

# 采用脉冲宽度调制技术实现人工神经网络<sup>1</sup>

陈 琼 郑启伦 凌卫新\*

(华南理工大学计算机科学与工程学院 广州 510640)

\*(华南理工大学应用数学系 广州 510640)

**摘 要** 该文提出了一种采用脉冲宽度调制 (PWM) 技术实现的人工神经网络 (ANN)。神经网络的权值采用数字存储器存储, 突触电路由开关组成。电容积分电路和电流采样保持电路完成输入信号和权值信号的乘加运算, 输出采用双电流镜。电路结构简单, 易于集成, 可用于构成前馈网络, 如实现“异或”运算的人工神经网络。

**关键词** 脉冲宽度调制 (PWM), 神经网络, 权值, 突触

**中图分类号** TN911.3, TN-052

## 1 引 言

人工神经网络技术已广泛应用于许多领域, 如数据处理, 模式识别, 过程控制等许多领域。神经网络的应用大多是用软件来模拟实现神经网络, 这种方法不能体现神经网络广泛并行处理信息的基本特性, 且在速度上远远不能满足研究和应用的要求, 特别是实时应用的要求。因此, 中外许多学者致力于人工神经网络的硬件实现的研究<sup>[1-5]</sup>, 探求用硬件手段直接实现的人工神经网络系统, 从而在真正意义上体现神经网络的并行处理信息的能力。

神经网络的电子学实现方法有模拟实现、数字实现、混合数/模实现和脉冲技术实现等<sup>[4]</sup>。

近年来, 神经网络的脉冲实现技术引起人们的广泛关注。用脉冲技术实现人工神经网络, 可融合模拟实现和数字实现两者的优点, 是一种较好的神经网络实现方法。本文采用电流型脉冲宽度调制技术 (PWM) 将数字权值信号转化为脉冲宽度调制信号, 从而使突触电路的输入信号和权值信号的乘加运算易于实现, 神经元电路结构简单, 并为以较简单的电路实现权值的修改和存取提供可能性。

## 2 采用 PWM 技术实现的突触神经元

人工神经网络实现的关键技术是神经元输入信号和权值信号的乘加运算的实现和权值的存取。减小乘加运算电路的规模及解决权值的存取对于神经网络的 VLSI 实现意义重大。

采用 PWM 技术实现的神经元首先是将存储在存储器中的数字权值转化为脉冲串信号, 然后经脉冲宽度调制器产生一个脉冲宽度和权值成正比的脉冲宽度调制信号, 如图 1 所示, 控制图 2 所示电路的开关  $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。



图 1 数字权值转化为 PWM 信号

图 2 所示的 PWM 突触和神经元电路由突触电路、电流积分器、采样保持电路和双向电流型 CMOS 电流镜<sup>[6]</sup>组成。突触电路主要是开关  $S_1, S_2, \dots, S_n$ 。电流积分器由电容  $C_1$  和晶体

<sup>1</sup> 2000-09-12 收到, 2001-03-09 定稿

国家自然科学基金 (69783008)、国家教委博士点基金 (98056117) 和广东省自然科学基金 (970525) 资助项目

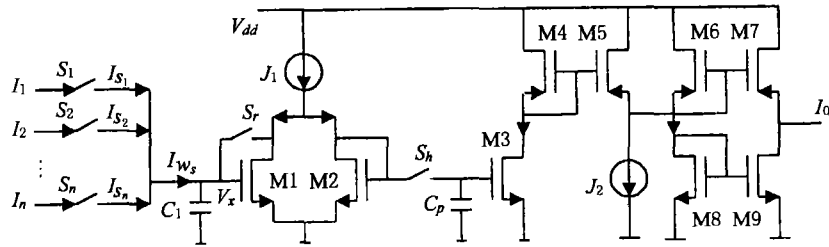


图 2 PWM 突触和神经元电路

管 M1, M2 组成, 电容  $C_1$  的放电开关  $S_r$  由放电脉冲信号  $\Phi_r$  控制, 如图 3(a) 所示. 开关  $S_h$  和电容  $C_p$ , 晶体管 M3 组成采样保持电路, 采样开关  $S_h$  由采样脉冲信号  $\Phi_h$  控制, 见图 3(b). 图 2 电路的输出部分采用双向电流镜, 因而输入电流信号可以是双向的, 即可以是正电流也可以是负电流.

一个工作周期由放电脉冲  $\Phi_r$  的上升沿起到采样脉冲  $\Phi_h$  的下降沿止. 在每个工作周期里脉冲信号产生电路将数字权值转化为脉冲串信号, 即输出等频脉冲串信号, 如图 3(d) 所示, 其脉冲个数和权值成正比, 然后经脉冲宽度调制器产生宽度和权值成正比的脉冲信号, 如图 3(e) 所示, 用于控制图 2 所示电路的开关  $S_1, S_2, \dots, S_n$ .

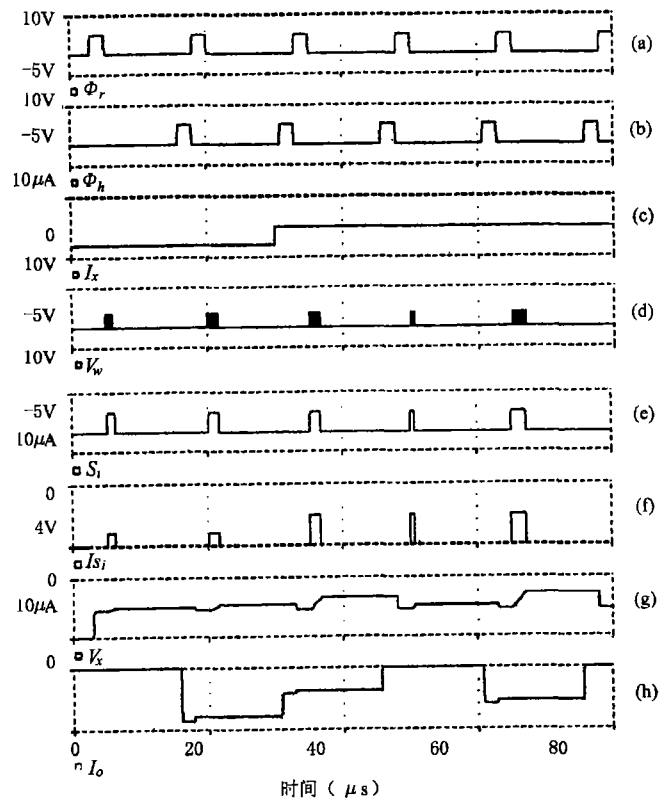


图 3 PWM 突触神经元电路 PSPICE 模拟结果

脉冲宽度调制器输出的脉冲信号  $S_i(n) \propto W_i(n)$ , 即

$$S_i(n) = K_1 W_i(n) \quad (1)$$

其中  $W_i(n)$  是权值,  $K_1$  是和电路参数有关的常数.

$I_1, I_2, \dots, I_n$  是神经元的输入信号, 开关  $S_1, S_2, \dots, S_n$  由权值的脉冲宽度调制信号  $S_i(n)$  控制,  $S_i(n)$  像一窗函数, 为高电平时输入信号可通过, 也就是

$$I_{s_i}(n) = \begin{cases} I_i(n), & S_i(n) \text{ 为高电平} \\ 0, & S_i(n) \text{ 为低电平} \end{cases} \quad (2)$$

因为是电流信号, 所以积分电容器  $C_1$  的积分电流  $I_{w_s}(n)$  为

$$I_{w_s}(n) = \sum_{i=1}^N I_i(n) \cdot S_i(n) \quad (3)$$

在每个工作周期开始时, 放电开关  $S_r$  闭合, 电容  $C_1$  放电. 放电脉冲结束时, 由权值控制的开关  $S_1, S_2, \dots, S_n$  闭合, 开始对电容  $C_1$  充电, 使  $V_x$  电位升高,  $V_x$  升高的电位  $\Delta V_x(n)$  为

$$\begin{aligned} \Delta V_s(n) &= K_2 \cdot \int_0^T \frac{I_{w_s}(n)}{g_m} \cdot dx \\ &= \frac{K_2}{g_m} \cdot \int_0^T \sum_{i=1}^N I_i(n) \cdot S_i(n) \cdot dx \\ &= \frac{K_2}{g_m} \cdot K_1 \cdot \sum_{i=1}^N I_i(n) \cdot W_i(n) \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $g_m$  是电容  $C_1$  的跨导,  $K_2$  是与电路参数有关的常数. 随着  $V_x$  电位的升高, 晶体管 M1 的漏极电流增大, 增大的漏极电流  $\Delta I(n) \propto \Delta V_s(n)$ . 当采样脉冲到来时, M2 和 M3 构成一电流镜, 在 M3 的漏端接 PMOS 电流镜和一恒流源, 则输出电流  $I_o(n) \propto \Delta V_s(n)$ , 即

$$I_o(n+1) = K_3 \cdot \Delta V_x(n) = K \cdot \sum_{i=1}^N I_i(n) \cdot W_i(n) \quad (5)$$

其中  $K_3$  是与电路参数有关的常数,  $K = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3$ . (5) 式实现了输入信号和权值信号的乘加运算. 由于图 2 电路的输出部分采用双向电流镜, 当输入信号为正时, 电流从负载管 M7 输出正电流. 当输入信号为负时, 电流从负载管 M9 输出负电流.

### 3 PSPICE 模拟结果

为了验证以上的分析, 用 PSPICE 模拟图 2 的 PWM 突触和神经元电路, 模拟波形如图 3 所示. 图 3(a) 是电容  $C_1$  的放电脉冲信号  $\Phi_r$ , 图 3(b) 是采样脉冲信号  $\Phi_h$ , 图 3(d) 是脉冲信号产生电路产生的正比于数字权值的脉冲串信号, 经脉冲宽度调制电路产生正比于数字权值的脉冲宽度调制信号, 如图 3(e) 所示. 当输入波形为图 3(c) 时, 经由脉冲宽度调制的权值信号控制的开关后波形如图 3(f) 所示. 因为是电流型信号, 输入信号和权值信号的乘积可以直接相加并对电容  $C_1$  充电, 电容  $C_1$  的电位波形如图 3(g), 经采样保持电路后得输出波形如图 3(h).

本文采用  $2\mu\text{m}$  工艺的 CMOS 晶体管, 电源电压  $V_{dd} = 3.3\text{V}$ , 各 MOS 管的沟道宽长参数如表 1. 由于 M1, M2 管参数相同, 电容  $C_1$  在放电脉冲到达后, M1 管的漏端电流  $I_{d_{M1}}$  等

于 M2 管的漏端电流  $I_{d_{M2}}$ 。当电容  $C_1$  充电后, M1 管的漏端电流增大, 其增大量  $I_{d_{M1}}$  等于 M2 管的漏端电流的减小量  $I_{d_{M2}}$ 。当采样脉冲到来时, M2 管和 M3 管构成一电流镜, 因此, M3 管的漏端电流的变化随 M2 的漏端电流变化而变化。M3 管的漏端接 PMOS 电流镜和一恒流源, 使输出电流随 M1 漏端电流的变化而变化, 因而与输入信号与权值信号的乘积成正比, 而且当输入信号与权值信号的乘积和的值较大时, 输出电流值达到最大值后将不再增大, 近似 S 函数。输入信号与权值信号的乘积的 PSPICE 模拟结果, 如图 4 所示, 因为用数字存储器存储权值, 可将数字权值的最高位设为符号位, 转化时, 只需将数字权值的绝对值转化为脉冲串信号和脉冲宽度调制信号。当权值为负时, 将输入信号反向, 这时, 通过突触后亦可得到正输入信号和负权值的乘积。

晶体管	宽 / 长
M1, M2 M3, M5	$2\mu\text{m}/2\mu\text{m}$
M4	$20\mu\text{m}/2\mu\text{m}$
M6, M7 M8, M9	$50\mu\text{m}/2\mu\text{m}$

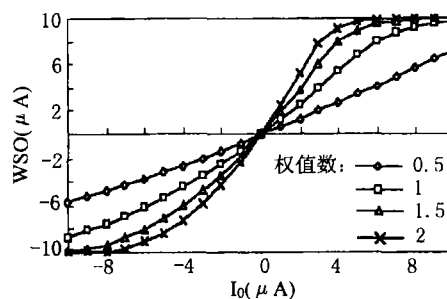
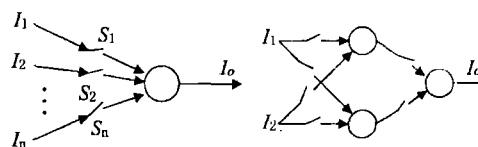


图 4 输入信号和权值信号的乘积的 PSPICE 模拟结果

## 4 前馈神经网络的实现

研究表明, 用多层前馈神经网络可以逼近任意非线性函数。用脉冲宽度调制技术实现的突触神经元电路可实现前馈神经网络。我们用本方案的突触神经元电路实现了进行“异或”运算的 2-2-1 前馈神经网络, 见图 5(b), 实验结果见表 2。输入信号  $0\mu\text{A}$  表示逻辑 0, 输入信号  $10\mu\text{A}$  表示逻辑 1, 权值的脉冲宽度调制信号的脉冲宽度为  $1\mu\text{s}$ 。实验证明图 2 所示电路可以作为神经元电路。由于采用数字权值存储, 可以容易地对权值进行修改, 因此, 可望实现具有自学习功能的神经网络。

逻辑值		实验值 ( $\mu\text{A}$ )			
输入值	输出值	输入值	输出值	输入值	输出值
0	0	0	0	0	0.005
0	1	1	0	10	9.05
1	0	1	10	0	9.05
1	1	0	10	10	0.005



(a) PWM 突触神经元符号 (b) 前馈神经网络  
图 5

## 5 结 论

脉冲宽度调制技术实现的突触神经元电路融合了神经网络数字实现和模拟实现的优点, 即权值可采用一般常规的数字存储器存储, 数字权值信号转换为脉冲宽度调制信号, 具有很好的稳定性, 不需要刷新电路, 结构简单易于集成。采用一般常规的数字存储器存储的权值易于修改, 对于实现具有自学习功能的神经网络具有重要的意义。突触电路部分主要是开关, 一个 MOS 管就可实现输入信号和权值信号的相乘。由于采用电流型信号, 求和运算简单, 易实现。电容积分电路和采样保持电路具有分段线性 (S 函数) 的特点, 因而可直接作为分段线性 (S 函数) 传

输函数神经元使用, 而无需专门的传输函数电路, 可用于实现前馈网络等人工神经网络.

### 参 考 文 献

- [1] Yasuhiro Ota, B. M. Wilamowki, Analog implementation of pulse-coupled neural networks, IEEE Trans. on Neural Networks, 1999, 10(3), 539-544.
- [2] R. Coggins, M. Jabri, B. Flower, S. Pickard, A hybrid analog and digital VLSI neural network for intracardiac morphology classification, IEEE J. of Solid State Circuits, 1995, 30(5), 542-550.
- [3] 王智, 陈琼, 郑启伦, 用 BiCMOS 工艺实现的阈值神经元电路, 华南理工大学学报 (自然科学版), 1999, 27(12), 11-15.
- [4] 陈琼, 郑启伦, 神经网络系统硬件实现的研究进展, 电路与系统学报, 2000, (1), 48-51.
- [5] 王若愚, 郑启伦, 黄贯光, 一种基于符号逻辑的神经元模型和电路实现, 电子科学学刊, 1999, 21(1), 55-59.
- [6] 王伶俐, 宋灵贵, 吴桂初, 陈偕雄, 基于双向电流型 CMOS 电路的谱综合, 电子科学学刊, 2000, 22(2), 311-315.
- [7] 张玉浩, 等译, 模拟集成电路设计 — 电流模法, 北京, 高等教育出版社, 1996, 157-212, 398-408.

## THE IMPLEMENTATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS USING PULSE WIDTH MODULATION TECHNIQUE

Chen Qiong    Zheng Qilun    Ling Weixin\*

(School of Computer Sci. & Eng., South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

\*(Dept. of Applied Mathematics, South China Univ. of Tech., Guangzhou 510640, China)

**Abstract** An Artificial Neural Network (ANN) is proposed which is implemented through Pulse Width Modulation (PWM) technique. The weight of the neural network is stored in digital memory, while the synapse circuits are composed of switches. The capacitor integral circuits and the current sample/hold circuits are used to implement the Weighted Summation Operation (WSO) that are required in the realization of a general ANN. This circuit is easy to be integrated because of its simple structure, which could be used to construct the feed forward neural networks, for example, to implement ANN for an XOR function.

**Key words** Pulse width modulation, Neural network, Weight, Synapse

陈 琼: 女, 1966 年生, 博士生, 从事神经网络, 计算机应用研究.

郑启伦: 男, 1938 年生, 教授, 博士生导师, 从事神经网络, 多值逻辑, 计算机应用研究.

凌卫新: 女, 1966 年生, 博士生, 从事神经网络, 计算机应用研究.