

忆阻器和量子元胞自动机纳电子超混沌系统的 函数投影同步研究

仇睿煌, 蔡理[✉], 冯朝文, 杨晓阔

(空军工程大学基础部, 西安, 710051)

摘要 研究了忆阻超混沌系统与量子细胞神经网络的函数投影同步问题。通过对 2 个超混沌系统的理论分析, 设计了同步控制器, 实现了异结构超混沌系统的函数投影同步, 并运用 Lyapunov 原理进行了稳定性证明。同时, 进一步理论推导了量子细胞神经网络中不确定参数的系数向量线性无关性, 实现了对不确定参数的估计。仿真结果表明 2 个超混沌系统的函数投影同步取得了良好的效果, 系统的不确定参数也逐渐回归到理想值。文中的研究结果为纳电子混沌系统在保密通信中的应用提供了一定的理论指导。

关键词 忆阻器; 量子元胞自动机; 超混沌系统; 函数投影同步

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2018.04.017

中图分类号 TN4 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2018)04-0099-06

Research on Function Projective Synchronization of Memristor and Quantum Cell Nano Electronic Hyperchaotic System

QIU Ruihuang, CAI Li[✉], FENG Chaowen, YANG Xiaokuo

(Department of Basic Sciences, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: This paper designs a synchronous controller to realize the function projective synchronization of the different structures, and applies the Lyapunov principle to the stability of the system. Simultaneously, the linearity independence of the coefficient vector of the uncertain parameters in the QCNN system is deduced, and the estimation of the uncertain parameters is realized. Both theoretical and simulated results demonstrate that the function projective synchronization of the two different structures hyper-chaotic systems are scientific rationality. Also the uncertain parameters return to the ideal values gradually. The research results provide theoretical guidance for the application of nano-electronic chaotic system in secure communication and image encryption.

Key words: Memristor; quantum-dot Cellular automata (QCA); hyper-chaotic system; function projective synchronization

纳电子学是纳米科学领域的一个重要分支, 而新兴的纳电子器件更是纳电子学的核心组成。根据

收稿日期: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(61401498); 陕西省自然科学基金(2014JQ8343)

作者简介: 仇睿煌(1993—), 男, 山西运城人, 硕士生, 主要从事忆阻器非线性特性研究. E-mail: Reily0518@163.com

通信作者: 蔡理(1959—), 女, 福建永春人, 教授, 博士生导师, 主要从事纳电子器件研究. E-mail: qianglicai@163.com

引用格式: 仇睿煌, 蔡理, 冯朝文, 等. 忆阻器和量子元胞自动机纳电子超混沌系统的函数投影同步研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2018, 19(4): 99-104. QIU Ruihuang, CAI Li, FENG Chaowen, et al. Research on Function Projective Synchronization of Memristor and Quantum Cell Nano Electronic Hyperchaotic System[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2018, 19(4): 99-104.

2013年的国际半导体技术发展路线图^[1](International Technology Roadmap for Semiconductors, ITRS),表明以硅基CMOS为主流的集成电路面临着很多的技术障碍,同时对以量子元胞自动机^[2-3](Quantum-dot Cellular Automata, QCA)和忆阻器(Memristor)为代表的新概念、新机理的电子器件研究已然成为前沿的热点方向。1971年,美国华裔科学家蔡少棠教授首次提出了忆阻器的概念^[4],他基于电路完备性理论,定义了电荷和磁通量之间的关系。直到2008年美国HP实验室率先制备了纳米级的忆阻器实物^[5],证实了忆阻器的存在。与传统的纳电子学元件相比,忆阻器具有纳米级的特征尺寸^[7]、结构简单^[8]和优异的非易失性等优点^[9-10],极大地吸引了众多研究人员的热情和兴趣。忆阻器虽然结构简单,但由其构成的混沌系统却有着更加复杂的动力学特性。量子细胞神经网络(Quantum Cellular Neural Network, QCNN)是以薛定谔方程为基础,用QCA构建了具有元胞耦合的细胞神经网络结构^[11],通过改变QCA的极化率和量子相位来实现复杂的非线性动力学特性^[12]。

混沌系统的控制和同步是非线性科学领域中研究热点之一,其在网络信息安全、保密通信等方面具有重要的应用潜力。文献[13]对忆阻混沌系统和Cohen-Grossberg神经网络系统的函数投影同步进行了研究;文献[14]对QCNN超混沌系统和Duffing系统的同步问题进行了研究;文献[15]对QCNN和Lorenz超混沌系统的函数投影同步进行了研究。上述的同步研究对象都是基于纳电子超混沌系统和经典混沌系统,而不同纳电子超混沌系统之间的同步问题研究成果还比较少。对于本文中的2个研究对象,都是基于新机理的纳电子元件的超混沌系统,所构建出含有忆阻器的超混沌系统,结构简单但却有着复杂的动力学特性。量子细胞神经网络融合了QCA和CNN的优点,具有超高集成密度和超低功耗^[16-17],通过对它们的混沌控制和同步进行研究,为今后纳电子器件在集成电路的应用和发展提供重要的意义。

本文首先分别介绍了忆阻超混沌系统、QCNN超混沌系统以及函数投影同步的概念;随后设计了同步控制器,使得对误差系统和不确定参数的估计逐渐回归至理想值;同时根据Lyapunov稳定性原理,从理论上证明了所设计的控制器的科学有效性;最后通过实验仿真,给出仿真结果,验证了方案的可行性。

1 忆阻超混沌系统

根据经典的Liu混沌系统^[18],通过简单变形,

提出了一个包含忆阻器的四维自治混沌系统,它的动力学状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = 10(x_2 - x_1) \\ \dot{x}_2 = 40x_1 - x_1x_3 + kW(x_4)x_1 \\ \dot{x}_3 = cx_3 - 3x_2 + 30x_1x_2 \\ \dot{x}_4 = x_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $x_i(i=1,2,3,4)$ 为系统变量; k 是与忆阻器相关的参数; c 是混沌系统的参数; $W(\cdot)$ 是忆阻器的忆导值。本文采用具有光滑二次非线性特性的忆阻器模型^[19],是由一条光滑的、分段连续的、非单调上升的二次非线性函数来进行描述。它表征流过忆阻器的电荷 q 和磁通量 φ 之间的关系,它的数学表达式为式(2a),对应的忆导为式(2b), a, b 为忆阻器的模型参数。

$$q(\varphi) = -a\varphi + 0.5b\varphi|\varphi| \quad (2a)$$

$$W(\varphi) = -a + b|\varphi| \quad (2b)$$

当 $k=1, c=-1, a=10, b=1$ 时,求得该系统的Lyapunov指数为: $\lambda_1=1.3314, \lambda_2=0.0291, \lambda_3=0, \lambda_4=-13.3496$ 。由此可知,系统(1)中有2个Lyapunov指数大于0,系统处于超混沌状态。其超混沌吸引子见图1。该四维非线性动力学系统的Lyapunov维数为:

$$\begin{aligned} \dot{x}D_L &= j + \frac{1}{|\lambda_{j+1}|} \sum_{i=1}^j \lambda_i = \\ 3 + \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{|\lambda_4|} &= 3 + \frac{1.3314 + 0.0291}{|-13.3496|} = 3.1019 \end{aligned} \quad (3)$$

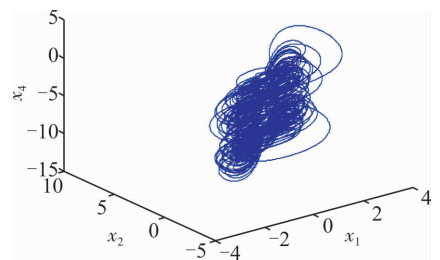


图1 忆阻超混沌系统的吸引子

Fig. 1 The attractor of memristor hyper-chaotic system

2 量子细胞神经网络与函数投影同步

2.1 量子细胞神经网络

由QCA耦合的QCNN超混沌系统中,第 k 个QCA的状态方程为^[20]:

$$\begin{cases} \hbar \frac{dp_k}{dt} = -2\gamma \sqrt{1-P_k^2} \sin\varphi_k \\ \hbar \frac{d\varphi}{dt} = -E_k \bar{P}_k + 2\gamma \frac{P_k}{\sqrt{1-P_k^2}} \cos\varphi_k \end{cases} \quad (4)$$

式中: \hbar 表示约化普朗克常数; γ 为量子点间的隧道效能能量; φ_k 为QCA的量子相位; E_k 为2个相

邻元胞的扭结能; \bar{P}_k 为局部相连的元胞极化率 P_k 的加权代数和。根据非线性动态电路理论,至少需要 2 个 QCA 元胞才可以出现混沌现象。由 2 个 QCA 元胞耦合的 QCNN 超混沌系统可由式(5)来表示:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -2v_1 \sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 \\ \dot{y}_2 = -v_3(y_1 - y_3) + 2v_1 \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 \\ \dot{y}_3 = -2v_2 \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 \\ \dot{y}_4 = -v_4(-y_1 + y_3) + 2v_2 \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 \end{cases} \quad (5)$$

式中: y_1, y_2 为 2 个 QCA 元胞的极化率, y_2, y_4 为 2 个元胞的量子相位; v_1, v_2 为每个 QCA 元胞量子点之间的隧道效应能量的系数; v_3, v_4 为相邻元胞极化率之差的加权影响。当参数 $v_1=20, v_2=13, v_3=10, v_4=8$ 时,它的超混沌吸引子见图 2。

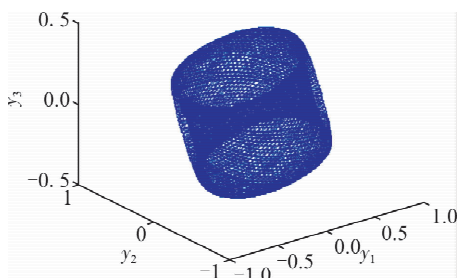


图 2 QCNN 超混沌系统的吸引子

Fig. 2 The attractor of QCNN hyper-chaotic system

2.2 函数投影同步模型

假设存在如下的驱动系统和响应系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}), \dot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(t, \mathbf{x}) + \mathbf{u}(t, \mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in R^n$ 为系统状态; $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}, \mathbf{y})$ 是同步控制器。设 $a(t)$ 为比例函数,且存在 $t \in R$ 时 $a(t) \neq 0$ 。定义 2 个系统的误差为 $e(t) = \mathbf{y} - a(t)\mathbf{x}$,若存在比例函数 $a(t)$,使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$,则称驱动系统和响应系统能够实现函数投影同步。

3 忆阻超混沌系统和 QCNN 超混沌系统的函数投影同步

3.1 同步控制器的设计

令驱动系统为忆阻超混沌系统(1),响应系统为 QCNN 超混沌系统:

$$\begin{cases} \dot{y}_1 = -2v'_1 \sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 + u_1 \\ \dot{y}_2 = -v'_3(y_1 - y_3) + 2v'_1 \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 + u_2 \\ \dot{y}_3 = -2v'_2 \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 + u_3 \\ \dot{y}_4 = -v'_4(-y_1 + y_3) + 2v'_2 \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 + u_4 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $v'_i (i=1,2,3,4)$ 是系统需要被估计的不确定参数; u_i 是所需设计的同步控制器。若存在合适的同步控制器,使得驱动系统和响应系统满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\dot{e}_i\| = \|\dot{\mathbf{y}}_i - a(t)\dot{\mathbf{x}}_i\| = 0$, 2 个超混沌系统的函数投影同步即可实现。

下面计算 2 个超混沌系统的误差系统 $\dot{e}_i (i=1, 2, 3, 4)$:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = \dot{y}_1 - a(t)\dot{x}_1 - \dot{a}(t)x_1 = -2v'_1 \sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 + u_1 - a(t)10(x_2 - x_1) - \dot{a}(t)x_1 \\ \dot{e}_2 = \dot{y}_2 - a(t)\dot{x}_2 - \dot{a}(t)x_2 = -v'_3(y_1 - y_3) + 2v'_1 \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 + u_2 - a(t)[40x_1 - x_1x_3 + kW(x_4)x_1] - \dot{a}(t)x_2 \\ \dot{e}_3 = \dot{y}_3 - a(t)\dot{x}_3 - \dot{a}(t)x_3 = -2v'_2 \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 + u_3 - a(t)[cx_3 - 3x_2 + 30x_1x_2] - \dot{a}(t)x_3 \\ \dot{e}_4 = \dot{y}_4 - a(t)\dot{x}_4 - \dot{a}(t)x_4 = -v'_4(-y_1 + y_3) + 2v'_2 \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 + u_4 - a(t)x_1 - \dot{a}(t)x_4 \end{cases} \quad (8)$$

设计的同步控制器为:

$$\begin{cases} u_1 = 2v_1 \sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 + a(t)10(x_2 - x_1) + \dot{a}(t)x_1 - \lambda e_1 \\ u_2 = v_3(y_1 - y_3) - 2v_1 \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 + a(t)[40x_1 - x_1x_3 + kW(x_4)x_1] + \dot{a}(t)x_2 - \lambda e_2 \\ u_3 = 2v_2 \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 + a(t)[cx_3 - 3x_2 + 30x_1x_2] + \dot{a}(t)x_3 - \lambda e_3 \\ u_4 = v_4(-y_1 + y_3) - 2v_2 \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 + a(t)x_1 + \dot{a}(t)x_4 - \lambda e_4 \end{cases} \quad (9)$$

通过控制器的作用,同步误差 e_1, e_2, e_3, e_4 随着系统的演化,按照式(9)规律逐渐减小为 0,同时不确定参数 v'_1, v'_2, v'_3, v'_4 也会按如下的规律变化:

$$\begin{cases} \dot{v}'_1 = 2(\sqrt{1-y_1^2} e_1 \sin y_2 - \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} e_2 \cos y_2) - \lambda(v'_1 - v_1) \\ \dot{v}'_2 = 2(\sqrt{1-y_3^2} e_3 \sin y_4 - \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} e_4 \cos y_4) - \lambda(v'_2 - v_2) \\ \dot{v}'_3 = (y_1 - y_3) e_2 - \lambda(v'_3 - v_3) \\ \dot{v}'_4 = (-y_3 + y_1) e_4 - \lambda(v'_4 - v_4) \end{cases} \quad (10)$$

在式(9)~(10)中,存在控制参数 $\lambda > 0$ 。驱动系统(1)和响应系统(7)在同步控制器(9)的规律下,误差系统(8)将会逐渐减小为 0,同时对于不确定参数也会按照式(10)的作用下趋近于理想值。

3.2 同步证明

根据 Lyapunov 稳定性理论,对上述的驱动和

响应系统的函数投影同步进行证明。选取的 Lyapunov 函数为 $V(e) = \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + \tilde{v}_1^2 + \tilde{v}_2^2 + \tilde{v}_3^2 + \tilde{v}_4^2)$, 其中:

$$\begin{cases} \tilde{v}_1 = v'_1 - v_1 \\ \tilde{v}_2 = v'_2 - v_2 \\ \tilde{v}_3 = v'_3 - v_3 \\ \tilde{v}_4 = v'_4 - v_4 \end{cases} \quad (11)$$

则 Lyapunov 函数沿着误差轨道的导函数为:

$$V' = \dot{e}_1 e_1 + \dot{e}_2 e_2 + \dot{e}_3 e_3 + \dot{e}_4 e_4 + \dot{\tilde{v}}_1 \tilde{v}_1 + \dot{\tilde{v}}_2 \tilde{v}_2 + \dot{\tilde{v}}_3 \tilde{v}_3 + \dot{\tilde{v}}_4 \tilde{v}_4 \quad (12)$$

将式(8)、(10)代入计算可得:

$$\begin{aligned} V' = & e_1[-2v'_1 \sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 + u_1 - a(t)10(x_2 - x_1) - \dot{a}(t)x_1] + e_2[-v'_3(y_1 - y_3) + \\ & 2v'_1 \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 + u_2 - a(t)[40x_1 - x_1 x_3 + \\ & kW(x_4)x_1] - \dot{a}(t)x_2] + e_3[-2v'_2 \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 + \\ & u_3 - a(t)[cx_3 - 3x_2 + 30x_1 x_2] - \dot{a}(t)x_3] + \\ & e_4[-v'_4(-y_1 + y_3) + 2v'_2 \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 + u_4 - \\ & a(t)x_1 - \dot{a}(t)x_4] + \tilde{v}_1[2(\sqrt{1-y_1^2} e_1 \sin y_2 - \end{aligned}$$

$$D(y) = \begin{bmatrix} -2\sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 2\frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 & 0 & -y_1 + y_3 & 0 \\ 0 & -2\sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 & 0 & 0 \\ 0 & 2\frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 & 0 & y_1 - y_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

对于 $\forall t$, 都存在 $\Delta t > 0$, 该系数向量的革兰矩阵为:

$$G = \int_t^{t+\Delta t} D^T(y) D(y) d\tau =$$

$$\int_t^{t+\Delta t} \begin{bmatrix} P_1 & 0 & Q_1 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & Q_2 \\ Q_1 & 0 & W_1 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & W_2 \end{bmatrix} d\tau \quad (15)$$

$$\text{式中: } P_1 = \frac{4((1-y_1^2) \sin y_2)^2 + (y_1 \cos y_2)^2}{1-y_1^2}; P_2 =$$

$$\frac{4((1-y_3^2) \sin y_4)^2 + (y_3 \cos y_4)^2}{1-y_3^2}; W_1 = (y_1 - y_3)^2;$$

$$W_2 = (-y_1 + y_3)^2; Q_1 = -\frac{2(y_1 - y_3)y_1 \cos y_2}{\sqrt{1-y_1^2}}; Q_2 =$$

$$-\frac{2(-y_1 + y_3)y_3 \cos y_4}{\sqrt{1-y_3^2}}.$$

由于状态变量 y_1, y_3 是 QCA 细胞的极化率, 而

$$\begin{aligned} & \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} e_2 \cos y_2 - y_2) - \lambda(v'_1 - v_1)] + \\ & \tilde{v}_2[2(\sqrt{1-y_3^2} e_3 \sin y_4 - \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} e_4 \cos y_4) - \\ & \lambda(v'_2 - v_2)] + \tilde{v}_3[(y_1 - y_3)e_2 - \lambda(v'_3 - v_3)] + \\ & \tilde{v}_4[(-y_3 + y_1)e_4 - \lambda(v'_4 - v_4)] = -\lambda(e_1^2 + e_2^2 + \\ & e_3^2 + e_4^2 + \tilde{v}_1^2 + \tilde{v}_2^2 + \tilde{v}_3^2 + \tilde{v}_4^2) \end{aligned} \quad (13)$$

由式(13)可知, 由于控制参数 $\lambda > 0$, 则 $\dot{V} < 0$, 所以当 $t \rightarrow \infty$ 时, 驱动响应系统的同步误差 e_1, e_2, e_3, e_4 和不确定参数的误差 $\tilde{v}_1, \tilde{v}_2, \tilde{v}_3, \tilde{v}_4$ 都会逐渐趋近于 0, 证毕。

3.3 不确定参数的估计

为了能够对 QCNN 超混沌系统中的不确定参数进行正确估计, 系统中不确定参数的系数向量就必须满足线性无关这个必要条件^[21]。考虑到实际过程中, 直接对参数的系数向量组线性无关进行证明是非常复杂和困难的。这里, 采用对不确定参数的系数向量革兰矩阵来进行判断, 如果革兰矩阵满秩, 那么参数的系数向量矩阵就是线性无关的, 进而能够对 QCNN 系统中的参数进行识别。

在混沌系统的函数投影同步过程中, QCNN 系统(5)中的不确定参数的系数向量为:

该极化率的绝对值小于 1, 故有 $y_1, y_3 \in (-1, 1)$, 当 QCNN 处于混沌状态时, 2 个 QCA 细胞的极化率 $y_1 \neq y_3$, 而且 2 个 QCA 元胞的量子相位 $y_2, y_4 \neq 0$ 故有:

$$P_1 W_1 - Q_1^2 = 4(y_1 - y_3)^2 (1 - y_1^2) \sin^2 y_2 \neq 0 \quad (16)$$

$$P_2 W_2 - Q_2^2 = 4(-y_1 + y_3)^2 (1 - y_3^2) \sin^2 y_4 \neq 0$$

由上可得 $\text{rank}(G) = 4$, 即 G 是满秩的, 故不确定参数的系数向量线性无关。通过对上述的分析可知, 系统的不确定参数可以进行正确估计的, 因此在 QCNN 超混沌系统和忆阻超混沌系统在实现函数同步投影的同时, 实现了对不确定参数的估计。

4 实验仿真结果

4.1 同步误差曲线和不确定参数的估计

采用 Matlab 软件进行实验仿真, 首先对忆阻超混沌系统(1)和 QCNN 超混沌系统(7)的函数投影

同步进行仿真。参数设置为:忆阻超混沌系统的初始值为 $x_1(0)=1, x_2(0)=0, x_3(0)=1, x_4(0)=0$, QCNN 超混沌系统的初始值为 $y_1(0)=0, y_2(0)=0, y_3(0)=0, y_4(0)=0$ 。同时, QCNN 超混沌系统的不确定参数 v'_1, v'_2, v'_3, v'_4 的初始值选取为 $v'_1(0)=1, v'_2(0)=16, v'_3(0)=15, v'_4(0)=6$, 它们的真实值为 $v_1=20, v_2=13, v_3=10, v_4=8$ 。控制参数 $\lambda=2$, 比例函数设置为 $a(t)=0.11+0.05\sin(t)+0.05\cos(2t)$ 。

绘制的函数投影同步的误差曲线见图 3, 当系统运行到 3 s 左右, 误差系统逐渐趋近到 0, 实现了忆阻超混沌系统和 QCNN 超混沌系统的函数投影同步。同时对 QCNN 超混沌系统中不确定参数的估计值如图 4 所示, 在系统演化 5 s 左右, 各个参数也达到了理想值, 仿真结果分别为 $v_1=20, v_2=13, v_3=10, v_4=8$, 实现了对 QCNN 超混沌系统中不确定的参数的正确估计。

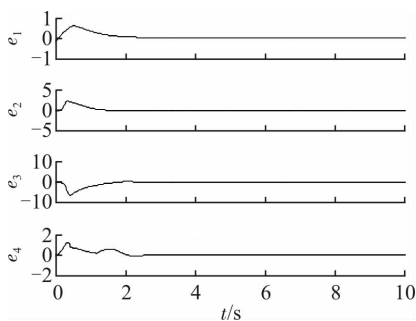


图 3 误差系统曲线

Fig. 3 The curves of error system

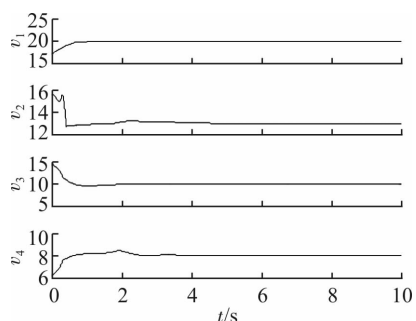


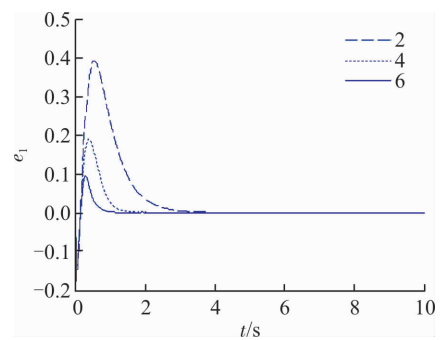
图 4 QCNN 超混沌系统的不确定参数的估计值

Fig. 4 The estimation of uncertain parameters in QCNN hyper-chaotic system

4.2 控制参数 λ 对同步速度的影响

控制参数 λ 的大小会对同步的速度产生影响, 分别取 $\lambda=2, 4, 6$, 以 e_1 的为例, 绘制的误差曲线如图 5 所示。图中可以看出当 $\lambda=2$ 时, 系统经过 4 s 误差曲线稳定到 0; 当 $\lambda=4$ 时, 经过 2 s 实现同步; 当 $\lambda=6$ 时, 经过 1 s 就使得误差系统为稳定到 0。通过仿真结果可以发现控制参数越大, 实现误差系

统同步所需要的时间越少, 同步速度越快。

图 5 不同控制参数在的误差曲线 e_1 Fig. 5 The error curves e_1 under different control parameters λ

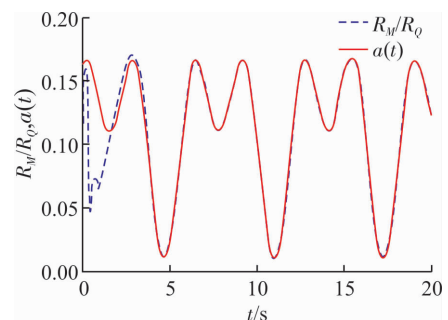
4.3 2 个系统的幅度之比

为了进一步说明同步的有效性, 分别定义驱动系统忆阻超混沌系统幅度 R_M 和响应系统 QCNN 混沌系统的幅度为 R_Q :

$$R_M = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2} \quad (17)$$

$$R_Q = \sqrt{y_1^2 + y_2^2 + y_3^2 + y_4^2}$$

则两者之比 R_M/R_Q 及给定的比例函数 $a(t)$ 变化曲线见图 6, 随着系统的不断的演化, 当系统演化 4 s 时, 2 个系统逐渐同步到给定的比例函数 $a(t)$ 。

图 6 R_M/R_Q 及比例函数 $a(t)$ 变化曲线Fig. 6 The curves of R_M/R_Q and the proportion function $a(t)$

5 结语

本文首先给出了含有忆阻器的超混沌系统, 通过对其进行动力学分析, 发现含有忆阻超混沌系统的非线性动力学特性更加复杂。接着设计出同步控制器使得忆阻超混沌系统和 QCNN 超混沌系统实现了函数投影同步, 同时对 QCNN 超混沌系统的不确定参数进行了估计; 最后给出了仿真结果, 证实了所设计的同步控制器能够有效的实现 2 个系统的函数投影同步。本文的同步方案对网络信息安全、通讯保密等领域具有一定的应用潜力。

参考文献(References):

- [1] HOEFFLINGER B. ITRS: The International Technology Roadmap for Semiconductors [M]. [S. l.]: Springer Berlin Heidelberg, 2011.
- [2] LENT C S, TOUGAW P D, POROD W, et al. Quantum Cellular Automata [J]. *Nanotechnology*, 1993, 4 (1): 49-57.
- [3] LENT C S, TOUGAW P D. Lines of Interacting Quantum-Dot Cells: A Binary Wire [J]. *Journal of Applied Physics*, 1993, 74(10): 6227-6233.
- [4] CHUA L O. Memristor-The Missing Circuit Element [J]. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1971, 18 (5): 507-519.
- [5] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The Missing Memristor Found [J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 80-83.
- [6] JO S H and LU W. CMOS Compatible Nanoscale Nonvolatile Resistance Switching Memory [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(2): 392-397.
- [7] YANG J J, ZHANG M X, STRACHAN J P, et al. High Switching Endurance in TaOx Memristive Devices [J]. *Applied Physics Letters*, 2010, 97 (23): 232102.
- [8] TORREZAN A, STRACHAN J P, MEDEIRO-Ribeiro G, et al. Sub-Nanosecond Switching of a Tantalum Oxide Memristor [J]. *Nanotechnology*, 2011, 22(48): 485203.
- [9] XIA Q, ROBINETT W, CUMBIE M W, et al. Memristor-CMOS Hybrid Integrated Circuit for Reconfigurable Logic [J]. *Nano Letters*, 2009, 9 (10): 3640-3645.
- [10] WANG X, CHEN Y, XI H, et al. Spintronic Memristor Through Spin-Torque-Induced Magnetization Motion [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2009, 30 (3): 294-297.
- [11] TOTH G, LENT C S, TOUGAW P D, et al. Quantum Cellular Neural Networks [J]. *Superlattices & Microstructures*, 2000, 20(4): 473-478.
- [12] NIU D Z, CHEN C X, HUI F U, et al. Research for Nonlinear Tracking Problem Based on QCNN [Z]. *Application Research of Computers*, 2013.
- [13] ABDURAHMAN A, JIANG H, RAHMAN K. Function Projective Synchronization of Memristor-Based Cohen-Grossberg Neural Networks with Time-Varying Delays [J]. *Cognitive Neurodynamics*, 2015, 9 (6): 603-613.
- [14] CHEN C X, NIU D Z, FU H, et al. New Controller Design in QCNN and the Synchronization with Chaotic System [J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2015, 719-720: 359-364.
- [15] YANG X K, CAI L, ZHAO X H, et al. Function Projective Synchronization of Quantum Cellular Neural Network and Lorenz Hyperchaotic System with Uncertain Parameters [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59 (6): 3740-3746.
- [16] BAO B C, XU J P, LIU Z. Initial State Dependent Dynamical Behaviors in a Memristor Based Chaotic Circuit [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(7): 51-53.
- [17] 蔡理, 马西奎, 王森. 量子细胞神经网络的超混沌特性研究 [J]. *物理学报*, 2003, 52(12): 3002-3006. CAI L, MA X K, WANG S. Study of Hyperchaotic Behavior in Quantum Cellular Neural Networks [J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52 (12): 3002-3006. (in Chinese)
- [18] 王发强, 刘崇新. Liu 混沌系统的混沌分析及电路实验的研究 [J]. *物理学报*, 2006, 55(10): 5061-5069. WANG F Q, LIU C X. Studies on Liu Chaotic system and Its Experimental Confirmation [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, 55(10): 5061-5069. (in Chinese)
- [19] BAO B C, XU J P, ZHOU G H. Chaotic Memristive Circuit: Equivalent Circuit Realization and Dynamical Analysis [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20 (12): 109-115.
- [20] KIM K, WU K, KARRI R. The Robust QCA Adder Designs Using Composable QCA Building Blocks [M]. [S. l.]. IEEE Press, 2007.
- [21] SUN Z, ZHU W, SI G. Adaptive Synchronization Design for Uncertain Chaotic Systems in the Presence of Unknown System Parameters: A Revisit [J]. *Nonlinear Dynamics*, 2013, 72(4): 729-749.

(编辑: 徐楠楠)