

多种化学突触性能比较的数值模拟

陈凯^{1,2}, 逯迈¹, 闻佳^{1,2}

1. 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730070; 2. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070

【摘要】目的:运用数值模拟的方法实现不同化学突触模型。**方法:**通过化学突触将两个Hodgkin-Huxley神经元连接构建简单的化学突触连接模型。运用Simulink软件和DSP Builder软件分别对5种化学突触数学模型建模,得到化学突触的突触电流模拟结果。采用相关系数法量化分析这几种化学突触的模拟结果。**结果:**不同化学突触的数学模型突触电流波形不同;数学描述和建模过程最简单的是化学突触模型1;化学突触模型1、突触模型2和突触模型3的相关系数较接近且较小,其次是化学突触模型4的相关系数,相关系数最大的是化学突触模型5,该模型实现了高精度神经元动作电位的传递。**结论:**突触模型5是最接近于生物学实际的化学突触;化学突触的模拟结果为后续运用硬件实现化学突触奠定了基础。

【关键词】化学突触;数学模型;Hodgkin-Huxley神经元;突触电流;数值模拟

【中图分类号】R322.8;Q811.2

【文献标志码】A

【文章编号】1005-202X(2017)09-0933-08

Performance comparison of numerical simulation of various chemical synapses

CHEN Kai^{1,2}, LU Mai², WEN Jia^{1,2}

1. Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Intelligent Control (Ministry of Education), Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China; 2. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Objective To establish different chemical synapse models using numerical simulation method. **Methods** A simple chemical synapse connection model was constructed by connecting two Hodgkin-Huxley neurons through chemical synapses. The mathematical models of 5 kinds of chemical synapse were modeled with Simulink software and DSP Builder software, respectively, so as to simulate chemical synaptic current. The simulation results of these chemical synapses were quantitatively analyzed with correlation coefficient method. **Results** The synaptic current waveforms of different mathematical synapse models were different. The chemical synapse mode 1 had the simplest mathematical description and modeling process. The correlation coefficients of chemical synapse model 1, synapse model 2 and synapse model 3 were closer and minimum, followed by the correlation coefficient of chemical synapse model 4. The chemical synapse model 5 with the largest correlation coefficient realized the transmission of high precision neuronal action potential. **Conclusion** The synapse model 5 was closest to the biological reality of chemical synapses. The simulation results of chemical synapses laid the foundation for the subsequent use of hardware to achieve the simulation of chemical synapses.

Keywords: chemical synapse; mathematical model; Hodgkin-Huxley neuron; synaptic current; numerical simulation

前言

生物神经系统中,突触是神经系统内部神经元之间以及神经元与感受器或效应器之间信息传递的

重要基础。根据突触传递的信息机制,突触可分为电突触和化学突触。电突触是以电流传递信息,而化学突触以神经递质作为通信媒介,在整个神经系统中占主导地位。化学突触对于信息的处理与传递起着重要的作用^[1]。因此,化学突触的研究对任何一种神经活动具有深刻的意义和重要的价值。

1952,Hodgkin和Huxley^[2-5]两位学者通过实验验证并首次提出了描述神经元动作电位发放与传导的数学模型,即HH神经元模型,该模型是最接近于生物学实际的神经元模型。20世纪90年代,学者们通过生物实

【收稿日期】2017-05-10

【基金项目】国家自然科学基金(51267010,51567015)

【作者简介】陈凯,硕士研究生,研究方向:神经突触的数值模拟与硬件实现,E-mail:chen05kai@126.com

【通信作者】逯迈,博士,教授,博士生导师,研究方向:生物医学电磁学、电磁暴露安全评估,E-mail:mai.lu@hotmail.com

验研究电脉冲在化学突触传递的过程和化学突触的生理特性,建立了不同的化学突触数学模型。Kandel等^[6-8]提出一种动态的化学突触模型。Hansel等^[9]提出一种最简单的刻画神经元化学突触的数学模型。Destexhe等^[10]提出一种简单的突触传递的动力学模型。Sharp等^[11-12]提出一种与神经递质相关的化学突触数学模型。Wang等^[13]研究海马神经元突触抑制网络模型时,提出一种化学突触模型。Rabinovich等^[14]建立具有时间滞后的化学突触数学模型。Savtchenko^[15]提出突触传递是一种复杂的动力学模型。化学突触模型的建立一直是突触研究过程中的一个重要方向。

突触模型在神经生物学中占据重要的地位。国外学者的研究中,2010年,Yu等^[16]用HH模型和以电导为基础的突触研究了单神经元非线性动力学和单突触动力学。2012年,Hutchison^[17]用电路实现了突触模型,并且进行了仿真。2015年,Veletic等^[18]提出一种基于通信理论基础的突触传递模型。2016年,Alam等^[19]在生物分子水平用超大规模集成电路实现化学突触传递过程的模型。国内学者的研究中,2008年,王青云等^[20]研究了一对具有兴奋性化学突触耦合的快峰神经元的同步。2011年,杨康乐^[21]采用抑制性化学突触耦合两个Morris-Lecar模型分析神经网络特性。2014年,李宏伟等^[22]用响应函数的指数逼近方法在Simulink平台上建立神经元突触的电路模型。2015年,杨浦等^[23]定量及定性分析不同化学突触模型在单向环网络中表现的动力学性质。2016年,王金龙^[24]研究了单个Hodgkin-Huxley神经元的特性,并对通过电突触耦合的两个HH神经元进行了FPGA硬件实现。2017年,闰佳等^[25]采用化学突触构建神经网络,对不同网络的特性进行研究。

本文运用MATLAB R2010a中的Simulink和Altera公司提供的辅助设计开发工具箱DSP Builder 11.0对5种不同的化学突触数学模型进行模拟仿真,得到化学突触电流波形。采用相关系数法^[26]对化学突触模拟结果进行量化比较,分析了5种化学突触在生物属性方面表现出的异同。

1 模型介绍

1.1 Hodgkin-Huxley 神经元模型

Hodgkin-Huxley神经元模型^[5]由4个非线性微分方程和6个代数方程来描述:

$$\begin{cases} C \frac{dV}{dt} = G_{Na} m^3 h (E_{Na} - V) + G_K n^4 (E_K - V) + G_L (E_L - V) + I \\ \frac{dm}{dt} = \alpha_m (1 - m) - \beta_m m \\ \frac{dh}{dt} = \alpha_h (1 - h) - \beta_h h \\ \frac{dn}{dt} = \alpha_n (1 - n) - \beta_n n \end{cases} \quad (1)$$

方程中 α 和 β 函数满足:

$$\alpha_m = \frac{0.1(V + 40)}{1 - \exp(-(V + 40)/10)} \quad (2)$$

$$\beta_m = 4 \exp(-(V + 65)/18) \quad (3)$$

$$\alpha_h = 0.07 \exp(-(V + 65)/20) \quad (4)$$

$$\beta_h = \frac{1}{1 + \exp(-(V + 35)/10)} \quad (5)$$

$$\alpha_n = \frac{0.01(V + 55)}{1 - \exp(-(V + 55)/10)} \quad (6)$$

$$\beta_n = 0.125 \exp(-(V + 65)/80) \quad (7)$$

微分方程组中, V 是神经元膜电位; C 是膜电容,取值为 $1 \mu\text{F}/\text{cm}^2$; I 是外部刺激电流; G_{Na} 、 G_K 分别为钠通道和钾通道最大电导,取值分别为 120 、 $36 \text{ mS}/\text{cm}^2$; G_L 为漏电导,取值为 $0.3 \text{ mS}/\text{cm}^2$; E_{Na} 、 E_K 、 E_L 分别为钠通道、钾通道、漏通道的反转电势,取值分别为 50.0 、 -77.0 、 -54.5 mV ; m 为钠通道活化过程参数; n 为钾通道活化过程参数; h 为钠通道失活过程参数。 α 函数和 β 函数是与膜电位有关而与时间无关的速率常数。

1.2 化学突触模型

1.2.1 化学突触模型1 文献[9]中提到的化学突触数学模型描述如下:

$$I_{syn} = G_{syn} H(V_{pre}(t - \tau) - V_{thresh}) \quad (8)$$

式中, V_{thresh} 为突触阈值, G_{syn} 是耦合强度, H 是Heaviside阶跃函数, τ 是神经元信息传递的时滞。

1.2.2 化学突触模型2 文献[10]中提到的化学突触数学模型描述如下:

$$I_{syn} = g_{syn} r(t)(V_{syn} - E_{syn}) \quad (9)$$

$$\frac{dr}{dt} = \alpha[T](1 - r) - \beta r \quad (10)$$

其中, V_{syn} 是突触后电位, E_{syn} 表示突触可逆电位, α 和 β 分别为前后受体结合的速率常数, $[T]$ 是神经递质的浓度,单位是 mM , r 代表受体结合的分率。

1.2.3 化学突触模型3 文献[13]中提到的化学突触数学模型描述如下:

$$I_{syn} = G_{syn} S(V - E_{syn}) \quad (11)$$

$$\frac{dS}{dt} = \alpha F(V_{pre})(1 - S) - \beta S \quad (12)$$

$$F(V_{pre}) = \frac{1}{1 + \exp(-(V_{pre} - \theta_{syn})/2)} \quad (13)$$

其中, I_{syn} 表示突触后电流, G_{syn} 表示最大突触电导, S 表示突触后膜上化学门控离子通道的开放比例, E_{syn} 表示突触可逆电位, $F(V_{pre})$ 代表突触前神经元膜电位的S型函数, α 和 β 分别代表离子通道打开和关闭的速率, V_{pre} 是突触前膜神经元的膜电位, θ_{syn} 是突触前的可逆电位。

1.2.4 化学突触模型4 文献[14]中提到的化学突触

数学模型描述如下:

$$I_{syn} = G_{syn}(V - V_{syn})H(V_{pre}(t - \tau) - V_{thresh}) \quad (14)$$

其中, G_{syn} 表示突触耦合强度, V_{syn} 是突触可逆电位, H 是 Heaviside 阶梯函数, 考虑了突触阈值 V_{thresh} , τ 是突触传递的时间延迟。

1.2.5 化学突触模型 5 文献[15]中提到的化学突触数学模型描述如下:

$$I_{syn} = -C_m S_2 \frac{\partial(V_1 - V_2)}{\partial t} + G_s(V_p - E_s + V_1 - V_2) \quad (15)$$

第一部分 $-C_m S_2 \frac{\partial(V_1 - V_2)}{\partial t}$ 描述由突触前神经元的动作电位产生的电容电流, 第二部分 $G_s(V_p - E_s + V_1 - V_2)$ 描述通过突触后配基门控通道的离子电流, 该电流取决于突触后电导 G_s 、可逆电位 E_s 、突触后保持电位 V_p 、膜电位 V_1 和 V_2 之间的差值。

1.3 化学突触连接模型

化学突触连接模型由两个 Hodgkin-Huxley 神经

元模型分别作为突触前神经元和突触后神经元, 两神经元之间通过化学突触连接进行信息交流, 实现简单的单向耦合。其中, 对突触前神经元直接施加外界刺激, 而突触后神经元没有直接施加外界刺激, 它所接收的刺激来自于化学突触电流。图 1 为化学突触连接模型。

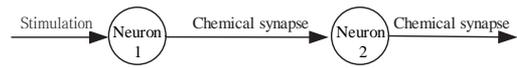


图 1 化学突触连接模型

Fig.1 Chemical synaptic connectivity model

2 建模过程

根据化学突触数学模型分别建立 Simulink 模型和 DSP Builder 模型。以化学突触模型 3 的建模为例来说明化学突触建模过程。由化学突触模型 3 给出的式(11)~(13)所建立的模型如图 2 所示。

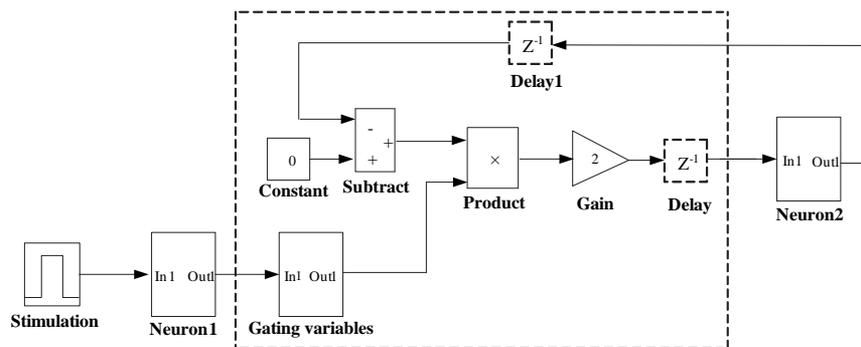


图 2 化学突触模型 3 的建模

Fig.2 Modeling of chemical synapse model 3

图 2 中, 虚线框内是对化学突触数学模型 3 的建模, 这部分代表化学突触的突触电流部分, 也是化学突触的输出部分。标注神经元 1 和神经元 2 的两个子系统分别是对化学突触前神经元和化学突触后神经元的建模, 这两个子模块作为化学突触的输入部分。增益模块表示化学突触的耦合强度。由此可以看出: 化学突触实际上可以看成是以一个神经元为输入状态, 以突触电流为输出的子系统。

2.1 Simulink 建模

Simulink 建模时, 直接在 MATLAB 的 Simulink 界面调用所需要的运算模块。此模型的建立直接根据所给出的化学突触数学模型的式子搭建模型。图 2 中, 去掉用虚线框所表示的 Delay 和 Delay1 两个延时模块, 即为该模型的 Simulink 建模过程。

2.2 DSP Builder 建模

DSP Builder 建模时, 较之 Simulink 建模要复杂些。采用的是嵌入在 MATLAB 中的开发工具箱 DSP Builder 搭建化学突触数学模型 3。建立该模型时, 不能直接对微分方程建模, 先需要对微分方程采用欧拉法离散化得到差分方程, 依据离散积分原理建立相应的离散积分模块, 从而实现对化学突触数学模型的 DSP Builder 建模。模型整体的构建与 Simulink 建模在形式上一样, 不同的是 DSP Builder 建模时要考虑各变量之间的时序问题, 以保证计算的同步。在图 2 中, 包含了用虚线框所表示的 Delay 和 Delay1 两个延时模块, 即为该模型的 DSP Builder 建模过程。延时模块的作用就是保证时序同步, 计算结果不出现错误, 并且所调用的模块中还要设置其它必要的参数, 比如说数据位宽的设置, 这项参数的设置关系到计算结果的准确度。

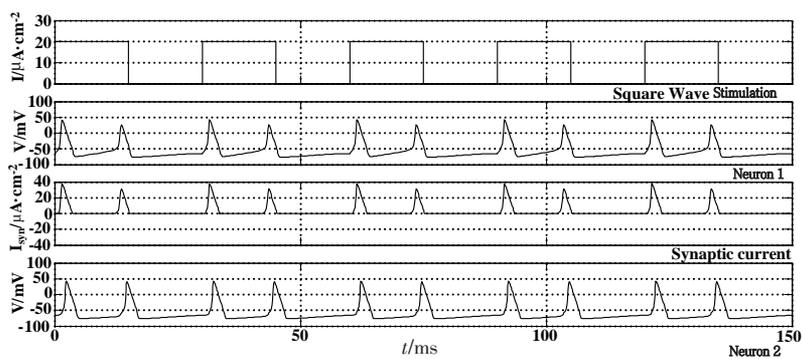
3 模拟结果

神经元1施加的刺激是幅值为 $20 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、周期为 30 ms 的方波刺激。神经元2不施加任何外界刺激,其刺激是由化学突触电流施加的。化学突触的模型实际上是通过对方突触电流的描述体现出化学突

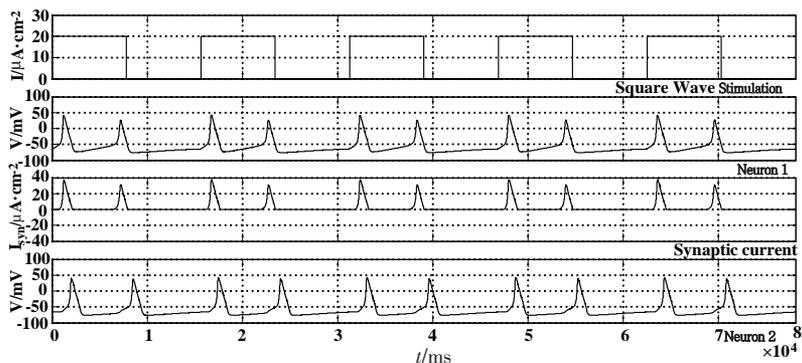
触的生理学特性。以兴奋性化学突触为研究对象,模拟结果分别是 Simulink 模拟结果和 DSP Builder 模拟结果。

3.1 化学突触模型1的模拟结果

图3a和图3b分别为化学突触模型1的 Simulink 模拟结果和 DSP Builder 模拟结果。



a: Simulink simulation results



b: DSP Builder simulation results

图3 化学突触模型1的模拟结果

Fig.3 Simulation results of chemical synapse model 1

3.2 化学突触模型2的模拟结果

图4a和图4b分别为化学突触模型2的 Simulink 模拟结果和 DSP Builder 模拟结果。

3.3 化学突触模型3的模拟结果

图5a和图5b分别为化学突触模型3的 Simulink 模拟结果和 DSP Builder 模拟结果。

3.4 化学突触模型4的模拟结果

图6a和图6b分别为化学突触模型4的 Simulink 模拟结果和 DSP Builder 模拟结果。

3.5 化学突触模型5的模拟结果

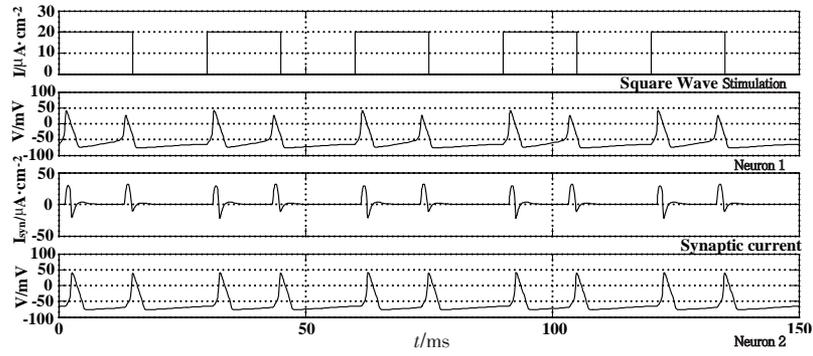
图7a和图7b分别为化学突触模型5的 Simulink 模拟结果和 DSP Builder 模拟结果。

4 模拟结果的验证与分析

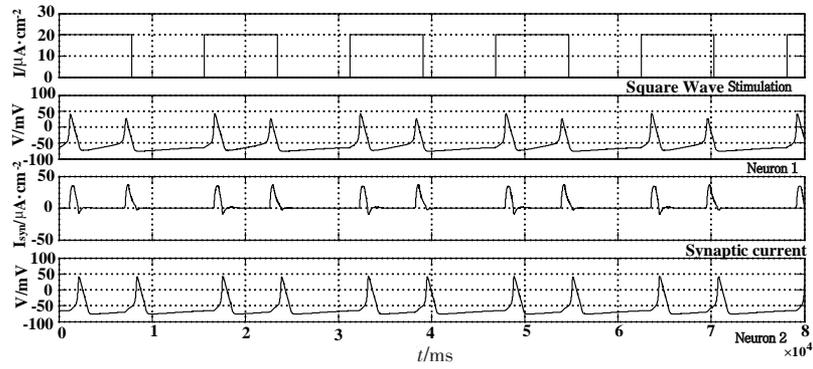
4.1 模拟结果验证

以文献[10]中的化学突触模型为例,验证建模得出的化学突触电流与文献结果的一致性。此处,直接施加在神经元1的刺激是幅值为 $3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 的直流电刺激,耦合强度为 $0.1 \text{ mS}/\text{cm}^2$ 。以兴奋性突触为主要研究对象,得到如图8所示的模拟结果。

通过与文献[10]中的结果对比,建模得到的突触电流波形与文献中的基本一致,说明建模得到的突触电流的正确性。当改变施加到神经元1的刺激时,突触电流波形会随之发生变化,突触电流与突触前神经元上施加的刺激和耦合强度有关。当增大突触耦合强度时,兴奋性突触后电位超过动作电位发放阈值(-55 mV),从而使突触后神经元产生动作电位,此时突触电流波形也发生改变。



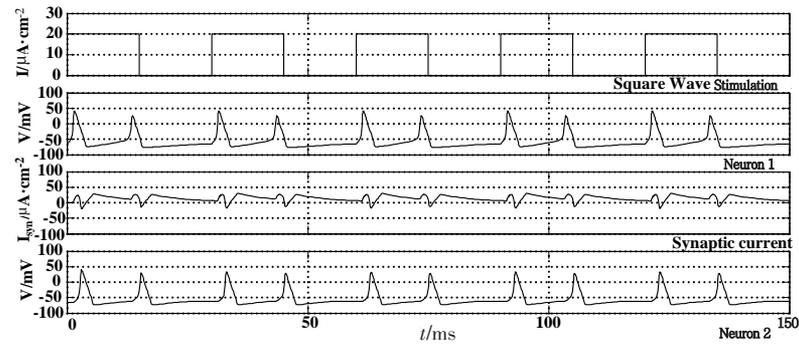
a: Simulink simulation results



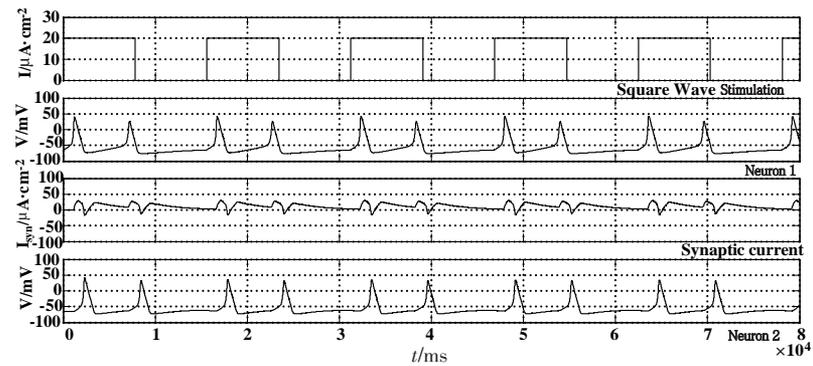
b: DSP Builder simulation results

图4 化学突触模型2的模拟结果

Fig.4 Simulation results of chemical synapse model 2



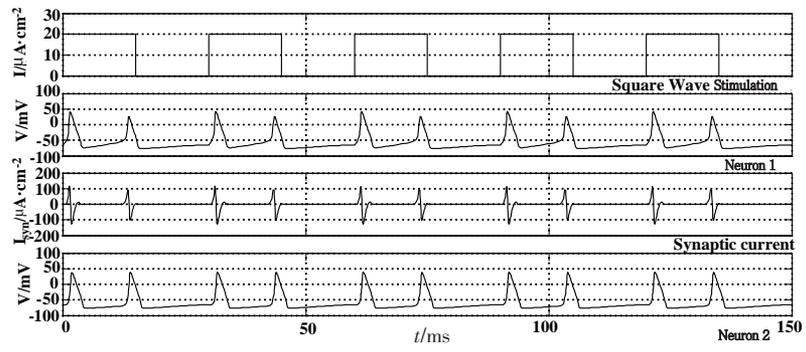
a: Simulink simulation results



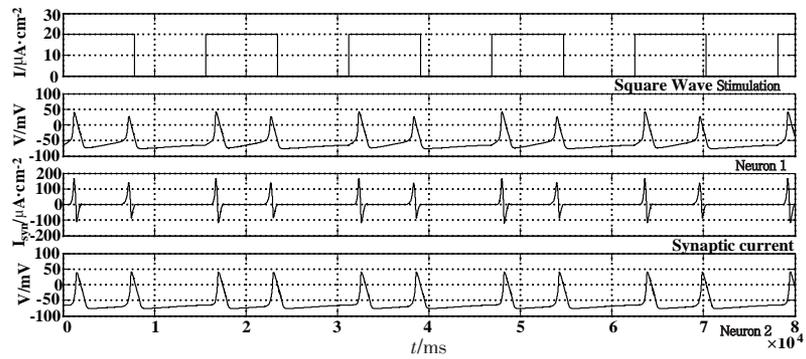
b: DSP Builder simulation results

图5 化学突触模型3的模拟结果

Fig.5 Simulation results of chemical synapse model 3



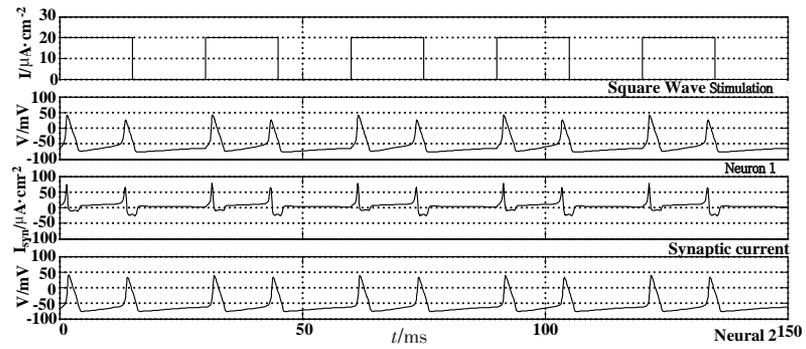
a: Simulink simulation results



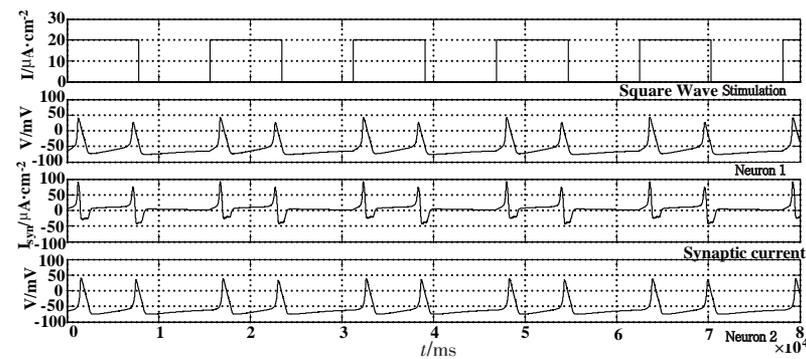
b: DSP Builder simulation results

图 6 化学突触模型 4 的模拟结果

Fig.6 Simulation results of chemical synapse model 4



a: Simulink simulation results



b: DSP Builder simulation results

图 7 化学突触模型 5 的模拟结果

Fig.7 Simulation results of chemical synapse model 5

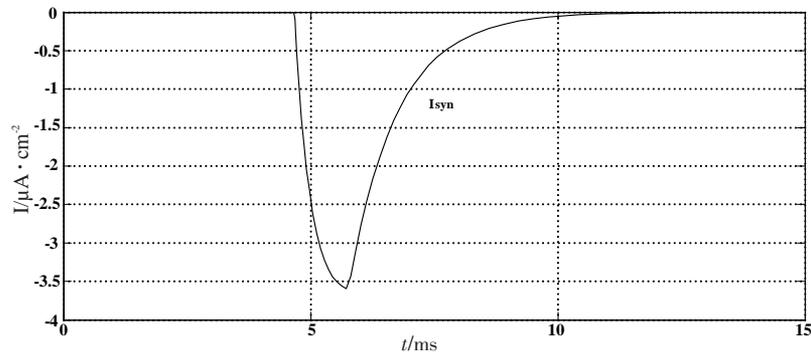


图8 验证结果

Fig.8 Validation results

4.2 结果分析

为了量化比较5种化学突触的模拟结果,引入能够衡量两个随机变量之间线性相关程度的相关系数^[27],相关系数公式如下所示:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}} \quad (16)$$

其中,相关系数 r_{xy} 的取值范围为 $[-1,1]$, $|r|$ 表示变量之间相关度的高低,其值越大,表示两变量间的相关程度越高,即变量的一致性越高。对第三部分中的模拟结果取一个周期,即0~30 ms之间的样本值进行计算,计算结果如表1所示。

表1 模拟结果的相关系数

Tab.1 Correlation coefficient of simulation results

Model	r_{xy}
Chemical synapse model 1	0.953 6
Chemical synapse model 2	0.962 8
Chemical synapse model 3	0.951 2
Chemical synapse model 4	0.985 7
Chemical synapse model 5	0.990 1

x is the action potential of neuron 1, and y is the action potential of neuron 2.

由表1可以分析得出:神经元1和神经元2的动作电位之间的相关系数都大于0.9,属于高度线性相关。说明通过这5种化学突触数学模型,都能将在同一方波刺激下神经元1产生的动作电位传递到神经元2中,并且传递到神经元2的动作电位未发生畸变等现象。但是5种化学突触之间在以下3个方面有一定的区别:(1)在用数学形式描述化学突触的复杂

度方面,化学突触模型1是最简单的模型,数学描述复杂程度最低,其次是化学突触模型5的数学描述复杂度较低,而化学突触模型3的数学描述复杂度最高。(2)在用Simulink和DSP Builder建模实现化学突触电流过程中,实现化学突触数学模型1的建模最简单,采用到的建模模块最少,对于DSP Builder建模而言,该模型消耗的资源也最少。化学突触模型2和化学突触模型3在建模过程中都较复杂,但在消耗资源的方面,化学突触模型3最多,即建模过程也最复杂。(3)在生物属性方面,从相关系数可以看出,化学突触模型1、化学突触模型2和化学突触模型3的相关系数较接近,相比于其他两种模型,这3种模型的相关系数较小,其次是化学突触模型4的相关系数,相关系数最大的是化学突触模型5,同时化学突触模型5的数学表达式复杂程度较低,说明数学描述复杂程度较低的化学突触模型实现了高精度神经元动作电位的传递,该模型最接近于生物学实际,是一个更现实的突触模型。

通过上述模拟结果图可以分析出:(1)在基于不同机理的化学突触模型,其突触电流波形互不相同,但当施加的刺激小、耦合强度小、不足以产生动作电位时,不同化学突触的突触电流波形基本一致。(2)神经元1和神经元2不仅仅是突触前神经元和突触后神经元,它们也是化学突触中的一部分输入,而突触电流是输出,最后刺激神经元2产生神经元动作电位,从而完成整个突触传递过程。(3)化学突触传递神经信息时有突触延迟特性,从第三部分的模拟结果图可以看出神经元2的动作电位稍滞后于神经元1的动作电位,不同化学突触的突触延迟时间不同,但是其延迟时间均在0.5~2.0 ms内。

5 结论

本文主要对5种化学突触模型在同一方波刺激

下分别进行 Simulink 建模和 DSP Builder 建模,得到化学突触模拟结果。采用相关系数法对这几种化学突触的模拟结果进行了量化分析,较高的相关系数表明,5种化学突触都能将神经元动作电位从一个神经元传递到另一个神经元。其中化学突触模型1、化学突触模型2和化学突触模型3的相关系数较接近,相比于其他两种模型,这3种模型的相关系数较小,其次是化学突触模型4的相关系数,相关系数最大的是化学突触模型5,该模型实现了高精度神经元动作电位的传递,说明突触模型5最接近于生物学实际,是一个更现实的突触模型。化学突触模型1是数学描述和建模过程最简单的模型,这为建立神经网络时化学突触的选择提供一定的思路。本文只完成了5种化学突触模型的数值模拟,后续的研究工作就是采用FPGA对具有生物属性的化学突触进行硬件实现,实现具有生物功能的电子神经突触。

【参考文献】

- [1] 阮云迪. 神经生物学[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008: 110-111.
RUAN Y D. Neurobiology[M]. Hefei: China Science and Technology Press, 2008: 110-111.
- [2] HODGKIN A L, HUXLEY A F. Current carried by sodium and potassium ions through the membrane of the giant axon of Loligo[J]. J Physiol, 1952, 116(4): 449-472.
- [3] HODGKIN A L, HUXLEY A F. The components of membrane conductance in the giant axon of Loligo[J]. J Physiol, 1952, 116(4): 473-496.
- [4] HODGKIN A L, HUXLEY A F. The dual effect of membrane potential on sodium conductance in the giant axon of Loligo[J]. J Physiol, 1952, 116(4): 497-506.
- [5] HODGKIN A L, HUXLEY A F. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve[J]. Bull Math Biol, 1990, 52(1): 25-71.
- [6] KANDEL E R. Synaptic transmission in principles of neural science [M]. Norwalk: Appleton and Lange, 1991.
- [7] TSUMOTO K, YOSHINAGA Y, KAWAKAMI H. Bifurcations in synaptically coupled BVP neurons[J]. Int J Bifurcat Chaos, 2001, 11(4): 1053-1064.
- [8] TSUMOTO K, YOSHINAGA Y, AIHARA K, et al. Bifurcations in synaptically coupled Hodgkin-Huxley neurons with a periodic input [J]. Int J Bifurcat Chaos, 2003, 13(3): 653-666.
- [9] HANSEL D, SOMPOLINSKY H. Synchronization and computation in a chaotic neural network[J]. Phys Rev Lett, 1992, 68: 718-721.
- [10] DESTEXHE A, MAINEN Z, SEJNOWSKI T. An efficient method for computing synaptic conductances based on a kinetic model of receptor binding[J]. Neural Comput, 1994, 6(1): 14-18.
- [11] SHARP A A, SKINNER F K, MARDER E. Mechanisms of oscillation in dynamic clamp constructed two-cell half-center circuits[J]. J Neurophysiol, 1996, 76(2): 867-883.
- [12] PEREIRA T, BAPTISTA S, KURTHS J. Onset of phase synchronization in neurons with chemical synapse[J]. Int J Bifurcat Chaos, 2007, 17(10): 3545-3549.
- [13] WANG X J, BUZSÁKI G. Gamma oscillation by synaptic inhibition in a hippocampal inter neuronal network model[J]. J Neurosci, 1996, 16(20): 6402-6413.
- [14] RABINOVICH M I, ABARBANEL H D, HUERTA R, et al. Self-regularization of chaos in neural systems: experimental and theoretical results[J]. IEEE Trans Circ Syst, 1997, 44(10): 997-1005.
- [15] SAVTCHENKO L P. Bilateral processing in chemical synapses with electrical 'ephaptic' feedback: a theoretical model[J]. Math Biosci, 2007, 207(1): 113-137.
- [16] YU T, CAUWENBERGHS G. Analog VLSI biophysical neurons and synapses with programmable membrane channel kinetics[J]. IEEE Trans Biomed Circ Syst, 2010, 4(3): 139-148.
- [17] HUTCHISON F. Electronic model of synaptic transmission [C]// Bioengineering Conference. Philadelphia: IEEE, 2012: 165-166.
- [18] VELETIC M, MESITI F, FLOOR P A, et al. Communication theory aspects of synaptic transmission [C]//IEEE International Conference on Communications. IEEE, 2015: 1116-1121.
- [19] ALAM S, HASAN S M. A VLSI circuit emulation of chemical synaptic transmission dynamics and postsynaptic DNA transcription[J]. IEEE Trans VLSI Syst, 2016, 24(2): 678-691.
- [20] 王青云, 陆启韶. 兴奋性化学突触耦合的神经元的同步[J]. 动力学与控制学报, 2008, 6(1): 25-39.
WANG Q Y, LU Q S. Synchronization of coupled neurons with excitability chemical synapse[J]. Journal of Dynamics and Control, 2008, 6(1): 25-39.
- [21] 杨康乐. 神经网络FPGA仿真系统构建的研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.
YANG K L. Research on construction of simulation system for neural network in FPGA[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [22] 李宏伟, 吴庆祥. 脉冲神经网络中神经元突触的硬件实现方案[J]. 计算机系统, 2014, 23(2): 17-21.
LI H W, WU Q X. Implementation of the synapse of spiking neural network in the hardware [J]. Computer Systems and Applications, 2014, 23(2): 17-21.
- [23] 杨浦, 付喆. 化学耦合神经环路的震荡周期[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2015, 31(6): 27-41.
YANG P, FU Z. The oscillating period of neural loops coupled by chemical synaptic models[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2015, 31(6): 27-41.
- [24] 王金龙. 基于HH模型神经元动作电位的模拟与实现[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2016.
WANG J L. Numerical simulation and hardware implementation of neurons action potential based on Hodgkin-Huxley model [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2016.
- [25] 闻佳, 逯迈, 陈小强, 等. 基于HH模型的神经网络的数值模拟与FPGA实现[J]. 航天医学与医学工程, 2017, 30(1): 38-45.
WEN J, LU M, CHEN X Q, et al. Numerical simulation of neural network based on HH model and its FPGA implementation[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2017, 30(1): 38-45.
- [26] 尹宁. 基于脑电的磁刺激穴位复杂脑功能网络研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2013.
YIN N. Study of complex brain functional networks under magnetic stimulation at acupoint based on EEG[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2013.
- [27] 谢明文. 关于协方差、相关系数与相关性的关系[J]. 数理统计与管理, 2004, 44(4): 33-37.
XIE M W. The relation of covariance, correlation coefficient and correlation[J]. Journal of Applied Statistics and Management, 2004, 44(4): 33-37.

(编辑:陈丽霞)