

滞环细胞神经网络实现多涡卷混沌发生器

刘洪臣,冯 勇,李林静

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001)

摘 要:提出利用 2 个具有滞环输出的 CNN 细胞实现了多涡卷混沌发生器. 首先用标准 CNN 细胞的状态方程来表示多涡卷混沌发生器的状态方程,通过对比来确定 CNN 模板的参数,用运算放大器来实现 CNN 细胞的状态方程及不同形式的滞环输出方程,分别采用不同形式的滞环输出函数实现双涡卷和三涡卷混沌吸引子. 本系统由运算放大器、电阻及电容构成,易于实现集成. 最后,应用 Orcad Pspice 进行了电路仿真,验证了结论的正确性.

关键词:多涡卷;滞环函数;混沌发生器;细胞神经网络

中图分类号:TN75 文献标识码:A 文章编号:1673-4785(2007)03-0063-04

Multi-scroll chaos generator based on HCNN

LIU Hong-chen ,FENG Yong ,LI Lin-jing

(School of Electrical Engineering and Automation ,Harbin Institute of Technology ,Harbin 150001 ,China)

**Abstract :**A realization of multi-scroll chaos generation is presented using two CNN cells with hysteresis output function in the paper. First , the CNN template can be ascertained through expressing the unstable second-order linear continuous system with the state function of CNN ; Second , the state function of CNN and the hysteresis output function are realized with operational amplifier ; Finally , double scroll and three scroll chaos attractor are realized using different hysteresis functions. The proposed system uses only operational amplifiers , resistors and capacitors , so it 's easy to be integrated. The results ' validity is illustrated by the circuit simulation using Orcad Pspice.

**Key words :**multi-scroll ;hysteresis function ;chaos generator ;CNN

作为一种普遍存在的非线性现象,混沌的发现对科学的发展具有深远的影响.混沌行为是确定性因素导致的类似随机运动的行为,即一个可由确定性方程描述的非线性系统,其长期行为表现为明显的随机性和不可预测性.

细胞神经网络<sup>[1]</sup> (CNN) 是一种局域互连网络,具有结构简单、易于集成等优点,使其在混沌电路领域有着广泛的应用.细胞神经网络是非线性的动态系统,因此应用细胞神经网络可以构建混沌系统,这对研究混沌行为有着重要意义,并且为混沌电路的仿真分析提供了一条便捷的途径.

近几年来,滞环输出函数的 CNN 引起人们的广泛关注<sup>[2-4]</sup>,由于滞环函数是很常用的函数,在系统中引入滞环函数(或滞回比较器)可以提高系统的

可靠性,防止系统的误动作.本文利用 2 个滞环 CNN 细胞来实现多涡卷滞环混沌发生器,对实现的过程进行了分析并对电路的实现进行了阐述,最后,应用 Orcad Pspice 对本文的设计进行了电路仿真,验证了结论的正确性.

1 滞环混沌发生器

根据文献[1],无量纲滞环混沌发生器的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} - \\ - \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ h(x_1) \end{bmatrix}, \tag{1}$$

式中:  $h(x_1)$  为滞环函数:

$$h(x_1) = \begin{cases} 1 & x_1 > 1, \\ -1 & x_1 < -1, \\ \text{保持不变} & -1 < x_1 < 1. \end{cases} \tag{2}$$

在  $\alpha$  和  $\beta$  同为小于 1 的正数时有  $\omega = \sqrt{1 - \alpha^2 - \beta^2}$ . 在这种情况下,式(1)的特征值  $\lambda = \pm j\omega$  具有正实部(也

收稿日期:2006-12-05.  
基金项目:国家自然科学基金资助项目(60474016).

就是说系统不稳定). 在  $Q^+ = ( \quad, - )$  和  $Q^- = ( - , \quad)$  处有 2 个不稳定的平衡点.

式(2)中的滞环函数如图 1(a)所示. 当  $x_1$  达到左门限值时,  $h(x_1)$  跳变到 1; 而当  $x_1$  达到右门限值时,  $h(x_1)$  跳变到 -1. 对图 1(a)所示的滞环函数变形可得到图 1(b)所示的滞环函数, 其函数表达式如式(3); 将图 1(b)所示的滞环函数向第三象限进行拓展, 得到图 1(c)所示的滞环函数, 其函数表达式如式(4), 由于  $h_2(x_1)$  有 3 种不同取值, 因此系统有 3 个平衡点.

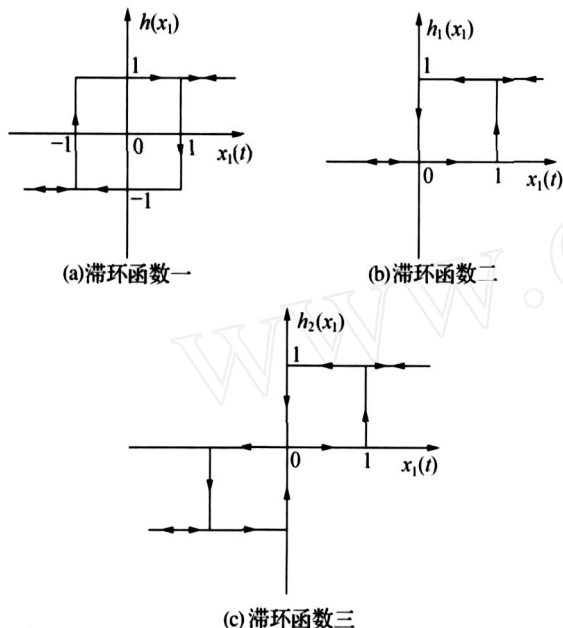


图 1 几种不同的形式的滞环函数

Fig. 1 The different kinds of hysteresis functions

$$h_1(x_1) = \begin{cases} 0, & x_1 \leq 0, \\ 1, & x_1 \geq 1, \\ \text{保持不变}, & 0 < x_1 < 1. \end{cases} \quad (3)$$

$$\text{定义: } h_{-1}(x_1) = \begin{cases} -1, & x_1 \leq -1, \\ 0, & x_1 \geq 1, \\ \text{保持不变}, & -1 < x_1 < 0. \end{cases}$$

则拓展后的滞环函数的表达式为

$$h_2(x_1) = h_1(x_1) + h_{-1}(x_1). \quad (4)$$

## 2 滞环细胞神经网络模型

标准 CNN 是由美国加州大学伯克莱分校的 L. O. Chua 和 L. Yang 于 1988 年在 HOPFIELD 网络的基础上发展的局部连接网络<sup>[5]</sup>. CNN 是一种非线性局域连接神经网络, 由许多细胞组成. 为了说明方便, 图 2 仅给出一个  $4 \times 4$  的二维细胞神经网络.

在一个  $M \times N$  的二维神经元排列空间内,  $C(i, j)$  ( $1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$ ) 表示第  $i$  行、第  $j$  列的神经元, 它只同周围  $r$  邻域范围内的神经元相连, 而不直接相连的细胞则通过连续动态的传播效应而互

相影响. 如果用  $Sr(i, j)$  表示  $C(i, j)$  神经元和临近其他神经元的集合, CNN 网络的连接关系可以用下面的式子表示:

$$Sr(i, j) = \left\{ C(k, l) \mid \max_{1 \leq k \leq M, 1 \leq l \leq N} \{ |k - i|, |l - j| \} \leq r \right\}. \quad (5)$$

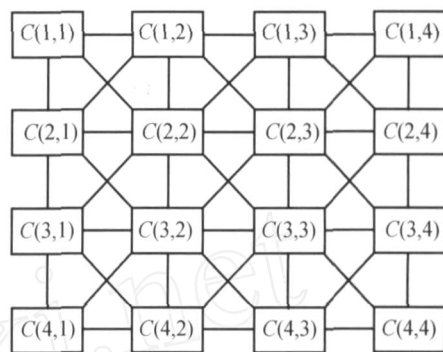


图 2  $4 \times 4$  的二维细胞神经网络的基本结构

Fig. 2 The  $4 \times 4$  two dimensional CNN

细胞神经网络的通用无量纲非线性状态方程为

$$\dot{x}_i = -x_i + \sum_{k=1}^n a_{ik} y_k + \sum_{k=1}^n s_{ik} x_k + v_i. \quad (6)$$

式中:  $n$  为邻域细胞数,  $x_i$  为状态变量,  $y_i$  为细胞的输出, 标准 CNN 细胞的输出函数为分段线性函数, 本文取输出函数为式(2) ~ (4) 中的任一种滞环函数,  $a_{ik}$  和  $s_{ik}$  是常数,  $v_i$  为门限值. 在 2 个 CNN 细胞全连接的情况下, 动力学模型被描述为如下方程:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + a_{11} y_1 + a_{12} y_2 + s_{11} x_1 + s_{12} x_2 + v_1, \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + a_{21} y_1 + a_{22} y_2 + s_{21} x_1 + s_{22} x_2 + v_2. \end{aligned} \quad (7)$$

式中:  $x_1$  和  $x_2$  为状态变量,  $y_1$  和  $y_2$  为相应的输出. 为了应用于滞环混沌发生器, 系统(6)中的下列参数  $a_{ik}$ 、 $s_{ik}$  必须适当选取, 以得到式(1)所描述的动力学行为. 比较式(1)和式(7)中各项系数, 并去掉无关项得到式(8):

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= (s_{11} - 1) x_1 + s_{12} x_2, \\ \dot{x}_2 &= s_{21} x_1 + (s_{22} - 1) x_2 + a_{21} y_1. \end{aligned} \quad (8)$$

式(6)和式(7)中各项系数为

$$\begin{aligned} v_1 &= v_2 = 0; a_{12} = a_{22} = a_{11} = 0; a_{21} = 1, \\ s_{11} &= s_{22} = +1; s_{12} = s_{21} = -1; y_1 = h(x_1). \end{aligned}$$

这样, 就用 CNN 的通用无量纲状态方程表示了滞环混沌发生器的状态方程, 式(8)就是滞环混沌发生器 CNN 实现的状态方程模型.

## 3 滞环细胞神经网络细胞模型的设计

### 3.1 CNN 细胞状态模型运算放大器的设计

上节中已经建立 CNN 的无量纲方程式(6), 要用运算放大器来实现它, 必须把它变换到时间域内.

令  $= t/ R_b C_i$  ,则有

$$C_i = \frac{dx_1}{dt} = - \frac{x_i}{R_b} + \frac{1}{R_b} \left[ \sum_{k=1}^n a_{ik} y_k(t) + \sum_{k=1}^n S_{ik} x_k(t) + v_i \right], \tag{9}$$

令  $z = \sum_{k=1}^n a_{ik} y_k(t) + \sum_{k=1}^n S_{ik} x_k(t) + v_i$  ,则式 (9) 可以简化为

$$C_i \frac{dx_1}{dt} = - \frac{x_i}{R_b} + \frac{1}{R_b} z. \tag{10}$$

式 (10) 可以用运算放大器电路实现<sup>[1,3-4]</sup> ,图 3 为式 (7) 所示的状态方程. 细胞 1 和细胞 2 的第 1 级运放 (U1A 和 U1D) 为反相求和器,实现的是将

$$- \frac{x_i}{R_b} + \frac{1}{R_b} \left[ \sum_{k=1}^n a_{ik} y_k(t) + \sum_{k=1}^n S_{ik} x_k(t) + v_i \right]$$

反相求和,也就是式 (10) 中的等号右边,由此可以根据各自的放大倍数来确定 U1A 和 U1D 周边的电阻值,可以证明: $S_{11} - 1 = \frac{R_3}{R_1} S_{12} = \frac{R_3}{R_2} S_{21} = \frac{R_{10}}{R_7}$ .

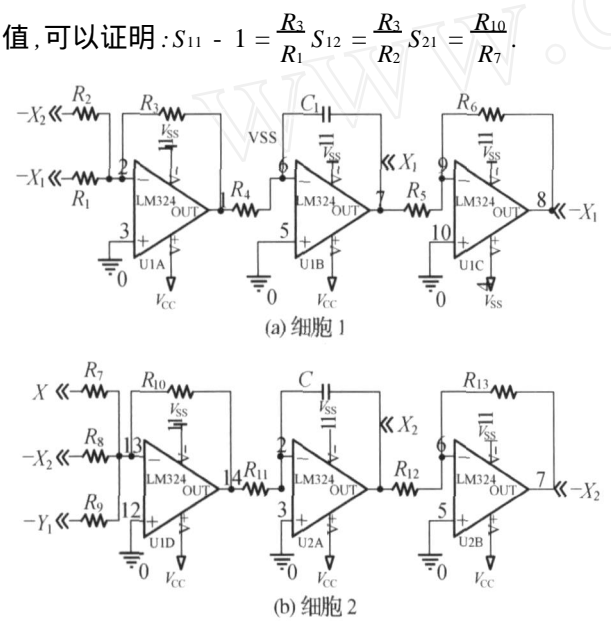


图 3 CNN 细胞状态单元的电路实现

Fig. 3 The circuit implementation for the considered CNN cell

$$S_{22} - 1 = \frac{R_{10}}{R_8} a_{11} = \frac{R_{10}}{R_9}. \tag{11}$$

U1A 和 U1D 的输出  $z$  送入第 2 级运放 (U1B 和 U2A),电阻  $R_4$  和电容  $C_1$  及电阻  $R_{11}$  和电容  $C_2$  构成的积分电路对  $z$  进行积分便得到细胞 1 和细胞 2 的状态  $x_1$  和状态  $x_2$ . 根据 U1B 和 U2A 的输入端列节点电流方程有

$$C_i \frac{dx_i}{dt} + \frac{(x_i - z)}{R_b} = 0. \tag{12}$$

该方程式与式 (10) 等价,由此可知该运算放大器模型第 1 级和第 2 级运放实现了 CNN 细胞的状态方程. 电阻  $R_5$ 、 $R_6$  和运放 U1C 及电阻  $R_{12}$ 、 $R_{13}$  和运放 U2B 构成反相器,用以得到  $-x_1$  和  $-x_2$ ,于是可得  $R_5 = R_6$ 、 $R_{12} = R_{13}$ . 利用上述关系即可确定电

路各参数的选取.

3.2 CNN 滞环输出模型运算放大器的设计

图 4 所示为细胞输出电路,图 4 (a) 和 (b) 的输入 - 输出特性是图 1 (a) 和 (c) 的滞环函数. 对于图 4 (a),运算放大器 U2B 及其周边电阻构成滞环比较器,运算放大器 U2C 构成比例放大器,调节  $R_{18}$  可将滞环比较器输出调整到所需的范围,而 2D 构成反相器,因此  $R_{19} = R_{20}$ .

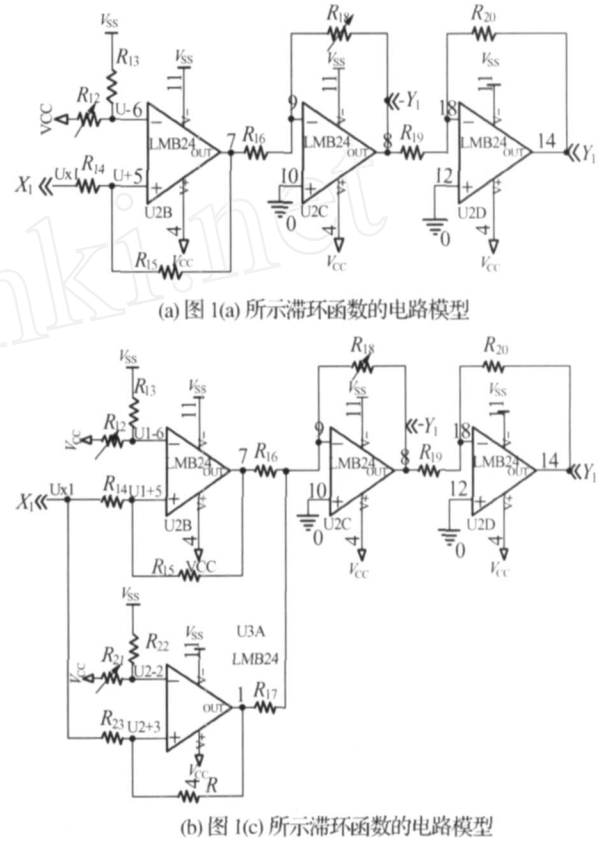


图 4 滞环函数的电路模型

Fig. 4 The circuit implementation of hysteresis function

由于运放 U2B 工作在正反馈状态,因此输出只有  $\pm 15\text{ V}$  2 种状态. 当输出为  $+15\text{ V}$  时,根据叠加定理 (用  $U_+$  和  $U_-$  表示运算放大器的同相和反相输入电压,  $U_{x1}$  表示信号  $x_1$  输入端的电压):

$$U_+ = R_{14} \times U_{out} / (R_{14} + R_{15}) + U_{x1} \times R_{15} / (R_{14} + R_{15})$$

调节  $R_{12}$  使  $U_- = k(-15\text{ V} \leq k \leq 15\text{ V})$ , 因此当  $U_+ = U_- = k$  时输出跳变到  $-15\text{ V}$ , 于是得到  $U_{x1} = \frac{(k - 15) \times R_{14} + k \times R_{15}}{R_{15}}$  时跳变. 同理, 当输出为  $-15\text{ V}$  时, 输入临界跳变电压  $U_{x1} = \frac{(k + 15) \times R_{14} + k \times R_{15}}{R_{15}}$ . 要实现图 1 (a) 所示的滞环函数, 即临界跳变点为  $\pm 1$ , 令  $U_{x1} = -1, U_{x1} = 1$  得  $k = 0$  且  $R_{15} / R_{14} = 15 / 1$ .

对于图 4 (b), 用  $U_{1+}$ 、 $U_{1-}$  分别表示 U2B 的同相及反相输入电压, 用  $U_{2+}$ 、 $U_{2-}$  表示 U3A 的同相及反相输入电压, 用  $U_{3+}$ 、 $U_{3-}$  表示 U3B 的同相及反相输入电压, 用  $U_{4+}$ 、 $U_{4-}$  表示 U3C 的同相及反相输入电压, 用  $U_{5+}$ 、 $U_{5-}$  表示 U3D 的同相及反相输入电压, 用  $U_{6+}$ 、 $U_{6-}$  表示 U3E 的同相及反相输入电压, 用  $U_{7+}$ 、 $U_{7-}$  表示 U3F 的同相及反相输入电压, 用  $U_{8+}$ 、 $U_{8-}$  表示 U3G 的同相及反相输入电压, 用  $U_{9+}$ 、 $U_{9-}$  表示 U3H 的同相及反相输入电压, 用  $U_{10+}$ 、 $U_{10-}$  表示 U3I 的同相及反相输入电压, 用  $U_{11+}$ 、 $U_{11-}$  表示 U3J 的同相及反相输入电压, 用  $U_{12+}$ 、 $U_{12-}$  表示 U3K 的同相及反相输入电压, 用  $U_{13+}$ 、 $U_{13-}$  表示 U3L 的同相及反相输入电压, 用  $U_{14+}$ 、 $U_{14-}$  表示 U3M 的同相及反相输入电压, 用  $U_{15+}$ 、 $U_{15-}$  表示 U3N 的同相及反相输入电压, 用  $U_{16+}$ 、 $U_{16-}$  表示 U3O 的同相及反相输入电压, 用  $U_{17+}$ 、 $U_{17-}$  表示 U3P 的同相及反相输入电压, 用  $U_{18+}$ 、 $U_{18-}$  表示 U3Q 的同相及反相输入电压, 用  $U_{19+}$ 、 $U_{19-}$  表示 U3R 的同相及反相输入电压, 用  $U_{20+}$ 、 $U_{20-}$  表示 U3S 的同相及反相输入电压, 用  $U_{21+}$ 、 $U_{21-}$  表示 U3T 的同相及反相输入电压, 用  $U_{22+}$ 、 $U_{22-}$  表示 U3U 的同相及反相输入电压, 用  $U_{23+}$ 、 $U_{23-}$  表示 U3V 的同相及反相输入电压, 用  $U_{24+}$ 、 $U_{24-}$  表示 U3W 的同相及反相输入电压, 用  $U_{25+}$ 、 $U_{25-}$  表示 U3X 的同相及反相输入电压, 用  $U_{26+}$ 、 $U_{26-}$  表示 U3Y 的同相及反相输入电压, 用  $U_{27+}$ 、 $U_{27-}$  表示 U3Z 的同相及反相输入电压, 用  $U_{28+}$ 、 $U_{28-}$  表示 U3AA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{29+}$ 、 $U_{29-}$  表示 U3AB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{30+}$ 、 $U_{30-}$  表示 U3AC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{31+}$ 、 $U_{31-}$  表示 U3AD 的同相及反相输入电压, 用  $U_{32+}$ 、 $U_{32-}$  表示 U3AE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{33+}$ 、 $U_{33-}$  表示 U3AF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{34+}$ 、 $U_{34-}$  表示 U3AG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{35+}$ 、 $U_{35-}$  表示 U3AH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{36+}$ 、 $U_{36-}$  表示 U3AI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{37+}$ 、 $U_{37-}$  表示 U3AJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{38+}$ 、 $U_{38-}$  表示 U3AK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{39+}$ 、 $U_{39-}$  表示 U3AL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{40+}$ 、 $U_{40-}$  表示 U3AM 的同相及反相输入电压, 用  $U_{41+}$ 、 $U_{41-}$  表示 U3AN 的同相及反相输入电压, 用  $U_{42+}$ 、 $U_{42-}$  表示 U3AO 的同相及反相输入电压, 用  $U_{43+}$ 、 $U_{43-}$  表示 U3AP 的同相及反相输入电压, 用  $U_{44+}$ 、 $U_{44-}$  表示 U3AQ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{45+}$ 、 $U_{45-}$  表示 U3AR 的同相及反相输入电压, 用  $U_{46+}$ 、 $U_{46-}$  表示 U3AS 的同相及反相输入电压, 用  $U_{47+}$ 、 $U_{47-}$  表示 U3AT 的同相及反相输入电压, 用  $U_{48+}$ 、 $U_{48-}$  表示 U3AU 的同相及反相输入电压, 用  $U_{49+}$ 、 $U_{49-}$  表示 U3AV 的同相及反相输入电压, 用  $U_{50+}$ 、 $U_{50-}$  表示 U3AW 的同相及反相输入电压, 用  $U_{51+}$ 、 $U_{51-}$  表示 U3AX 的同相及反相输入电压, 用  $U_{52+}$ 、 $U_{52-}$  表示 U3AY 的同相及反相输入电压, 用  $U_{53+}$ 、 $U_{53-}$  表示 U3AZ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{54+}$ 、 $U_{54-}$  表示 U3BA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{55+}$ 、 $U_{55-}$  表示 U3BB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{56+}$ 、 $U_{56-}$  表示 U3BC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{57+}$ 、 $U_{57-}$  表示 U3BD 的同相及反相输入电压, 用  $U_{58+}$ 、 $U_{58-}$  表示 U3BE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{59+}$ 、 $U_{59-}$  表示 U3BF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{60+}$ 、 $U_{60-}$  表示 U3BG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{61+}$ 、 $U_{61-}$  表示 U3BH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{62+}$ 、 $U_{62-}$  表示 U3BI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{63+}$ 、 $U_{63-}$  表示 U3BJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{64+}$ 、 $U_{64-}$  表示 U3BK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{65+}$ 、 $U_{65-}$  表示 U3BL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{66+}$ 、 $U_{66-}$  表示 U3BM 的同相及反相输入电压, 用  $U_{67+}$ 、 $U_{67-}$  表示 U3BN 的同相及反相输入电压, 用  $U_{68+}$ 、 $U_{68-}$  表示 U3BO 的同相及反相输入电压, 用  $U_{69+}$ 、 $U_{69-}$  表示 U3BP 的同相及反相输入电压, 用  $U_{70+}$ 、 $U_{70-}$  表示 U3BQ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{71+}$ 、 $U_{71-}$  表示 U3BR 的同相及反相输入电压, 用  $U_{72+}$ 、 $U_{72-}$  表示 U3BS 的同相及反相输入电压, 用  $U_{73+}$ 、 $U_{73-}$  表示 U3BT 的同相及反相输入电压, 用  $U_{74+}$ 、 $U_{74-}$  表示 U3BU 的同相及反相输入电压, 用  $U_{75+}$ 、 $U_{75-}$  表示 U3BV 的同相及反相输入电压, 用  $U_{76+}$ 、 $U_{76-}$  表示 U3BW 的同相及反相输入电压, 用  $U_{77+}$ 、 $U_{77-}$  表示 U3BX 的同相及反相输入电压, 用  $U_{78+}$ 、 $U_{78-}$  表示 U3BY 的同相及反相输入电压, 用  $U_{79+}$ 、 $U_{79-}$  表示 U3BZ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{80+}$ 、 $U_{80-}$  表示 U3CA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{81+}$ 、 $U_{81-}$  表示 U3CB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{82+}$ 、 $U_{82-}$  表示 U3CC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{83+}$ 、 $U_{83-}$  表示 U3CD 的同相及反相输入电压, 用  $U_{84+}$ 、 $U_{84-}$  表示 U3CE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{85+}$ 、 $U_{85-}$  表示 U3CF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{86+}$ 、 $U_{86-}$  表示 U3CG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{87+}$ 、 $U_{87-}$  表示 U3CH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{88+}$ 、 $U_{88-}$  表示 U3CI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{89+}$ 、 $U_{89-}$  表示 U3CJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{90+}$ 、 $U_{90-}$  表示 U3CK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{91+}$ 、 $U_{91-}$  表示 U3CL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{92+}$ 、 $U_{92-}$  表示 U3CM 的同相及反相输入电压, 用  $U_{93+}$ 、 $U_{93-}$  表示 U3CN 的同相及反相输入电压, 用  $U_{94+}$ 、 $U_{94-}$  表示 U3CO 的同相及反相输入电压, 用  $U_{95+}$ 、 $U_{95-}$  表示 U3CP 的同相及反相输入电压, 用  $U_{96+}$ 、 $U_{96-}$  表示 U3CQ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{97+}$ 、 $U_{97-}$  表示 U3CR 的同相及反相输入电压, 用  $U_{98+}$ 、 $U_{98-}$  表示 U3CS 的同相及反相输入电压, 用  $U_{99+}$ 、 $U_{99-}$  表示 U3CT 的同相及反相输入电压, 用  $U_{100+}$ 、 $U_{100-}$  表示 U3CU 的同相及反相输入电压, 用  $U_{101+}$ 、 $U_{101-}$  表示 U3CV 的同相及反相输入电压, 用  $U_{102+}$ 、 $U_{102-}$  表示 U3CW 的同相及反相输入电压, 用  $U_{103+}$ 、 $U_{103-}$  表示 U3CX 的同相及反相输入电压, 用  $U_{104+}$ 、 $U_{104-}$  表示 U3CY 的同相及反相输入电压, 用  $U_{105+}$ 、 $U_{105-}$  表示 U3CZ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{106+}$ 、 $U_{106-}$  表示 U3DA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{107+}$ 、 $U_{107-}$  表示 U3DB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{108+}$ 、 $U_{108-}$  表示 U3DC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{109+}$ 、 $U_{109-}$  表示 U3DD 的同相及反相输入电压, 用  $U_{110+}$ 、 $U_{110-}$  表示 U3DE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{111+}$ 、 $U_{111-}$  表示 U3DF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{112+}$ 、 $U_{112-}$  表示 U3DG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{113+}$ 、 $U_{113-}$  表示 U3DH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{114+}$ 、 $U_{114-}$  表示 U3DI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{115+}$ 、 $U_{115-}$  表示 U3DJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{116+}$ 、 $U_{116-}$  表示 U3DK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{117+}$ 、 $U_{117-}$  表示 U3DL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{118+}$ 、 $U_{118-}$  表示 U3DM 的同相及反相输入电压, 用  $U_{119+}$ 、 $U_{119-}$  表示 U3DN 的同相及反相输入电压, 用  $U_{120+}$ 、 $U_{120-}$  表示 U3DO 的同相及反相输入电压, 用  $U_{121+}$ 、 $U_{121-}$  表示 U3DP 的同相及反相输入电压, 用  $U_{122+}$ 、 $U_{122-}$  表示 U3DQ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{123+}$ 、 $U_{123-}$  表示 U3DR 的同相及反相输入电压, 用  $U_{124+}$ 、 $U_{124-}$  表示 U3DS 的同相及反相输入电压, 用  $U_{125+}$ 、 $U_{125-}$  表示 U3DT 的同相及反相输入电压, 用  $U_{126+}$ 、 $U_{126-}$  表示 U3DU 的同相及反相输入电压, 用  $U_{127+}$ 、 $U_{127-}$  表示 U3DV 的同相及反相输入电压, 用  $U_{128+}$ 、 $U_{128-}$  表示 U3DW 的同相及反相输入电压, 用  $U_{129+}$ 、 $U_{129-}$  表示 U3DX 的同相及反相输入电压, 用  $U_{130+}$ 、 $U_{130-}$  表示 U3DY 的同相及反相输入电压, 用  $U_{131+}$ 、 $U_{131-}$  表示 U3DZ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{132+}$ 、 $U_{132-}$  表示 U3EA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{133+}$ 、 $U_{133-}$  表示 U3EB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{134+}$ 、 $U_{134-}$  表示 U3EC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{135+}$ 、 $U_{135-}$  表示 U3ED 的同相及反相输入电压, 用  $U_{136+}$ 、 $U_{136-}$  表示 U3EE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{137+}$ 、 $U_{137-}$  表示 U3EF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{138+}$ 、 $U_{138-}$  表示 U3EG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{139+}$ 、 $U_{139-}$  表示 U3EH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{140+}$ 、 $U_{140-}$  表示 U3EI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{141+}$ 、 $U_{141-}$  表示 U3EJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{142+}$ 、 $U_{142-}$  表示 U3EK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{143+}$ 、 $U_{143-}$  表示 U3EL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{144+}$ 、 $U_{144-}$  表示 U3EM 的同相及反相输入电压, 用  $U_{145+}$ 、 $U_{145-}$  表示 U3EN 的同相及反相输入电压, 用  $U_{146+}$ 、 $U_{146-}$  表示 U3EO 的同相及反相输入电压, 用  $U_{147+}$ 、 $U_{147-}$  表示 U3EP 的同相及反相输入电压, 用  $U_{148+}$ 、 $U_{148-}$  表示 U3EQ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{149+}$ 、 $U_{149-}$  表示 U3ER 的同相及反相输入电压, 用  $U_{150+}$ 、 $U_{150-}$  表示 U3ES 的同相及反相输入电压, 用  $U_{151+}$ 、 $U_{151-}$  表示 U3ET 的同相及反相输入电压, 用  $U_{152+}$ 、 $U_{152-}$  表示 U3EU 的同相及反相输入电压, 用  $U_{153+}$ 、 $U_{153-}$  表示 U3EV 的同相及反相输入电压, 用  $U_{154+}$ 、 $U_{154-}$  表示 U3EW 的同相及反相输入电压, 用  $U_{155+}$ 、 $U_{155-}$  表示 U3EX 的同相及反相输入电压, 用  $U_{156+}$ 、 $U_{156-}$  表示 U3EY 的同相及反相输入电压, 用  $U_{157+}$ 、 $U_{157-}$  表示 U3EZ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{158+}$ 、 $U_{158-}$  表示 U3FA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{159+}$ 、 $U_{159-}$  表示 U3FB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{160+}$ 、 $U_{160-}$  表示 U3FC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{161+}$ 、 $U_{161-}$  表示 U3FD 的同相及反相输入电压, 用  $U_{162+}$ 、 $U_{162-}$  表示 U3FE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{163+}$ 、 $U_{163-}$  表示 U3FF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{164+}$ 、 $U_{164-}$  表示 U3FG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{165+}$ 、 $U_{165-}$  表示 U3FH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{166+}$ 、 $U_{166-}$  表示 U3FI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{167+}$ 、 $U_{167-}$  表示 U3FJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{168+}$ 、 $U_{168-}$  表示 U3FK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{169+}$ 、 $U_{169-}$  表示 U3FL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{170+}$ 、 $U_{170-}$  表示 U3FM 的同相及反相输入电压, 用  $U_{171+}$ 、 $U_{171-}$  表示 U3FN 的同相及反相输入电压, 用  $U_{172+}$ 、 $U_{172-}$  表示 U3FO 的同相及反相输入电压, 用  $U_{173+}$ 、 $U_{173-}$  表示 U3FP 的同相及反相输入电压, 用  $U_{174+}$ 、 $U_{174-}$  表示 U3FQ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{175+}$ 、 $U_{175-}$  表示 U3FR 的同相及反相输入电压, 用  $U_{176+}$ 、 $U_{176-}$  表示 U3FS 的同相及反相输入电压, 用  $U_{177+}$ 、 $U_{177-}$  表示 U3FT 的同相及反相输入电压, 用  $U_{178+}$ 、 $U_{178-}$  表示 U3FU 的同相及反相输入电压, 用  $U_{179+}$ 、 $U_{179-}$  表示 U3FV 的同相及反相输入电压, 用  $U_{180+}$ 、 $U_{180-}$  表示 U3FW 的同相及反相输入电压, 用  $U_{181+}$ 、 $U_{181-}$  表示 U3FX 的同相及反相输入电压, 用  $U_{182+}$ 、 $U_{182-}$  表示 U3FY 的同相及反相输入电压, 用  $U_{183+}$ 、 $U_{183-}$  表示 U3FZ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{184+}$ 、 $U_{184-}$  表示 U3GA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{185+}$ 、 $U_{185-}$  表示 U3GB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{186+}$ 、 $U_{186-}$  表示 U3GC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{187+}$ 、 $U_{187-}$  表示 U3GD 的同相及反相输入电压, 用  $U_{188+}$ 、 $U_{188-}$  表示 U3GE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{189+}$ 、 $U_{189-}$  表示 U3GF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{190+}$ 、 $U_{190-}$  表示 U3GG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{191+}$ 、 $U_{191-}$  表示 U3GH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{192+}$ 、 $U_{192-}$  表示 U3GI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{193+}$ 、 $U_{193-}$  表示 U3GJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{194+}$ 、 $U_{194-}$  表示 U3GK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{195+}$ 、 $U_{195-}$  表示 U3GL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{196+}$ 、 $U_{196-}$  表示 U3GM 的同相及反相输入电压, 用  $U_{197+}$ 、 $U_{197-}$  表示 U3GN 的同相及反相输入电压, 用  $U_{198+}$ 、 $U_{198-}$  表示 U3GO 的同相及反相输入电压, 用  $U_{199+}$ 、 $U_{199-}$  表示 U3GP 的同相及反相输入电压, 用  $U_{200+}$ 、 $U_{200-}$  表示 U3GQ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{201+}$ 、 $U_{201-}$  表示 U3GR 的同相及反相输入电压, 用  $U_{202+}$ 、 $U_{202-}$  表示 U3GS 的同相及反相输入电压, 用  $U_{203+}$ 、 $U_{203-}$  表示 U3GT 的同相及反相输入电压, 用  $U_{204+}$ 、 $U_{204-}$  表示 U3GU 的同相及反相输入电压, 用  $U_{205+}$ 、 $U_{205-}$  表示 U3GV 的同相及反相输入电压, 用  $U_{206+}$ 、 $U_{206-}$  表示 U3GW 的同相及反相输入电压, 用  $U_{207+}$ 、 $U_{207-}$  表示 U3GX 的同相及反相输入电压, 用  $U_{208+}$ 、 $U_{208-}$  表示 U3GY 的同相及反相输入电压, 用  $U_{209+}$ 、 $U_{209-}$  表示 U3GZ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{210+}$ 、 $U_{210-}$  表示 U3HA 的同相及反相输入电压, 用  $U_{211+}$ 、 $U_{211-}$  表示 U3HB 的同相及反相输入电压, 用  $U_{212+}$ 、 $U_{212-}$  表示 U3HC 的同相及反相输入电压, 用  $U_{213+}$ 、 $U_{213-}$  表示 U3HD 的同相及反相输入电压, 用  $U_{214+}$ 、 $U_{214-}$  表示 U3HE 的同相及反相输入电压, 用  $U_{215+}$ 、 $U_{215-}$  表示 U3HF 的同相及反相输入电压, 用  $U_{216+}$ 、 $U_{216-}$  表示 U3HG 的同相及反相输入电压, 用  $U_{217+}$ 、 $U_{217-}$  表示 U3HH 的同相及反相输入电压, 用  $U_{218+}$ 、 $U_{218-}$  表示 U3HI 的同相及反相输入电压, 用  $U_{219+}$ 、 $U_{219-}$  表示 U3HJ 的同相及反相输入电压, 用  $U_{220+}$ 、 $U_{220-}$  表示 U3HK 的同相及反相输入电压, 用  $U_{221+}$ 、 $U_{221-}$  表示 U3HL 的同相及反相输入电压, 用  $U_{222+}$ 、 $U_{222$

及反相输入电压. 调节电阻  $R_{12}$  使  $U_{1-} = k$ , 调节电阻  $R_{21}$  使  $U_{2-} = -k$ . 跳变点的分析与上面双涡卷电路相同,  $U_{2B}$  的临界跳变点为  $U_{x1} = 0, U_{x1} = 1$ , 而  $U_{3A}$  的临界跳变点为  $U_{x1} = -1, U_{x1} = 0$  得  $k = 15/31$  且  $\frac{R_{15}}{R_{14}} = \frac{30}{1}, \frac{R_{24}}{R_{23}} = \frac{30}{1}$ . 临界跳变电压为 0 和  $\pm 1$  V.

4 仿真分析

本文以图 1(a)、(c) 所示的滞环函数作为 CNN 的输出函数, 应用 Orcad Pspice 对其进行电路仿真分析, 仿真结果如图 5 所示.

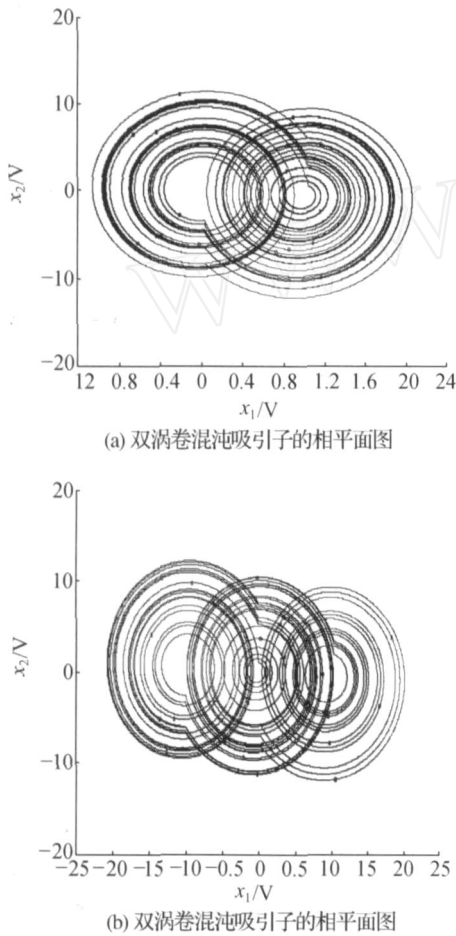


图 5 混沌吸引子的相平面图  
Fig. 5 The chaotic attractor

选择参数  $\alpha = 0.05$ , 初始条件为  $x_1(0) = 0.5, x_2(0) = 0$ . 根据给定的  $\alpha = 0.05$  计算,  $\beta = \sqrt{1 - \alpha^2} = 0.9987$ , 于是电路的状态方程为

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_1 + 1.05x_1 + 0.9987x_2, \\ \dot{x}_2 &= -x_2 + y_1 - 0.9987x_1 + 1.05x_2. \end{aligned} \tag{13}$$

于是有  $s_{11} = s_{22} = 1.05, s_{12} = 0.9987, s_{21} = -0.9987, a_{11} = a_{12} = a_{22} = 0, a_{21} = 1$  各电阻、电容的参数如下:

细胞 1:  $R_1 = 1\,000k, R_2 = 50.07k, R_3 = 50k,$   
 $R_4 = 100k, R_5 = R_6 = 10k, C_1 = 10\,\mu F,$   
细胞 2:  $R_7 = 50.07k, R_8 = 1\,000k, R_9 = R_{10} = 50k,$   
 $R_{11} = 100k, C_2 = 10\,\mu F,$   
图 4(a):  $R_{12} = R_{13} = 10k, R_{14} = 1k, R_{15} = 30k,$   
 $R_{16} = 150k, R_{18} = R_{19} = R_{20} = 10k,$   
图 4(b):  $R_{13} = R_{22} = 10k, R_{14} = R_{23} = 1k, R_{15} = R_{24} = 30k,$   
 $R_{16} = R_{17} = 150k, R_{18} = R_{19} = R_{20} = 10k$

5 结束语

对 CNN 细胞间的动力学行为的研究及用简单的电路实现各种动力学行为(包括混沌行为)受到了人们的广泛关注. 本文应用 2 个具有滞环输出函数的 CNN 细胞实现了多涡卷混沌发生器, 建立了 CNN 细胞的状态方程及滞环输出函数的运放模型, 并实现了双涡卷和三涡卷混沌吸引子. 该系统是由电阻、电容及运算放大器构成, 因此, 本文的方案易于实现集成化. 仿真结果表明本文的方案是可行的.

参考文献:

[1] ARENA P, BAGLIO S, FORTUNA L, et al. Chua's circuit can be generated by CNN cells[J]. IEEE Trans on CAS-I, 1995, 42(2): 123 - 125.  
[2] SHINJI N, TOSHIMICHI S. An RC OTA hysteresis chaos generator[J]. IEEE Trans on CAS-I, 1996, 43(12): 1019 - 1021.  
[3] AISSI C, SHAMS A. A CNN implementation of a hysteresis chaos generator[A]. IEEE ISCAS '99[C]. Orlando, USA, 1999.  
[4] ARENA P, BAGLIO S, FORTUNA L, et al. Hyperchaos from cellular neural networks[J]. Electronics Letters, 1995, 31(4): 250 - 251.  
[5] CHUA L O, YANG L. Cellular neural networks: theory[J]. IEEE Trans on CAS-I, 1988, 35(10): 1257 - 1272.  
[6] CHUA L O, YANG L. Cellular neural networks: applications[J]. IEEE Trans on CAS-I, 1988, 35(10): 1273 - 1290.

作者简介:



刘洪臣, 男, 1977 年生, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为细胞神经网络、非线性电路、图像处理等.  
E-mail: fenmiao@hit.edu.cn.