

一类自突触作用下神经元电路的设计和模拟

任国栋 武刚 马军 陈旸

Simulation of electric activity of neuron by setting up a reliable neuronal circuit driven by electric autapse

Ren Guo-Dong Wu Gang Ma Jun Chen Yang

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 058702 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.058702

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.058702>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I5>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

单周期控制三电平 Boost 功率因数校正变换器的慢尺度分岔分析

[Analysis on the slow-scale bifurcation behaviors of one-cycle-controlled three-level Boost power factor correction converter](#)

物理学报.2015, 64(4): 040502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.040502>

脉冲序列控制双断续导电模式 BIFRED 变换器的动力学建模与多周期行为

[Dynamical modeling and multi-periodic behavior analysis on pulse train controlled DCM-DCM BIFRED converter](#)

物理学报.2015, 64(1): 010501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.010501>

基于一阶广义忆阻器的文氏桥混沌振荡器研究

[Wien-bridge chaotic oscillator based on first-order generalized memristor](#)

物理学报.2014, 63(24): 240505 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240505>

非线性磁式压电振动能量采集系统建模与分析

[Modeling and analysis of piezoelectric vibration energy harvesting system using permanent magnetics](#)

物理学报.2014, 63(24): 240504 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.240504>

神经元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>

一类自突触作用下神经元电路的设计和模拟*

任国栋 武刚 马军† 陈旻

(兰州理工大学物理系, 兰州 730050)

(2014年6月20日收到; 2014年9月30日收到修改稿)

神经元在自突触作用下可以诱发各类放电活动的迁移, 神经元动作电位对电自突触的响应比较敏感. 通常用包含延迟因子和增益的反馈回路电流来刻画自突触对神经元动作电位的影响. 基于Pspice软件, 设计了包含自突触效应的神经元电路, 用以延迟反馈电路来模拟电自突触对电位的调制作用. 研究发现: 1) 在外界刺激和电自突触回路协同作用下, 神经元电路输出信号可以呈现静息态, 尖峰放电, 簇放电状态. 2) 在时变增大的外界刺激下和自突触回路驱动下, 神经元电路的输出电位序列在多种电活动模式之间(静息, 尖峰放电, 簇放电)交替出现, 其机理在于自突触回路具有记忆特性, 神经元对于不同的外界刺激可以做出不同模式的响应. 3) 在给定比较大外界刺激下, 改变反馈回路的增益, 发现电路输出的序列也可以呈现不同模式交替, 即神经元对于相同的刺激可以通过自我调节自突触增益来产生不同模式的响应, 其机理可能在于回路的有效反馈, 这有助于理解突触的可塑性.

关键词: 自突触, 神经元电路, 尖峰放电, 簇放电

PACS: 87.19.lq, 87.18.Hf, 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.64.058702

1 引言

自1952年Hodgkin-Kuxley在生物实验方面开创性的发现以来, 神经元电活动规律的研究在实验和动力学模拟方面引发了广泛关注^[1-8]. 研究发现神经元在恰当的外界激励下可以历经静息态到尖峰放电, 簇放电, 甚至进入混沌态^[9-14]. 更有趣的是在神经元和神经网络内可观察到相干共振或随机共振行为^[15-25], 即在特定刺激和参数下神经元或网络电活动呈现高度有序性. 有趣的是, 在二维空间网络下, 相干共振和类相干共振下可以在神经网络内观察到螺旋波^[26-33], 这些螺旋波如节拍器一样调制神经网络群体电活动行为. 对于神经元电活动的实验研究中, 如古华光等利用生物实验揭示钾, 钙流刺激可以显著改变神经元的电活动模式, 诱发各类分岔和迁移行为^[34-37], 其研究结果可以为计算神经科学研究提供重要的实验依据. 另一方面, 一些实验物理学家探索设计各

类人工神经元智能电路^[38-47]来模拟神经元的各类放电行为, 如Knudsen^[38]设计了一类神经电路来模拟离散映像和HR神经元模型的电活动特性; Wu等利用Pspice软件设计了一类包含离子通道效应的Morris-Lecar神经元电路来模拟神经元电活动特性, 并讨论约瑟夫森谐振子电路模拟神经元放电特性^[39]; Wagemakers等^[40]设计了一类神经元电路来模拟Morris-Lecar神经元的簇放电特性, Dahasert等^[41]等利用积分器设计了一类神经元电路来模拟Hindmarsh-Rose神经元无自突触作用下的放电特性, 并探讨了硬件实现和神经元电路同步问题. Rabinovich等^[42]对一类可产生各种神经元电活动模式的振荡电路进行了数值模拟计算. Mayer等^[43]研究了丘脑皮层电路模型中抑制性反馈对信息传递处理的作用. Li等^[44]利用同步控制理论研究了约瑟夫森结谐振电路模拟菲茨休-南云(FHN)神经元各类放电模式问题. Nowotny等^[45]研究了一类微神经元电路的尖峰放电和簇放电的

* 国家自然科学基金(批准号: 11265008, 11372122)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: hyperchaos@163.com

动力学问题. Sitt 等^[46]报道了一类生物学可激发的神经元的动力学特性. Kwon 等^[47]研究了周期性刺激对一类过度激发的神经元电活动模式的影响问题. 这些初步研究结果可以为大规模集成神经元电路网络提供实验依据和技术参数. 另一方面, 利用神经元的记忆和放电模式多样可选择性, 可以设计智能神经元电路用以自动控制一些复杂装置, 如水下机器人等^[48,49].

实验研究发现, 一些神经元存在自突触, 即神经元突触历经一定回路连接到自身胞体上, 该自突触对神经元电位的调制可以用一个闭合回路的延迟反馈项来表达^[50-54], 在正反馈作用下, 静息的神经元可以被激发, 产生类似振子一样的振荡行为, 使得神经元电位可呈现周期性或混沌性放电, 实现尖峰放电到簇放电的迁移^[53,54], 另外神经网络内电自突触分布也可以诱发靶波和螺旋波来调制神经网络群体电活动行为^[55]. 文献^[56]设计了一类包含自适应反馈突触的振荡电路来模拟神经元的放电行为, 但包含自突触效应的神经元电路研究还有许多问题值得进一步探索. 对于常见的神经元模型, 如Hodgkin-Huxley, Hindmarsh-Rose, Morris-Lecar 神经元模型, 其电活动动力学行为分析, 包括网络群体动力学分析都已经有了细致的研究报告. 神经元电路方面的研究主要包括: 1) 设计各类振荡电路, 使得电路输出的电压信号能够产生类似于神经元放电的各类模式, 并探索硬件实验的可行性如功耗, 元件工艺的可行性, 安全性问题; 2) 对已知的各类神经元模型设计等效电路来刻画神经电路的输出特性, 并考虑元件使用型号, 数量等对实际硬件实现的影响, 这为进一步大规模集成神经智能网络提供参数范围. 因此, 对于这些常见的理论模型如果设计等效的神经元电路, 进一步探索硬件实现和大规模神经元电路集成, 对于研究神经网络信息传递具有积极作用. 本文基于Pspice软件环境, 采用运放器件TL08X和延迟线, 基于Hindmarsh-Rose (HR) 神经元模型, 设计了一类包含电自突触的神经元电路, 来研究各类激发刺激和延迟下, 神经元电活动的各类激发响应, 迁移、以及神经元对外界刺激响应的选择性.

2 神经元模型、电路设计和结果

Hindmarsh-Rose (HR) 神经元模型^[7,8]是从包含离子通道效应的Hodgkin-Huxley 神经元模型简

化而来, 相对而言, HR 模型便于进行分岔动力学分析, 其输出序列可以很好的模拟一些软体动物神经元电活动的规律, 其动力学方程表示为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y - ax^3 + bx^2 - z + I, \\ \dot{y} &= c - dx^2 - y, \\ \dot{z} &= r[s(x + 1.6) - z], \end{aligned} \quad (1)$$

其中 a, b, c, d, r, s 为系统的参数, I 为该神经元的外部刺激电流. 通过计算李亚普诺夫指数发现, 当系统参数 $a = 1, b = 3, c = 1, d = 5, r = 0.006, s = 4$ 时系统出现一个正的李亚普诺夫指数^[57], 即系统出现混沌态. 变量 x 通常用来描述神经元膜电位变化的规律, y, z 分别是恢复变量和自适应电流项. 调节外刺激电流大小, 系统可分别展现静息, 周期和混沌态. 如文献^[50-53]所报道, 一些神经元中存在附加的自突触, 即突触经过一定的回路和胞体自身相连接, 这些自突触可以影响神经元的电活动规律, 其实际结构见文献^[52], 示意图见^[53,58].

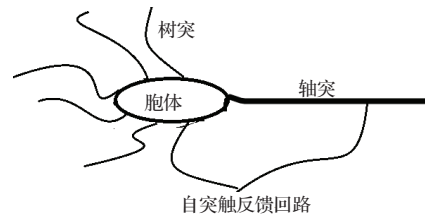


图1 自突触结构示意图

自突触回路对神经元胞体施加一个附加的刺激电流, 对神经元膜电位的调制可表示为

$$I_{\text{aut}} = g(x(t) - x(t - \tau)), \quad (2)$$

其中参数 g 表示回路的增益, τ 表示回路动作电位传递过程中引发的延迟. 当增益 g 大于零时, 自突触电流对胞体施加一个正反馈, 可促进动作电位的激发. 当增益 g 为负数时, 对动作电位有抑制作用, 神经元可进入静息态. 文献^[54]研究了含自突触的Hindmarsh-Rose (HR) 神经元模型的分岔动力学, 文献^[55]进一步研究了链状HR自突触神经元在最近邻连接下脉冲波的激发问题, 结果表明自突触正反馈可以唤醒静息的单个神经元, 在链状网络中可以诱发稳定行波来调制所有神经元的电活动, 并可诱发各类电活动行为的迁移. 在理论模拟研究中, 通常把(2)式施加在系统(1)第一变量方程的右侧, 相当于通过一个回路延迟电流来调制神经元膜电位. 下面研究基于Pspice软件仿真环境下, 包含电

自突触HR神经元电路的设计, 并通过调制电突触参数来研究神经元电活动的激发和迁移. 在模拟电路中, 主要采用运放TL08X和乘法器来设计HR神经元模型, 如图2所示, 其中FX引脚表示反馈输入端, 即自突触接入端, 当无反馈时, 该FX脚悬空. 图2中运放U1构成加法器, 完成(1)式中第一项表达式等号右边的算术求和, 运放U2完成积分运算, 得到变量 x ; 运放U6构成的加法器完成(1)式中第二项表达式等号右边的算术求和, 运放

U7完成积分运算, 得到变量 y ; 运放3和4构成的加法器完成(1)式中第三项表达式等号右边的算术求和, 运放U5完成积分运算, 得到变量 z 的反. 运放U8, U9, U10和U11构成反相放大器.

如(1)式所示, 外部刺激电流 I 可以改变膜片电活动的动力学行为, 在Pspice平台上, 我们采用等效电流刺激来实现对神经元的激励, 不同刺激电流下的软件仿真结果见图3.

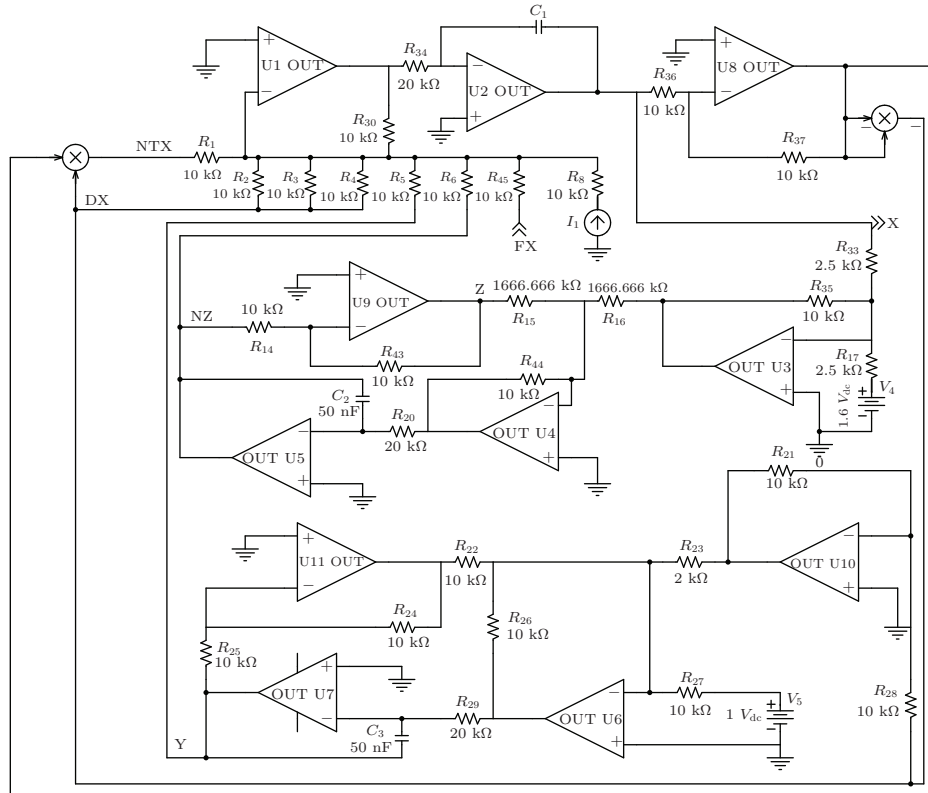


图2 无自突触作用下的HR神经元电路, 输出端X的电压信号和模型中第一变量对应, 所有的运放器都采用TL08X型号.

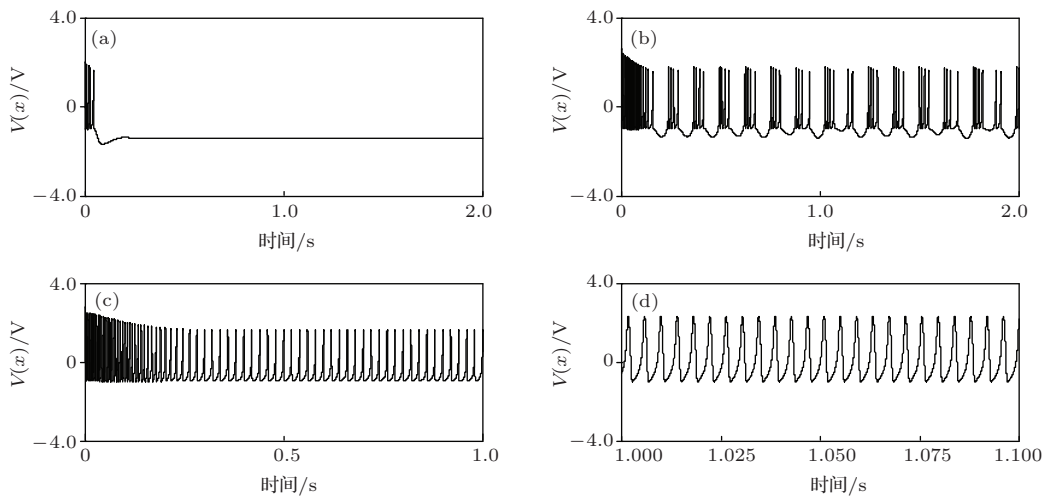


图3 不同外部刺激下神经元输出的电位序列 (a) 外界刺激强度 $I = 0.1 \text{ mA}$; (b) 簇放电 $I = 0.3 \text{ mA}$; (c) $I = 0.4 \text{ mA}$; (d) $I = 0.9 \text{ mA}$

图3的结果表明,当刺激强度超过一定阈值,静息的神经元可以呈现稳定的簇放电或尖峰放电,说明设计的神经元电路可以在一定参数范围内再现神经元电活动的各类放电模式.进一步增大外部刺激电流如 $I = 2.1 \text{ mA}$,输出的电位序列则全部为正.下面考虑自突触电路的设计,模拟电路见图4.

为了验证包含自突触反馈回路的神经元电路在不同外界刺激下的输出信号特性,选取了不同的增益和延迟时间来探测其输出电位序列的波形变化特点.首选选择增益 $g = 0.5$, $\tau = 0.5 \text{ ms}$,图5给出了不同外界刺激强度下神经元电路输出电位序列变化曲线.

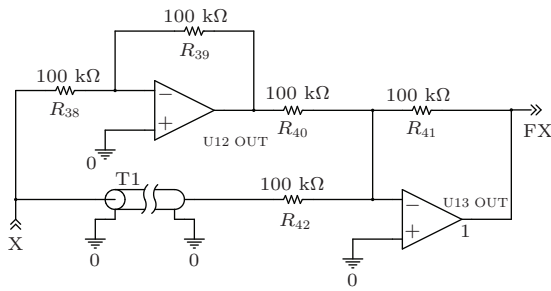


图4 延迟反馈(电自突触回路)对应的电路图(其中延迟时间采用Pspice的延迟模型T构造,仿真中的延迟线寄生电阻选取 10Ω ,输出端为FX,和图2中的输入端FX对应.运放U12实现变量 x 的反相,延迟线T1实现 $x(t - \tau)$,运放U13实现算术求和)

图5的结果表明,逐渐增加外界刺激信号强度,可以使得神经元电路的输出信号具有类似尖峰放电,簇放电,混沌态,静息态等多种放电模式.在自突触作用下逐渐增加外刺激强度,在比较窄的参数范围内(刺激电流强度)神经元电路输出的电位序

列不再呈现单一模式,而是在多种模式之间间歇涌现,其原因在于自突触回路产生的电流和外界刺激电流一起调制整个电路的输出信号特性,即神经元电活动的动力学特性取决于外刺激电流与自突触回路电流协作或竞争.自突触回路电流大小取决于两个因素,即延迟时间和反馈增益,首先研究增益在自突触回路的作用.即,在不改变延迟时间条件下,给自突触对应的延迟回路选择另外一种增益值 $g = 1.0$,其对应的电位输出序列见图6,其结果表明自突触电路仍然可以对外界刺激电流做出有效响应,使得输出的信号序列在不同刺激电流下展现不同的放电模式.

显然,增加了突触回路的反馈增益后,神经元电路的输出信号对于不同的外界刺激强度则呈现不同的响应模式,如增加外界刺激强度,仍然可以观察到类似神经元尖峰放电,静息态,簇放电和混沌放电态,且这几种放电模式在比较窄的参数区域内(外界刺激电流)交替出现,继续增加外界刺激强度,仍然可以观察到这几种状态交替出现,这完全不同于那种神经元仅仅受到外界刺激而无延迟反馈作用的情形,其机理在于延迟反馈项的记忆作用.即就是说,延迟回路的存在,使得神经元电活动的变化规律更丰富.神经回路里面的延迟一般是有限的,在神经元延迟反馈回路中,进一步测试了更大延迟时间 $\tau = 1 \text{ ms}$ 的情形,仿真结果见图7,其结果表明自突触神经元电路的输出信号对于外界刺激信号仍然可以积极响应,其信号序列变化模式仍然类似于神经元的各种电活动模式.

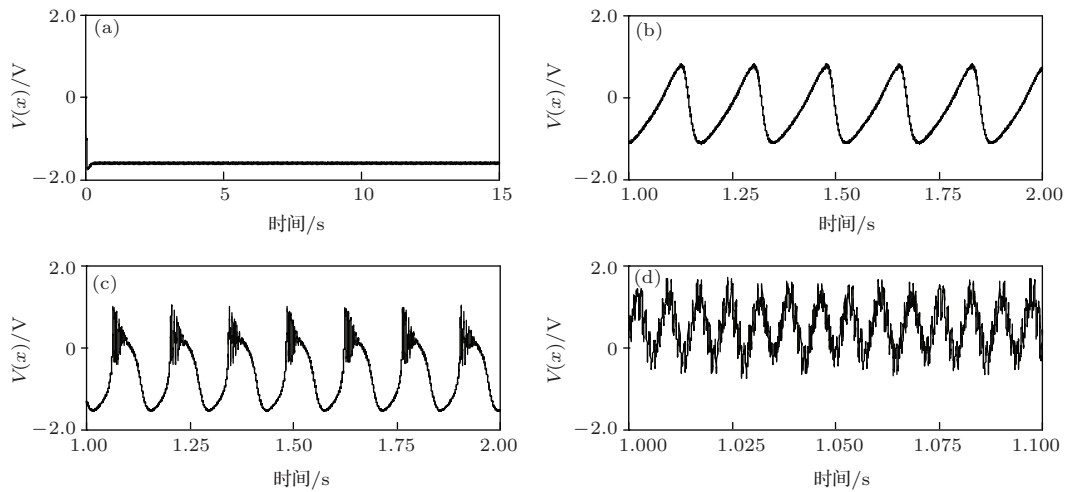


图5 电自突触作用下,不同外界刺激强度下神经元电路输出信号序列 ($g = 0.5$, $\tau = 0.5 \text{ ms}$) (a) $I = 0.6 \text{ mA}$; (b) $I = 0.8 \text{ mA}$; (c) 簇放电 $I = 1 \text{ mA}$; (d) 准周期放电 $I = 1.6 \text{ mA}$

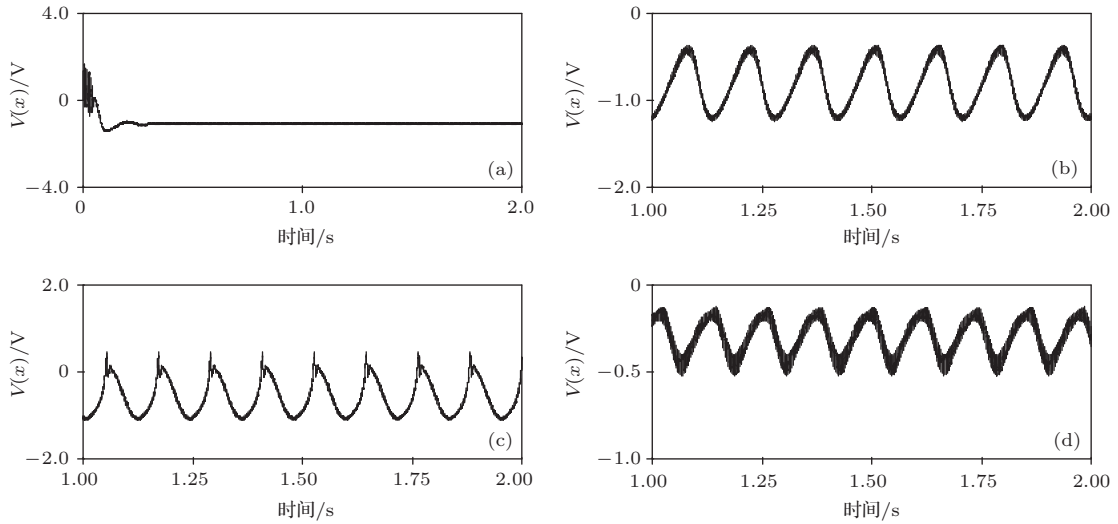


图6 电自突触作用下, 不同外界刺激强度下神经元电路输出序列 ($g = 1.0, \tau = 0.5 \text{ ms}$) (a) 稳定态 $I = 1.45 \text{ mA}$; (b) 周期态 $I = 1.55 \text{ mA}$; (c) 簇放电 $I = 1.65 \text{ mA}$; (d) 准周期放电 $I = 1.75 \text{ mA}$

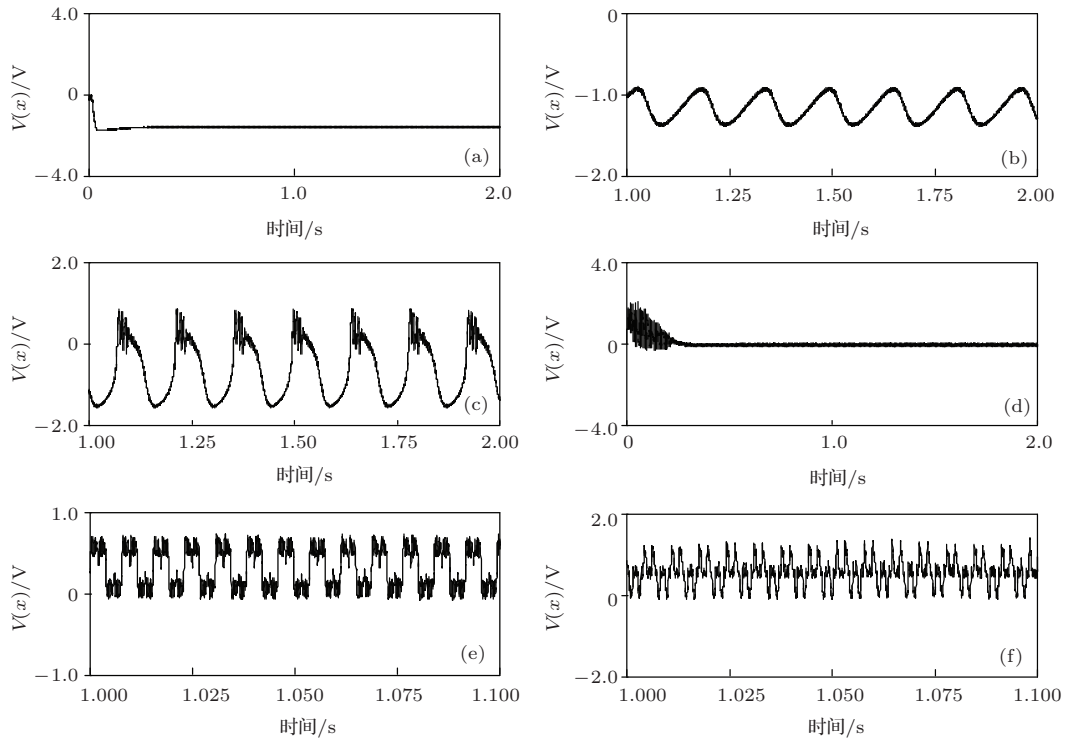


图7 电自突触作用下, 不同外界刺激强度下神经元电路输出序列 ($g = 0.5, \tau = 1 \text{ ms}$) (a) 稳定态 $I = 0.6 \text{ mA}$; (b) 周期态 $I = 0.8 \text{ mA}$; (c) 簇放电 $I = 1 \text{ mA}$; (d) 准周期态 $I = 1.2 \text{ mA}$; (e) 簇放电 $I = 1.4 \text{ mA}$; (f) 准周期放电 $I = 1.6 \text{ mA}$

图7的结果表明, 即使在比较小的增益下, 选择比较大的延迟时间, 神经元电路在自突触回路反馈下依然有效的对外界刺激做出不同模式的响应, 使得自突触驱动的神经元电路输出信号可以呈现不同电活动模式, 实际上, 神经元电路系统输出的信号序列取决于外界刺激和反馈回路的协同作用.

以上几种情况表明, 无论初始状态是什么, 选择不同的外界刺激, 在自突触反馈回路作用下, 神

经元电路系统输出的电位序列可呈现各类复杂的动力学行为, 其输出信号序列随时间的变化可以呈现多种电活动模式. 对于实际的神经元可能受到外界时变信号的刺激, 在自突触作用下, 神经元必然做出不同的响应模式. 下面考虑当外界刺激强度变化情形下, 电路输出的响应特性. 其依据和背景在于神经元受到外界越来越强的刺激会如何改变自身的电位, 以便对外界信号做出适当响应或者抑

制. 为简单起见, 设外界刺激强度按照每 1 s 增加 0.2 mA, 等刺激强度增加到 1.4 mA 后然后以相同的梯度下降, 观察不同增益和延迟作用下神经元电位响应特征, 仿真结果见图 8, 其结果表明神经元电路在自突触作用下可以有效的应对外界时变刺激, 对于不同的外界刺激电流做出不同的响应模式 (稳定沉默, 尖峰般变化, 簇发式).

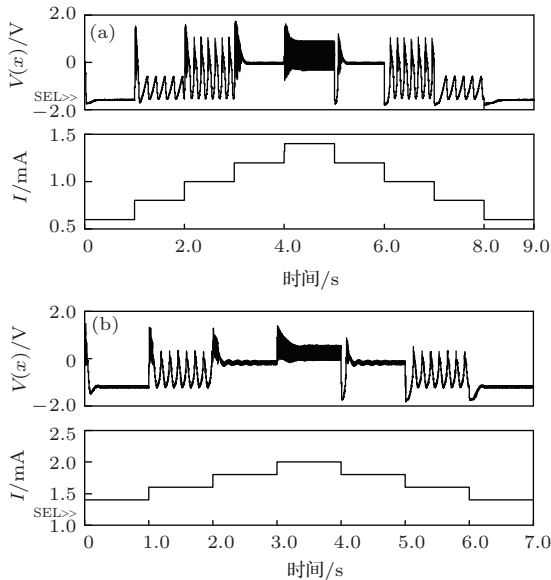


图 8 电自突触作用下神经元电位对外界刺激电流的响应特征 (a) $g = 0.5$, $\tau = 0.5$ ms (上图是电路输出电位序列, 下图是外界刺激电流变化); (b) $g = 1$, $\tau = 1$ ms (上图是电路输出电位序列, 下图是外界刺激电流变化)

图 8 的结果表明, 随着外界刺激电流阶跃增加, 在自突触电路驱动下, 神经元电路输出信号历经不同放电模式并保持一定的稳定性, 随着阶跃性降低外界刺激电流强度, 电路的输出信号重新回归为稳定态, 对应于神经元的静息电活动模式. 可以看到, 相邻两种放电模式迁移过程中总数要历经一定的暂态过程才能使得下一电活动模式保持稳定, 其原因在于自突触回路里的延迟因子再其作用, 对于前一放电模式的记忆. 神经元电路各种放电模式的迁移以及各种稳定的放电模式取决于自突触和外界刺激电流的协同作用. 实际上, 自突触的反馈回路和外界刺激电流一起来驱动整个振荡电路, 其延迟作用主要通过延迟因子 τ , 在自突触增益和延迟时间确定情况下, 放电模式的转变主要依赖于外界刺激强度的改变. 可以看到, 当外界刺激电流在 0.6—1.4 mA 之间阶跃增加时, 神经元电路在自突触回路驱动下, 其输出的电信号可以历经不同的放电活动模式 (静息, 尖峰, 簇发, 准周期态), 把这一

结果和对理论模型的计算结果对比, 外界刺激电流在 0—3 范围内可以确保自突触神经元输出包含多种放电模式, 因此, 这种实际电路的刺激电流和理论模型刺激电流的有效触发范围之间的比例关系大约是 2.1, 即如果对所设计的神经元电路利用基尔霍夫定理列出电路方程, 进一步做无量纲变换, 实际刺激电流 I/I_0 就可映射为 HR 模型中的无量纲化刺激电流, 其中标度变换因子 $I_0 \approx 0.5$.

对于实际的神经系统, 如果有外界电信号刺激, 神经元可以做出有效响应, 也可能对于某些处于阈值之上的刺激信号保持沉默, 这可能与突触的可塑性有关. 对于包含自突触回路的神经元来说, 自突触回路的自我调节如增益的变化则可以加强或抑制神经元对外界信号的响应程度. 下面考虑当外界刺激强度不变而反馈增益变化情形下, 电路输出的响应特性. 所加的外界刺激电流 2 mA, 增益每隔 1 个时间单位 (0.1 s) 在 $1 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1$ 之间变化, 观察不同增益和延迟作用下神经元电位响应特征, 仿真结果如图 9 所示, 其结果表明对于给定的外界刺激信号, 信号强度比较大的情况下, 自突触回路的增益若能在一定范围内跃变, 则可以产生不同模式的响应.

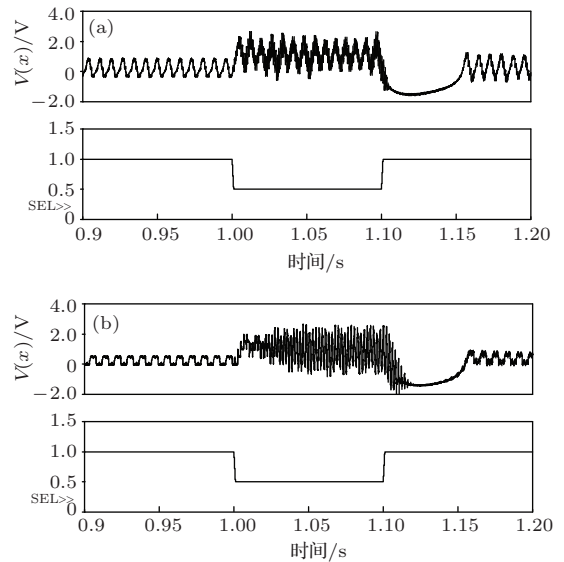


图 9 反馈回路增益阶跃变化下, 不同刺激电流和延迟下神经元电路的输出波形图 (其中 $V(x)$ 表示神经元电位响应, $V(\text{GAIN})/1\text{V}$ 表示增益随时间的变化) (a) $I = 2$ mA, $\tau = 0.5$ ms (上图是神经元电路输出的电位序列, 下图是增益变化曲线); (b) $I = 2$ mA, $\tau = 1$ ms (上图是神经元电路输出电位序列, 下图是增益变化曲线)

图 9 的结果表明, 在固定的延迟和外界刺激电流下, 当反馈回路的增益阶跃变化可以确保神经元

电路的输出选择不同的电活动模式, 即就是说, 包含自突触回路的神经元可以根据需要通过调节自身的增益来选择不同的响应模式, 进一步减小增益实现负反馈则可以使得电路输出信号保持稳定即对应神经元的静息态, 也就是说, 自突触回路中增益的变化可以使得神经元对外界刺激做出积极响应, 也可以保持沉默, 这体现了神经元对外界刺激信号的选择性. 当然, 进一步也可以考虑增益不变, 在恒定的比较大信号刺激下, 选择时变的延迟时间来分析神经元记忆因子对放电模式的选择. 但实际的神经元回路里的延迟取值一般是有限的且非常

小, 这取决于回路的结构, 因此在大范围内讨论延迟时间的变化没有实际意义.

为了进一步测试该神经元电路的有效性, 我们从硬件上也进行了探索, 其实物如图 10 所示, 硬件测试该实验电路具有一定的有效性, 当运放器输入电压为 $\pm 12\text{ V}$ 时, 电路的功耗大约是 0.6 W , 进一步减小运放器电源电压, 实际电路的功耗还可以减小. 因为采用的是多组运算放大器, 且电阻比较多, 其实际功耗可能偏大, 在进一步的研究中拟采用集成电路优化来大幅度降低功耗, 以便实现多个神经元电路耦合网络的集成实验.

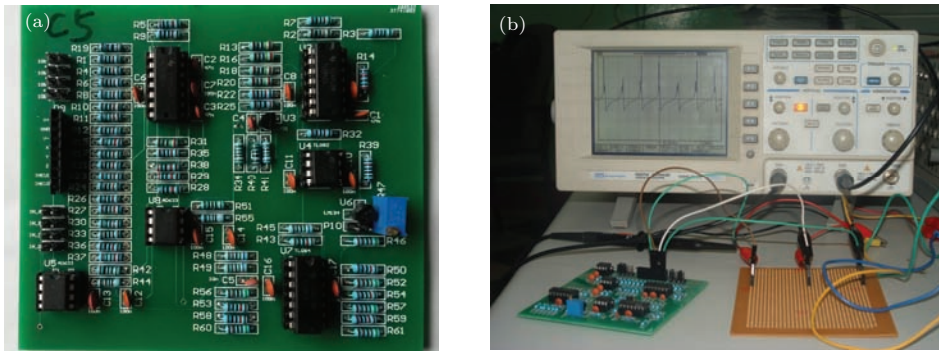


图 10 (a) 包含自突触回路的神经元电路的实物图 (其中面板上的标记, X, Y, Z 分别对应理论模型中的三个变量 x, y, z ; V_+, V_- 表示电路输入电压 GND 表示接地. 上图电路板样板尺寸为 $9.4\text{ cm} \times 9.6\text{ cm}$); (b) 包含自突触的神经元电路工作实物图

神经元受到的外部刺激信号很多情况下可能是变化的, 因此会诱发神经元各类电活动模式的改变和迁移. 在比较大的外界刺激信号下, 神经元可以自发的选择不同的回路增益来实现放电活动模式的转变, 从生物响应方面实现对外界信号的应激反应, 这可能和神经元突触可塑性有关.

的再现神经元的各类放电行为, 也可以模拟神经元在动态刺激下各类放电模式的迁移行为.

3 结 论

参考文献

基于 Pspice 软件平台, 设计了一类包含自突触回路的神经元电路, 发现在外界刺激和电自突触作用下, 神经元电路在自突触驱动下可以输出不同类型的电活动模式, 如静息, 尖峰放电, 簇放电, 混沌放电. 在时变外界刺激下, 可以观察到这几类电活动行为交替出现, 这说明神经元对于外界刺激总是可以做出积极响应. 另一方面, 如果固定外界刺激强度, 动态改变回路增益, 发现电路输出的电位序列呈现不同的模式迁移, 其机理在于神经元对于外界刺激的应激表现出动态适应性和选择性, 其可能机理在于神经元突触的可塑性和神经回路的自适应性. 以上设计的电路在改变控制参数下可以很好

- [1] Hodgkin A L, Huxley A F 1952 *J. Physiol.* **117** 500
- [2] Rinzel J, Ermentrout G B 1989 *Analysis of neuronal excitability and oscillations*, C Koch and I. Segev (Eds.), *Methods in neuronal Modeling: from synapses to Networks* (MIT press, London)
- [3] Cronin J 1987 *Mathematical Aspects of Hodgkin-Huxley Neural Theory* (Cambridge University Press, Cambridge, UK)
- [4] Morris C, Lecar H 1981 *Biophys. J.* **35** 193
- [5] Smith G D 2002 *Comput. Cell Biol.* **20** 285
- [6] Sanjuán M A F, Ibarz B, Casado J M 2011 *Phys. Rep.* **501** 1
- [7] Hindmarsh J L, Rose R M 1982 *Nature* **296** 162
- [8] Hindmarsh J L, Rose R M 1984 *Proc. R. Soc. Lond. B* **221** 87
- [9] Gu H G 2013 *Chaos* **23** 023126
- [10] Kunichika T, Hiroyuki K, Tetsuya Y, Aiharad K, Kawakamif H 2006 *Neurocomput.* **69** 293
- [11] Shilnikov A 2012 *Nonlinear Dyn.* **68** 305
- [12] Yang Z Q, Lu Q S 2008 *Sci. China Ser. Phys. Mech. Astron.* **51** 687

- [13] Crotti P 2011 *Analysis of coherence resonance near bifurcation points in the stochastic Class II Morris-Lecar model*. Master thesis (University of Fribourg Switzerland)
- [14] Selverston A I, Rabinovich M I, Abarbanel H D I, Elson R, Szücs A, Pinto R D, Huerta R, Varona P 2000 *J. Physiol. (Paris)* **94** 357
- [15] Wang W, Chen G, Wang Z D 1997 *Phys. Rev. E* **56** 3728
- [16] Wei D Q, Luo X S 2007 *Commun. Theor. Phys.* **48** 759
- [17] Perc M 2007 *Phys. Rev. E* **76** 066203
- [18] Perc M, Gosak M 2008 *New J. Phys.* **10** 053008
- [19] Gosak M, Marhl M, Perc M 2009 *Physica D* **238** 506
- [20] Kwon O, Jo H H, Moon H T 2005 *Phys. Rev. E* **72** 066121
- [21] Yuan W J, Luo X S, Yang R H 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 835
- [22] Perc M 2009 *Eur. Phys. J. B* **69** 147
- [23] Chik D T W, Wang Y Q, Wang Z D 2001 *Phys. Rev. E* **64** 021913
- [24] Yu Y G, Wang W, Wang J F, Liu F 2001 *Phys. Rev. E* **63** 021907
- [25] Zhang J Q, Wang C D, Wang M S, Huang S F 2011 *Nerocomput.* **74** 2961
- [26] Gu H G, Jia B, Li Y Y, Chen G R 2013 *Physica A* **392** 1361
- [27] Wang Q Y, Zheng Y H, Ma J 2013 *Chaos Solitons & Fractals* **56** 19
- [28] Ma J, Wu Y, Wu N J, Guo H Y 2013 *Sci. China Phys. Mech. Astro.* **56** 952
- [29] H B L, Ma J, Tang J 2013 *Plos One* **8** 69251
- [30] 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]
- [31] Tang Z, Li Y Y, Xi L, Jia B, Gu H G 2012 *Commun. Theor. Phys.* **57** 61
- [32] Liu S B, Wu Y, Li J J, Xie Y, Tan N 2013 *Nonlinear. Dyn.* **73** 1055
- [33] Wu Y, Li J J, Liu S B, Pan J Z, Du M M, Lin P 2013 *Cogn. Neurodyn.* **7** 431
- [34] Gu H G 2013 *Plos One* **8** 81759
- [35] Gu H G, Pan B B, Xu J 2014 *EPL* **106** 50003
- [36] Gu H G, Jia B, Chen G R 2013 *Phys. Lett. A* **377** 718
- [37] Jia B, Gu H G 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 240505 (in Chinese) [贾冰, 古华光 2012 物理学报 **61** 240505]
- [38] Knudsen Daniel P 2006 *Creating functional neural control circuits incorporating both discrete-time, map based neuron and Hindmarsh-Rose electronic neurons* (Honors Junior/Senior Projects) Paper 11
- [39] Wu X Y, Ma J, Yuan L H, Liu Y 2014 *Nonlinear Dyn.* **75** 113
- [40] Wagemakers A, Sanjuán A F, Casado J M 2006 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **16** 3617
- [41] Dahasert N, Ozturk I, Kilic R 2012 *Nonlinear Dyn.* **70** 2343
- [42] Rabinovich M, Huerta R, Bazhenov M, Kozlov A K, Abarbanel H D I 1998 *Phys. Rev. E* **58** 6418
- [43] Mayer J, Schuster H G, Claussen J C 2006 *Phys. Rev. E.* **73** 031908
- [44] Li F, Liu Q R, Guo H Y et al. 2012 *Nonlinear Dyn.* **69** 2169
- [45] Nowotny T, Rabinovich M I 2007 *Phys. Rev. Lett.* **98** 128106
- [46] Sitt J D, Aliaga J 2007 *Phys. Rev. E* **76** 051919
- [47] Kwon O, Kim K, Park S, Moon H T 2011 *Phys. Rev. E* **84** 021911
- [48] Ayers J, Rulkov N, Knudsen D, Kim Y B, Volkovskii A, Selverston A 2010 *Appl. Bionics. Biom.* **7** 57
- [49] Lee Y J, Lee J, Kim K K, Kim Y B, Ayers J 2007 *Neurocomput.* **71** 284
- [50] Bekkers J M 2003 *Curr. Biol.* **13** R433
- [51] Bekkers J M 2002 *Curr. Biol.* **12** R648
- [52] Bekkers J M 2009 *Curr. Biol.* **19** R296
- [53] Herrmann C S, Klaus A 2004 *Int. J. Bifurcat. Chaos* **14** 623
- [54] Wang H T, Ma J, Chen Y L, Chen Y 2014 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **19** 3242
- [55] Qin H X, Ma J, Jin W Y, Wang C N 2014 *Sci. China Tech. Sci.* **57** 936
- [56] Chen J, Li C G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 050503 (in Chinese) [陈军, 李春光 2011 物理学报 **60** 050503]
- [57] L Y Y, Schmid G, Hänggi P, Schimansky-Geier L 2010 *Phys. Rev. E* **82** 061907
- [58] Ma J, Ying H P, Liu Y, Li S R 2009 *Chin. Phys. B* **18** 98

Simulation of electric activity of neuron by setting up a reliable neuronal circuit driven by electric autapse*

Ren Guo-Dong Wu Gang Ma Jun[†] Chen Yang

(Department of Physics, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

(Received 20 June 2014; revised manuscript received 30 September 2014)

Abstract

Transition of electric activity of neuron can be induced by electric autapse, and its action potential is much sensitive to the stimuli from the electric autapse. Generally, the effect of electric autapse on membrane potential of neuron is often described by using time-delayed feedback in closed loop. Based on Pspice software, a class of electric circuit is designed with the electric autapse being taken into consideration, and a time-delayed circuit is used to detect the adjusting action of electric autapse on the action potential. Results are found as follows: (1) The neuronal electric circuit can produce quiescent state, spiking, bursting state under an external force besides the electric autapse circuit. (2) The transition of electric activity occurs between four different states (quiescent, spiking, bursting state) by imposing a time-varying forcing current; its potential mechanism is that the electric circuit is associated with the memory, and the neuron can give different types of response to the same external forcing current. (3) When a strong external force is imposed, the outputs can show different type of electric activities due to an electric autapse, that is to say, self-adaption of gain in the autapse is useful for the neuron and thus different type of electric activities occurs, whose potential mechanism may be due to the effective feedback in the loop; so it is helpful to understand the synaptic plasticity.

Keywords: autapse, neuronal circuit, spiking, bursting

PACS: 87.19.lq, 87.18.Hf, 05.45.-a

DOI: [10.7498/aps.64.058702](https://doi.org/10.7498/aps.64.058702)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11265008, 11372122).

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