

具有自适应反馈突触的神经元模型中的混沌: 电路设计*

陈 军¹⁾²⁾ 李春光^{2)†}

1)(定西师范高等专科学校物理与电子工程学系, 定西 743000)

2)(浙江大学信息与电子工程学系, 杭州 310027)

(2010年8月5日收到; 2010年8月20日收到修改稿)

近期文献中报道了在具有自适应反馈突触的神经元模型中, 随着参数的变化, 存在从两个共存吸引子到一个相连吸引子再到两个共存吸引子的混沌转化现象. 本文对此模型进行了电路设计, 同时对具有非单调激活函数功能的电路设计进行了细致的研究, 并利用 Electronic Workbench (EWB) 软件对所设计的电路进行了仿真实验, 研究了电路中的混沌现象, 验证了所设计电路的动力学行为与通过数值模拟结果十分相似.

关键词: 自适应反馈突触, 神经元模型, 混沌, 电路设计

PACS: 05.45.-a

1. 引言

神经元模型中的混沌由于具有重要的科学意义和应用价值, 近年来受到许多学者的关注. 神经网络中的混沌现象在许多领域得到了广泛的应用, 如在图像加密、信息安全和优化计算等方面, 因此人们对混沌信号的产生和混沌振荡器的研究等内容产生了极大的兴趣, 在工程应用领域有目的地产生和加强混沌行为已成为一个重要课题, 研究者通过电路设计来产生各种混沌信号^[1].

神经网络是一个非线性动力学系统. 虽然, 每个神经元的功能和动力学可能比较简单, 但是神经网络的动力学行为却可能十分复杂. 神经网络动力学特性已成为当前研究的热点问题^[2-22]. 在各种不同类型的神经网络中的混沌现象得到了广泛的研究, 例如, 文献[3]对由26个神经元组成的神经网络的动力学行为进行了研究; 文献[4]考察了具有三个神经元的细胞神经网络的混沌行为; 文献[5]描述了在三个神经元的迟滞 Hopfield 型神经网络中的混沌现象; 文献[6]对具有外部正弦激励的 Tabu

学习神经元模型中的混沌行为进行了研究; 文献[7]对高维混沌神经网络在外部正弦激励下的混沌现象进行了探讨; 文献[8-11]发现了在各种时延神经网络中的混沌现象; 文献[12]对惯性二神经元的混沌行为进行了研究; 文献[13, 14]对离散时间的混沌神经网络进行了考察; 此外神经网络学习算法中的混沌现象也有报道^[15]. 近年来一些学者也研究了神经元模型及混沌神经网络的电路实现^[18-22].

源自于神经生物学的神经网络模型由描述神经元的状态和描述神经元之间突触连接的两类变量构成, 因此一个完整的神经网络模型需要两组动力学方程. 但上述研究基本都只考虑了神经元的状态动力学而未考虑突触连接的动力学方程. 近年来具有自适应(动态)突触连接的神经网络模型研究受到了关注, 如文献[23]研究了具有非单调激活函数和自适应突触的离散时间神经网络的动力学行为; 文献[24]对以动态突触耦合的兴奋和抑制的神经元网络的混沌行为进行了研究; 文献[2]对文献[25]中提出的具有自适应反馈突触的神经元模型中的动力学现象进行了研究, 发现随着参数的变

* 国家自然科学基金(批准号:60871094), 全国优秀博士学位论文作者专项资金(批准号:2007B42)和中央高校基本科研业务费专项资金(批准号:2009QNA5026, 2010QNA5031)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: cgli@zju.edu.cn

化,可实现从两个共存吸引子到一个相连吸引子再到两个共存吸引子的混沌转化现象.

本文研究文献[2]中报道的具有自适应反馈的神经元模型的电路设计问题,我们对非单调激活函数模型及具有自适应反馈的神经元模型详细进行了电路设计研究,并利用 EWB^[26] 软件对实现这些模型的电路进行了仿真实验,并对所设计的电路中的动力学现象进行了研究.

2. 具有自适应反馈突触的神经元模型

本文研究的神经元的动力学模型描述如下^[2, 25]:神经元 i 的输出 V_i 是状态 u_i 的函数即 $V_i = g_i(u_i)$, W_{ij} 是从第 j 个神经元到第 i 个神经元的突触连接权,神经元的状态变化方程如下^[2, 25]:

$$\frac{du_i}{dt} = -\frac{u_i}{\tau_i} + \sum_j W_{ij}V_j + I_i, \quad (1)$$

这里 τ_i 是时间常数, I_i 表示外界输入.

如果连接强度 W_{ij} 是常数,即不随时间变化,则只需一组动力学方程. 如果突触是自适应的,根据 Hebb 规则,描述突触随时间变化的另一组方程可写为^[2, 25]

$$B_{ij} \frac{ds_{ij}}{dt} = -s_{ij} + V_i V_j, \quad (2)$$

$$W_{ij} = H_{ij}(s_{ij}),$$

这里 B_{ij} 是一个时间常数, s_{ij} 表示两个神经元 i 和 j 的状态 V_i 和 V_j 近期的相关性, H_{ij} 是一个有界函数.

在此,我们讨论单神经元模型,设 g 和 H 相同,即令 $g = H = f$, 则该模型方程可写为

$$\frac{du}{dt} = -\frac{u}{\tau} + f(qs)f(pu) + I,$$

$$\frac{ds}{dt} = -\alpha s + \alpha f^2(pu), \quad (3)$$

其中 $\alpha = 1/B, p, q$ 是正常数,外界输入正弦函数取为 $I = \varepsilon \sin(\omega t + \varphi)$. 这里,我们取激活函数 $f(x)$ 为

$$f(x) = 2 \tanh(x) - \tanh(x + 1.5) - \tanh(x - 1.5). \quad (4)$$

它和文献[2]中的激活函数在形状上很相似.

3. 具有自适应反馈突触的神经元模型的电路设计与仿真

我们在参考了文献[18—22, 27—33]等的基础上,分别设计了实现激活函数的单元电路、具有自适应反馈突触的神经元模型电路,并运用 EWB 软件对

所设计的电路进行了电路仿真实验,分别介绍如下.

3.1. 激活函数电路的设计与仿真

3.1.1. $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路的设计与仿真

激活函数(4)由三个双曲正切函数线性组合而成. 可见,要实现激活函数(4)的电路功能,首先要设计实现双曲正切函数功能的电路. 在电路设计中,我们采用了一个实现双曲正切函数功能的更加实用的差动放大电路,如图 1 所示. 为了方便,我们称它为 $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路^[18].

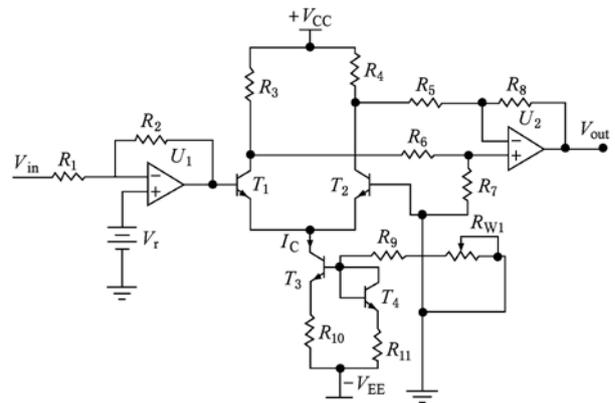


图 1 $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路图

该电路的方程为

$$V_{out} = \frac{1}{2} \left(\frac{R_8}{R_6} - \frac{R_8}{R_5} \right) \times \tanh \frac{1}{2} \left(\frac{R_2}{V_r R_1} V_{in} - \frac{R_1 + R_2}{V_r R_1} V_r \right), \quad (5)$$

其中, $\frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_8} = \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7}$, V_{in}, V_r 和 V_{out} 分别为 $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路的输入、变换和输出电压.

U_1, U_2 为 LM741 型电子集成运算放大器,它与线性电阻搭配完成电路的加、减及放大运算,电阻值分别为 $R_1 = R_5 = R_6 = R_7 = R_8 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = 520 \Omega, R_3 = R_4 = 1 \text{ k}\Omega, R_{10} = R_{11} = 2 \text{ k}\Omega, R_9 = 5 \text{ k}\Omega, R_{w1}$ 为 $1 \text{ k}\Omega$ 至 $10 \text{ k}\Omega$ 范围内可变的电阻器, $+V_{CC}, -V_{EE}$ 为电源,其电压均为 12V . V_r 为温度电压,在室温下, V_r 取值约为 26mV . T_1, T_2, T_3, T_4 为 TN2219A 型三极管,其中, T_1 与 T_2, T_3 与 T_4 分别配对. $T_3, T_4, R_9, R_{10}, R_{11}, R_{w1}$ 和 $-V_{EE}$ 组成比例恒流源,给由 T_1 和 T_2 组成的差动放大器提供偏置电流. 调节可变电阻 $R_{w1} = 5 \text{ k}\Omega$, 可使得 $I_c \approx 1 \text{ mA}$. 因此, $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路的状态方程(5)式可简化为

$$V_{out} = \tanh(V_{in} - 20.23 V_r). \quad (6)$$

当 $V_r = 0$ 时, (6) 式可化为

$$V_{out} = \tanh(V_{in}). \quad (7)$$

此时模块单元电路的仿真实验结果如图 2 所示.

3.1.2. $f(\cdot)$ 单元电路的设计与仿真

根据以上分析可知, 激活函数(4)式的功能可以通过三个 $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路的线性组合来实现, 如图 3 所示为激活函数(4)式的电路图, 其中三个方框中所示为三个 $\tanh(\cdot)$ 模块. 为了叙述方便, 我们称此电路为 $f(\cdot)$ 单元电路.

在图 3 中, 右侧的两个电子集成运算放大器仍然为 LM741, 它们和线性电阻搭配完成电路的加、减

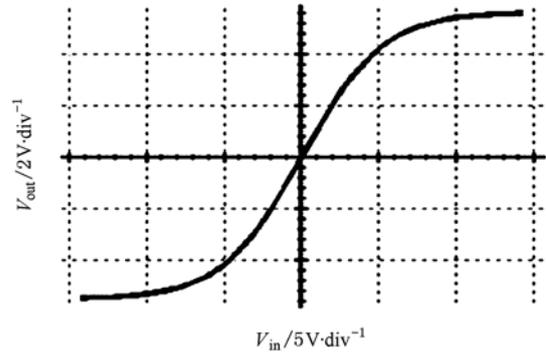


图 2 当 $V_r = 0$ 时 $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路的传输特性图

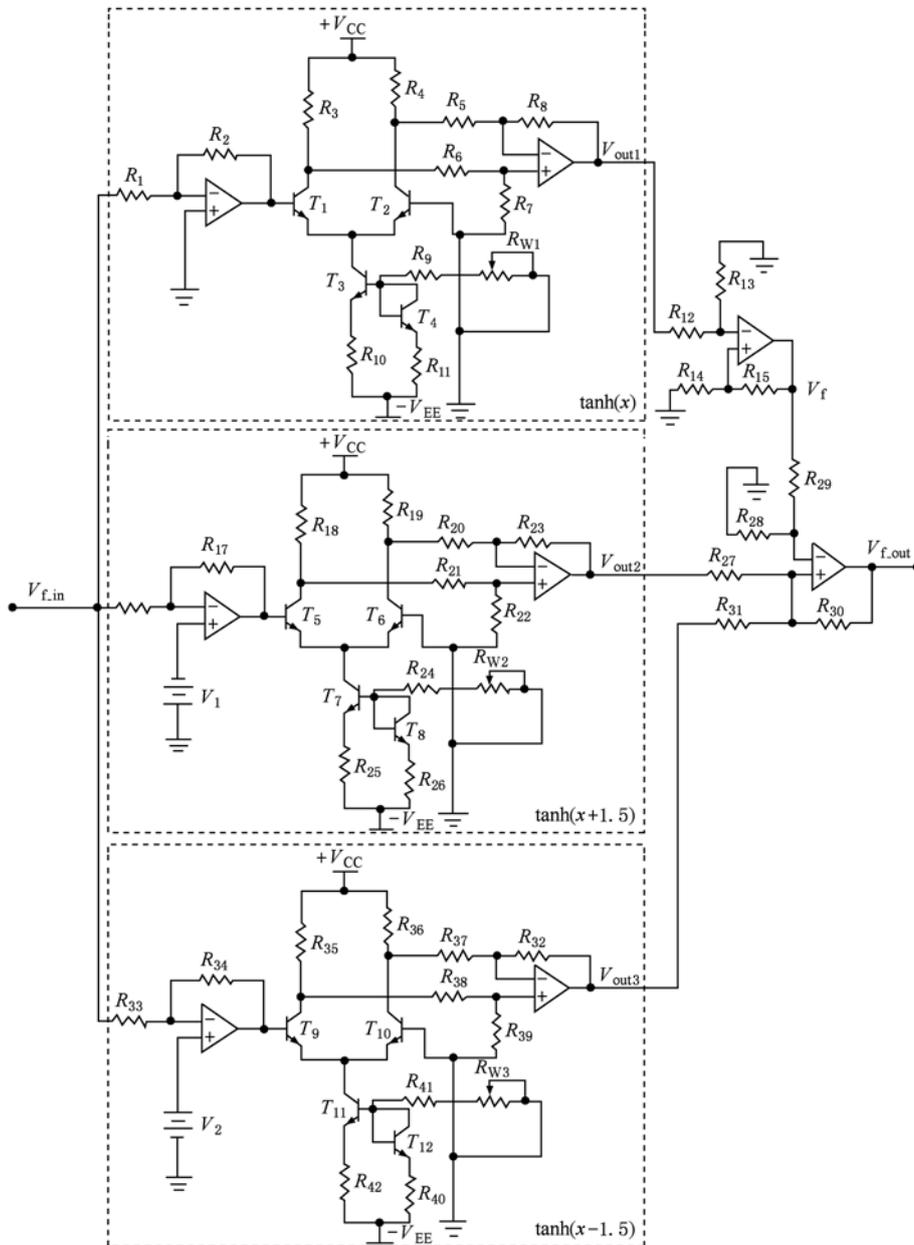


图 3 $f(\cdot)$ 单元电路图

及放大运算. 根据电路回路定律, 对图 3 的电路进行分析有如下的电路方程:

$$V_{f_out} = \frac{R_{30}}{R_{29}}V_f - \frac{R_{30}}{R_{27}}V_{out2} - \frac{R_{30}}{R_{31}}V_{out3} \\ = \frac{R_{30}}{R_{29}} \times \frac{R_{15}}{R_{12}}V_{out1} - \frac{R_{30}}{R_{27}}V_{out2} - \frac{R_{30}}{R_{31}}V_{out3}, \quad (8)$$

其中, $\frac{1}{R_{28}} + \frac{1}{R_{29}} = \frac{1}{R_{27}} + \frac{1}{R_{30}} + \frac{1}{R_{31}}$, $\frac{1}{R_{12}} + \frac{1}{R_{13}} = \frac{1}{R_{14}} + \frac{1}{R_{15}}$, V_{f_out} , V_f 表示 $f(\cdot)$ 单元电路的输出电压, V_{out1} , V_{out2} , V_{out3} 分别表示三个 $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路的输出电压. 通过系统(8)式与激活函数(4)式比较, 可从(6)式得到 $V_1 = V_2 = 74.14 \text{ mV}$. 除了上述 $\tanh(\cdot)$ 模块中已定义的元件参数值外, 电阻 $R_{12} = R_{14} = R_{27} = R_{29} = R_{30} = R_{31} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{15} = 20 \text{ k}\Omega$, $R_{28} = 5 \text{ k}\Omega$. 根据上面 $\tanh(\cdot)$ 模块单元电路的知识, 并令 $V_{f_in} = x$, 则系统(8)可化简为

$$V_{f_out} = 2V_{out1} - V_{out2} - V_{out3} \\ = 2\tanh(x) - \tanh(x + 1.5) \\ - \tanh(x - 1.5). \quad (9)$$

比较系统(9)与激活函数(4)式, 可知系统(8)实现了激活函数 $f(\cdot)$.

我们运用 EWB 软件对 $f(\cdot)$ 单元电路进行仿真实验, 其传输特性的仿真结果如图 4 所示. 通过图 4 也可以看出, 本文所选用的激活函数虽然函数形式上和文献[2]中的激活函数不尽相同, 但形状上十分类似.

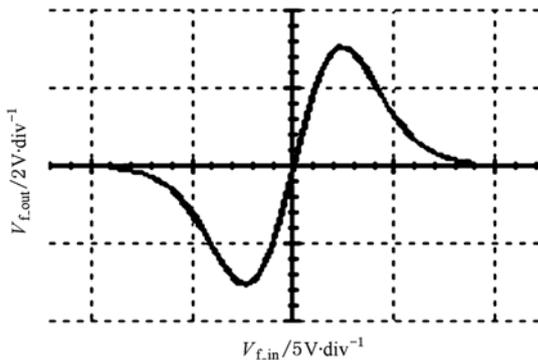


图 4 $f(\cdot)$ 单元电路的传输特性图

3.2. 系统的电路设计与仿真

在系统(3)中, 设参数取值分别为^[2] $\tau = 1$, $p = q = 5$, $\varepsilon = 0.2$, $\omega = 2\pi$, α 为一可变常数. 则系统(3)转化为

$$\dot{u} = -u + f(5s)f(5u) + 0.2\sin(2\pi t + \varphi), \\ \dot{s} = -\alpha s + \alpha f^2(5u). \quad (10)$$

在 EWB 软件环境下, 为了将系统(10)通过电子电路实现, 我们采用线性电阻、线性电容、电子集成运算放大器 LM741、乘法器 AD633 和 $f(\cdot)$ 单元电路等器件来搭建电路. 根据系统(10)和电路基本原理以及各个元件的功能, 转换成相应电路元件, 则其电路如图 5 所示.

电路中运算放大器 LM741 的功能仍然是与线性电阻、电容搭配完成电路的加、减、微分及反相运算, 乘法器 AD633 用来实现非线性运算, $f(\cdot)$ 单元电路实现激活函数(4)的功能, V_s 为外部输入的正弦信号, 其表达式为 $V_s = -0.2\sin(2\pi t + \varphi)$. 电路中全部元器件均选用 EWB 中的电子元件. 根据理想运算放大器的基本特性, 由电路图 5 可推导出系统(10)的电路数学模型如下:

$$\dot{u}_1 = -\frac{u_1}{R_{47}C_1} + \left(-\frac{1}{R_{45}C_1}\right)\left(-\frac{R_{43}}{R_{44}}\right) \\ \times \left[f\left(\frac{R_{58}}{R_{59}}u_2\right)f\left(\frac{R_{49}}{R_{50}}u_1\right)\right] \\ + \left(-\frac{1}{R_{46}C_1}\right)[-0.2\sin(2\pi t + \varphi)], \\ \dot{u}_2 = -\frac{1}{R_{54}C_2}\left(\frac{R_{W5}}{R_{56}}u_2\right) \\ - \frac{1}{R_{53}C_2}\left[-\frac{R_{W4}}{R_{52}}f^2\left(\frac{R_{49}}{R_{50}}u_1\right)\right], \quad (11)$$

其中, $\frac{1}{R_{48}} + \frac{1}{R_{49}} = \frac{1}{R_{50}} + \frac{1}{R_{51}}$, $\frac{1}{R_{57}} + \frac{1}{R_{58}} = \frac{1}{R_{59}} + \frac{1}{R_{60}}$ 和 $\frac{1}{R_{W5}} + \frac{1}{R_{55}} = \frac{1}{R_{56}} + \frac{1}{R_{W6}}$. 这里, 电容值取 $C_1 = C_2 = 1 \mu\text{F}$, 电阻值分别取 $R_{43} = R_{44} = R_{48} = R_{50} = R_{52} = R_{55} = R_{56} = R_{57} = R_{59} = 10 \text{ k}\Omega$, $R_{45} = R_{46} = R_{47} = R_{53} = R_{54} = 1 \text{ M}\Omega$, $R_{49} = R_{51} = R_{58} = R_{60} = 50 \text{ k}\Omega$, R_{W4} , R_{W5} 和 R_{W6} 均为 $10 \text{ k}\Omega$ 至 $60 \text{ k}\Omega$ 范围内可调的电阻器. 改变 R_{W4} , R_{W5} 的阻值相当于改变系统(10)中的 α 参数值, 取不同的 φ 值, 相当于在系统(10)中取不同的初始值, 在下述仿真中我们取 $\varphi = 0$ 或 $\varphi = \pi$. 令 $u_1 = u$, $u_2 = s$, 则系统(10)和(11)是等价的.

在图 5 电路中, 我们改变可变电阻 R_{W4} , R_{W5} 和 R_{W6} 的值, 当 $R_{W4} = R_{W5} = R_{W6} = 15 \text{ k}\Omega$ 时, 即对应于系统(10)中 $\alpha = 1.5$ 时的情况. 我们启动 EWB 仿真软件, 对所设计的电路进行仿真实验, 此时神经网络的轨道出现了混沌, 如图 6 和图 7 所示. 图 6(a), (b)分别为 $\varphi = 0, \varphi = \pi$ 时 u_1 - u_2 相平面图. 图 7(a), (b)分别为 $\varphi = 0, \pi$ 时 t - u_1 波形图.

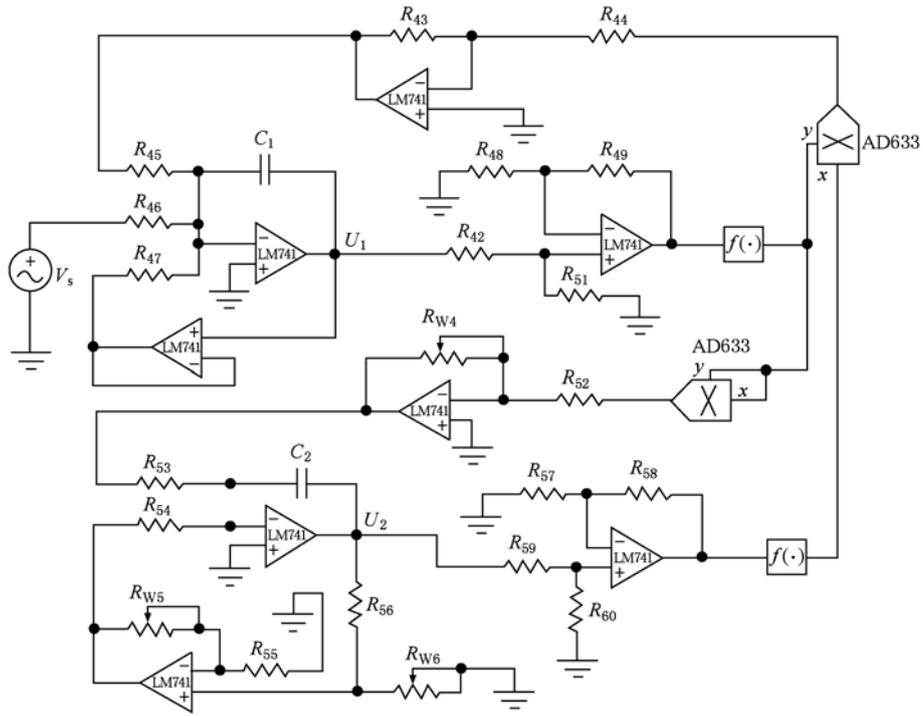


图5 系统(10)的电路图

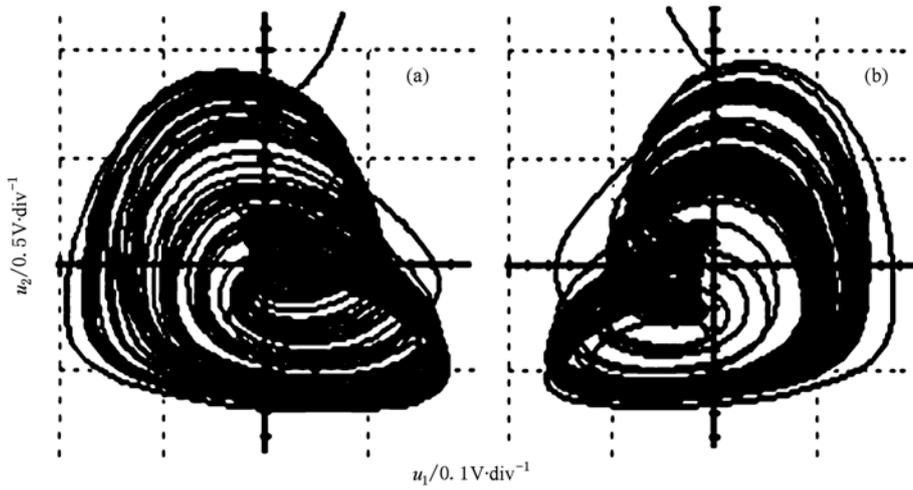


图6 $\alpha = 1.5$ 时 u_1 - u_2 相平面图 (a) $\varphi = 0$; (b) $\varphi = \pi$

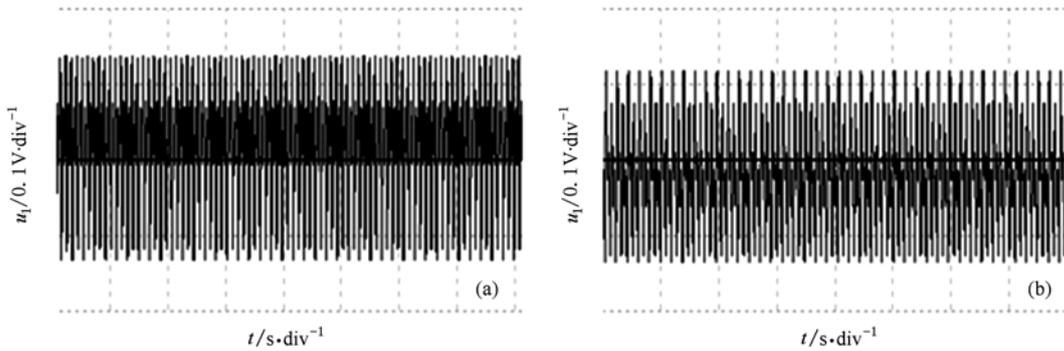


图7 $\alpha = 1.5$ 时 t - u_1 波形图 (a) $\varphi = 0$; (b) $\varphi = \pi$

在 EWB 软件环境下,接着改变图 5 电路中的 R_{W4}, R_{W5} 和 R_{W6} 的阻值,当 $16 \text{ k}\Omega < R_{W4} = R_{W5} = R_{W6} < 35 \text{ k}\Omega$ 时,神经网络电路中的两个共存的吸引子相互连接在了一起,即显现出从两个共存吸引子到

一个相连吸引子转化的混沌现象. 当 $R_{W4} = R_{W5} = R_{W6} = 30 \text{ k}\Omega$ 时 u_1-u_2 相平面图和 $t-u_1$ 波形图分别如图 8(a), (b) 所示. 它对应于系统(10)中 $\alpha = 3$ 的结果.

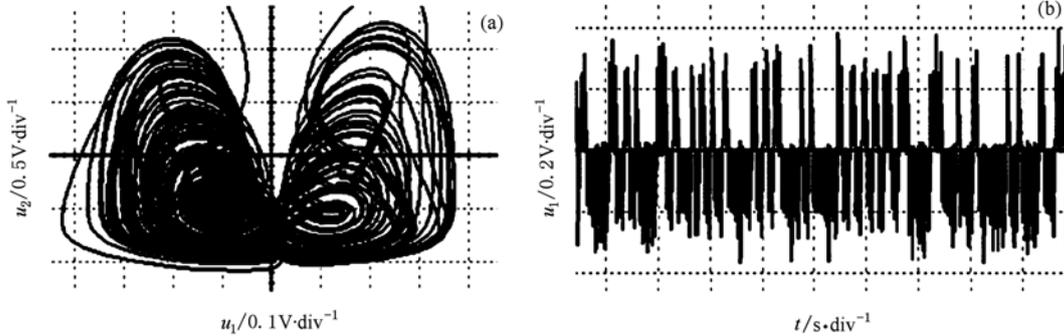


图 8 $\alpha = 3$ 时仿真实验图 (a) u_1-u_2 相平面图;(b) $t-u_1$ 波形图

当 R_{W4}, R_{W5} 和 R_{W6} 的阻值超过 $35 \text{ k}\Omega$ 时,神经网络的轨道又分离成两个独立的混沌吸引子(图未给出). 随着可变电阻值的增加,其轨迹进而变成了周

期性轨道. 当 $R_{W4} = R_{W5} = R_{W6} = 50 \text{ k}\Omega$ 时,即 $\alpha = 5$ 时,对应于不同 φ 值的仿真结果分别如图 9(a), (b) 所示. 以上这些仿真实验结果都与文献[2]中的

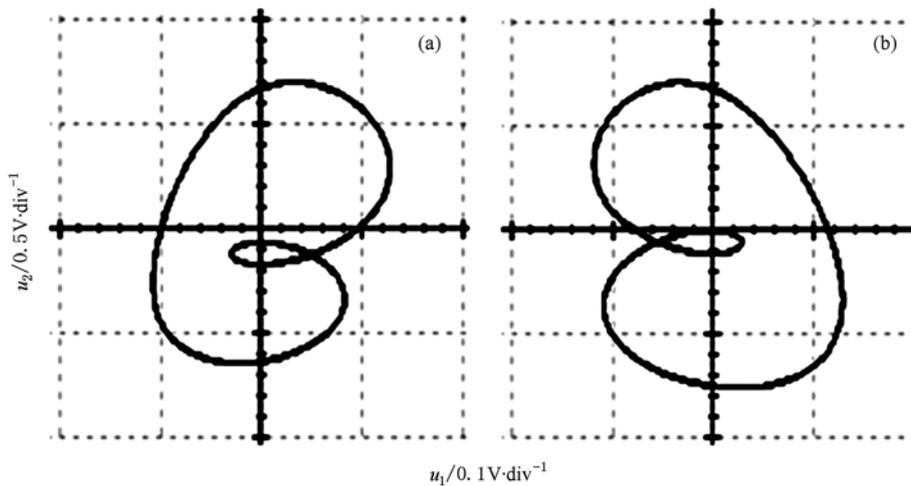


图 9 $\alpha = 5$ 时 u_1-u_2 相平面图 (a) $\varphi = 0$;(b) $\varphi = \pi$

结果相符合.

4. 结 论

本文对具有自适应反馈的神经元模型进行了电路设计,推导出可行的电路参数,特别是对实现非单调激活函数单元电路的设计较为详细. 在此基

础上利用 EWB 电路仿真软件进行了仿真实验研究. 我们可以看到,EWB 实验仿真结果与文献[2]中数值模拟结果相一致,表明了所设计电路的正确性. 由于 EWB 软件采用的是实际电路元件模型,其仿真实验结果与从实际硬件电路得到的结果是十分相近的. 本文所作的工作对混沌神经元的电路设计和应用研究具有一定的意义.

- [1] Tao C H, Lu J A, Lü J H 2002 *Acta Phys. sin.* **51** 1497 (in Chinese) [陶朝海、陆君安、吕金虎 2002 物理学报 **51** 1497]
- [2] Li C G, Chen G R 2005 *Chaos, Solitons and Fractals* **23** 1599
- [3] Kürten K E, Clark J W 1986 *Phys. Lett. A* **114** 413
- [4] Zou F, Nossek J A 1993 *IEEE Trans. CSA-I* **40** 166
- [5] Li C G, Yu J B, Liao X F 2001 *Phys. Lett. A* **285** 368
- [6] Li C G, Chen G R, Liao X F 2005 *Int. J. Bifur. Chaos* **15** 2633
- [7] Bondarenko V E 1997 *Phys. Lett. A* **236** 513
- [8] Li C G, Chen G R, Liao X F, Yu J B 2004 *Eur. Phys. J. B* **41** 337
- [9] Liao X F, Wong K W, Leung C S, Wu Z F 2001 *Chaos, Solitons and Fractals* **12** 1535
- [10] Gilli M 1993 *IEEE Trans. CAS-I* **40** 849
- [11] Lu H T 2002 *Phys. Lett. A* **298** 109
- [12] Wheeler D W, Schieve W C 1997 *Phys. D* **105** 267
- [13] Chen L N, Aihara K 1995 *Neural Networks* **8** 915
- [14] Chen L N, Aihara K 2001 *IEEE Trans. CAS-I* **47** 1455
- [15] Li C G, Liao X F, Yu J B 2003 *Neurocomputing* **55** 731
- [16] Wang Q Y, Lu Q S, Wang H X 2005 *Chin. Phys. B* **14** 2189
- [17] Wang Q Y, Lu Q S, Chen G R 2008 *Int. J. Bifur. Chaos* **18** 1189
- [18] Duan S K, Liao X F 2007 *Phys. Lett. A* **369** 37
- [19] Duan S K, Wang L D 2009 *Computers & Mathematics with Applications* **57** 1736
- [20] Sekikawa M, Kohno T, Aihara K 2008 *Artif Life and Robotics* **13** 116
- [21] Takemoto T, Kohno T, Aihara K 2007 *Int. J. Bifur. Chaos* **17** 459
- [22] Chen J, Li C G 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 020502 (in Chinese) [陈军、李春光 2011 物理学报 **60** 020502]
- [23] Caroppo D, Stramaglia S 1998 *Phys. Lett. A* **246** 55
- [24] Dror G, Tsodyks M 2000 *Neurocomputing* **32-33** 365
- [25] Dong D W, Hopfield J J 1992 *Network: Comp Neural Sys.* **3** 267
- [26] Wang G H 2008 *Circuit designing and its application of Multisim 10* (Beijing: National Defense Industry Publishing House) p122 (in Chinese) [王冠华 2008 Multisim10 电路设计及应用 (北京:国防工业出版社) 第122页]
- [27] Jia H Y, Chen Z Q, Yuan Z Z 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4469 (in Chinese) [贾红艳、陈增强、袁著祉 2009 物理学报 **58** 4469]
- [28] Liu L, Su Y Z, Liu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 1966 (in Chinese) [刘凌、苏燕辰、刘崇新 2007 物理学报 **56** 1966]
- [29] Cang S J, Chen Z Q, Wu W J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 1792
- [30] Chen Z Y, Zhang X F, Bi Q S 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 2326 (in Chinese) [陈章耀、张晓芳、毕勤胜 2010 物理学报 **59** 2326]
- [31] Liu C X 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 6865 (in Chinese) [刘崇新 2007 物理学报 **56** 6865]
- [32] Zhang R X, Yang S P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 020510
- [33] Wang H X, Cai G L, Miao S, Tian L X 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030509

Chaos in a neuron model with adaptive feedback synapse: Electronic circuit design*

Chen Jun¹⁾²⁾ Li Chun-Guang^{2) †}

1) (*Department of Physics and Electronic Engineering, Dingxi Teachers' College, Dingxi 743000, China*)

2) (*Department of Information Science and Electronic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*)

(Received 5 August 2010; revised manuscript received 20 August 2010)

Abstract

In a neuron model with adaptive feedback synapse, with the change of parameters, the existence of two coexisting chaotic attractors, switching from the coexisting chaotic attractors to a connected chaotic attractor, and then switching back to the two coexisting chaotic attractors in this model were recently reported. An electronic circuit design for this model is described in detail in this paper. The circuit design of the non-monotonous activation function unit is also considered in detail. The designed circuits are simulated using the Electronic Workbench (EWB) software. Simulation results demonstrate that the dynamical behaviors of the designed circuit are closely similar to those in numerical simulations.

Keywords: adaptive feedback synapse, neuron model, chaos, circuit design

PACS: 05.45.-a

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 60871094), the Foundation for the Author of National Excellent Doctoral Dissertation of China (Grant No. 2007B42) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant Nos. 2009QNA5026 & 2010QNA5031).

† Corresponding author, E-mail: cgli@zju.edu.cn