

基于忆阻器的模拟人工神经元电路设计

朱任杰, 张 涛, 柯志强

(武汉科技大学 信息科学与工程学院, 湖北 武汉 430081)

摘 要: 为了解决传统的人工神经元电路难以连续调整和掉电存储权值的问题, 使用由忆阻器构成的人工神经突触电路, 设计出一种人工神经元电路. SPICE 仿真实验结果证实了设计的可行性. 所设计的神经元电路, 在调整、存储权值方面相比于传统的人工神经元电路具有很大优势.

关键词: 人工神经元电路; 忆阻器; SPICE

中图分类号: TM50

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)08-0171-06

Design of Analog Artificial Neurons Circuit Based on Memristor

ZHU Ren-jie, ZHANG Tao, KE Zhi-qiang

(School of Information Science and Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: In order to solve the problem of continuous adjustment and power-down memory weights in traditional artificial neural circuits, artificial neural circuits based on artificial synaptic circuits which is made of memristor is proposed in the paper. The proposed circuit is simulated by SPICE, the results show that the circuit have a great advantage in terms of adjustment and memory weights compared with traditional artificial neural circuits.

Key words: artificial neural circuits ; memristor ; SPICE

1 引言

传统的模拟神经元电路一般采用固定电阻、可变线性电导以及动态方式、数字方式和不发挥方式来表示其突触权值^[1]. 但这些方式都不能方便有效地存储神经突触上的权值.

加州大学伯克利分校的蔡少棠教授在分析电路基本变量之间的关系时提出了忆阻器的概念, 它用以描述电荷 q 与磁通量 φ 之间的关系^[2]. 2008 年惠普实验室发现了一种具有记忆功能的纳米双端电阻^[3], 其电气特性与蔡少棠教授提出的忆阻器特性相符, 证实了忆阻器的存在. 忆阻器实际上就是一个具有记忆功能的非线性电阻, 这一特性非常适合用于制造非易失性存储设备, 非常适合用来作为模拟人工神经元电路的神经突触^[4-5], 将经过多次学习得到的期望输出的权值存储下来. Hyongsuk Kim 等提出一种基于忆阻器的人工神经突触信号选择电

路^[6], 该电路通过一个输入端口实现突触权值方向、大小的调整和信号的输入. 本文利用该信号选择电路构成基于忆阻器的人工神经突触电路, 搭建人工神经元电路.

2 忆阻器

2.1 忆阻器的概念和性质

在传统电路理论中有四种基本变量: 电流 i 、电压 v 、电荷 q 和磁通量 φ , 从数学上分析, 其中任意两个变量之间的关系存在着六种可能性, 如下:

$$\begin{cases} dv = R \cdot di \\ d\varphi = L \cdot di \\ dq = C \cdot dv \\ d\varphi = v \cdot dt \\ dq = i \cdot dt \\ \varphi = ?q \end{cases} \quad (1)$$

以上六种变量关系中, 前面的五种关系在很早

收稿日期: 2013-11-09; **修回日期:** 2013-12-30

基金项目: 湖北省自然科学基金项目(2011CDC075); 湖北省教育厅科研项目资助(D20101104)

以前就被发现了,其中 R 、 L 和 C 分别是现有的三种基本电路元件:电阻、电感和电容,但是磁通量 φ 和电荷 q 之间的关系迟迟未能确定.加州大学伯克利分校的蔡少棠^[2]教授猜想磁通量 φ 和电荷 q 之间的关系为 $d\varphi = Mdq$,其中 M 被他定义为忆阻值同时提出了忆阻器的概念.2008 年,惠普实验室宣布成功研制出固态忆阻器^[3].该忆阻器是一种具有记忆特性的非线性纳米元件,忆阻的物理量纲与电阻相同,其阻值取决于流过忆阻器的电荷总量.当给忆阻器施加正向电压时,流经忆阻器的电流为正,其阻值减小;当电压反相时,流经忆阻器的电流为负,其阻值增加;当其阻值达到最大或最小值时,继续施加电压忆阻器的阻值不再变化.断电后,忆阻器能保持断电时的电阻值.

BIOLEK Zdeněk^[7-8]等人在惠普实验室忆阻器原型的基础上,提出了一种忆阻器 SPICE 仿真模型,可以自由修改边界效应条件等参数以改变忆阻器的性质,这些参数分别是忆阻器阻值的初始值 R_{init} ,最大值 R_{off} ,最小值 R_{on} ,金属氧化物薄膜厚度 D ,离子迁移率 μ 和用以表征离子非线性迁移特性的窗函数的参数 p .文献^[9]中考虑到离子迁移是需要一定强度的电场这一要素,在 BIOLEK Zdeněk 等人设计模型的基础上,提出了一种具有阈值电压 V_T 的忆阻器模型,只有施加在忆阻器两端的电压大于阈值时才能改变忆阻器的阻值.

2.2 基于忆阻器的人工神经突触电路

突触是神经元之间连接的接口.神经元之间的连接强度即突触权值是可以随训练改变的,且能长期存储,具有记忆功能.信号可以对神经元起刺激作用,也可以起抑制作用,故人工神经突触应该具备如下特性:能够连续调整权值,权值能够被稳定地存储,权值具有正负性.

蔡少棠教授提出的忆阻器的一个重要性质就是断电后能保持断电时的电阻值,也就是说忆阻器是一种记忆器件,这使得忆阻器非常适合用来搭建人工神经突触电路.基于这点,本文在 Hyongsuk Kim 等提出的神经突触信号选择电路^[6]的基础上,设计出一种基于忆阻器的人工神经突触电路.该神经突触电路由 5 个忆阻器构成,其电路结构如图 1 所示.

图中 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 为 Hyongsuk Kim 等提出的神经突触信号选择电路^[6],用来选择信号通路即权值的正负性, M_5 和差分放大器 A 构成神经突触, I_s 为输入的电流信号.差分放大器 A 的输出为

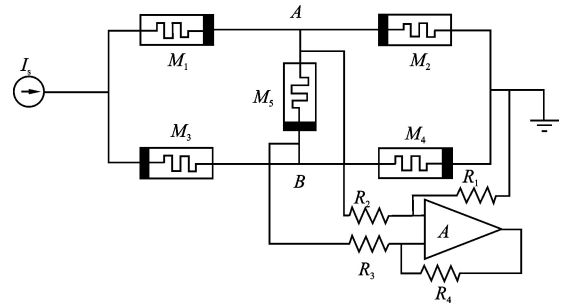


图 1 人工神经突触电路

$$V_{AOUT} = \frac{(R_3 + R_4) \times R_1}{(R_1 + R_2) \times R_3} \times V_A - \frac{R_4}{R_3} \times V_B \quad (2)$$

该电路的操作分为信号方向设定、权值大小设定、信号输入这三个部分.

2.2.1 信号方向设定

根据前文所述,忆阻器具有方向性,且要改变忆阻器的阻值需要其两端压降大于阈值.图 1 所示电路中 M_1 、 M_4 方向相同, M_2 、 M_3 方向相同.故在 I_s 上通入正向的幅值较大的电流时,在图 1 所示的 5 个忆阻器上产生的压降均超过其阈值,由于流经 M_1 、 M_4 上的电流为正向,故它们阻值减小.当通入电流的持续时间较长时, M_1 、 M_4 的阻值会减小到最小值 R_{on} .同理,由于流经 M_2 、 M_3 上的电流为负向,故它们阻值增加.当通入电流的持续时间较长时, M_2 、 M_3 的阻值会增加到最大值 R_{off} .所以这时可以将 M_1 、 M_4 视为开状态,而将 M_2 、 M_3 视为关状态,由于 M_1 、 M_4 的阻值远小于 M_2 、 M_3 的阻值,当前信号通路为 M_1 、 M_4 、 M_5 .这时输入流经忆阻器后使其两端压差小于阈值的正向小电流信号,在 A、B 间产生的压差 V_{AB} 为正值,表示权值为正.在 I_s 上通入负向的持续时间较长、幅值较大的电流时,流经 M_1 、 M_4 上的电流为负向,故它们的阻值会增加到最大值 R_{off} ,这时 M_1 、 M_4 视为关状态.同理,流经 M_2 、 M_3 上的电流为正向,故它们的阻值会减小到最小值 R_{on} , M_2 、 M_3 视为开状态.这时由于 M_2 、 M_3 的阻值远小于 M_1 、 M_4 的阻值,信号通路是 M_2 、 M_3 、 M_5 .这时输入流经忆阻器后使其两端压差小于阈值的正向小电流信号,在 A、B 间产生的压差 V_{AB} 为负值,表示权值为负.如表 1、2 所示.

表 1 输入大电流后各忆阻器状态

输入大电流方向	各忆阻器状态
正向	$M_1 = M_4 = R_{\text{on}}, M_2 = M_3 = R_{\text{off}}$
负向	$M_1 = M_4 = R_{\text{off}}, M_2 = M_3 = R_{\text{on}}$

表 2 输入正向小电流信号后 A, B 间的压差

	各忆阻器状态	A, B 间的压差
输入正向	$M_1 = M_4 = R_{on}, M_2 = M_3 = R_{off}$	V_{AB} 为正值
小电流信号	$M_1 = M_4 = R_{off}, M_2 = M_3 = R_{on}$	V_{AB} 为负值

2.2.2 权值大小设定

本文设计的电路中,利用忆阻器 M_5 的阻值大小来表示神经突触的权值大小,在信号通路选定以后,就可以进行权值大小的设定.此时,若信号通路为 M_1 、 M_4 ,在 I_s 上通入一个负向的幅值较大、持续时间短的电脉冲,电流流经 M_5 可以在其两端产生超过阈值的压降.由于流经 M_5 的电流为负向, M_5 阻值增加.只要调整电流脉冲的脉冲宽度,就可以调整 M_5 阻值的大小.但是考虑到不影响 M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 的开关状态.这里只能通入持续时间较短的电流脉冲,让 M_5 在有限阻值范围内变化.同理,当信号通路为 M_2 、 M_3 时,在 I_s 上通入一个正向的幅值较大、持续时间短的电脉冲,使流经 M_5 上的电流为负向, M_5 阻值增加.

3 忆阻器构成的人工神经元电路

3.1 基于忆阻器的基本人工神经元电路

神经元是神经网络的基本组成单元.任何复杂的神经网络都是由一个个基本神经元组成的.一个简单的感知器神经元模型如图 2 所示.

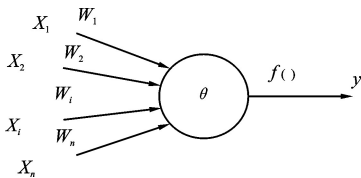


图 2 简单的感知器神经元模型

图中, X_i 是该神经元的第 i 个输入, W_i 为第 i 个输入到处理单元的连接权值即突触权值, θ 为阈值, y 为神经元的输出.它满足如下的关系:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta\right) \quad (3)$$

式中, f 为激发函数,它决定神经元受到各输入 X_i 的共同刺激下是否被激发至兴奋态,在本文中,它取为阶跃函数:

$$f = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta \geq 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n w_i x_i - \theta < 0 \end{cases} \quad (4)$$

基于感知器神经元模型,本文设计出基于忆阻器的人工神经元电路,如图 3 所示.

图 3 所示电路中, $A_1 \sim A_5$ 为理想运放. C_1 为理想电压比较器. X_1 、 X_i 对应神经元模型中的输入信

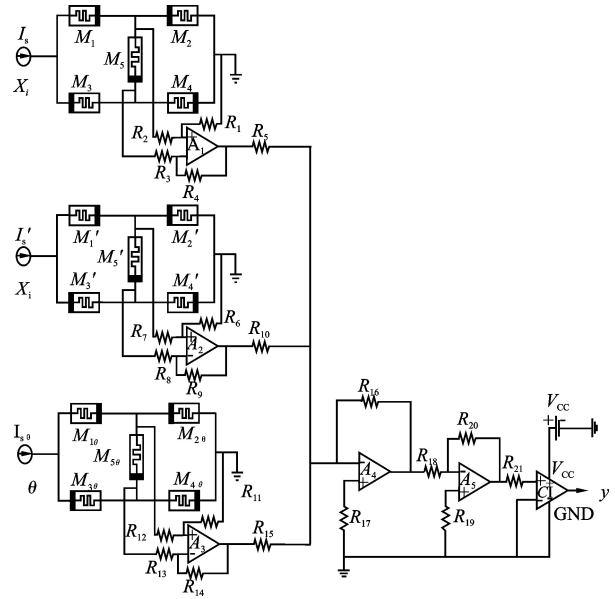


图 3 神经元电路

号, θ 对应神经元模型中的阈值, y 为神经元输出.

该电路中 M_5 的阻值对应式(3)中的 w_i , 即突触权值. 输入信号 X_i 在 M_5 上产生的压降 V_{M_5} 对应式(3)中的输入信号在连接权重下的乘积 $w_i x_i$. $A_1 \sim A_3$ 构成的差分放大器求出 $V_{M_5} \sim V_{M_{5\theta}}$. 对于阈值 θ , 可视为 $-w_i x_i$, 在图 3 所示电路中, 通过信号方向的选择, 选定 $M_{2\theta}$ 、 $M_{3\theta}$ 、 $M_{5\theta}$ 为信号通路即 $M_{5\theta}$ 为负向权值即可. A_4 构成的加法器对应式(3)中的求和函数. A_4 的输出为

$$V_{A4OUT} = -R_{16} \left(\frac{V_{A1OUT}}{R_5} + \frac{V_{A2OUT}}{R_{10}} + \frac{V_{A3OUT}}{R_{15}} \right) \quad (5)$$

由于 A_4 构成的是反向求和电路, 在 A_4 后加上由 A_5 构成的反相器.

$$V_{A5OUT} = -\frac{R_{20}}{R_{18}} V_{A4OUT} \quad (6)$$

图 3 所示电路中的电压比较器 C_1 构成一个过零比较器, 对应式(4)中的阶跃激发函数. 其输出如下:

$$V_{COUT} = \begin{cases} V_{CC} & V_{A5OUT} \geq 0 \\ 0 \text{ V} & V_{A5OUT} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

3.2 单个神经元可实现的二值数字或逻辑运算感知器模型

单个神经元可实现的二值数字或逻辑运算感知器模型如图 4 所示, 其中输入变量 X , $X \in \{0, 1\}$. W_1 、 W_2 为两个输入端对应的神经突触的权值. 输出为 y , θ 为阈值, f 为激发函数.

欲采用感知器实现或逻辑函数, 则将其表 3 所示或逻辑真值表的四组函数输入、输出对作为分类

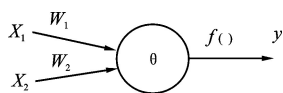


图4 或逻辑运算感知器模型

样本,以设计感知器的权重和阈值.

表3 或逻辑真值表

X_1	X_2	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

设权重为 W_1, W_2 , 阈值为 θ , 则有

$$\begin{cases} w_1 \times 0 + w_2 \times 0 - \theta < 0 \\ w_1 \times 0 + w_2 \times 1 - \theta \leq 0 \\ w_1 \times 1 + w_2 \times 0 - \theta \geq 0 \\ w_1 \times 1 + w_2 \times 1 - \theta \geq 0 \end{cases} \quad (8)$$

上述方程组的解有无穷多组,若选取上述方程的一组解为 $W_1 = 1, W_2 = 1, \theta = 0.5$. 则所设计的或逻辑感知器模型如图5所示.

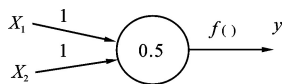


图5 计算得出的或逻辑运算感知器模型

4 仿真实验

本文的实验都是在文献[9]所提出的忆阻器模型上实现的,忆阻器的相关参数均为

$R_{on} = 100 \Omega, R_{off} = 16 \text{ k}\Omega, R_{init} = 11 \text{ k}\Omega, p = 1, D = 10 \text{ nm}, V_T = 1.2 \text{ V}, \mu = 10^{-14} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1}$.

图3所示电路中其3他元件参数如下:

$V_{CC} = 5 \text{ V}, R_{17,19,21} = 5.1 \text{ k}\Omega, R_{18,20} = 10 \text{ k}\Omega,$

$R_{1 \sim 16} = 20 \text{ k}\Omega, A_1 \sim A_5$ 为理想运放, C_1 为理想电压比较器. 将上述参数带入式(3)、式(5)、式(6)中得

$$V_{A1 \sim 3OUT} = V_A - V_B \quad (9)$$

$$V_{A4OUT} = -(V_{A1OUT} + V_{A2OUT} + V_{A3OUT}) \quad (10)$$

$$V_{A5OUT} = -V_{A4OUT} = (V_{A1OUT} + V_{A2OUT} + V_{A3OUT}) \quad (11)$$

故

$$V_{A5OUT} = V_{M5} + V_{M5'} + V_{M5\theta} \quad (12)$$

如果设 $M_{5'}$ 为正向权值, $M_{5\theta}$ 为负向权值, 即 $V_{M_{5'}}$ 和 $V_{M_{5\theta}}$ 为正值, $V_{M_{5\theta}}$ 为负值, 可设 $\theta = -V_{M_{5\theta}}$.

将式(12)和式(7)与式(3)和式(4)对比,发现图3所示电路可以表示神经元的数学模型. 下面通过 SPICE 仿真软件对该电路进行了一系列仿真.

4.1 神经突触权重调整试验

首先在图1所示神经突触电路的 I_s 端通入幅值 50 mA , 持续时间 $[0, 50 \text{ ms}]$ 的电流脉冲, 进行信号方向选择, 通过 SPICE 仿真可以得到如图6所示通入正或负向电流脉冲后各个忆阻器的阻值变化.

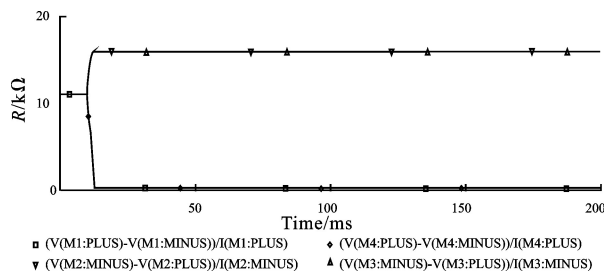
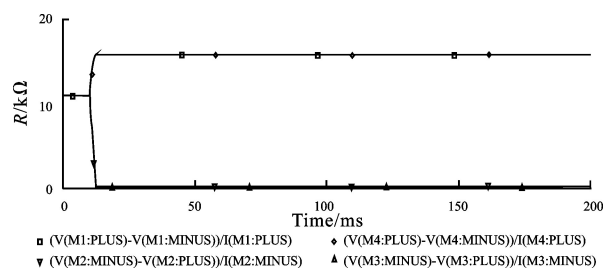
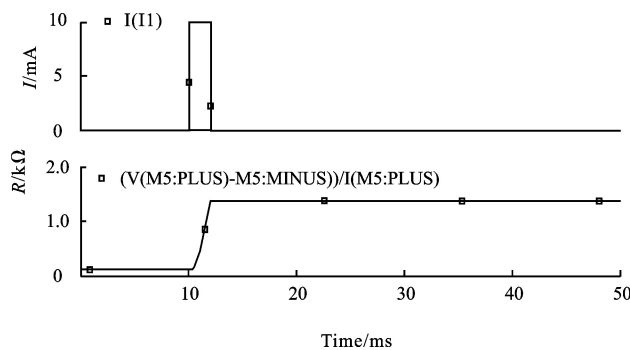
(a) 通入正向电流后 $M_1 \sim M_4$ 的阻值变化(b) 通入负向电流后 $M_1 \sim M_4$ 的阻值变化

图6 通入正或负向电流脉冲后各忆阻器的阻值

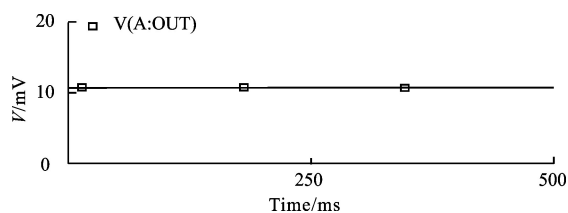
在设定好信号方向后,再来改变权值即 M_5 的阻值大小. 经过试验,发现通入幅值 10 mA , 持续时间小于等于 2 ms 的电流脉冲时,可以改变 M_5 的阻值在 $[100 \Omega, 1.38 \text{ k}\Omega]$ 之间变化,且不影响 $M_1 \sim M_4$ 的开关状态. 实验结果如图7所示.

图7 输入 2 ms 电流脉冲后 M_5 阻值的变化

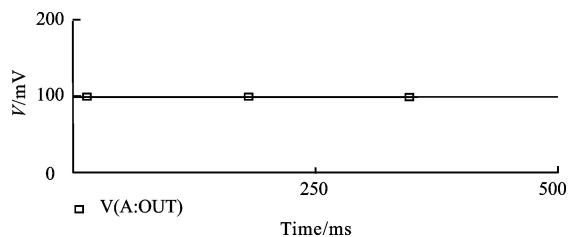
在设定好权值后,就可以在 I_s 端输入电流信号,经过试验发现通入 $100 \mu\text{A}$ 的直流电流信号时,在忆阻器两端产生的压降低于其阈值,故选择电流信号幅值为 $100 \mu\text{A}$.

通过 SPICE 仿真,当通入 $100 \mu\text{A}$ 的直流电流信号且 M_5 的阻值在 $[100 \Omega, 1.38 \text{ k}\Omega]$ 之间变化时,图1所示电路中差分放大器 A 的输出电压 V_{AOUT} 的变

化范围为 $[10.7 \text{ mV}, 97.7 \text{ mV}]$. 如图 8 所示.



(a) M_5 处于最小阻值时两端的压差



(b) M_5 处于最大阻值时两端的压差

图 8 M_5 两端压差的变化范围

4.2 单个神经元可实现的二值数字或逻辑运算实验

图 5 中单个神经元可实现的二值数字或逻辑运算感知器模型中, 神经元有两条神经突触, 其权值为 $W_1 = W_2 = 1$. 阈值 $\theta = 0.5$. 由式(12)可知, $\theta = -V_{M_{5\theta}} = -\omega_{\theta}x_{\theta} = 0.5$. 由于输入信号 $X \in \{0, 1\}$, 故 $x_{\theta} = 1$, 所以 $\omega_{\theta} = -0.5$. 由上节实验可知, M_5 的阻值变化范围为 $[100 \Omega, 1.38 \text{ k}\Omega]$, 故可设权值为 1 时 M_5 的阻值为 $1.38 \text{ k}\Omega$, 权值为 0 时 M_5 的阻值为 100Ω . 权值为 -0.5 时 M_5 的阻值为 $\frac{1\ 380 - 100}{2} = 640 \Omega$. 由于忆阻器可以等效为一个非线性电阻, 其阻值与电流脉冲持续时间不是线性关系. 经过试验, 调整 M_5 的阻值到 640Ω 需要在 I_s 端输入幅值为 10 mA , 持续时间 1.25 ms 的电流脉冲, 如图 9 所示.

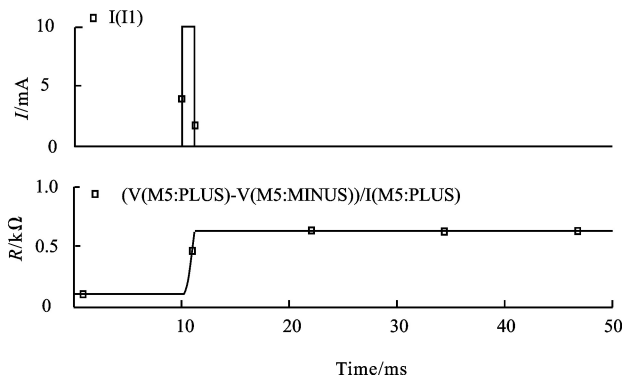


图 9 输入 1.25 ms 电流脉冲调整 M_5 阻值变为 640Ω

神经元电路的权值与 M_5 的阻值以及 I_s 端输入的电流脉冲大小和持续时间的对应关系如表 4

所示.

表 4 权值与 M_5 的阻值对应关系

权值	M_5 的阻值 / Ω	I_s 端电流脉冲持续 / 时间 / ms	I_s 端电流脉冲幅值 / mA
0	100	0	0
-0.5	640	1.25	10
1	11 380	2	10

由上节实验可知, 输入信号逻辑 $X = 1$ 时, 在 I_s 端通入幅值为 $100 \mu\text{A}$ 直流电流信号, 当 $X = 0$ 时, I_s 端短路到地. 设电压比较器输出 5 V 为逻辑 1, 输出 0 V 为逻辑 0. 如表 5 所示.

表 5 逻辑值与信号值对应关系

逻辑值	I_s 端输入信号的幅值 / μA	电压比较器输出电压的幅值 / V
0	0	0
1	100	5

按照前面叙述方法和计算结果调整图 3 所示神经元电路的信号通路和权值, 然后在 I_s 、 I_s 端输入如表 6 所示的电流信号, 通过 SPICE 仿真可以得到如图 10 所示实验结果.

表 6 神经元电路或逻辑运算的输入信号

时间 / ms	0~10	10~13	13~20	20~50
I_1 幅值 / μA	100	0	100	0
I_2 幅值 / μA	0	0	100	0

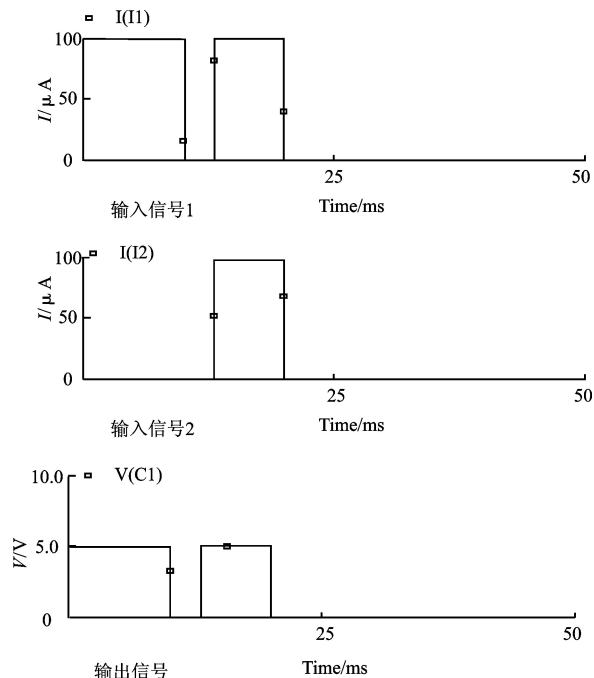


图 10 神经元电路或逻辑运算

由以上仿真实验结果可知, 逻辑运算结果与真值表一致. 表明本电路能够实现神经元电路基本的运算功能.

本文所设计的用忆阻器实现的神经元电路的权

值调整更加连续、精确、方便. 由于忆阻器是纳米级的器件, 相比普通的电阻以及晶体管组成的电路, 具有更高的集成度. 所以本文设计的基于忆阻器的人工神经元电路完全可以替代传统的模拟人工神经元电路.

5 结束语

本文设计了一种基于忆阻器的人工神经元电路. 相比传统的人工神经元电路, 本文所设计的神经元电路可以实现神经突触权值的连续正反调整, 且只用一个输入端口就可以实现信号方向的选择、权值的调整和信号的输入. 同时, 由于忆阻器的阻值连续稳定可调且具有掉电记忆功能, 相比传统的神经元电路, 本文所设计神经元电路中的突触权值调整更加稳定, 且经过学习获得的权值可以被稳定的存储. 即使掉电, 权值也不会丢失. 经过仿真实验, 可知本文所设计电路的功能基本符合设计要求. 因此, 本设计对于人工神经元硬件实现的研究具有一定的参考价值.

参考文献:

- [1] 周伟雄, 靳东明, 李志坚. 模拟神经元电路实现研究现状与进展[J]. 固体电子学研究进展, 2002, 22(3): 268-279.
- [2] Chua L O. Memristor-the missing circuit element [J]. IEEE Trans Circuit Theory, 1971(18): 507-519.
- [3] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, et al. The missing memristor found[J]. Nature, 2008, 2008, 453(1): 80-83.
- [4] Sharifi M J, Banadaki Y M. General SPICE models for memristor and application to circuit simulation of mem-

ristor-based synapses and memory cells[J]. Journal of Circuits, Systems, and Computers, 2010, 19(2): 407-424.

- [5] Huang G M, Ho Y, Li P. Memristor system properties and its design applications to circuits such as non-volatile memristor memories [C] // Communications, Circuits and Systems (ICCCAS), 2010 International Conference on. [s. l.]: IEEE, 2010: 805-810.
- [6] Kim H, Sah M, Yang C, et al. Neural synaptic weighting with a pulse-based memristor circuit [J]. Circuits and Systems I: Regular Papers, IEEE Transactions on, 2012, 59(1): 148-158.
- [7] Biolek Zdeněk, Biolek Dalibor, Biolková Viera. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift[J]. Radio-engineering, 2009, 18(2): 210-214.
- [8] Biolek D, Biolek Z, Biolkova V. SPICE modeling of memristive, memcapacitive and meminductive systems [C] // Proceedings of the Circuit Theory and Design European Conference on. Brno, Czech Republic: IEEE, 2009: 249-252.
- [9] 段宗胜, 甘朝晖, 王勤. 一种改进的忆阻器的 SPICE 模型及其仿真[J]. 微电子学与计算机, 2012, 29(8): 193-199.

作者简介:

朱任杰 男, (1987-), 硕士研究生. 研究方向为嵌入式系统、忆阻器及神经网络方面的研究.

张涛 男, (1967-), 博士, 硕士生导师. 研究方向为数模混合集成电路设计, 开关电源与功率电子学, 信号与信息处理等.

柯志强 男, (1988-), 硕士研究生. 研究方向为模拟集成电路、开关电源、忆阻器及神经网络.

(上接第 170 页)

- [8] Datcu M, Seidel K. Image Information Mining: Exploration of Image Content in Large Archives [C] // IEEE Conference on Aerospace. [s. l.]: IEEE, 2000.

作者简介:

张锦华 女, (1979-), 硕士, 讲师. 研究方向为图像处理、三维建模.

孙挺 男, (1972-), 博士, 副教授. 研究方向为智能信息处理.