

## 改进型细胞神经网络实现的忆阻器混沌电路\*

李志军<sup>1)2)†</sup> 曾以成<sup>2)</sup> 李志斌<sup>3)</sup>

1)(湘潭大学信息工程学院, 湘潭 411105)

2)(湘潭大学光电工程系, 湘潭 411105)

3)(湘潭大学能源工程学院, 湘潭 411105)

(2013年7月7日收到; 2013年10月5日收到修改稿)

在通用细胞神经网络单元的基础上, 本文利用忆阻器本身的非线性实现了一种改进型细胞神经网络单元. 通过连接4个改进的细胞神经网络单元导出了一种基于状态控制细胞神经网络的忆阻器混沌电路. 为了验证该方法的正确性, 采用通用的电子器件构建了一个忆阻器的模拟等效电路, 并对提出的电路进行了实验分析. 实验结果与数值仿真结果的一致性表明采用改进型的细胞神经网络可以有效地实现忆阻器混沌电路.

**关键词:** 忆阻器, 分段线性, 状态控制细胞神经网络, 混沌

**PACS:** 05.45.-a

**DOI:** 10.7498/aps.63.010502

## 1 引言

2008年5月Hewlett-Packard(HP)实验室研究小组采用纳米技术实现了具有记忆特性的电阻<sup>[1]</sup>, 从而证实了Chua于1971提出的忆阻器概念<sup>[2]</sup>和1976年提出的忆阻系统的相关理论<sup>[3]</sup>. 作为与 $R$ ,  $L$ ,  $C$ 并列的第四个基本无源器件, 忆阻器建立了磁通和电荷之间的关系, 其阻值与电压幅度、极性和流过的电流有关. 由于忆阻器具有记忆功能, 其潜在的应用价值引起了国内外学者的广泛关注. 利用其数字工作方式, 忆阻器可以实现非易失性阻抗存储器(RRAM)和现场可编程门阵列(FPGA)<sup>[4]</sup>; 利用其模拟工作方式, 忆阻器可以实现人工神经网络和新型类脑系统<sup>[5]</sup>.

近年来, 混沌电路的理论设计、硬件实现、及其应用在非线性系统领域引起了广泛的研究兴趣. 作为一种纳米尺寸的非线性器件, 忆阻器可以用来实现高频混沌电路. 2008年, Itoh和Chua采用HP实验室的Williams忆阻器模型替换蔡氏二极管实现了第一个忆阻器混沌电路<sup>[6]</sup>. 一般来说, 采用忆阻器实现混沌电路有两种方式: 1)采用分段线性

(piecewise-linear, PWL)模型<sup>[7-9]</sup>, 如在文献<sup>[7]</sup>中, Muthuswamy采用PWL模型的忆阻器实现了标准及类蔡氏混沌电路, 在一定的参数条件下这些电路能够展现出丰富的动力学行为; 2)光滑模型<sup>[10-14]</sup>, 包伯成等利用光滑模型的磁控忆阻器实现了一系列新的蔡氏混沌电路<sup>[10-12]</sup>. 同样, Muthuswamy等采用光滑三次非线性磁控忆阻器取代蔡氏二极管实现了一种变形蔡氏混沌电路<sup>[13,14]</sup>.

由于现有的忆阻器混沌电路都是直接以忆阻器替换原蔡氏电路中的非线性器件来实现的, 只是采用的忆阻器的模型不同而已, 因而实现方法单一. 且采用简单的替换法实现的忆阻器混沌电路均包含电感, 致使电路鲁棒性较差, 在实际工程应用中存在诸多的限制. 为了进一步拓宽忆阻器混沌电路的研究与应用, 本文提出了一种新的忆阻器混沌电路的实现方法: SC-CNNs(State-Controlled Cellular Nonlinear Networks)方案. 该方案通过连接4个改进型的细胞神经网络单元, 可以将忆阻器混沌系统模型映射为相应的SC-CNN电路. 为了验证该方法的正确性, 本文采用通用的电子器件实现了一个磁通控制的PWL型忆阻器的模拟等效电

\* 国家自然科学基金(批准号: 61176032)资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: lizhijun\_320@163.com

路并应用到提出的混沌电路中. 电路的硬件实验结果和忆阻器混沌模型的数值仿真结果基本一致, 从而表明采用改进型的 SC-CNNs 是实现忆阻器混沌电路的另外一种可供选择的、有效的实现方法.

## 2 忆阻器混沌电路模型

将蔡氏电路中的蔡氏二极管替换为一个磁通控制的忆阻器, 我们可以得到一个忆阻器混沌电路模型, 如图 1 所示. 在本文中采用的忆阻器是一个 PWL 型的磁控忆阻元件, 其电荷  $q$  与磁通  $\phi$  之间的关系可以表示为 [6]

$$q(\phi) = b\phi + \frac{1}{2}(a - b)(|\phi + 1| - |\phi - 1|), \quad (1)$$

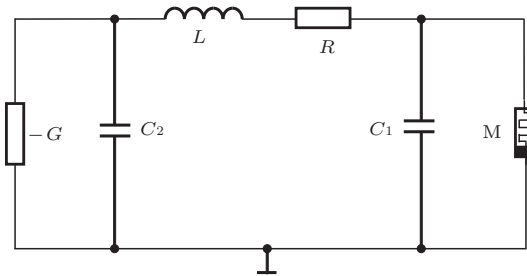


图 1 忆阻器混沌电路模型

由此可以得到忆阻器的忆导  $W(\phi)$  为

$$W(\phi) = \frac{dq}{d\phi} = \begin{cases} a, & |\phi| < 1, \\ b, & |\phi| > 1, \end{cases} \quad (2)$$

则忆阻器的电流和忆阻器端电压之间的关系满足

$$i = W(\phi)v. \quad (3)$$

运用基尔霍夫电压和电流定律分析图 1 的电路, 可以得到其状态方程

$$\begin{aligned} \dot{v}_1 &= \frac{1}{C_1}(i_L - W(\phi)v_1), \\ \dot{v}_2 &= \frac{1}{C_2}(Gv_2 - i_L), \\ \dot{i}_L &= \frac{1}{L}(v_2 - v_1 - Ri_L), \\ \dot{\phi} &= x_1, \end{aligned} \quad (4)$$

因此, 图 1 所示的忆阻器混沌电路具有 4 个状态变量, 其中  $v_1, v_2$  分别表示电容  $C_1, C_2$  上的电压,  $i_L$  表示电感  $L$  上流过的电流,  $\phi$  是忆阻器的内部状态控制变量, 即忆阻器的磁通.

设  $x = v_1, y = v_2, z = i_L, u = \phi, \alpha = 1/C_1, \beta = G/C_2, 1 = 1/C_2, \gamma = R, L = 1$ , 并根据 (2) 式定义非线性函数

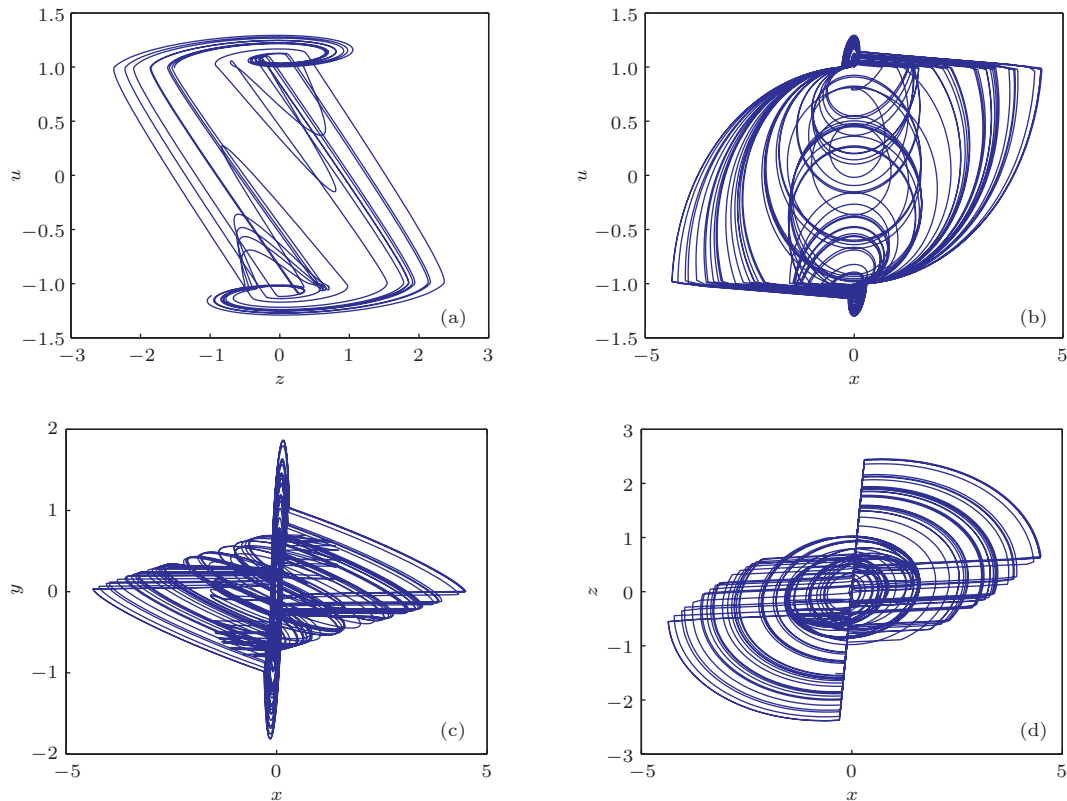


图 2 典型的混沌吸引子 (a)  $z-u$  平面; (b)  $x-u$  平面; (c)  $x-y$  平面; (d)  $x-z$  平面

$$W(u) = \begin{cases} a, & |u| < 1, \\ b, & |u| > 1, \end{cases} \quad (5)$$

则系统(4)可以用以下的无维状态方程来描述它的动力学特性

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \alpha(z - W(u)x), \\ \dot{y} &= \beta y - z, \\ \dot{z} &= y - x - \gamma z, \\ \dot{u} &= x. \end{aligned} \quad (6)$$

选择参数使  $\alpha = 4, \beta = 0.7, \gamma = 0.1, a = 0.1, b = 8$ , 并设置初始条件为  $(0.01, 0, 0, 0)$ , 利用4阶龙格库塔算法求解系统(6)得到的运行轨迹在相平面上的投影如图2所示. 利用Jacobi方法计算系统的Lyapunov指数得  $L_1 = 0.163, L_2 = 0, L_3 = -0.075, L_4 = -4.891$ , Lyapunov维数为  $D_L = 3.018$ . 由系统(6)的相轨图、Lyapunov指数和维数, 可以判断该系统是混沌振荡的.

### 3 系统的SC-CNN模型

#### 3.1 改进的SC-CNN单元

CNN是一种模拟非线性、实时并行处理的阵列结构. 自1988年蔡少棠和杨林提出CNN理论以来, 细胞神经网络在目标检测、图像加密、保密通信和非线性系统中得到广泛的应用<sup>[15,16]</sup>. 根据Arena等提出的SC-CNN定义, 细胞单元的动力学方程可以描述为<sup>[17]</sup>

$$\tau_j \dot{x}_j = -x_j + \sum_k a_{jk} y_k + \sum_l s_{jl} x_l + i_j, \quad (7)$$

$$y_j = f(x_j) = 0.5(|x_j + 1| - |x_j - 1|), \quad (8)$$

其中  $x_j$  是第  $j$  个细胞的状态变量,  $y_j$  对应为该细胞的输出,  $i_j$  是该单元的阈值函数,  $\tau_j$  是电路的时间常数,  $\{a_{jk}\}$  和  $\{s_{jl}\}$  分别为反馈控制模板和状态控制模板. 图3为电压型运算放大器 (voltage operational amplifier, VOA) 实现的通用SC-CNN单元, 其非线性输出采用放大器的饱和特性来实现<sup>[18]</sup>.

为了建立忆阻器混沌电路的SC-CNNs模型, 我们采用电流型运算放大器 (current feedback operational amplifier, CFOA) 和忆阻器实现了一种新的细胞单元电路, 如图4. 其中模块B<sub>3</sub>的功能是实现细胞单元的非线性输出. 从图4可以看出, U<sub>3</sub>、忆阻器M和线性电导G<sub>C</sub>实现一个反相放大器. 由于U<sub>3</sub>的反相输入端存在虚地现象, 则忆阻器两端的电压对应为  $x_j$ . 根据法拉第电磁感应定理, 忆阻器两端的磁通为  $x_j$  对时间  $t$  的积分. 由(2)式可知, 忆阻器的忆导  $W(\phi)$  受磁通  $\phi$  控制, 因此细胞单元的非线性输出函数  $y_j$  可以表示为

$$\begin{aligned} y_j &= f(x_j, W(\phi)) \\ &= f(x_j, W(\int x_j dt)) \\ &= \frac{W(\int x_j dt)}{G_C} x_j. \end{aligned} \quad (9)$$

由(9)式可以看出, 改进细胞单元的非线性输出函数与CFOA的饱和电压无关, 从而电源电压的变化对细胞单元的非线性输出不会产生影响.

在模块B<sub>2</sub>中, U<sub>2</sub>构成单位增益的反相放大器 ( $R_6 = R_7$ ). 由U<sub>1</sub>可以写出该细胞单元的动力学方程

$$\begin{aligned} C_j \dot{x}_j &= -\frac{x_j}{R_5} + \frac{R_4}{R_1 R_5} v_1 + \frac{R_4}{R_2 R_5} v_2 \\ &+ \frac{R_4}{R_3 R_5} v_3. \end{aligned} \quad (10)$$

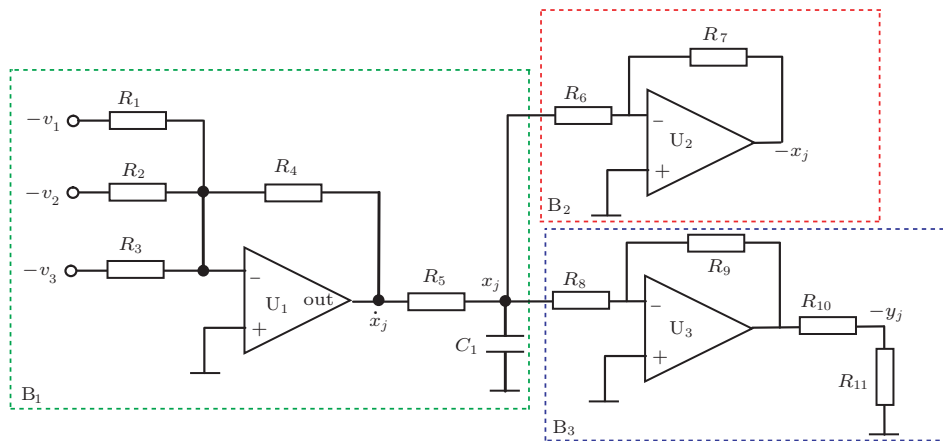


图3 基于VOA实现的细胞单元电路

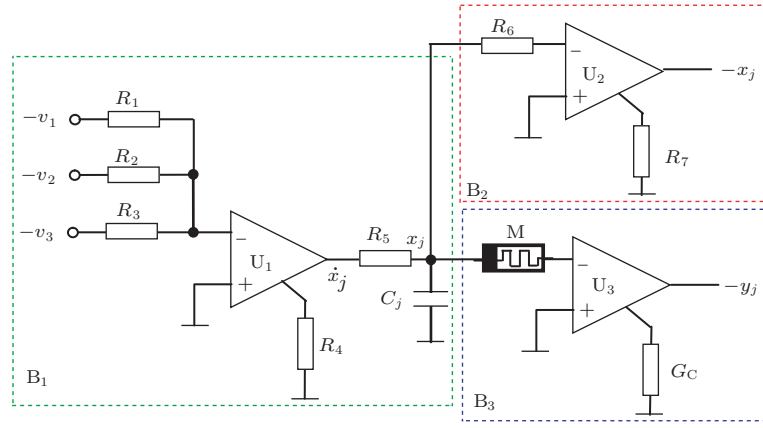


图4 改进的细胞单元电路

相对于VOA来说, 由于CFOA不受增益带宽积的限制, 具有高的压摆率, 因而提出的细胞单元具有较好的高频性能<sup>[19,20]</sup>. 综上所述, 改进型细胞神经单元的动态方程由(7)式描述, 其非线性输出函数由(9)式决定.

### 3.2 系统的SC-CNN模型

根据(7)式, 4个改进型细胞单元构成的动态系统可以描述为

$$\begin{aligned} \tau_1 \dot{x}_1 &= -x_1 + \sum_{k=1}^4 a_{1k} y_k + \sum_{k=1}^4 s_{1k} x_k + i_1, \\ \tau_2 \dot{x}_2 &= -x_2 + \sum_{k=1}^4 a_{2k} y_k + \sum_{k=1}^4 s_{2k} x_k + i_2, \\ \tau_3 \dot{x}_3 &= -x_3 + \sum_{k=1}^4 a_{3k} y_k + \sum_{k=1}^4 s_{3k} x_k + i_3, \\ \tau_4 \dot{x}_4 &= -x_4 + \sum_{k=1}^4 a_{4k} y_k + \sum_{k=1}^4 s_{4k} x_k + i_4. \end{aligned} \quad (11)$$

为了将系统(6)映射为四个细胞单元构成的SC-CNN网络, 系统(11)可以转化为

$$\begin{aligned} \tau_1 \dot{x}_1 &= -x_1 + a_{11} y_1 + s_{11} x_1 + s_{13} x_3, \\ \tau_2 \dot{x}_2 &= -x_2 + s_{21} x_2 + s_{23} x_3, \\ \tau_3 \dot{x}_3 &= -x_3 + s_{31} x_1 + s_{32} x_2 + s_{33} x_3, \\ \tau_4 \dot{x}_4 &= -x_4 + s_{41} x_1 + s_{44} x_4, \end{aligned} \quad (12)$$

其中 $y_1$ 为第一个细胞神经单元的非线性输出函数, 它取决于第四个细胞神经单元的状态变量, 根据(9)式, 该函数可以重写为

$$y_1 = f\left(x_1, W\left(\int x_4 dt\right)\right) = \frac{W(x_4)x_1}{G_C}. \quad (13)$$

比较系统(12)和系统(6)可知, 当选择参数

$$\begin{aligned} s_{11} &= 0, \\ s_{13} &= -a_{11} = 1, \\ s_{21} &= 1 + \beta, \\ s_{31} &= -s_{32} = -1, \\ s_{33} &= 1 - \gamma, \\ s_{41} &= -s_{44} = 1, \\ G_C &= 1, \\ \tau_2 &= \tau_3 = \tau_4 = 1, \\ \tau_1 &= 1/\alpha. \end{aligned} \quad (14)$$

则系统(6)仅仅是系统(12)的一个特例而已. 因此, 通过合适连接4个改进的SC-CNN单元电路, 图1所示的忆阻器混沌电路模型能够映射为SC-CNNs模型. 值得注意的是系统(12)中的第四个状态方程对应为忆阻器内部状态方程, 它可以由忆阻器本身的赋定关系实现.

## 4 整体电路实现

### 4.1 忆阻器的模拟等效电路

由于忆阻器在短时间内无法商品化, 忆阻器的建模和电路模拟成为当前忆阻器及忆阻器系统研究的热点问题<sup>[21-23]</sup>. 由于现有的模型和等效实现电路都是建立在忆阻器物理模型的基础上, 虽然能观察到忆阻器的迟滞 $v-i$ 特性曲线, 但由于工作频率太低无法接入实际电路进行实验研究. 为了对本文提出的混沌电路进行实验分析, 我们采用第四个神经细胞构建了一个磁通控制的PWL忆阻器的模拟电路. 电路如图5所示, 其中节点B应该接地(或

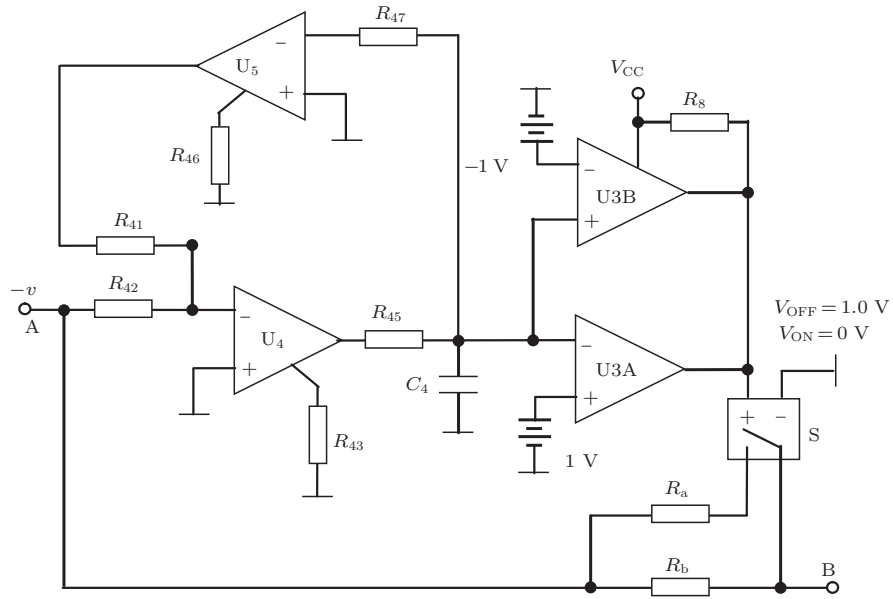


图5 磁通控制PWL型忆阻器的模拟电路

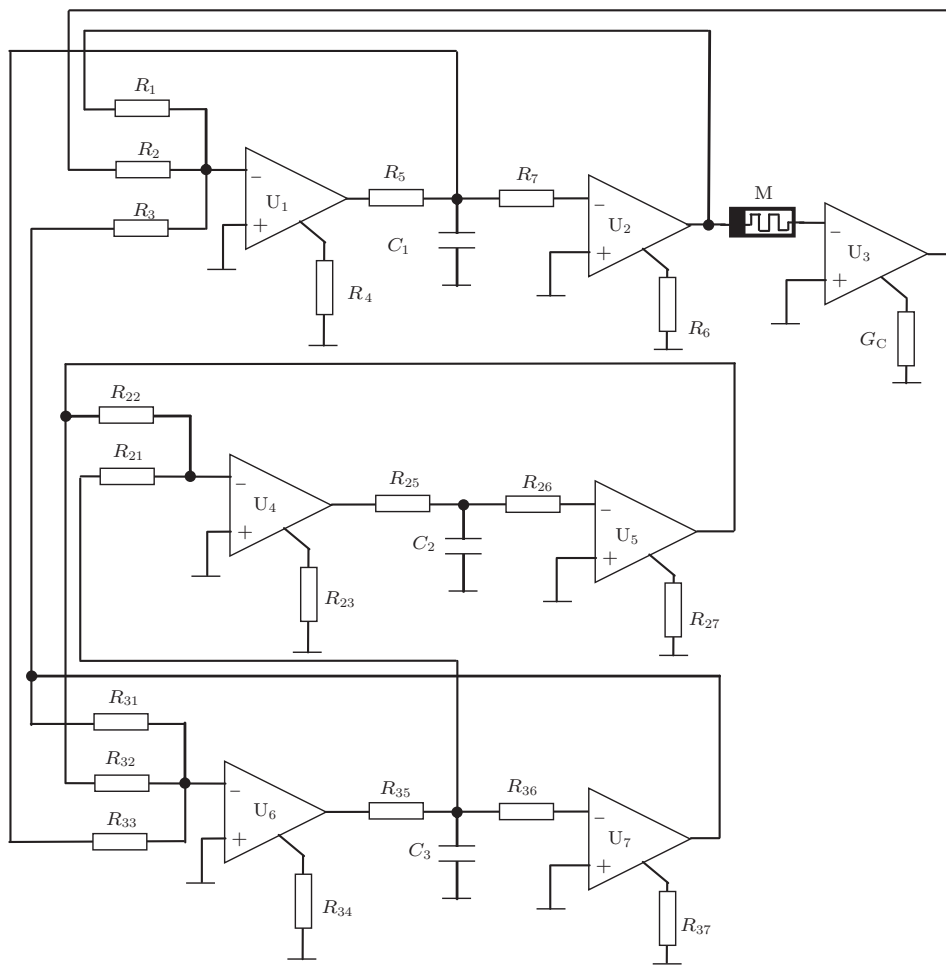


图6 整体实现电路

虚地). 第四个神经细胞由放大器  $U_4, U_5$  及外围器件构成, 根据 (10) 式可以得到其动态方程

$$\tau_4 \dot{\phi} = -\phi + \frac{R_{43}}{R_{41}}\phi + \frac{R_{43}}{R_{42}}v, \quad (15)$$

其中  $\tau_4 = R_{45}C_4$  是电路的时间常数. 当选择参数使  $R_{43}/R_{41} = R_{43}/R_{42} = 1$  成立, 那么

$$\tau_4 \dot{\phi} = v, \quad (16)$$

(16) 式表明, 电容  $C_4$  上的电压等效为忆阻器的内部状态控制变量, 即忆阻器的磁通  $\phi$ . U3A 和 U3B 构成窗口比较器, 其输出电平控制开关 S 的通断. 当忆阻器流过的磁通  $|\phi(t)| > 1$  时, 窗口比较器的输出为高电平, 开关 S 处于断开状态, 此时节点 A 和节点 B 之间的电导对应为  $1/R_b$ ; 当忆阻器流过的磁通  $|\phi(t)| < 1$  时, 窗口比较器输出为低电平, 开关 S 处于导通状态, 则 A, B 节点之间对应的电导为  $(1/R_a + 1/R_b)$ . 从上述分析可以看出, 提出的电路能很好地模拟 (2) 式所定义的 PWL 忆阻器.

### 4.2 整体电路

根据 (12) 式和 (10) 式, 我们构建了系统的整体电路如图 6 所示, 图中忆阻器采用电路符号表示. 根据图 6, 系统 (12) 的状态变量  $x_1, x_2, x_3$  分别对

应为电容  $C_1, C_2, C_3$  上的电压. 第四个状态变量  $x_4$ , 对应为忆阻器的磁通  $\phi$ , 可以从图 5 的忆阻器等效电路内部电容  $C_4$  上获得. 通过简单的电路分析可以得到电路的状态方程为

$$\begin{aligned} \tau_1 \dot{x}_1 &= -x_1 + \frac{R_4}{R_1}x_1 + \frac{R_4}{R_3}x_3 - \frac{R_4}{R_2} \frac{W(x_4)}{G_C}x_1, \\ \tau_2 \dot{x}_2 &= -x_2 + \frac{R_{23}}{R_{22}}x_2 - \frac{R_{23}}{R_{21}}x_3, \\ \tau_3 \dot{x}_3 &= -x_3 - \frac{R_{34}}{R_{33}}x_1 + \frac{R_{34}}{R_{32}}x_2 + \frac{R_{34}}{R_{31}}x_3, \\ \tau_4 \dot{x}_4 &= -x_4 + \frac{R_{43}}{R_{41}}x_1 + \frac{R_{43}}{R_{42}}x_4. \end{aligned} \quad (17)$$

当选择电路参数使之满足 (14) 式, 则系统 (6) 所描述的忆阻器混沌电路模型可以映射为图 6 所示的电路.

### 5 实验结果

为了验证电路的动力学特性, 我们采用 AD844 电流反馈运算放大器作为 SC-CNN 单元的有源器件, 忆阻器等效电路内部的窗口比较器采用 LM339 实现, 控制开关 S 采用高速集成开关 ADG201AKN, 电源电压为  $\pm 12$  V. 其他元件参数值分别为:

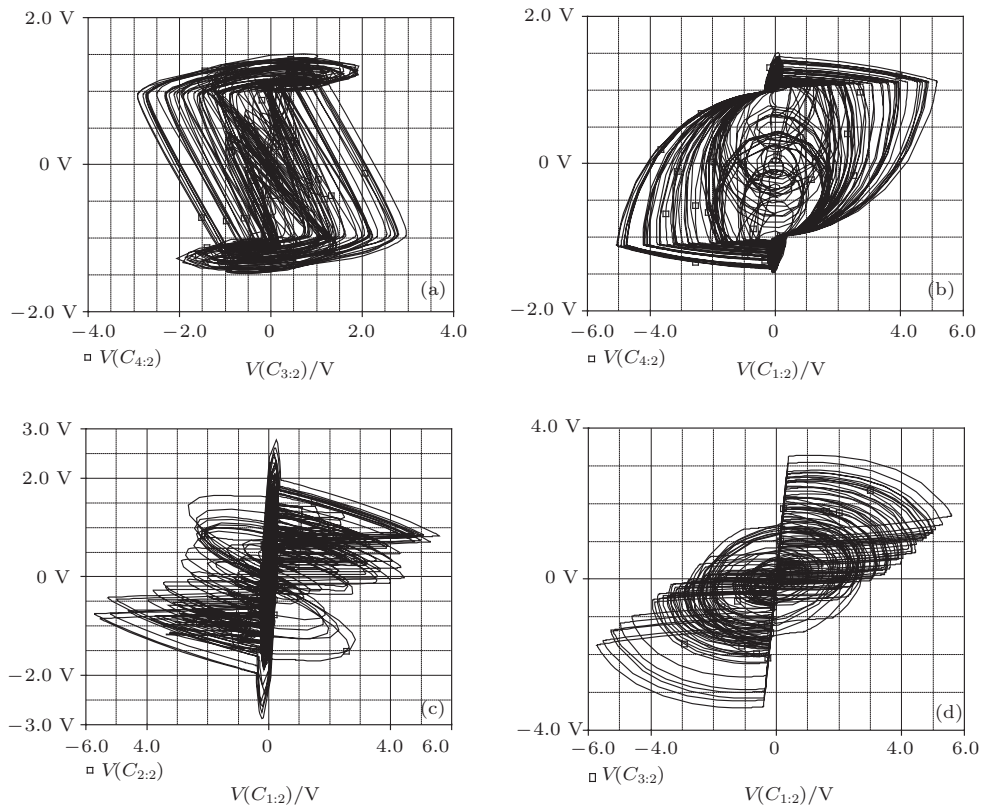


图 7 PSPICE 仿真得到的混沌吸引子 (a)  $v_{c3}-v_{c4}$  平面; (b)  $v_{c1}-v_{c4}$  平面; (c)  $v_{c1}-v_{c2}$  平面; (d)  $v_{c1}-v_{c3}$  平面



Cell 1#:  $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R_6 = R_7 = 100$  k $\Omega$ ,  $R_{15} = 1.2$  k $\Omega$ ,  $R_C = 10$  k $\Omega$ ,  $C_1 = 47$  nF;

Cell 2#:  $R_{21} = R_{23} = R_{26} = R_{27} = 100$  k $\Omega$ ,  $R_{22} = 59$  k $\Omega$ ,  $R_{25} = 4.7$  k $\Omega$ ,  $C_2 = 47$  nF;

Cell 3#:  $R_{32} = R_{33} = R_{34} = R_{36} = R_{37} = 100$  k $\Omega$ ,  $R_{35} = 4.7$  k $\Omega$ ,  $C_3 = 47$  nF;

Cell 4#:  $R_{41} = R_{42} = R_{43} = R_{46} = R_{47} = R_b = 100$  k $\Omega$ ,  $R_{45} = 4.7$  k $\Omega$ ,  $R_8 = 10$  k $\Omega$ ,  $C_4 = 47$  nF,  $R_a = 1.25$  k $\Omega$ .

选择电阻  $R_{31}$  为电路的控制参数. 当  $R_{31} = 110$  k $\Omega$  时, 采用 PIPICE 仿真软件得到的混沌吸引子如图 7 所示.

为了进一步验证电路的混沌行为, 对提出的电路进行硬件实验. 采用泰克 MSO3032 混合示波器、双路稳压电压和实验电路板构建的实验测试平台如图 8 所示. 同样当调节电阻  $R_{31} = 110$  k $\Omega$  时, 示波器观察到的混沌吸引子如图 9 所示.

比较图 2、图 7 和图 9 可以看出, 忆阻器混沌电路模型的数值模拟结果、采用 SC-CNNs 方案实现的忆阻器混沌电路的 PSPICE 仿真结果和实验结果三者符合良好, 从而可以证明采用改进型的 SC-CNNs 可以有效地实现忆阻器混沌电路.

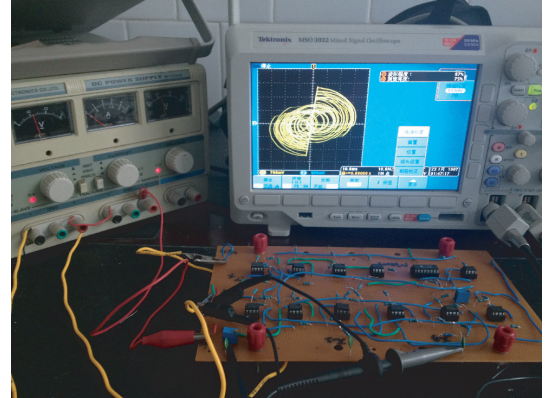


图 8 硬件测试平台

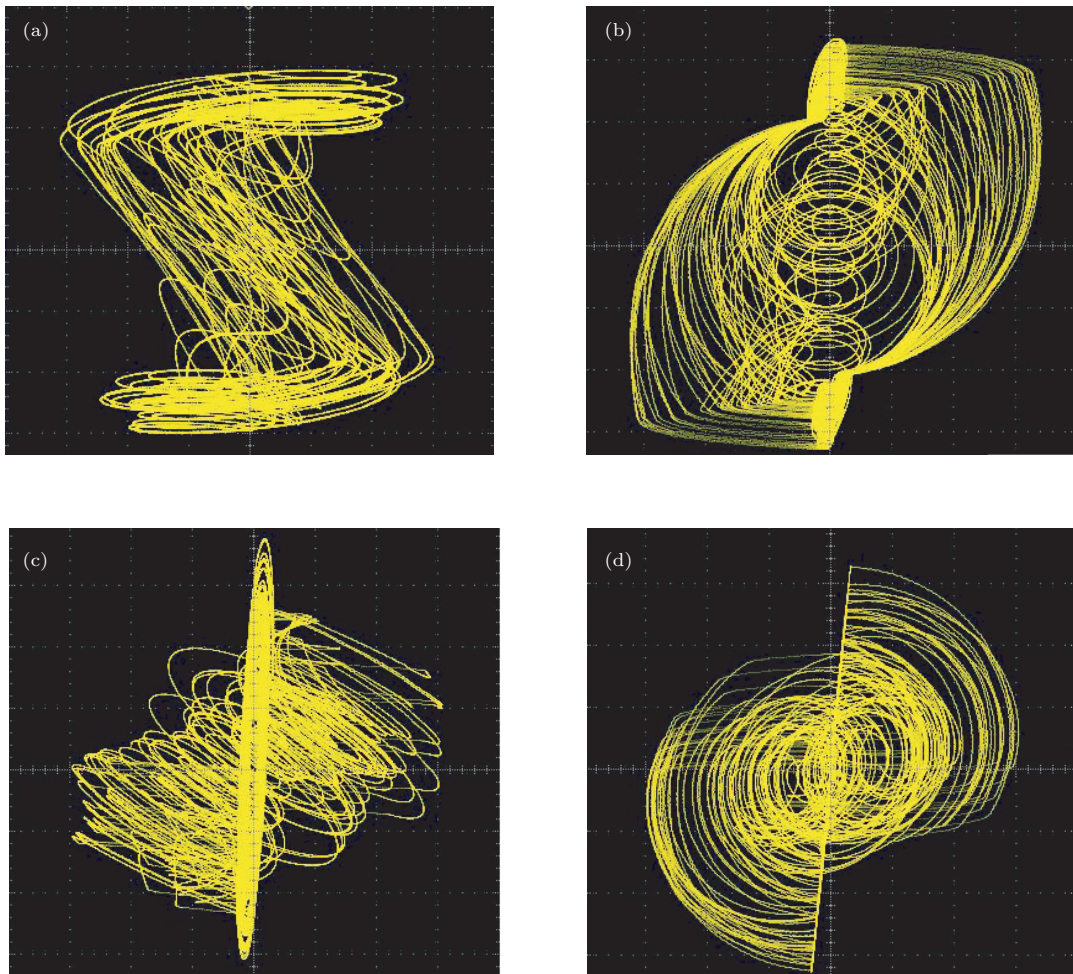


图 9 实验观察到的混沌吸引子 (a)  $v_{c3}$ - $v_{c4}$  平面 ( $v_{c3} = 0.8$  V/div,  $v_{c4} = 0.5$  V/div); (b)  $v_{c1}$ - $v_{c4}$  平面 ( $v_{c1} = 1.5$  V/div,  $v_{c4} = 0.5$  V/div); (c)  $v_{c1}$ - $v_{c2}$  平面 ( $v_{c1} = 1.5$  V/div,  $v_{c2} = 0.8$  V/div); (d)  $v_{c1}$ - $v_{c3}$  平面 ( $v_{c1} = 1.5$  V/div,  $v_{c2} = 1.0$  V/div)

## 6 结 论

自 HP 实验室宣布物理实现忆阻器以来, 有关忆阻器混沌电路的研究一直是非线性系统领域的一个研究热点. 然而现有忆阻器混沌电路的实现方法比较单一, 都是采用忆阻器直接替换原蔡氏电路中的蔡氏二极管. 且大多数忆阻器混沌电路 [6-10,12,13] 只是从理论上分析了系统的混沌行为, 并没有从实际电路上验证其混沌行为. 本文在现有忆阻器混沌电路的基础上采用改进型的 SC-CNNs 实现了一种新的忆阻器混沌电路, 从而为忆阻器混沌电路的设计提供了另外一种可供选择的方法. 电路的实验结果证实了该方法的正确性和有效性. 与现有的忆阻器混沌电路相比 [6-14], 采用改进型 SC-CNNs 实现的忆阻器混沌电路不但结构简单、且具有良好的鲁棒性(不包含电感), 因而可以广泛应用于混沌保密通信、图像加密和电子测量系统中 [24].

## 参考文献

- [1] Strukov D B, Snider G S, Stewart G R, Williams R S 2008 *Nature* **453** 80
- [2] Chua L O 1971 *IEEE Trans. Circuit Theory* **18** 507
- [3] Chua L O, Kang S M 1976 *Proc. IEEE* **64** 209
- [4] Shin S, Kim K, Kang S M 2012 *Electronics Letters* **48** 78
- [5] Shin S, Kim K, Kang, S M 2011 *IEEE Trans. on Nanotechnology* **10** 266
- [6] Itoh M, Chua L O 2008 *Int. J. Bifurc. Chaos* **18** 3183
- [7] Muthuswamy B, Kokate P P 2009 *IETE Techn. Rev.* **26** 415
- [8] Li Z J, Zeng Y C 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040502
- [9] El-Sayed A M A, Elsaid A, Nour H M, Elsonbaty 2013 *Commun Nonlinear Sci. Numer Simulat.* **18** 148
- [10] Bao B C, Liu Z, Xu J P 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3785 (in Chinese) [包伯成, 刘中, 许建平 2010 物理学报 **59** 3785]
- [11] Liu Z, Bao B C, Xu J P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030510
- [12] Bao B C, Liu Z, Xu J P 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 070504
- [13] Muthuswamy B, Chua L O 2010 *Int. J. Bifurc. Chaos* **20** 1567
- [14] Muthuswamy B 2010 *Int. J. Bifurc. Chaos* **20** 1335
- [15] Chua, L O, Yang L 1998 *IEEE Trans. Circuits Syst.* **35** 1257
- [16] Gunay E, Alci M 2005 *Int. J. Bifurc. Chaos* **15** 4013
- [17] Arena P, Baglio S, Fortuna L, Manganaro G 1995 *IEEE Trans. Circuits Syst. I.* **42** 123
- [18] Swathy P S, Thamilmaran K 2013 *Nonlinear Dyn.* **71** 505
- [19] Kilic R 2003 *Circuit Syst. Sign. Process* **22** 475
- [20] Gunay E, Alci M, Yildirim F 2005 *Int. J. Bifurc. Chaos* **15** 2551
- [21] Messias M, Nespole C, Botta V A 2010 *Int. J. Bifurc. Chaos* **20** 437
- [22] Shin S, Kang S M 2010 *IEEE Trans. Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems* **29** 590
- [23] Birolek Z, Birolek D, Biolkova V 2009 *Radioengineering* **18** 210
- [24] Juan L, Mata-Machuca, Rafael Martí nez-Guerra, Ricardo Aguilar-López 2012 *Commun Nonlinear Sci. Numer Simulat.* **17** 1706



# Memristive chaotic circuit based on modified SC-CNNs\*

Li Zhi-Jun<sup>1)2)†</sup> Zeng Yi-Cheng<sup>2)</sup> Li Zhi-Bin<sup>3)</sup>

1) (*College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

2) (*Dept. of Optoelectronic Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

3) (*College of Energy Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China*)

( Received 7 July 2013; revised manuscript received 5 October 2013 )

## Abstract

Memristor, as a fundamental nonlinear circuit element, is very suitable for realizing new nonlinear circuits that are able to exhibit complex dynamical behaviors. A modified state-controlled cellular nonlinear network (SC-CNN) cell containing memristors, the output nonlinear function of which is implemented with the intrinsic nonlinearity of memristor, is presented in this paper. By using appropriate connection of four modified SC-CNN cells, a SC-CNN based memristive chaotic circuit is developed. In particular, an imitative memristive circuit is developed to experimentally investigate its dynamical behaviors. The resemblance of experimental results with those of numerical simulations shows that the memristive chaotic circuit can be efficiently implemented in terms of SC-CNN scheme.

**Keywords:** memristor, piecewise-linear, state-controlled cellular nonlinear networks, chaos

**PACS:** 05.45.-a

**DOI:** [10.7498/aps.63.010502](https://doi.org/10.7498/aps.63.010502)

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61176032).

† Corresponding author. E-mail: [lizhijun\\_320@163.com](mailto:lizhijun_320@163.com)