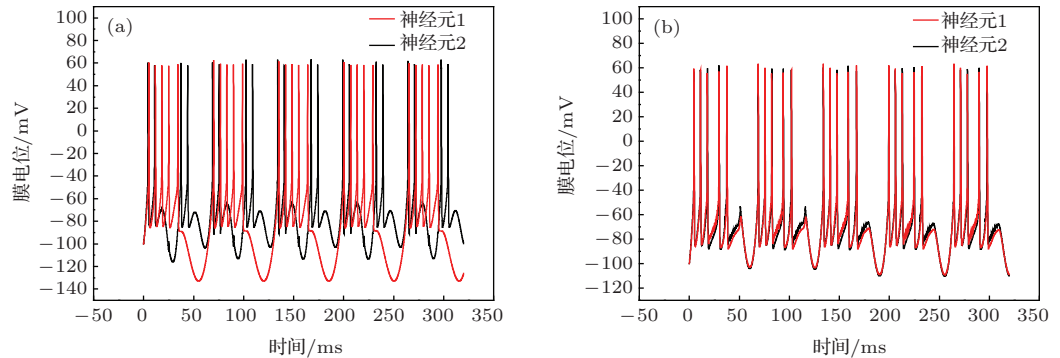


图8 神经元1(受到 $S = 50$, $f = 900$ MHz 的磁辐射)的放电模式对神经元2(受到 $S = 50$, $f = 1800$ MHz 的磁辐射)放电行为的影响 (a) 耦合强度 $D = 0$; (b) 耦合强度 $D = 1$

4 结 论

本文根据神经元能量理论,建立了刻画磁辐射影响的神经元膜电流改变量的数学模型,然后基于HH神经元模型,研究了电磁辐射对于单个神经元和双向电耦合神经元放电行为的影响,主要结论:

1) 关于单个神经元放电行为,随着电磁辐射强度的增大,神经元放电率出现台阶式快速下降阶段和稳定的微幅振荡阶段.经过研究发现,神经元放电率快速减小阶段对应神经元从周期放电经由非周期放电变为周期簇放电的过程,神经元一旦形成周期簇放电后,放电率呈现微幅振荡变化.

2) 通过研究单个神经元关于外界刺激电流的动态分岔性质,分析了磁辐射引起神经元簇放电的机理.根据神经元分岔性质,外界刺激电流取值范围可以划分为4个区域,分别对应神经元静息态、周期放电、静息态和周期放电双稳态.磁辐射电流增量是一个周期变化过程,在周期性刺激电流影响下,神经系统放电模式形成了周期性的静息态、周期放电再次回到静息态的簇放电过程.

3) 关于双向电耦合的两个神经元,当磁辐射作用在神经元1上,耦合后两个不同放电模式的神经元可以实现同步簇放电;在两个耦合的神经元上分别施加不同频率的磁辐射,同样也可以诱导两个神经元实现同步簇放电.结果表明磁辐射可以通过神经元间的双向耦合影响其他神经元放电模式.

电磁辐射引起的如上复杂的神经节律变化一方面使我们进一步认识了磁辐射对大脑神经的影响,另一方面本工作的结果对于临床医学关于节律动力学相关脑疾病和电磁辐射的关系的研究有一定的参考价值.

参考文献

- [1] Hodgkin A L, Huxley A F 1952 *J. Phys. London* **117** 500
- [2] Izhikevich E M 2004 *IEEE T. Neural Networ.* **15** 1063
- [3] Hindmarsh J L, Rose R M A 1984 *Proc. R. Soc. London, Ser. B* **221** 87
- [4] Li Y Y, Jia B, Gu H G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 070504 (in Chinese) [李玉叶, 贾冰, 古华光 2012 物理学报 **61** 070504]
- [5] Wang C N, Ma J, Jin W Y 2012 *Dynam. Syst.* **27** 253
- [6] Wang Q Y, Lu Q S 2005 *Chin. Phys.* **14** 2189
- [7] Men C, Wang J, Qin Y M, Wei X L, Che Y Q, Deng B 2011 *Chin. Phys. B* **20** 128704

- [8] Ma J, Wang C N, Ying H P, Wu Y, Chu R T 2013 *Sci. China Phys. Mech.* **56** 1126
- [9] Ma J, Huang L, Ying H P, Pu Z S 2012 *Chin. Sci. Bull.* **57** 2094
- [10] Hu B L, Ma J, Li F, Pu Z S 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 058701 (in Chinese) [胡柏林, 马军, 李凡, 蒲忠胜 2013 物理学报 **62** 058701]
- [11] Liu S B, Wu Y, Li J J, Xie Y, Tan N 2013 *Nonlinear Dynm.* **73** 1055
- [12] Qin H X, Ma J, Jin W Y, Wang C H 2014 *Sci. China Technol. Sc.* **57** 936
- [13] Wu Y, Li J J, Liu S B, Pang J Z, Du M M, Lin P. 2013 *Cogn. Neurodyn.* **7** 431
- [14] Zhang Z Z, Zeng S Y, Tang W Y, Hu J L, Zeng S W, Ning W L, Qiu Y, Wu H S 2012 *Chin. Phys. B* **21** 108701
- [15] Kesari K K, Siddiqui M H, Meena R, Verma H N, Kumar S 2013 *Indian J. Exp. Biol.* **51** 187
- [16] Calvente I, Fernandez M F, Villalba J, Olea N, Nuñez M I 2010 *Sci. Total Environ.* **408** 3062
- [17] Inskip P D, Tarone R E, Hatch E E, Wilcosky T C, Shapiro W R, Selker R G, Fine H A, Black P M, Loeffler J S, Linet M S 2001 *New Engl. J. Med.* **344** 79
- [18] Susanna L, Martin R 2014 *Bioelectromagnetics* **35** 79
- [19] Zhao T Y, Zou S P, Knapp P E 2007 *Neurosci. Lett.* **412** 34
- [20] Rianne S 2010 *Brain Res. Rev.* **65** 80
- [21] Wachtel H, Seaman R, Joines W 1975 *Ann. NY. Acad. Sci.* **247** 46
- [22] Claudia C, Caterina M, Carmela M, Barbara B 2012 *Int. J. Biochem. Cell B* **2012** 683897
- [23] Wechsler L S, Checkoway H, Franklin G M, Costa L G 1991 *Neurotoxicology* **12** 387
- [24] Johansen C 2000 *Epidemiology* **11** 539
- [25] Noonan C W, Reif J S, Yost M, Touchstone J 2002 *Scand. J. Work Env. Hea.* **28** 42
- [26] Huss A, Spoerri A, Egger M, Roosli M 2009 *Am. J. Epidemiol.* **169** 167
- [27] Lobb C J 2014 *Basal Ganglia* **3** 187
- [28] Remple M S, Bradenham C H 2011 *Movement Disord.* **26** 1657
- [29] Nadia U, Nicolas R, Damien G, Bernard R, Guy C 2002 *J. Neurosci.* **22** 8665
- [30] Moujahid A, d'Anjou A, Torrealdea F J 2011 *Phys. Rev. E* **83** 031912
- [31] Moujahid A, d'Anjou A, Torrealdea F J, Torrealdea F 2011 *Chaos Soliton. Fract.* **44** 929
- [32] Torrealdea F J, Sarasola C, d'Anjou A 2009 *Chaos Soliton. Fract.* **40** 60
- [33] Torrealdea F J, Sarasola C, d'Anjou A, Moujahida A, de Mendizábal N V 2009 *Biosystems* **97** 60
- [34] Allan H F 1998 *Environ. Health Persp.* **106** 101
- [35] Yu Y G, Hill AP, McCormick D A 2012 *PLoS Comput. Biol.* **8** 1
- [36] Foust A J, Yu Y G, Popovic M, Zecevic D 2011 *J. Neurosci.* **31** 15490
- [37] Ermentrout G B, Terman D H 2010 *Mathematical Foundations of Neuroscience* (Vol.35) (New York: Springer) pp103–127

Dynamic behavior in firing rhythm transitions of neurons under electromagnetic radiation*

Li Jia-Jia Wu Ying[†] Du Meng-Meng Liu Wei-Ming

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

(Received 12 August 2014; revised manuscript received 10 September 2014)

Abstract

This paper presents the mathematical model of membrane current of neuron resulting from electromagnetic radiation based on the foundation of neuronal energy theory; and the effect of electromagnetic radiation on the dynamic behaviors of single neuron and the firing activities of two neurons coupled with gap connection are investigated. Results show that the neuronal firing rate is lowered as the radiation intensity increases, and finally reaches a stable value. As the radiation intensity increases, the periodical spiking of neuron is transformed into bursting firing, which is well explained based on the dynamic bifurcation theory. It turns out that the bursting firing induced by the electromagnetic radiation could spread out in neuronal network through an electrical gap junction.

Keywords: neuro-dynamics, electromagnetic radiation, bursting, dynamic bifurcation

PACS: 05.45.a, 87.19.lq, 87.19.lp, 87.19.lj

DOI: 10.7498/aps.64.030503

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11272242) and the Natural Science Basic Research Plan in Shaanxi Province of China (Grant No. S2014JC12575).

[†] Corresponding author. E-mail: wying36@163.com