

8-17-2020

## Novel Modeling of Memristive Cellular Neural Network and Its Circuit Simulation

Xiaohong Zhang

*School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;*

Linyu Liao

*School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;*

Lianghua Yu

*School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Novel Modeling of Memristive Cellular Neural Network and Its Circuit Simulation

## Abstract

**Abstract:** The memristor as the fourth fundamental circuit component included along with the resistor, capacitor and inductor could simulate the storage memory function of brain neural network. *A traditional three-dimensional CNN was designed, and the output function was implemented with the nonlinear characteristics of a flux-controlled memristor. The conventional electronic devices in Multisim were utilized to simulate flux-controlled memristor which simplified the output function part of the circuits. To compare with the CNN system which has chaotic behaviors, the circuits of novel memristive cellular neural network not only can show a chaos attractors phenomenon, but also the inner magnetic energy of memristor is changed with state of CNN to achieve the equivalent values of output function.* Numerical calculation and circuit simulation results verify its chaotic characteristics and feasibility, and can be applied in synchronization communication, image encryption and speech signal processing, et al.

## Keywords

cellular neural network, memristor, chaotic, piecewise-linear, circuit simulation, secure communication

## Recommended Citation

Zhang Xiaohong, Liao Linyu, Yu Lianghua. Novel Modeling of Memristive Cellular Neural Network and Its Circuit Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(8): 1715-1725.

# 新型忆阻细胞神经网络的建模及电路仿真

张小红, 廖琳玉, 俞梁华

(江西理工大学信息工程学院, 赣州 341000)

**摘要:** 作为继电阻、电容、电感三大电路基本元件外的第四类电路元件忆阻器, 可模拟大脑突触神经网络的存储记忆功能。构建一个传统三维细胞神经网络, 利用磁控忆阻器的非线性特性替换传统细胞神经网络的输出模块。采用 Multisim 通用电路元件构建磁控忆阻等效电路, 在电路整体设计上简化了输出函数模块数量, 与具有混沌行为的 CNN 系统相比, 新型忆阻 CNN 电路不仅展现出了混沌吸引子现象, 而且忆阻内部的磁能量随细胞状态而变化, 可完全达到等效输出函数的忆导值。数值计算与电路仿真结果验证了忆阻细胞神经网络的混沌特性及新设计方法的可行性, 在信号处理、同步控制与图像加密等方面具有现实的应用价值。

**关键词:** 细胞神经网络; 忆阻器; 混沌; 分段线性; 电路仿真; 保密通信

中图分类号: TP391.9/O415.5 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X (2016) 08-1715-11

## Novel Modeling of Memristive Cellular Neural Network and Its Circuit Simulation

Zhang Xiaohong, Liao Linyu, Yu Lianghua

(School of Information Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** The memristor as the fourth fundamental circuit component included along with the resistor, capacitor and inductor could simulate the storage memory function of brain neural network. A traditional three-dimensional CNN was designed, and the output function was implemented with the nonlinear characteristics of a flux-controlled memristor. The conventional electronic devices in Multisim were utilized to simulate flux-controlled memristor which simplified the output function part of the circuits. To compare with the CNN system which has chaotic behaviors, the circuits of novel memristive cellular neural network not only can show a chaos attractors phenomenon, but also the inner magnetic energy of memristor is changed with state of CNN to achieve the equivalent values of output function. Numerical calculation and circuit simulation results verify its chaotic characteristics and feasibility, and can be applied in synchronization communication, image encryption and speech signal processing, et al.

**Keywords:** cellular neural network; memristor; chaotic; piecewise-linear; circuit simulation; secure communication

## 引言

1971 年, 美国华裔教授蔡少棠(Chua)根据电路



收稿日期: 2015-02-03 修回日期: 2015-05-03;  
基金项目: 国家自然科学基金(11062002, 61363076),  
江西省自然科学基金(20142BAB207020), 江西省教育厅  
科技项目(GJJ150621, GJJ14439), 江西省研究生创新  
专项资金(YC2014-S368);  
作者简介: 张小红(1966-), 女, 河北昌黎, 博士, 教  
授, 研究方向为非线性动力学, 视频保密通信。

变量完备性理论首次提出了忆阻器(Memristor)<sup>[1]</sup>, 创造性地将磁通和电荷关系通过该新型元件有机联系起来, 这是继电阻、电容、电感三大电路基本元件外的第四类电路元件。2008 年美国惠普(HP)实验室 Strukov 等利用钛的氧化物薄膜, 成功研制出一种非线性的无源二端的忆阻器的纳米模型<sup>[2]</sup>, 将 Chua 理论在实际应用中得以实现。由于忆阻器其特殊的记忆和非线性特性, 近年来国内外广大学

者从数学和物理的角度探索不同模型的忆阻器的性质及应用<sup>[3-5]</sup>。捷克布尔诺科技大学 Biolek 等<sup>[3]</sup>建立了一个  $\text{TiO}_2$  忆阻的 SPICE 宏模型, 研究了忆阻在非线性漂移条件下的物理及电路变化特性; 胡丰伟、包伯成等<sup>[6]</sup>以三次非线性忆阻器模型为例, 制作实现了荷控忆阻的等效电路, 并对其电路特性进行实验分析; 洪庆辉、李志军等<sup>[7]</sup>分别设计了磁控和荷控忆阻器的等效电路模拟器, 利用两种忆阻模型结合串并联连接方式设计了一个五阶混沌电路; 加利福尼亚伯克利分校 Muthuswamy<sup>[8]</sup>采用自定义的分段线性忆阻模型替换蔡氏混沌电路中的二极管, 验证了其混沌特性。

神经网络(Cellular Neural Network, CNN)由 Chua 和 Yang 于 1988 年提出<sup>[9-10]</sup>, 是一种局部互连、双值输出的信号非线性模拟处理器, 具有连续实时、能高速并行计算、适用于超大规模集成电路(Very Large Scale Integration, VLSI)实现等特点。二十多年来 CNN 研究的成果已广泛应用于生物医学、图像处理、自动控制、模式识别、信号处理、保密通信等诸多领域<sup>[11-16]</sup>。CNN 电路的理论设计和硬件实现<sup>[17]</sup>是依据人脑生物神经网络对信息处理机制的简化模拟, 与生物神经元不同, CNN 细胞神经元之间的联系主要由权值模板控制, 模板的不同体现出的非线性特征也各异, 而具有记忆特性的忆阻器可被应用于神经元与神经元之间的机能连接点(突触), 芬兰图尔库大学 Lehtonen 用 SPICE 模拟仿真忆阻模型, 将其应用到 CNN 细胞的权值电路中<sup>[18]</sup>, 日本福冈工业大学 Itoh 和 Chua 将分段线性忆阻应用到细胞自动机中实现逻辑运算和图像处理等功能<sup>[19]</sup>。大量研究表明用忆阻实现的 CNN 表现出了良好的智能特性和潜在应用前景。

针对现有的 CNN 模块结构电路主要由权值模板矩阵和非线性输出的设计, 本文对于其硬件设计方法做出部分改进, 在提出一个新的三维 CNN 基础上, 将磁控忆阻器替换传统 CNN 中每个细胞输出模块中的电阻, 通过每个细胞的状态变化控制其对应忆阻的电导值变化, 实现 CNN 的非线性输出

功能。采用 Multisim 电路仿真忆阻等效电路产生的吸引子与数值仿真结果相似, 从而验证了忆阻 CNN 的混沌特性存在和设计方法可行性。通过同步通信系统控制、图像与信号加密等仿真实例, 揭示设计的 CNN 系统在现实中具有广泛的应用前景。

## 1 忆阻器数学模型

文献[1]中提出的忆阻器数学模型是根据电荷  $q$  和磁通  $\phi$  的关系定义的, 定义关系为单调上升、分段线性函数, 可用下列式子描述:

$$\phi(q) = bq + 0.5(a - b)(|q + 1| - |q - 1|) \quad (1)$$

$$q(\phi) = d\phi + 0.5(c - d)(|\phi + 1| - |\phi - 1|) \quad (2)$$

其中,  $a, b, c, d$  为不小于零的实数。

根据(1)(2), 忆阻器的阻值  $M(q)$  和忆导值  $W(\phi)$  可分别表示为:

$$M(q) = \frac{d\phi(q)}{dq} = \begin{cases} a, & |q| \leq 1 \\ b, & |q| > 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$W(\phi) = \frac{dq(\phi)}{d\phi} = \begin{cases} c, & |\phi| \leq 1 \\ d, & |\phi| > 1 \end{cases} \quad (4)$$

则忆阻器的伏安特性为  $u = M(q)i$ ;  $i = W(\phi)u$ 。  $M(q)$  和  $W(\phi)$  分别与电阻和电导具有相同的量纲。荷控忆阻两端的电压  $u$  是电流  $i$  和忆阻值  $M(q)$  的函数, 忆阻值  $M(q)$  是电荷量  $q$  的函数, 即忆阻值是随着电流的变化而变化, 磁控忆阻忆导值  $W(\phi)$  是磁通量  $\phi$  的函数。

## 2 CNN 模型

CNN 是一种能实时处理信号的大规模非线性模拟系统, 它的每一个基本电路单元为一个细胞神经元, 是由相同的细胞神经元在空间上规则排列连接而成。这些细胞神经元只与相邻连接的细胞神经元联系, 相互作用, 每个神经元都具有输入、输出和动力学规则相关的状态。由于 CNN 具有连续时间的动力学行为, 使得不邻近的细胞神经元也可有间接的影响<sup>[20]</sup>。本文以 9 个细胞为例, 按 3 行 3 列矩形网格排列成一个二维的  $3 \times 3$  CNN 结构, 如图 1 所示, 位于第  $i$  行第  $j$  列的细胞记为  $C(i, j)$ 。

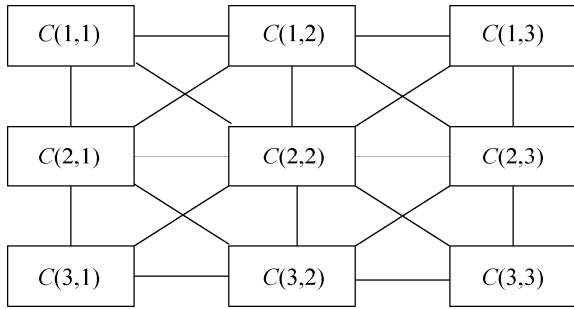


图 1 3×3 二维 CNN 结构

用  $N_r(i, j)$  表示  $C(i, j)$  和其所有邻近细胞的集合, 即  $C(i, j)$  的邻近细胞  $C(k, l)$  位于细胞  $C(i, j)$  的  $r$  邻域  $N_r(i, j)$  中, 对于  $r=1$ , 细胞邻域为  $3 \times 3$  结构的 CNN,  $N_r(i, j)$  定义如下:

$$N_r(i, j) = \{C(k, l) : \max(|i-k|, |j-l|) \leq r, 1 \leq k \leq 3, 1 \leq l \leq 3\} \quad (5)$$

图 2 为一个细胞神经元的等效电路图, 其包含电容、电阻、控制电源及独立电源。

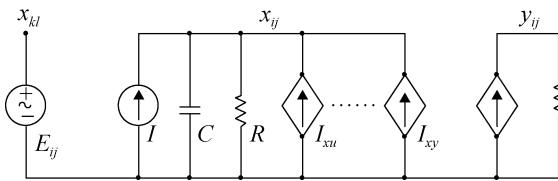


图 2 细胞  $C(i, j)$  的等效电路

细胞单元  $C(i, j)$  的状态方程为:

$$C \frac{dx_{ij}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_x} x_{ij}(t) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} A(i, j; k, l) y_{kl}(t) + \sum_{C(k,l) \in N_r(i,j)} B(i, j; k, l) x_{kl}(t) + I \quad (6)$$

输出方程为:

$$y_{ij}(t) = f(x_{ij}) = \frac{1}{2} (|x_{ij}(t) + 1| - |x_{ij}(t) - 1|) \quad (7)$$

其中:  $x_{kl}$  表示集合内所有细胞单元对  $C(i, j)$  的输入;  $x_{ij}$  表示  $C(i, j)$  细胞单元的状态;  $y_{kl}$  表示集合内所有细胞单元反馈输出;  $B(i, j; k, l)$  表示细胞集合的电路控制模板;  $A(i, j; k, l)$  表示细胞集合的电路反馈模板。图 2 中  $I_{xu}(i, j; k, l)$  和  $I_{xy}(i, j; k, l)$  表示压控电流源,  $I$  表示输入偏置电流,  $C$  为电路系统的电容,  $E_{ij}$  为独立电压源,  $R_y$  表示整个电路输出

阻抗。电路和状态方程关系有:

$$I_{xu}(i, j; k, l) = B(i, j; k, l) x_{kl} \quad (8)$$

$$I_{xy}(i, j; k, l) = A(i, j; k, l) y_{kl}$$

对于  $3 \times 3$  的二维 CNN 来说, 系统功能是由  $A$ 、 $B$  和  $I$  这 21 个参数的设置确定, 假设定义:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

为了便于数值仿真, 引入简化的无量纲 CNN 模型, 设  $C=1, R_x=1$ , 对于一个三维 CNN 系统, 其状态方程描述如下:

$$\frac{dx_j}{dt} = -x_j + \sum_{k=1}^3 A_{jk} f(x_k) + \sum_{k=1}^3 B_{jk} x_k + I_j, (j=1, 2, 3) \quad (10)$$

若令:

$$A_{jk} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & -4.22 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1.29 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B_{jk} = \begin{bmatrix} -2 & 6.2 & 3.02 \\ 1 & 0.08 & 1 \\ 0.14 & -9.32 & 0.74 \end{bmatrix}, I_j = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

则系统方程(10)变为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -x_1 + 3f(x_1) - 4.22f(x_3) - 2x_1 + 6.2x_2 + 3.02x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_2 + x_1 + 0.08x_2 + x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = -x_3 - 1.29f(x_2) + 0.14x_1 - 9.32x_2 + 0.74x_3 \end{cases} \quad (11)$$

当设置初始值  $(x_1, x_2, x_3)$  为  $(0.1, 0.2, 0.1)$ , 步长  $h=0.01$  时, 对系统进行数值仿真得到的运动轨迹相图如图 3 所示。

利用 GS 正交化算法计算(11)式 Lyapunov 指数得  $L_1=0.5359$ ,  $L_2=-0.0442$ ,  $L_3=-2.9616$ , Lyapunov 维数为  $D_L=2.1660$ , 因此, 可以判断该 CNN 系统是混沌振荡的。

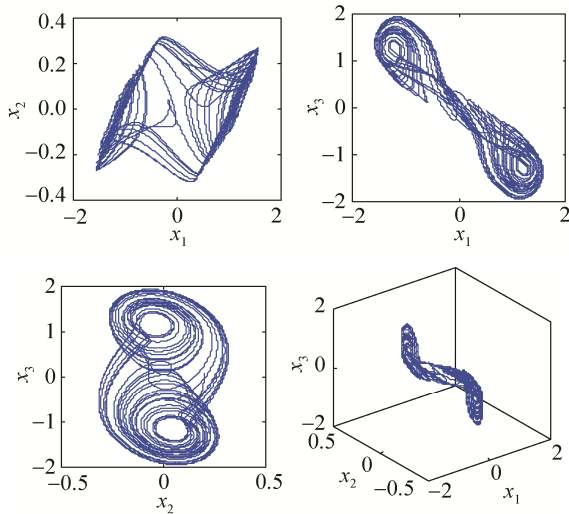
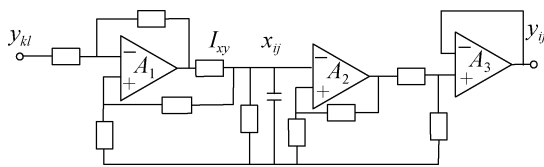


图 3 系统(11)的混沌吸引子相图

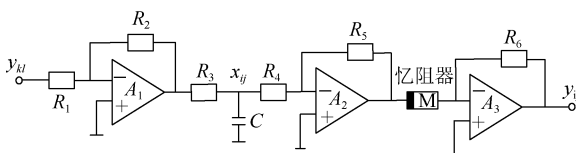
### 3 忆阻 CNN 模型

#### 3.1 传统 CNN 电路

传统 CNN 的每个细胞单元可用图 4(a)所示的运算放大器电路<sup>[9]</sup>实现。



(a) 传统 CNN 电路单元



(b) 忆阻 CNN 细胞单元电路

图 4 CNN 电路单元

从图 4(a)中可看出，运算放大器  $A_1$  把输入电压  $y_{kl}$  转化成电流  $I_{xy}$ ，电流  $I_{xy}$  经过  $R_x$  和  $C$  的并联电路后转化为电压  $x_{ij}$ ，非线性输出函数  $y_{ij}$  是通过放大器  $A_2$  和  $A_3$  实现，图中参数关系可用下列式子表示：

$$I_{xy} = -\frac{R_2}{R_1 R_5} y_{kl} \quad (12)$$

$$y_{ij} = \frac{R_9}{R_8 + R_9} \times \frac{R_6 + R_7}{R_6} x_{ij} \quad (13)$$

其中约束条件有：

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4 + R_5}{R_3} \quad (14)$$

$$\frac{R_6 + R_7}{R_6} = \frac{R_8 + R_9}{R_9} \quad (15)$$

结合公式(6)可演化成：

$$C \frac{dx_{ij}}{dt} = -\frac{1}{R_x} x_{ij} - \frac{R_2}{R_1 R_5} y_{ij} \quad (16)$$

图 4(a)有 10 个电阻，1 个电容和 3 个运算放大器，可知传统的 CNN 单元电路中的运用到多个电阻，且含有电阻约束条件，实现起来较复杂。本文针对 CNN 的非线性输出函数，结合磁控忆阻的非线性特性，实现一种简单新型的忆阻 CNN 电路设计。

#### 3.2 新型忆阻 CNN 电路

本文采用的是分段线性磁控忆阻器，其磁通和电荷的关系可用式(2)表示，忆导用式(4)表示，选取  $c=1, d=0$ ，则忆阻模型为：

$$q(\phi) = 0.5(|\phi + 1| - |\phi - 1|) \quad (17)$$

忆导  $W(\phi)$  为：

$$W(\phi) = \frac{dq(\phi)}{d\phi} = \begin{cases} 1, & |\phi| \leq 1 \\ 0, & |\phi| > 1 \end{cases} \quad (18)$$

显然，忆阻模型(17)和公式(7)CNN 输出函数  $f(x_{ij})$  具有相同的性质，都为分段线性函数，且自变量在  $-1$  到  $1$  区间，导数都为 1，当自变量大于 1 时，函数值为 1，小于 1 时，函数值为  $-1$ 。

从(11)看出，系统的 3 个细胞都有一个输出，为了将磁控忆阻应用到 CNN 的非线性输出模块中，本文参考文献[21]中设计思想将忆阻替换输出模块中的一个电阻，结合线性电导  $G_c$  和一个运算放大器构成一个反相放大器，实现一种新的细胞单元电路，如图 4(b)所示。

#### 3.3 新型忆阻 CNN 电路特点

忆阻器  $M$  输入端为对应细胞状态  $-x_{ij}$ ，经过  $A_3$  和  $R_6$  后输出端为  $y_{ij}$ ，而忆阻内部状态用一个电容两端的电压表示，取决于所连细胞单元的状态变量  $x_j$ ，忆阻两端的电导为  $W(\phi_j)$ ，因此细胞单元的输出函数可重写为：

$$f(x_j) = -\frac{W(\phi_j)}{G_c} x_j = -\frac{W(\int x_j dt)}{G_c} x_j, j=1,2,3 \quad (19)$$

$$W(\int x_j dt) = \begin{cases} 1, & |\int x_j dt| \leq 1 \\ 0, & |\int x_j dt| > 1 \end{cases} \quad (20)$$

每个细胞的输出都使用忆阻后, 忆阻内部的磁通量为对应细胞状态  $x_j$  对时间的积分, 忆导值为磁通量的函数, 输出函数中的忆阻用忆导值表示, 改进后的忆阻 CNN 细胞单元电路如图 4(b)所示, 图 4(b)中共使用 6 个电阻, 3 个运算放大器, 1 个忆阻器, 1 个电容, 和 1 个新型的有记忆特性的元件, 即忆阻器。

图 4(b)中电路满足以下关系:

$$C \frac{dx_{ij}}{dt} = -\frac{1}{R_3} x_{ij} + \frac{R_2}{R_1} y_{ij} \quad (21)$$

$$y_{ij} = -\frac{R_6}{M} x_{ij} \quad (22)$$

式中  $M$  为忆阻阻值, 从图 4(a)和图 4(b)对比可以看出, 电路降低了复杂度, 省略了电路电阻的一些约束条件, 用忆阻器替换了电路中输出模块的一个电阻, 使整体电路集成度更高, 实现起来更简单。

### 3.4 忆阻 CNN 数值仿真

将忆阻应用到 CNN 电路后, 系统(11)可转化为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -x_1 + 3 \frac{W(\int x_1 dt)}{G_c} x_1 - \\ 4.22 \frac{W(\int x_3 dt)}{G_c} x_3 - 2x_1 + 6.2x_2 + 3.02x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_2 + x_1 + 0.08x_2 + x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = -x_3 - 1.29 \frac{W(\int x_2 dt)}{G_c} x_2 + \\ 0.14x_1 - 9.32x_2 + 0.74x_3 \end{cases} \quad (23)$$

其中  $G_c$  设置为 1。

用 MATLAB 数值仿真得到的混沌吸引子如图 5 所示, 忆阻 CNN 系统与一般的 CNN 系统有不同

的动力学特性, 不仅电路参数的变化会导致电路的特性的变化, 且忆阻器的初始状态也会影响电路特性, 因为忆阻具有独特的记忆特性, 这种记忆特性会导致在系统关闭后重新启动展示新的混沌行为。

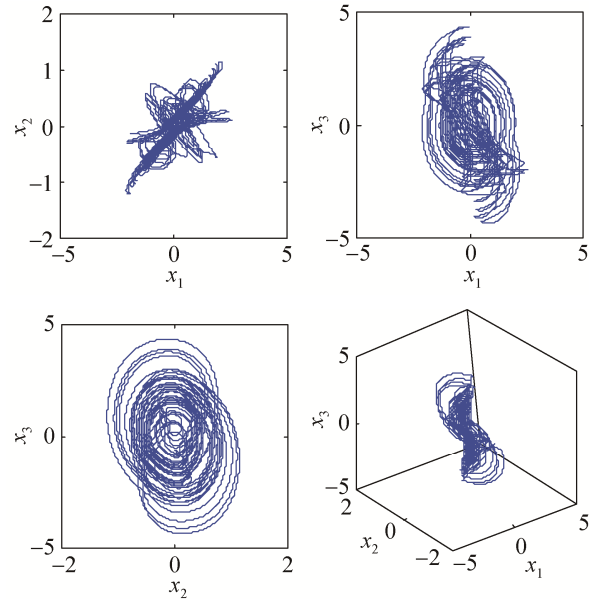
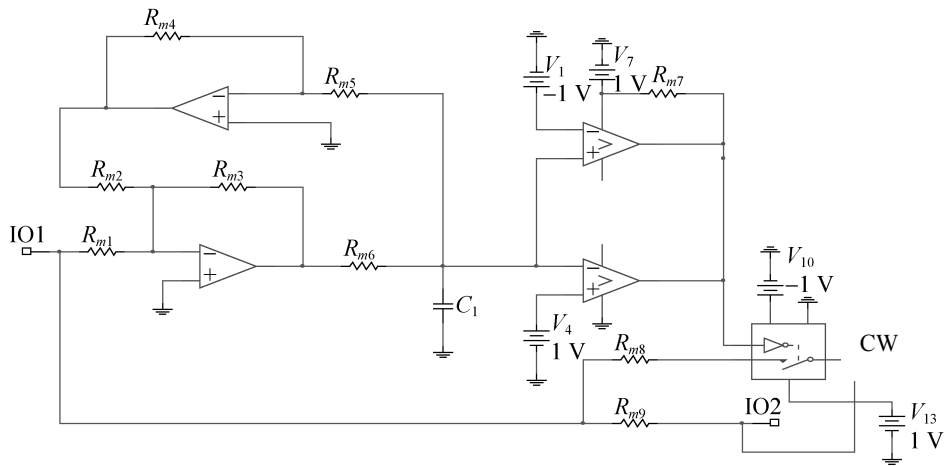


图 5 系统(23)的混沌吸引子相图

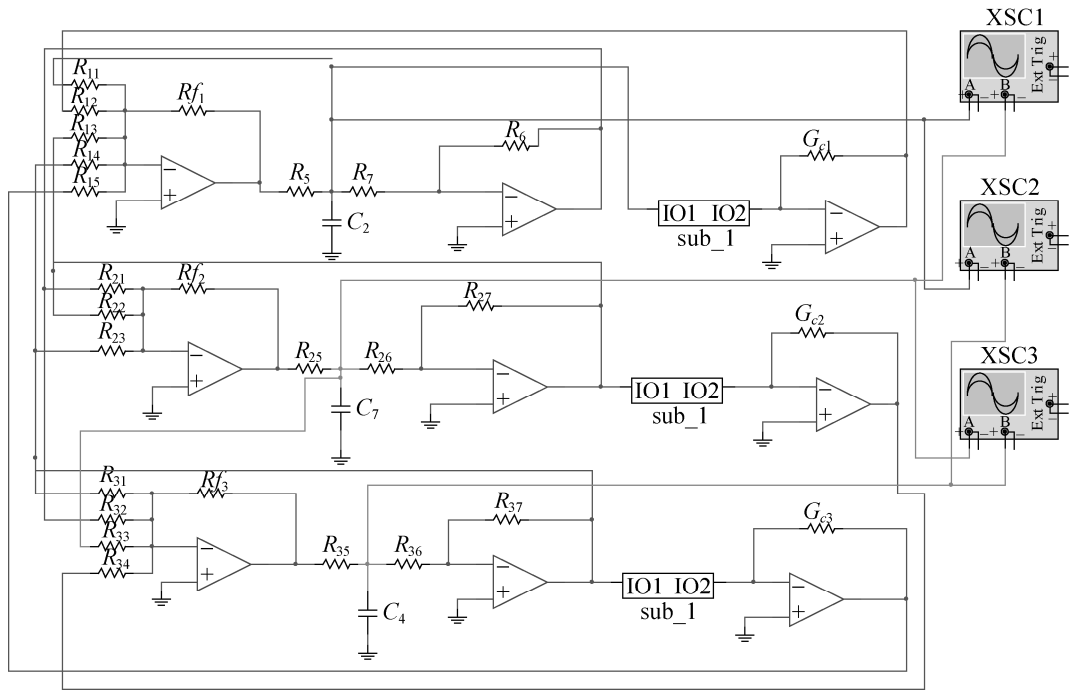
### 3.5 新型忆阻 CNN 电路实验验证

根据目前研究现状来看, 忆阻器主要有两种制作方式, 一种是纳米压印光刻技术, 另一种是原子层沉积技术, 作为一种纳米材料, 制作成本较高, 为了实验验证本文提出的忆阻 CNN 电路, 采用 Multisim10.0 仿真软件, 本文设计了适应忆阻模型(17)的忆阻电路图, 参考文献[21]中的忆阻模拟等效电路, 如图 6(a)所示。

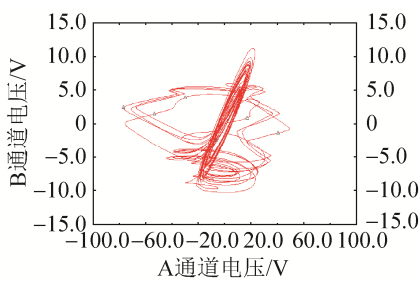
图 6(a)中电容  $C_1$  上的电压等效为忆阻器内部流过的磁通量  $\phi_j$ , 根据磁通量的定义, 磁通量  $\phi_j$  为状态  $x_j$  对时间  $t$  的积分, 当流过忆阻内部的磁通  $|\phi_j| \leq 1$  时, 窗口比较器 CW 的开关导通, 忆阻的电导值  $W(\phi_j)$  为  $\frac{1}{R_{m9}}$ , 根据(18)式, 这里设置为 1; 当流过忆阻内部的磁通  $|\phi_j| > 1$  时, 窗口比较器 CW 的开关断开, 忆阻的电导值  $W(\phi_j)$  为  $\frac{1}{R_{m9}} + \frac{1}{R_{m8}}$ , 根据(18)式, 这里设置为 0。



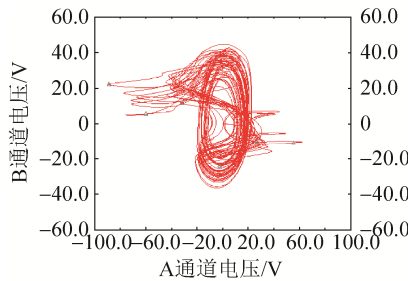
(a) 忆阻模拟等效电路(sub\_1)



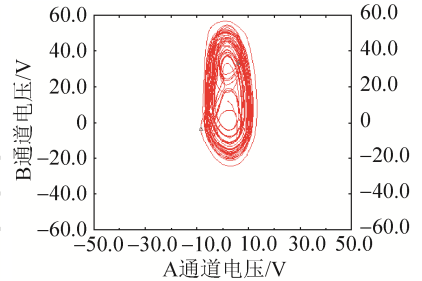
(b) 忆阻 CNN 电路图



(c)  $x_1-x_2$



(d)  $x_1-x_3$



(e)  $x_2-x_3$

图 6 三维忆阻 CNN 电路图及实验波形图



结合系统(23), 对图 4(b)中的忆阻单元重新规划, 设计了简单易行的电阻替换忆阻 CNN 电路, 如图 6(b)所示。

图 6(b)中, 磁控忆阻器采用图 6(a)中的子电路模块 sub\_1, 系统(23)的三个细胞  $x_1, x_2, x_3$  的状态变量分别对应于电路中电容  $C_2, C_3, C_4$  上的电压, 每个忆阻器的忆导值依据对应细胞的状态变化而变化。分析可知, 此忆阻模块能够较好的模拟 CNN 的非线性输出函数。通过对电路分析, 忆阻 CNN 电路的状态方程可写为:

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = -x_1 + \frac{Rf_1}{R_{12}} \frac{W(\int x_1 dt)}{G_c} x_1 - \\ \frac{Rf_1}{R_{15}} \frac{W(\int x_3 dt)}{G_c} x_3 - \frac{Rf_1}{R_{11}} x_1 + \frac{Rf_1}{R_{13}} x_2 + \frac{Rf_1}{R_{14}} x_3 \\ \frac{dx_2}{dt} = -x_2 + \frac{Rf_2}{R_{21}} x_1 + \frac{Rf_2}{R_{22}} x_2 + \frac{Rf_2}{R_{23}} x_3 \\ \frac{dx_3}{dt} = -x_3 - \frac{Rf_3}{R_{34}} \frac{W(\int x_2 dt)}{G_c} x_2 + \frac{Rf_3}{R_{32}} x_1 - \\ \frac{Rf_3}{R_{33}} x_2 + \frac{Rf_3}{R_{31}} x_3 \end{cases} \quad (24)$$

电路图 6(b)中电阻、电容等各个元器件参数值分别设置为:

细胞 1:

$$Rf_1 = R_6 = R_7 = 100\text{k}\Omega, R_{11} = 50\text{k}\Omega, R_{12} = 33.33\text{k}\Omega, \\ R_{13} = 16.13\text{k}\Omega, R_{14} = 33.11\text{k}\Omega, R_{15} = 23.69\text{k}\Omega, \\ R_5 = 5\text{k}\Omega, G_{c1} = 10\text{k}\Omega, C_2 = 50\text{nF}。$$

细胞 2:

$$Rf_2 = R_{21} = R_{23} = R_{26} = R_{27} = 100\text{k}\Omega, R_{22} = 1250\text{k}\Omega, \\ R_{25} = 5\text{k}\Omega, G_{c2} = 10\text{k}\Omega, C_3 = 50\text{nF}。$$

细胞 3:

$$Rf_3 = R_{35} = R_{36} = R_{37} = 100\text{k}\Omega, R_{31} = 135.14\text{k}\Omega, \\ R_{32} = 714.29\text{k}\Omega, R_{33} = 10.73\text{k}\Omega, R_{34} = 77.5\text{k}\Omega, \\ G_{c3} = 10\text{k}\Omega, C_4 = 50\text{nF}。$$

忆阻器:

$$R_{m1} = R_{m2} = R_{m3} = R_{m4} = R_{m5} = 100\text{k}\Omega, R_{m6} = 5\text{k}\Omega, \\ R_{m7} = R_{m8} = 1\text{k}\Omega, R_{m9} = 1000\text{k}\Omega, C_1 = 50\text{nF}。$$

图 6(a)~(b)中放大器均采用采用的是 LF347, 忆阻器等效电路中窗口比较器采用的是 LM339AD, 电压为 1.9 V, 开关采用的是集成开关 ADG201AKN, 电源电压为  $\pm 15\text{V}$ , 仿真结果用示波器显示, 如图 6(c)~(e)所示。

### 3.6 实验仿真结果分析

HP 使用  $\text{TiO}_2$  物理实现的边界非线性迁移忆阻模型与蔡氏电路的非线性二极管极其类似, 与其他元件结合可实现混沌振荡器, 所以, 能产生混沌现象实属必然现象, 本文以有混沌动力学行为的 CNN 系统着手, 用忆阻进行替换非线性输出部分, 同样能产生混沌现象。从 4.4 数值计算与 4.5 的电路仿真可知:

(1) 忆阻器的阻值随外加电源电压的变化而变化, 利用其类似于突触的特性, 可用于 CNN 电路, 只需要调节忆阻两端的电压极性、幅度或施加时间长度, 使得改变其通过电流的大小, 即改变忆阻的电荷量或磁通量得到不同的忆阻值。由于忆阻的记忆特性, 断电后也能记忆其断电前设置的值, 使得忆阻 CNN 可以保持原有的状态。

(2) 比较图 5 和图 6(c)~(e)的波形图可以看出, 忆阻 CNN 电路模型的数值仿真结果和采用 Multisim 软件实验电路仿真的结果大致符合, 由于模拟电路的温度漂移特性和电磁辐射效应的影响, 影响了系统的精确度, 导致了实验结果和数值仿真存在差异, 但总体符合一致性。

(3) 我们选取了大量的有混沌现象的 CNN 系统进行忆阻替换电路实验, 实验结果证明忆阻实现的改进 CNN 电路一样存在混沌现象, 说明了忆阻对 CNN 电路有良好的普适性。

## 4 忆阻 CNN 在现实中的应用

### 4.1 同步通信系统控制

通过构造可实现状态重构的全维状态观测器，从而实现两个忆阻 CNN 系统的同步。

一般地，对于以下非线性系统作为发送端：

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}F(\mathbf{X}) \\ \mathbf{Y} = \mathbf{K}\mathbf{X} + F(\mathbf{X}) \end{cases} \quad (25)$$

其中， $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times m}$ ,  $\mathbf{B} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ ,  $F: \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^m$  ( $m \leq n$ ) 为非线性映射， $\mathbf{K} \in \mathbf{R}^{m \times n}$  为待定矩阵， $\mathbf{Y}$  为输出，根据观测器原理，构造(25)的全维状态观测器，作为接收端：

$$\dot{\hat{\mathbf{X}}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{Y} \quad (26)$$

设同步误差  $\mathbf{e} = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}$ ，由(25)，(26)可得：

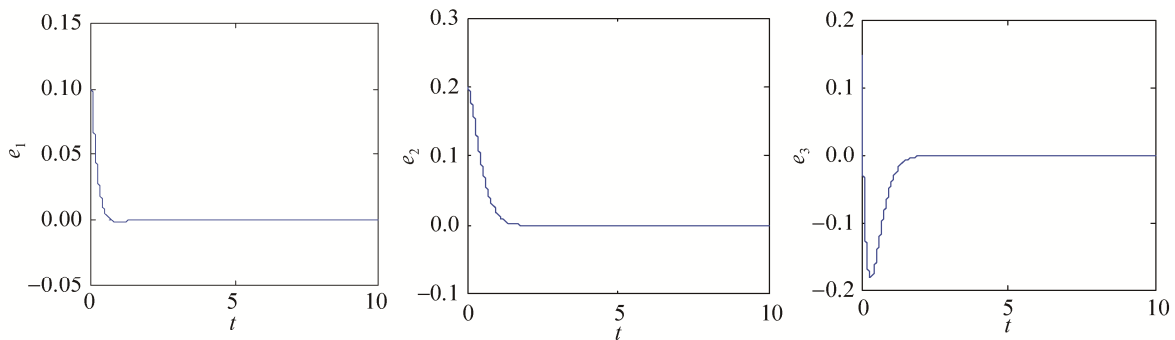


图 7 忆阻 CNN 系统同步误差图

### 4.2 图像置乱加密

考虑到忆阻 CNN 系统(23)具有混沌特性，对于 24 位 RGB 真彩图像，选择混沌序列  $x_i$  ( $i=1,2,3$ ) 作为密钥源  $key_i$  ( $i=1,2,3$ )，对图像中的红、绿、蓝三个色板分别进行信息的置乱，密钥是在设定初始值和一定时间后截取的不确定序列，其初值敏感性和不可预见性可以实现混沌保密通信系统。通过与给定的混沌序列同步的混沌轨道，利用 4.1 节构造的忆阻 CNN 同步通信系统，在信息的发射端和接收端实现两个忆阻 CNN 系统的混沌行为状态的完全同步。

(1)加密置乱过程：取  $H \times L$  像素的彩色图像 P 和密钥  $key_1, key_2$ ，对图像的像素点  $(i, j)$  进行以下置乱算法生成新的像素点  $(m, n)$ ：

$$\dot{\mathbf{e}} = (\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})\mathbf{e} \quad (27)$$

根据线性系统稳定性理论，选择合适的矩阵  $\mathbf{K}$  使得矩阵  $(\mathbf{A} - \mathbf{B}\mathbf{K})$  的全部特征根实部均为负时，系统(27)稳定，即发送端和接收端同步。

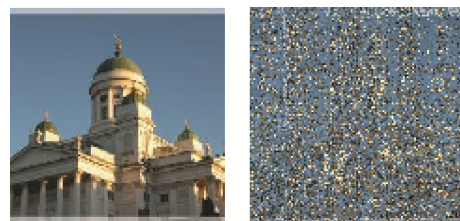
选择与系统(11)相同的  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$  模板，当并选取：

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5 \\ -3 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

式(27)的特征值为  $-22.0537$ ,  $-3.6181 \pm 1.2077i$ 。由于全部特征值实部均为负，可知系统(27)稳定，图 7 为忆阻 CNN 系统(23)的同步误差图，图中可以看出  $\mathbf{e} = \mathbf{X} - \hat{\mathbf{X}}$  经过短暂时间后都趋近于零，说明该忆阻 CNN 系统实现了同步。

$$\begin{aligned} m &= \text{mod}((i + k + \text{key}_1), H) + 1 \\ n &= \text{mod}(j + k + \text{key}_2), L) + 1 \end{aligned} \quad (28)$$

其中  $k$  为正整数，图 8 为原始图像 P 的置乱后的图像 P1。

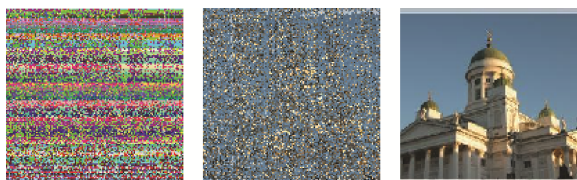


(a) 原始图像P (b) 置乱后图像P1

图 8 图像 P 的置乱图

(2)置乱图像还原过程：取置乱后图像 P1 的红、绿、蓝 3 个分量，分别与发送端系统的加密密钥

$key_1, key_2, key_3$  做异或运算得到加密图像, 与之同步的接收端对密文图像的像素值与解密密钥  $key_1, key_2, key_3$  进行反运算则可得到解密图像, 最后进行反置乱可还原图像 P。图 9 为加密与解密实验图。



(a) 加密后图像 (b) 解密后图像 (c) 逆置乱后图像

图 9 图像 P1 的加密与解密图

从图 8 可以看出, 置乱后的图像 P1 类似被碎纸机处理过, 和原图 P 对比完全不一样; 从图 9 可以看出, 对置乱图像 P1 进行加密后的图像呈现了各种颜色混杂, 解密后仍能得到图像 P1, 最后成功还原原始图像 P, 对说明本方案能对图像进行正确保密传输及恢复。

### 4.3 机密信号隐藏

利用 3.4 节设计的忆阻 CNN 系统能够将机密信号隐藏在复杂的混沌信号中。假设选取的机密信

号为  $s_1 = \sin(0.2t) + 2\cos(0.3t)$ , 采用公式(23)中  $x_2$  和  $x_3$  序列混合叠加成  $se = x_2 + x_3 \times s_1$ , 混合信号  $se$  通过不安全信道传送, 在接收端用正确的密钥抽取还原出原始信号  $s_2$ , 解密算法为  $s_2 = se/x_3 - x_2/x_3$ 。实验仿真如图 10 所示。

从图 10 可以看出, 信号  $s_1$  经忆阻 CNN 系统加密后, 信号  $se$  中完全看不出原始信号的形状, 也就是通过忆阻 CNN 序列可以将机密信息安全隐藏在随机的混沌信号中, 以达到安全传输的目的。

### 4.4 语音信号掩盖

对连续或离散信号的掩盖也可以应用在语音信号的传递中, 图 11 是选择一段复杂的音乐左声道作为机密信息, 对系统(23)产生的混沌信号从第  $10^3$  位开始进行截取与原始信号同等长度波形, 如图 11(b)所示, 用其混沌信号波形与原始语音波形进行叠加得到加密后的语音波形, 如图 11(c)所示, 最后通过正确解密后可还原原始语音波形, 如图 11(d)所示。用上述对信号混叠方法进行音频量的隐匿, 在信道中传递的数据流几乎被 CNN 混沌信号全部掩盖。

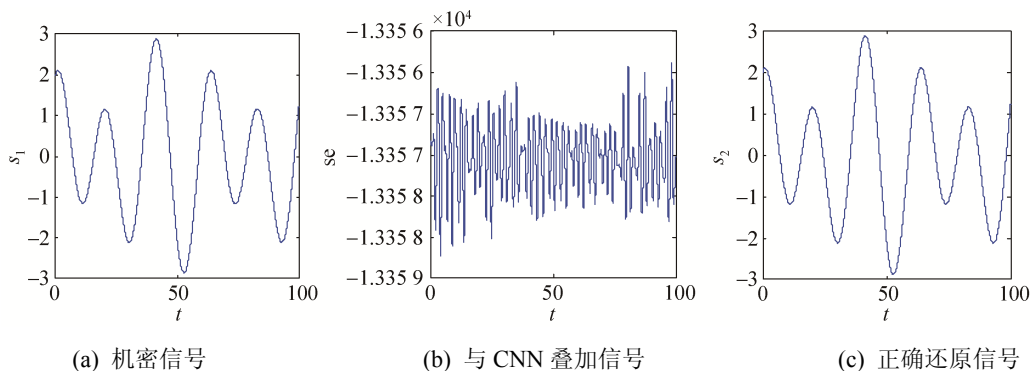


图 10 机密信号隐藏仿真图

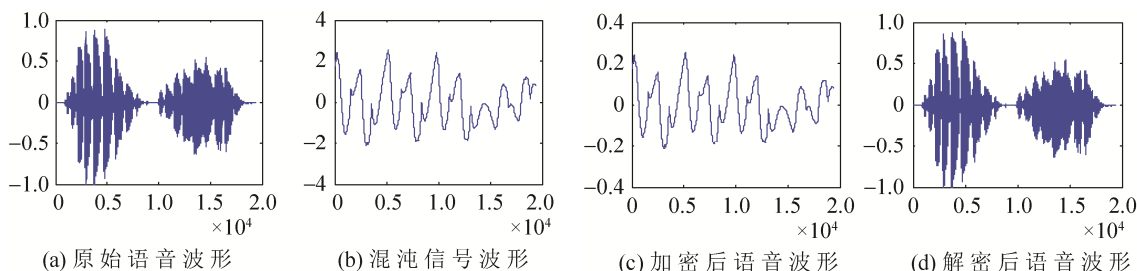


图 11 机密语音信号隐藏仿真图

## 4.5 安全性能分析

无论是对信号、音频还是图像进行信息隐藏或置乱,均使用了(23)式中的常量系数矩阵  $A$  和  $B$ ,本方案所采用的 9 个  $A$  矩阵参数和 9 个  $B$  矩阵参数均可作为双精度密钥使用,由于这 18 个数值都对  $10^{-15}$  高度敏感,因此对称密钥空间为  $10^{15 \times 18} > 2^{896}$ ,这样的密钥空间大小理论上是不可数的,因此本方案的密钥空间足以满足安全通信的需求。图 12 为采用未用混沌同步技术的混沌掩盖方案,取大小为  $M \times N$  的原始图像,如图 12(a)所示,对系统(23)产生的混沌信号  $x_i (i=1,2,3)$ ,分别截取从  $4.5 \times 10^4$  位开始长度为  $M \times N$  的序列  $k_i (i=1,2,3)$ ,将  $k_i$  分别与混沌 CNN 随机数相乘,与原始图像的红、绿、蓝 3 个分量进行叠加得到加密图像,如图 12(b)所示。图 12(c)和(d)分别是实验仿真参数  $b_{13}$  相差  $10^{-10}$  的图像解密和正确的解密图,可见此密钥空间在不依赖混沌同步的情况下也能有效地防止攻击者解密出原始图像,具有良好的攻击抵御性。



图 12 图像仿真结果图

## 5 结论

现有的忆阻 CNN 研究大多都是用忆阻模拟 CNN 中的权值电路,本文在传统的 CNN 电路基础上,采用忆阻器替换传统 CNN 中的输出函数模块,

设计了一种新的忆阻 CNN 电路,通过各个细胞状态控制忆阻器的内部磁通量变化,从而达到控制忆阻忆导值的变化,即细胞状态输出变化,再反馈到细胞的状态中。与传统 CNN 电路相比,改进的细胞单元电路不仅简化了输出模块电路,避免了电阻的一些限制条件,使其实现起来更简洁,普适的设计结果依然彰显出忆阻的非线性行为。通过对新设计的忆阻 CNN 系统进行同步通信系统控制、图像置乱加密处理、机密信号隐藏和语音信号掩盖等具体应用实验仿真,体现了本文提出的新方法具有良好的可行性和应用前景。

## 参考文献:

- [1] Chua L O. Memristor-The Missing Circuit Element [J]. IEEE Transaction on Circuit Theory (S0018-9324), 1971, 18(5): 507-519.
- [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart G R, et al. The missing memristor found [J]. Nature (S0028-0836), 2008, 453: 80-83.
- [3] Biolek Z, Biolek D, Biolkva V. SPICE model of memristor with nonlinear dopant drift [J]. Radio engineering (S0013-5194), 2009, 18(2): 210-214.
- [4] Wang X, Chen Y, Xi H, Dimitrov D. Spintronic memristor through spin-torque-induced magnetization motion [J]. IEEE Electron Device Letters (S0741-3106), 2009, 30(3): 294-297.
- [5] Peishin Y V, Ventra M D. Memory effects in complex materials and nanoscale systems [J]. Advances in Physics (S0001-8732), 2011, 60(2): 145-227.
- [6] 胡丰伟,包伯成,武花干,等. 荷控忆阻等效电路分析模型及其电路特性研究 [J]. 物理学报, 2013, 62(21): 218401.
- [7] 洪庆辉,曾以成,李志军. 含磁控和荷控两种忆阻器的混沌电路设计与仿真 [J]. 物理学报, 2013, 62(23): 230502.
- [8] Muthuswamy B, Kokate P P. Memristor Based Chaotic Circuits [J]. IETE Technical Review (S0256-4602), 2009, 26(6): 417-429.
- [9] Chua L O, Yang L. Cellular Neural Networks: theory [J]. IEEE Transactions on Circuits and systems (S1549-8328), 1988, 35(10): 1257-1272.
- [10] Chua L O, Yang L. Cellular Neural Networks: Application [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems (S1549-8328), 1988, 35(10): 1273-1290.

(下转第 1731 页)