

Electrical Activity in Chay Neuronal Model under Magnetic Flow Effect

Hao Yu, Han Xiao, Fangyuan Si, Jiabao Song, Yebing Zhang

College of Sciences, North China University of Technology, Beijing
Email: tltrc919@gmail.com

Received: Feb. 28th, 2017; accepted: Mar. 20th, 2017; published: Mar. 29th, 2017

Abstract

The Chay neuronal model with electromagnetic induction being considered in this paper, and the mode transition of electrical activities in Chay neuronal model is detected when external electromagnetic flow is imposed on the neuron. It is found that the memristor can make neurons exhibiting silence, spiking and bursting. Particularly, we find complex mixed modes of electrical activities in the model.

Keywords

Chay Model, Magnetic Flow, Firing Activities

磁流对神经元Chay模型放电模式的影响

于浩, 肖晗, 司芳源, 宋家宝, 张叶冰

北方工业大学理学院, 北京
Email: tltrc919@gmail.com

收稿日期: 2017年2月28日; 录用日期: 2017年3月20日; 发布日期: 2017年3月29日

摘要

本文主要研究磁流作用下改进的Chay神经元模型, 以及神经元在外界磁流作用下电活动的模式转迁。结果表明, 通过对Chay模型中膜电位上添加忆阻电流, 发现在不同参数条件下, 系统呈现静息、峰放电和簇放电等丰富的放电模式。特别地, 我们发现了磁流作用下神经元表现出复杂混合振荡模式。

关键词

Chay模型, 磁流, 放电模式



1. 引言

生物神经系统是由数量巨大的神经细胞(神经元)相互联结组成的,具有极其复杂的多层次结构的信息网络系统,具有复杂的动力学行为。基于神经元的电生理实验, Hodgkin 和 Huxley 在理论上提出了关于神经元放电的著名的 HH 模型(Hodgkin-Huxley) [1], 揭示了神经生理活动的电化学机制。此后, 人们在 HH 模型基础上, 为了更好的描述不同神经元丰富的放电模式, 相继改进或提出一些著名的神经电生理模型, 如 FHN (FitzHugh-Nagumo)模型、HR (Hindmarsh-Rose)模型、ML (Morris-Lecar)模型、Chay 模型等。神经元 Chay 模型是描述胰腺 β -细胞的电生理模型[2], 它由经典的 HH 模型改进而得到, 在原有 Na^+ , K^+ 离子通道的基础上增加 Ca^{2+} 离子通道。Chay 模型具有丰富的放电模式和动力学行为。裴利军等人研究了神经元 Chay 模型的动力学行为[3]; 周毅研究神经元 Chay 模型簇放电活动的动力学行为和模式划分[4]。随着对神经系统生物电的进一步研究, 神经元系统中可以检测到复杂的电磁场分布。马军等人研究了磁流对神经元放电模式的影响[5]; 李佳佳等人研究电磁辐射引起神经元放电节律转迁的动力学行为[6]。在本文中, 研究 Chay 模型中磁流对神经元放电模式的影响, 主要通过增加磁通量以及忆阻器对 Chay 模型进行改进, 改进的 Chay 神经元模型能产生丰富的放电模式, 特别是产生了复杂的混合簇放电模式。就作者的知识面来讲, 这是以往研究中少见的现象。本文主要研究了磁流对单个神经元放电行为的影响, 为深入研究电磁辐射对人体神经元的影响提供有益的探讨。

2. 改进的 Chay 神经元模型

经典的三变量 Chay 模型最初是用来模拟胰腺 β -细胞的放电行为, 也可以用来描述其他神经元的峰、簇放电行为。在磁流作用下, 改进后的 Chay 模型表示如下[2] [5]:

$$\frac{dv}{dt} = g_i m_\infty^3 h_\infty (v_i - v) + g_{kv} (v_k - v) n^4 + g_{kc} \left(\frac{C}{1+C} \right) (v_k - v) + g_l (v_l - v) + I - k_1 v \rho(\varphi) \quad (1)$$

$$\frac{dC}{dt} = \rho [m_\infty^3 h_\infty (v_c - v) - k_c C], \quad (2)$$

$$\frac{dn}{dt} = \frac{n_\infty - n}{\tau_n}, \quad (3)$$

$$\frac{df}{dt} = v - k_2 \varphi, \quad (4)$$

$$\frac{dq}{df} = \rho(\varphi), \quad (5)$$

其中(1)表示细胞膜 v 电位的变化, v_i, v_k 和 v_l 分别是混合 Na^+ - Ca^{2+} 离子通道、 K^+ 通道和漏电离子通道的可逆电位; g_i, g_{kv}, g_{kc} 和 g_l 分别代表混合离子通道、依赖电位的 K^+ 通道、依赖细胞膜内 Ca^{2+} 浓度的 K^+ 通道和漏电流的最大电导。(2)表示细胞膜内 Ca^{2+} 浓度的变化规律, 右边两项分别表示进出膜的 Ca^{2+} ; (3)表示依赖于电位的 K^+ 通道打开的概率的变化规律, 其中 τ_n 弛豫时间。 k_c 是细胞内 Ca^{2+} 流出的比率常数, ρ 是比例性常数, v_c 是 Ca^{2+} 通道的可逆电位, λ_n 是与 K^+ 通道打开的时间常数相关的参数。 m_∞ 和 h_∞ 分别是混合 Na^+ - Ca^{2+} 通道激活和失活的概率, n_∞ 是 K^+ 通道打开概率 n 的稳定值, 具体表达式:

$$m_\infty = \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \beta_m},$$

$$h_\infty = \frac{\alpha_h}{\alpha_h + \beta_h},$$

$$n_\infty = \frac{\alpha_n}{\alpha_n + \beta_n},$$

其中： $\alpha_m = \frac{0.1(25+v)}{1-e^{-0.1v-2.5}}$ ， $\beta_m = 4e^{\frac{-(v+50)}{18}}$ ， $\alpha_h = 0.07e^{-0.05v-2.5}$ ， $\beta_h = \frac{1}{1+e^{-0.1v-2}}$ ， $\alpha_n = \frac{0.01(20+v)}{1-e^{-0.1v-2}}$ ， $\beta_n = 0.125e^{\frac{-(v+30)}{80}}$ ， $\tau_n = \frac{1}{\lambda_n(\alpha_n + \beta_n)}$ 。变量 φ 描述的是跨膜磁通量， $\rho(\varphi)$ 表示磁通控制忆阻器(记忆电阻)。

$\rho(\varphi) = r + 3b\varphi^2$ ，其中 r, b 是给定的参数值。参数 k_1, k_2 是描述膜电位和磁通量之间的联系。 $k_1 v \rho(\varphi)$ 是指对膜电位的抑制调节，它主要取决于 φ 的变化。根据电磁定律可以把 $k_1 v \rho(\varphi)$ 描述为感应电流，表达式如下：

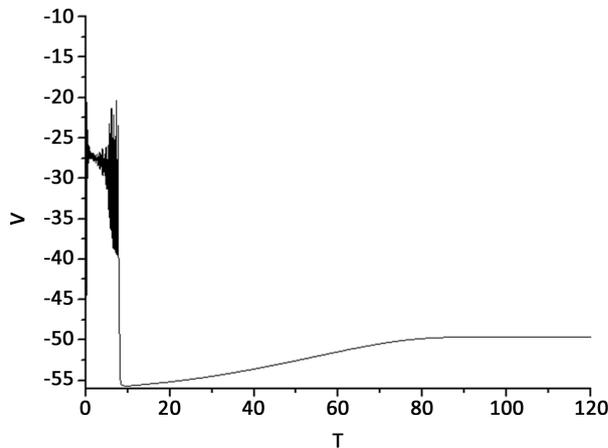
$$i' = \frac{dq(\varphi)}{dt} = \frac{dq(\varphi)}{d\varphi} \frac{d\varphi}{dt} = \rho(\varphi)v = k_1 v \rho(\varphi). \quad (6)$$

方程中由于离子的跨膜运动会增加膜电位，所以在方程中引入负反馈 $-k_2 \varphi$ 。模型中用到的参数值见附录。

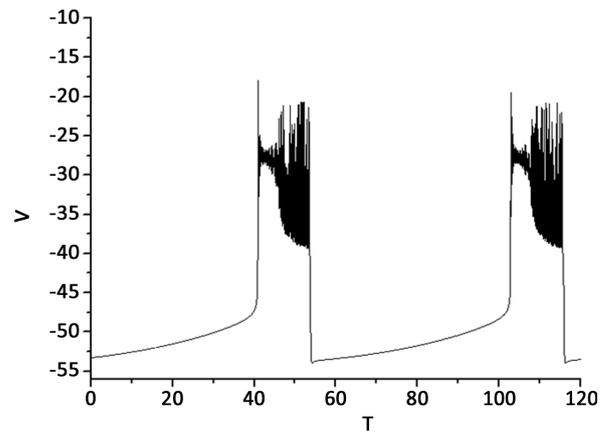
3. 主要结果

以改进的 Chay 模型为基础，研究参数 k_1, k_2, r, I 分别对神经元的膜电位产生的影响。固定参数 $k_2 = 2$ ， $r = 0.5$ ， $b = 0.0006$ ， $I = -65$ ，当 k_1 变化时神经元呈现不同的放电模式：由静息态、簇放电到周期簇放电的转迁，如图 1 所示。当 $k_1 = 0.2$ 时，簇大体形态一致但每一组簇中所包含的峰放电状态并不相同，即混合模式。当 $k_1 = 0.8$ 时，簇放电的振幅约为 15 mV。当 $k_1 = 2$ 时，神经元的簇放电的振幅约为 5 mV。也即是说，参数 k_1 不仅可以影响神经元放电模式的频率，还可以影响放电模式的振幅，也即影响膜电位的大小。

k_1 和 k_2 都是用来描述膜电位和磁通量之间关系的参数。接下来，我们研究负反馈 $-k_2 \varphi$ 中的 k_2 对神经元膜电位的影响。 $k_2 = 0$ 时，膜电位振荡的幅度很小，表现为静息态，如图 2 所示。在 k_2 增加到 0.6



(a)



(b)

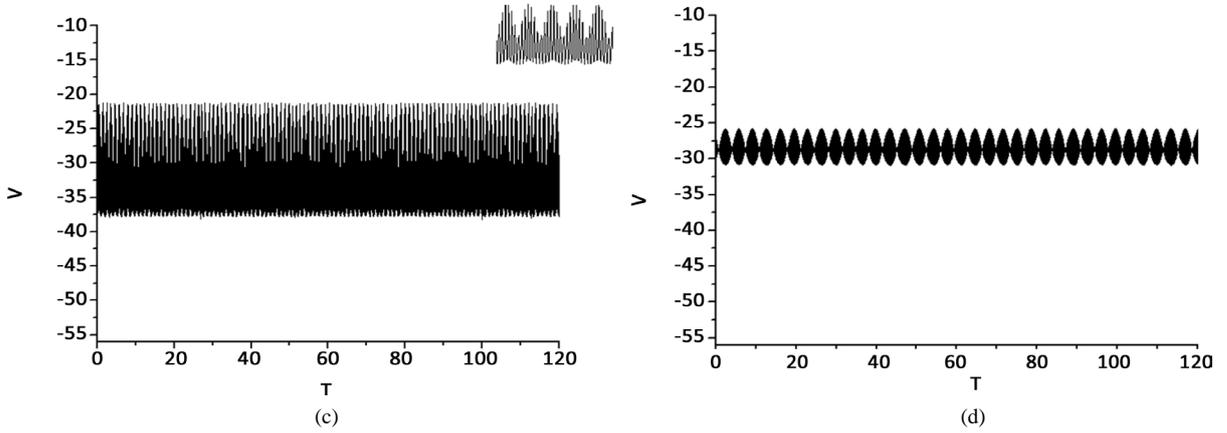


Figure 1. $k_2 = 2$, $r = 0.5$, $b = 0.0006$, $I = -65$. The time series of membrane potential when parameter k_1 varies: (a) $k_1 = -0.1$, (b) $k_1 = 0.2$, (c) $k_1 = 0.8$, (d) $k_1 = 2$

图 1. $k_2 = 2$, $r = 0.5$, $b = 0.0006$, $I = -65$ 。参数 k_1 变化时神经元膜电位的时间序列。(a) $k_1 = -0.1$, (b) $k_1 = 0.2$, (c) $k_1 = 0.8$, (d) $k_1 = 2$

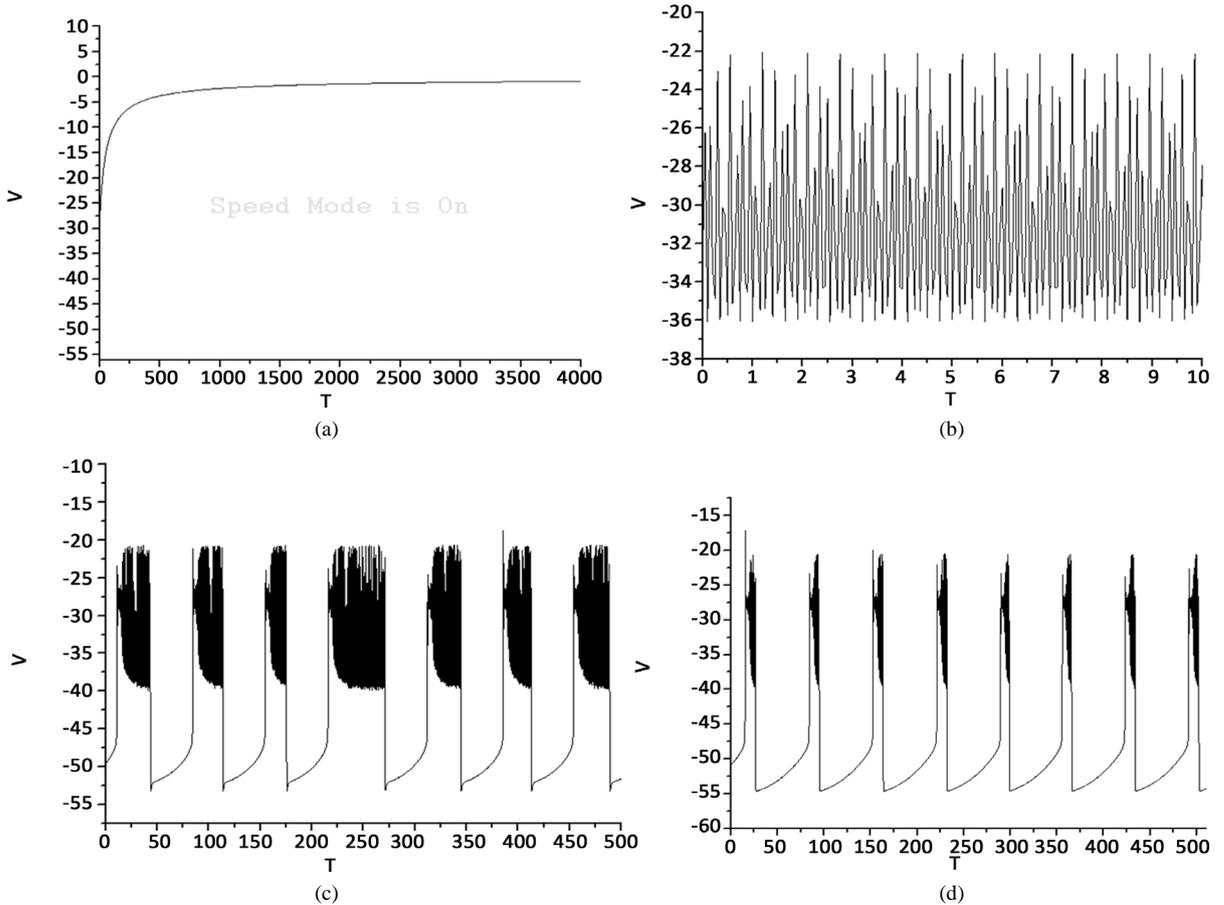


Figure 2. $k_2 = 0.2$, $r = 0.5$, $b = 0.0006$, $I = -65$. The time series of membrane potential when parameter k_2 varies: (a) $k_2 = 0$, (b) $k_2 = 0.6$, (c) $k_2 = 1.2$, (d) $k_2 = 2$

图 2. $k_2 = 0.2$, $r = 0.5$, $b = 0.0006$, $I = -65$ 。参数 k_2 变化时神经元膜电位的时间序列图。(a) $k_2 = 0$, (b) $k_2 = 0.6$, (c) $k_2 = 1.2$, (d) $k_2 = 2$

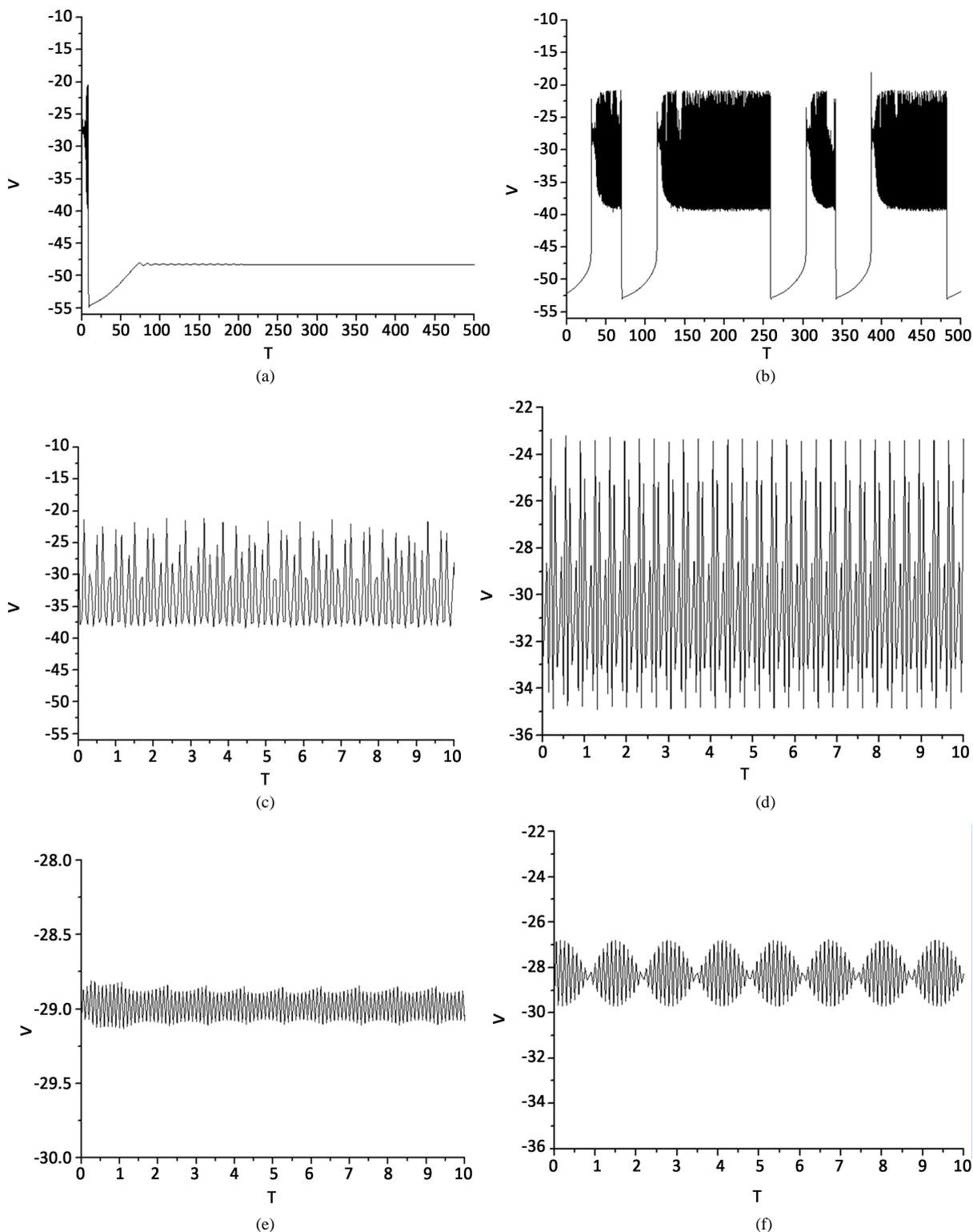


Figure 3. $k_1 = 0.2$, $k_2 = 2$, $b = 0.0006$, $I = -65$. The time series of membrane potential when parameter r varies: (a) $r = -1$, (b) $r = 2$, (c) $r = 3$, (d) $r = 6$, (e) $r = 8$, (f) $r = 9$

图 3. $k_1 = 0.2$, $k_2 = 2$, $b = 0.0006$, $I = -65$ 。参数 r 变化时神经元膜电位的时间序列图。(a) $r = -1$, (b) $r = 2$, (c) $r = 3$, (d) $r = 6$, (e) $r = 8$, (f) $r = 9$

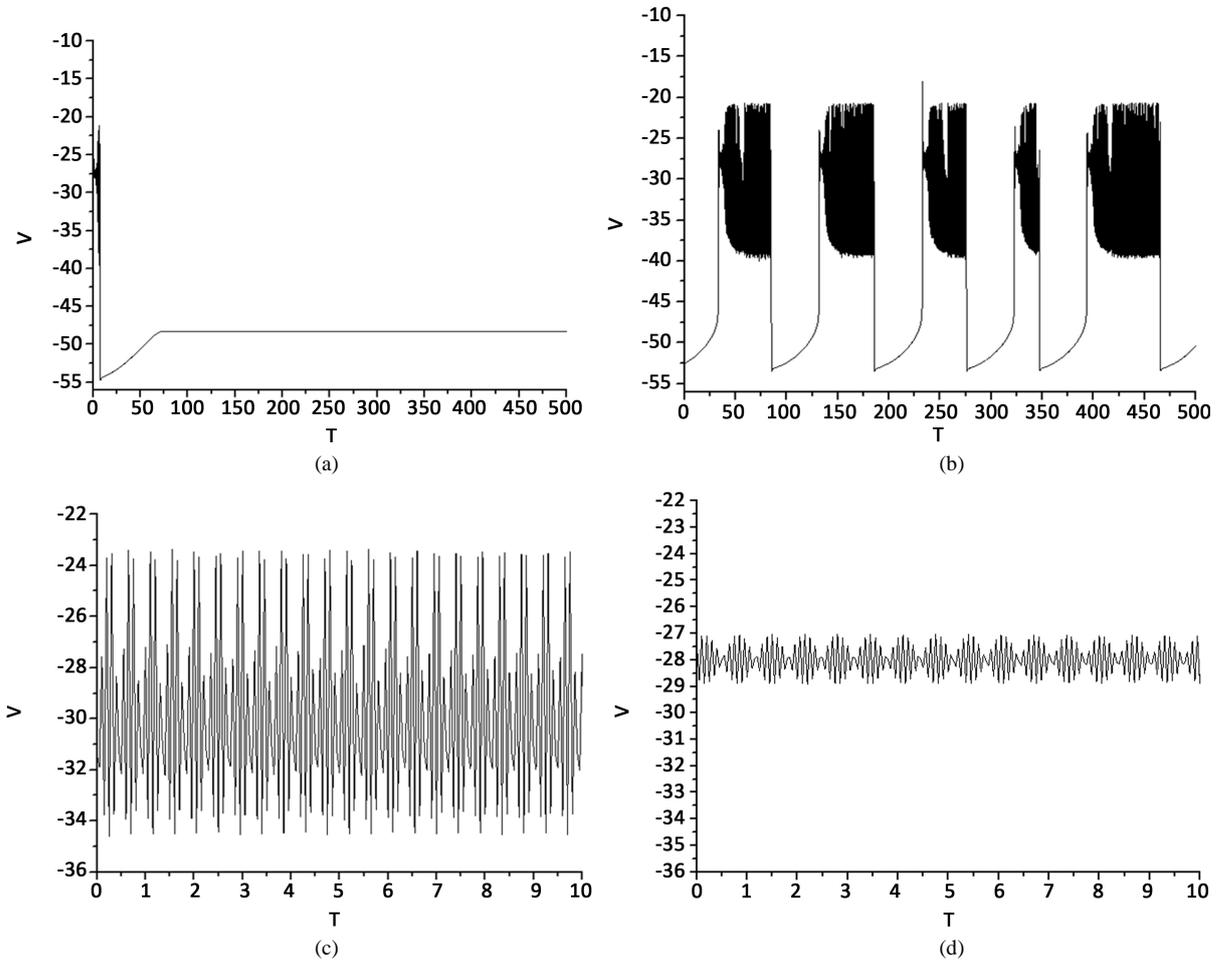


Figure 4. $k_1 = 0.2$, $k_2 = 2$, $r = 0.5$, $b = 0.0006$. The time series of membrane potential when parameter I varies:

(a) $I = -80$, (b) $I = -20$, (c) $I = 10$

图 4. $k_1 = 0.2$, $k_2 = 2$, $r = 0.5$, $b = 0.0006$ 。参数 I 变化时神经元膜电位的时间序列图。(a) $I = -80$, (b) $I = -20$, (c) $I = 10$

时,神经元的放电模式呈现出无规律非周期性峰放电节律。继续增大 k_2 的值,当 $k_2 = 1.2$ 时,神经元呈现复杂的混合簇放电模式。 $k_2 = 2$ 时,神经元表现为稳定的簇放电模式。说明参数 k_2 变化时,神经元经由静息、峰放电到混合簇放电到簇放电的转迁。参数 k_2 对膜电位的频率影响较大,但对振幅的影响不是很大。

对于改进的 Chay 模型,磁通控制忆阻器(记忆电阻)起到了关键性的作用,它可以用来记忆跨膜磁通量的大小,其中 $\rho(\varphi) = r + 3b\varphi^2$ 。下面我们研究参数 r , b 对神经元膜电位产生的影响,如图 3 所示。神经元由静息、混合放电、无规律峰放电到低振幅周期簇放电的转迁。参数 r 对神经元膜电位的振幅及频率都有重要的影响。

外部刺激电流对神经元的放电模式也有重要的影响。外部刺激 I 变化时神经元的放电模式如图 4 所示。神经元表现为静息态,混合簇放电、峰放电到低振幅簇放电的转迁。

4. 结语

基于经典 Chay 模型,我们研究了神经系统中电磁场对神经元膜电位的影响。通过增加跨膜磁通量及

忆阻器, 给出了磁流作用下改进的 Chay 模型。我们主要研究了参数 k_1, k_2, r 和外部刺激电流 I 对神经元放电模式的影响。在磁流作用下, 我们发现, Chay 神经元会表现出复杂的混合模式, 实验中也观察到类似的混合模式现象[7]。选取适当的参数, 神经元就可以呈现: 静息、峰放电、簇放电和混合簇放电等多样的放电模式。经典的 Chay 模型中, 神经元常见的放电状态为静息、峰放电和簇放电。电磁场引起的复杂的神经节律变化可以使我们进一步认识了磁辐射对大脑神经活动的影响, 另一方面, 该结果对于节律动力学与电磁辐射的相关性的研究也有一定的参考价值。

基金项目

本文得到“北京市大学生科学研究与创业行动计划”项目和北方工业大学“科研创新团队建设计划”项目支持的资助; 感谢指导教师段利霞老师的悉心指导。

参考文献 (References)

- [1] Hodgkin, A.L. and Huxley, A.F. (1952) A Quantitative Description of Membrane Current and Its Applications to Conduction and Excitation in Nerve. *Journal of Physiology*, **117**, 500-544. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1952.sp004764>
- [2] Chay, T.R. (1985) Chaos in the Three-Variable Model of an Excitable Cell. *Physica D*, **16**, 233-242. [https://doi.org/10.1016/0167-2789\(85\)90060-0](https://doi.org/10.1016/0167-2789(85)90060-0)
- [3] 裴利军, 王永刚, 范晔. 神经元 Chay 模型的动力学分析[J]. 郑州大学学报, 2009, 41(2): 7-12.
- [4] 周毅. 神经元 Chay 模型簇放电活动的分岔研究[J]. 赤峰学院学报, 2012, 23(6): 23-25.
- [5] Lv, M., Wang, C., Ren, G., et al. (2016) Model of Electrical Activity in a Neuron under Magnetic Flow Effect. *Nonlinear Dynamics*, **85**, 1479-1490. <https://doi.org/10.1007/s11071-016-2773-6>
- [6] 李佳佳, 吴莹, 独盟盟, 刘伟明. 电磁辐射诱发神经元放电节律变迁的动力学行为研究[J]. 物理学报, 2015, 64(3): 214-220.
- [7] Dunmyre, J.R., Del Negro, C.A. and Rubin, J.E. (2011) Interactions of Persistent Sodium and Calcium-Activated Nonspecific Cationic Currents Yield Dynamically Distinct Bursting Regimes in a Model of Respiratory Neurons. *Journal of Computational Neuroscience*, **31**, 305-328. <https://doi.org/10.1007/s10827-010-0311-y>

附录

在本文的模型中, 所用到的参数值见附表 1。

Appendix 1. Parameter values used in the paper

附表 1. 文章中的参数值

g_i	1800	v_i	100	ρ	0.27	λ_n	230
g_{iv}	1700	v_k	61	k_c	0.18333333	g_l	7
g_{iv}	10	v_l	-40	v_c	336		

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：biphy@hanspub.org