

文章编号:2095-7386(2019)06-0049-07

DOI:10.3969/j.issn.2095-7386.2019.06.010

基于脉冲神经膜系统的有符号串行乘法器设计

王防修

(武汉轻工大学 数学与计算机学院,湖北 武汉 430023)

摘 要:针对现有的脉冲神经膜系统只能进行无符号二进制整数的乘法运算,而实际应用中更多地需要处理有符号整数的乘法运算,故用脉冲神经膜系统实现有符号整数的乘法运算更能满足实际需要。首先,设计了串行乘法器中串行数据的数值位与符号位的分离;其次,设计了用来计算任意两个有符号整数乘法的串行乘法器的脉冲神经膜系统。系统仿真表明,所设计的脉冲神经膜系统能准确地执行有符号整数的乘法运算。当前问题的解决将有助于脉冲神经膜系统的生物型 CPU 的设计。

关键词:脉冲神经膜系统;有符号乘法;串行乘法器

中图分类号:TP 332.22

文献标识码:A

Design of symbolic serial multiplier based on spiking neural membrane system

WANG Fang-xiu

(School of Mathematics and Computer Science, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: For the existing spiking neural membrane system, it can only multiply unsigned binary integers, but in practice, it is more necessary to multiply signed integers. Therefore, it is more suitable to multiply signed integers by spiking neural membrane system. Firstly, the separation of numeric bit and symbol bit of serial data in serial multiplier is designed. Secondly, a spiking neural membrane system is designed to compute the serial multiplier of any two signed integer multiplications. The simulation results show that the system can perform the multiplication of signed integers accurately. The solution of the current problem will contribute to the design of biological CPU for spiking neural membrane system.

Key words: spiking neural membrane system; signed multiplication; serial multiplier

1 引言

当前,针对脉冲神经膜系统的研究^[1-4]理论成果^[5-6]较多,而应用研究相对不足。在为数不多的应用研究中,算术运算是脉冲神经膜系统研究的热点^[7]。目前这类研究已经取得一些成果,为生物型 CPU 的设计打下了一定基础。然而,作为计算装置

中的乘法运算,脉冲神经膜系统只能执行无符号整数^[8-9]的乘法运算,而有符号整数的乘法运算则更多的是理论^[10]探讨,即使偶有涉及也不具有可操作性^[11-13]。因此,在本文中,设计了一种脉冲神经膜系统来实现任意两个有符号整数的乘法运算。仿真表明,此处设计的串行乘法器能快速而准确地计算出任意两个有符号整数的乘积。

收稿日期:2019-09-10.

作者简介:王防修(1973-),男,副教授,E-mail:wfx323@126.com.

基金项目:中国食品公益专项研究基金(201513004-3).

2 串行数据中符号位和数值位分离的脉冲神经膜系统

定理1 图1所示的脉冲神经膜系统能从长度为 $2k$ 的二进制整数中分离出两个有符号整数的数值位和符号位的乘积,其中符号位的长度为1而数值位的长度为 $2k$,整个串行数据分离的输出在 $t=4$ 到 $t=2k+3$ 步内完成。

证明:图1所示的SNP系统包括9个神经元,它可以从长度为 $2k$ 的二进制数据分离出长度为 $2k$ 的二进制数值位和1位二进制符号位乘积。该系统定义如下:

$$\Pi_1 = (0, \sigma_{SW_1}, \sigma_{SW_2}, \dots, \sigma_{SW_8}, \sigma_{compare}, syn, in,$$

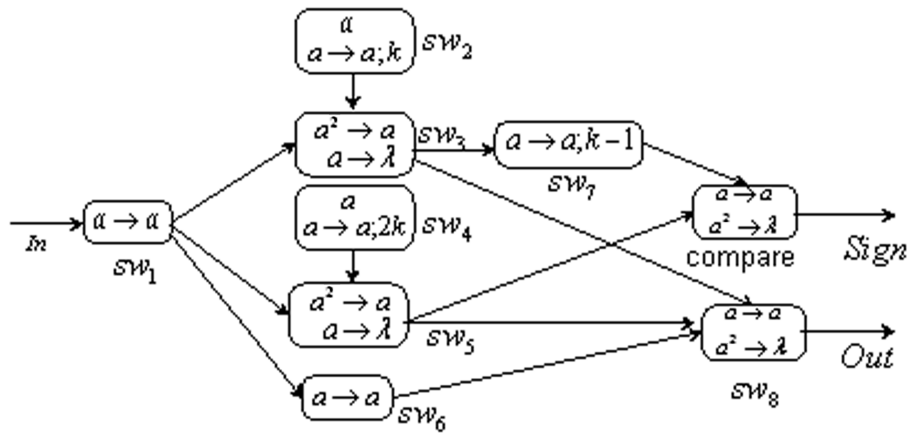


图1 从长度为 $2k$ 的二进制数据中分离出符号位与数值位的SNP系统

从图1可以看出,神经元 SW_6 的作用是将输入神经元 SW_1 发送过来的脉冲传递给输出神经元 SW_8 。因此,输出神经元 SW_8 在 $t=3$ 到 $t=2k+2$ 步内能接收输入神经元 SW_1 发送过来的脉冲。辅助神经元 SW_2 仅在 $t=k$ 通过执行激发规则 $a \rightarrow a$ 向辅助神经元 SW_3 发送一个脉冲,此时辅助神经元 SW_3 也接收来自输入神经元 SW_1 发送过来的脉冲。如果输入神经元 SW_1 此时发送给辅助神经元 SW_3 一个脉冲,则在 $t=k+1$ 步辅助神经元 SW_3 会激发规则 $a^2 \rightarrow a$,向与之存在突触的辅助神经元 SW_7 和输出神经元 SW_8 各自发送一个脉冲。否则,神经元 SW_3 会激发遗忘规则 $a \rightarrow \lambda$ 。当 $t=k$ 时,神经元 SW_1 发送的是第一个有符号整数的符号位。如果符号位为负,则神经元 SW_1 向与之存在突触的其他神经元发送一个脉冲,故在 $t=k+1$ 步,神经元 SW_3 向与之存在突触的神经元各发送一个脉冲。而在其他任何情况下,神经元 SW_3 不会向外界发送任何脉冲。

同样,辅助神经元 SW_5 只在 $t=2k+1$ 时才有可能向外界发送脉冲,而在其他格局中都不会向外界

发送脉冲。在 $t=2k+1$ 时,神经元 SW_5 是否向外界发送脉冲,取决于 $t=2k$ 时神经元 SW_1 是否向其发送脉冲,而此时神经元 SW_1 是否向外界发送脉冲又取决于第二有符号整数的符号位。如果符号位为负,则神经元 SW_5 向外界发送一个脉冲,而在其他情况下都不会发送脉冲。

神经元 SW_7 起着延时 $k-1$ 步的作用,以等待第二个有符号整数的符号位到达。在 $t=2k+2$ 时,输出神经元 $compare$ 接收到两个符号对应的脉冲。如果这两个整数同号,则神经元 $compare$ 要么执行遗忘规则 $a^2 \rightarrow \lambda$ 要么没有规则可执行。总之,同号时,输出神经元 $compare$ 不向外界发送任何脉冲,此时符号位的乘积为0。反之,如果这两个有符号整数异号,则此时神经元 $compare$ 由于从外界只能接收到一个脉冲,故执行激发规则 $a \rightarrow a$ 而向外界发送一个脉冲。因此,在 $t=2k+3$ 时得到符号位的乘积为1。

图1中的输入神经元是 SW_1 ,输出神经元是 $compare$ 和 SW_8 ,辅助神经元 $SW_2, SW_3, \dots, SW_8$ 。

从图1中可以看出,除了在 $t=k+2$ 和 $t=2k+2$ 外,在其他时刻,输出神经元 SW_8 中的脉冲数只是对辅助神经元 SW_6 中脉冲数的复制。在 $t=k+2$

时,输出神经元 SW_8 还有接收可能来自神经元 SW_3 发送过来的脉冲。如果 $t = k + 1$ 时神经元 SW_3 向外界发送一个脉冲,则意味着第一个有符号整数的符号位为负,则在 $t = k + 2$ 时输出神经元 SW_8 会接收到两个脉冲而激发遗忘规则 $a^2 \rightarrow \lambda$ 。如果没有接收到脉冲,则表明第一个有符号整数的符号位为正,此时不会执行任何规则。因此,输出神经元 SW_8 在 $t = k + 2$ 时不会向外界发送任何脉冲。同理,输出神经元 SW_8 在 $t = 2k + 2$ 时不会向外界发送任何脉冲。因此,在 $t = k + 2$ 和 $t = 2k + 2$ 时,两个有符号整数的

符号位都是 0。

从系统中可以看出,输出神经元在 $t=4$ 时向外界已经发送了二进制有符号整数的第一个二进制位。然后,连续向外界发送二进制的符号位,直到 $t=2k+3$ 时间,外界环境中得到全部的二进制数值位。与此同时,系统输出了两个有符号整数符号位的乘积。

由于 $-5 = 1101$, 而 $6 = 0110$, 故串行数据 11010110 的分离过程如图 2 和表 1 所示。



图2 二进制串行有符号整数 11010110 的符号位与数值位分离

表 1 对二进制串行有符号整数 11010110 的符号位与数值位分离的 SNP 系统中各神经元在不同时刻包含的脉冲数

[illegible]

3 有符号串行乘法器脉冲神经膜系统

定理 2 图 3 所示的脉冲神经膜系统可以实现长度为 $2k$ 的二进制整数所表示的两个有符号整数的乘积,求积结果的输出将在 $t = 2k + 8$ 到 $t = 4k + 5$ 内完成。

证明:设计如图 3 所示的脉冲神经膜系统,该系统定义如下:

$$\Pi_2 = (0, \sigma_{SW1}, \sigma_{SW2}, \dots, \sigma_{SW8}, \sigma_{compare}, \sigma_{Input}, \sigma_{aux1,0}, \sigma_{aux1,1}, \dots, \sigma_{aux1,k}, \sigma_{bit0}, \sigma_{bit1}, \dots, \sigma_{bit_{k-1}}, \sigma_{aux2,0}, \sigma_{aux2,1}, \dots, \sigma_{aux2,k}, \sigma_{bit1,0}, \sigma_{bit1,1}, \dots, \sigma_{bit1,k-1}, \sigma_{bit2,1}, \sigma_{bit2,2}, \dots, \sigma_{bit2,k}, \dots, \sigma_{bit_{k,k-1}}, \sigma_{bit_{k,k}}, \dots, \sigma_{bit_{k,2k-2}}, \sigma_{sum0}, \sigma_{sum1}, \dots, \sigma_{sum_{2k-2}}, \sigma_{Add}, \sigma_{syn}, in, out)$$

$$(1) O = \{a\};$$

$$(2) \sigma_{SW1} = (0, \{a \rightarrow a\});$$

$$(3) \sigma_{SW2} = (0, \{a \rightarrow a; k\});$$

$$(4) \sigma_{SW3} = \sigma_{SW5} = (0, \{a \rightarrow \lambda, a^2 \rightarrow a\});$$

$$(5) \sigma_{SW4} = (1, \{a \rightarrow a; 2k\});$$

$$(6) \sigma_{SW6} = (0, \{a \rightarrow a\});$$

$$(7) \sigma_{SW7} = (0, \{a \rightarrow a; k-1\});$$

$$(8) \sigma_{SW8} = \sigma_{compare} = (0, \{a \rightarrow a, a^2 \rightarrow \lambda\});$$

$$(9) \sigma_{Input} = (0, R_{Input}), R_{Input} = \{a \rightarrow a, a^2 \rightarrow \lambda, a^3 \rightarrow a^2\};$$

$$(10) \sigma_{aux1,0} = (2, R_{aux1,0}), R_{aux1,0} = \{a^2 \rightarrow a^2; 3\}$$

$$(11) \sigma_{aux1,i} = (0, R_{aux1,i}), R_{aux1,i} = \{a^2 \rightarrow a^2\}, i = 1, 2, \dots, k;$$

$$(12) \sigma_{bit_i} = (0, \sigma_{bit_i}), \sigma_{bit_i} = \{a^2 \rightarrow \lambda, a^6/a^2 \rightarrow \lambda, a^5/a \rightarrow a, a \rightarrow \lambda\}, i = 0, 1, \dots, k-1.$$

$$(13) \sigma_{aux2,0} = \{0, R_{aux2,0}\}, R_{aux2,0} = \{a^2 \rightarrow a\};$$

$$(14) \sigma_{aux2,i} = \{0, R_{aux2,i}\}, R_{aux2,i} = \{a \rightarrow a\}, i = 1, \dots, k;$$

$$(15) \sigma_{bit_{i,j}} = (0, R_{bit_{i,j}}), R_{bit_{i,j}} = \{a \rightarrow \lambda, a^2/a \rightarrow \lambda a; k-i\}, i = 1, 2, \dots, k, j = i-1, i, \dots, i+k-2;$$

$$(16) \sigma_{sum_i} = (0, R_{sum_i}), R_{sum_i} = \{a^j \rightarrow a^j; i | j \in \{1, 2, \dots, k\}\}, i = 0, 1, \dots, 2k-2;$$

$$(17) \sigma_{Add} = (0, R_{Add}), R_{Add} = \{a^{2i+1}/a^{i+1} \rightarrow a, a^{2i}/a^i \rightarrow \lambda | i \in \{0, 1, \dots, k\} \text{ 且 } j \in \{1, 2, \dots, k\}\};$$

$$(18) \sigma_{syn} = \{(SW_1, SW_3), (SW_1, SW_5), (SW_1, SW_6), (SW_2, SW_3), (SW_3, SW_7), (SW_3, SW_4), (SW_3,$$

$$SW_8), (SW_4, SW_5), (SW_5, SW_8), (SW_5, compare), (SW_6, SW_8), (SW_7, compare), (SW_8, Input)\} \cup \{(Input, bit_i) | i \in \{0, 1, \dots, k-1\}\} \cup \{(aux_{1,i}, Input) | i \notin \{0, 1, \dots, k-1\}\} \cup \{(aux_{1,i}, Input_{i,i+1}) | i \in \{0, 1, \dots, k-1\}\} \cup \{(aux_{1,k}, aux_{2,0})\} \cup \{(aux_{2,i}, aux_{2,i+1}) | i \in \{0, 1, \dots, k-1\}\} \cup \{(aux_{i+1}, bit_i) | i \notin \{0, 1, \dots, k-1\}\} \cup \{(bit_i, bit_{j,1}) | i \notin \{0, 1, \dots, k-1\}, j \times 1 \in \{<1, i>, <2, i+1>, \dots, <k, i+k-1>\}\} \cup \{(aux_{2,i}, bit_{i,j}) | i \in \{1, 2, \dots, k\}, j \in \{i-1, i, \dots, i+k-2\}\} \cup \{(bit_{i,j}, sum_j) | i \in \{1, 2, \dots, j+1\}, j \in \{0, 1, \dots, k-1\}\} \cup \{(bit_{i,j}, sum_j) | i \in \{j-k+2, j-k+3, \dots, k\}, j \in \{k, k+1, \dots, 2k-2\}\} \cup \{(sum_i, Add) | i \in \{0, 1, \dots, 2k-2\}\};$$

$$(19) in = \sigma_{SW1};$$

$$(20) out = \sigma_{Add}.$$

从图 3 可以看出,在无符号串行乘法器的输入端增加一个串行数据的数值与符号的分离器就可以实现有符号数的乘积。在 $t = 3$, 神经元 SW_8 才开始向神经元发送脉冲,故神经元 $aux_{1,0}$ 要延时 3 个单位时间。因此,系统中的输出神经元 Add 在 $t = 2k + 7$ 开始向环境中发送脉冲。由于数值位乘积的长度是 $2k - 2$,故在 $t = 4k + 4$ 时,输出神经元 Add 发送最后一个脉冲。从系统的输出过程可以发现,乘积的结果将在 $t = 2k + 8$ 到 $t = 4k + 5$ 步内得到。

为说明图 3 所示的脉冲神经膜系统具体是如何运行的,不妨计算两个负数的乘积 $-5 \times (-7) = 35$ 为例。图 4、表 2 和表 3 给出了系统求积过程中各个神经元在不同时刻包含的脉冲数。

4 结束语

在本文中,设计了基于脉冲神经膜系统的串行乘法器,该乘法器都能够计算两个有符号整数的乘积。对于串行乘法器而言,只需要一个输入端口。在具体计算过程中,首先需要构建将串行数据中的两个有符号整数的符号位与数值位分离的脉冲神经膜系统;其次,设计了用串行乘法器求任意两个有符号整数乘积问题的脉冲神经膜系统。在本文中,设计的系统是对脉冲神经膜系统的算术运算的进一步补充和完善,增强了脉冲神经膜系统的计算能力和使用范围。

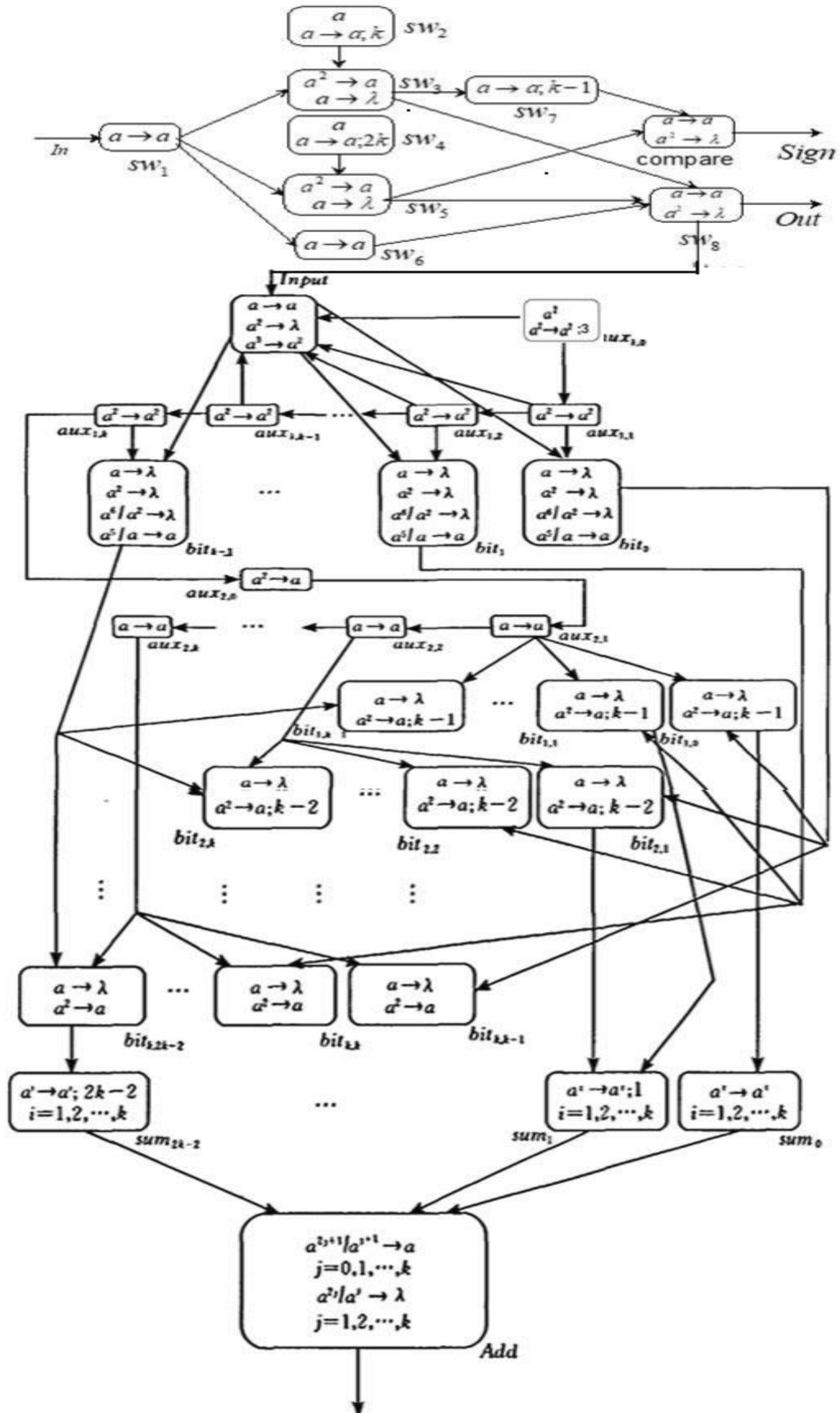


图3 有符号串行乘法器的脉冲神经膜系统

续表

Step	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
bit3	0	0	2	2	2	2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
aux20	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
aux21	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
aux22	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
aux23	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
aux24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
add	8	4	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	2	2	2	1	0
output	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1

参考文献:

[1] Gutiérrez – Naranjo M A, Leporati A. First steps towards a CPU made of spiking neural P systems[J]. Int J of Computers, Communications & Control. 2009,IV(3):244-252.

[2] Zhang X Y,Zeng X X,Pan L Q. A spiking neural P system for performing multiplication of two arbitrary natural numbers[J]. Chinese Journal of Computer. 2009,32(12):2362-2372.

[3] Song T,Pan L,Paun,G. Asynchronous spiking neural P systems with local synchronization[J]. Inf Sci 2013,219(1):197-207.

[4] Wu B, Pan L, Pérez – Jiménez M J. Tissue P systems with protein on cells,Fundam[J]. Inform,2016,144:77-107.

[5] Wu T,Zhang Z,Pan L. Cell – like spiking neural P systems[J]. Theoretical Computer Science,2016,15(5):455-467.

[6] Pan L,Wang J,Hoogeboom H J. Asynchronous extended spiking neural,P systems with astrocytes[J]. LNCS,2012,7184:243-256.

[7] Zhang X,Zhang X,Song T,et al. Spiking neural P systems with thresholds[J]. Neural Comput. 2014,26:1340-1361.

[8] Rong G H,Neri F,Pérez – Jiménez M J. An optimization spiking neural P system for approximately solving combinatorial optimization problems[J]. Int J Neural Syst,2014,24 (5):1-16.

[9] Pan L Q,Zeng X,Zhang X. Time – free spiking neural P systems[J]. Neural Comput,2011,23 (5):1320-1342.

[10] Ramanujan A,Krithivasan K. Control words of transition P systems[J]. Advances in Intelligent Systems and Computing, 2013,201:145-155.

[11] Verlan S,Quiros J. Fast hardware implementation of P systems, Mem-brane Computing, August 2012 [C]. Proc CMC 2012, Budapest, Springer,2013.

[12] Pan L Q,Pérez-Jiménez M J. Spiking neural P systems with neuron division and budding[J]. Science China Information Sciences, 2011,54(8):1596-1607.

[13] 王防修. 基于脉冲神经膜系统的有符号并行乘法器设计[J]. 武汉轻工大学学报,2019,39(2):44-49.