

参数不确定量子细胞神经网络与 Lorenz 超混沌系统的函数投影同步研究*

杨晓阔[†] 蔡 理 赵晓辉 冯朝文

(空军工程大学理学院, 西安 710051)

(2009 年 7 月 25 日收到; 2009 年 11 月 24 日收到修改稿)

研究了具有不确定参数的量子细胞神经网络系统与 Lorenz 超混沌系统的函数投影同步. 设计了自适应追踪控制器来实现两个不同系统渐进同步到已知的比例函数, 并运用 Lyapunov 稳定性方法进行了证明. 理论分析了量子细胞神经网络系统不确定参数的系数向量线性无关性, 实现了不确定参数的识别和估计. 数值仿真结果验证了函数投影同步和参数估计的有效性.

关键词: 量子细胞神经网络, Lorenz 超混沌, 函数投影同步, 纳电子器件

PACC: 0545

1. 引 言

量子细胞自动机(QCA)^[1]是以库仑作用传递信息的新型纳电子器件. 与传统晶体管相比, QCA 具有极小尺寸和极低功耗、无引线集成等优点. 近年来, 国内外学者运用薛定谔方程和蔡氏细胞神经网络^[2]结构, 用 QCA 构造了局部耦合的网络, 即量子细胞神经网络(QCNN)^[3-6]. 研究表明, QCNN 可从每个 QCA 的极化率和量子相位获得复杂的动力学特性, 能够产生纳米范围内器件的混沌振荡.

在非线性科学中, 混沌控制与同步的研究是热门课题之一, 其在军事通信和信息科学中具有巨大的应用潜力和广阔的发展前景. 目前对于混沌同步方法的研究主要集中在混沌系统完全同步、混沌系统相同步、混沌系统投影同步和混沌系统广义投影同步^[7-10]等方面. 最近, 文献^[11]提出了一种混沌系统的函数投影同步方法, 该方法将广义投影同步中的常数比例因子 α 变换成一比例函数 $\alpha(t)$, 通过选取不同的比例函数, 获得不同比例于原驱动混沌系统的输出混沌信号, 同步后两个混沌系统的拓扑结构在该比例函数意义下一致. 由于函数投影同步采用了随时间变化的函数, 增加了输出混沌信号的截取难度, 因而在保密通信中可以获得更加安全的

通信.

QCNN 可对信号进行实时处理并具有并行计算的特点, 将是细胞神经网络芯片在纳米级实现的一个发展方向. 为此, 本文对两个 QCA 耦合的 QCNN 系统与 Lorenz 超混沌系统的函数投影同步和参数估计进行了研究, 从理论上证明了同步是可以实现的, 同时对 QCNN 系统不确定参数的可识别性进行了理论分析, 并通过数值仿真验证了其有效性. QCNN 函数投影同步研究的这些结果对于未来的纳米级集成电路在军事保密通信上的应用具有重要意义.

2. 混沌系统及函数投影同步描述

2.1. 混沌系统描述

对一个 Lorenz 超混沌系统, 可用微分方程描述如下:

$$\begin{aligned}\dot{x}_1 &= a(x_2 - x_1) + x_4, \\ \dot{x}_2 &= bx_1 - x_1x_3 - x_2 + x_4, \\ \dot{x}_3 &= x_1x_2 - cx_3, \\ \dot{x}_4 &= -\delta x_2.\end{aligned}\tag{1}$$

当系统(1)的参数 $a = 10, b = 28, c = 8/3, \delta = 5$ 时,

* 国家高技术研究发展计划(批准号:2008JJA225)资助的课题.

[†] E-mail: shen_007828@sina.com

其超混沌吸引子如图 1 所示.

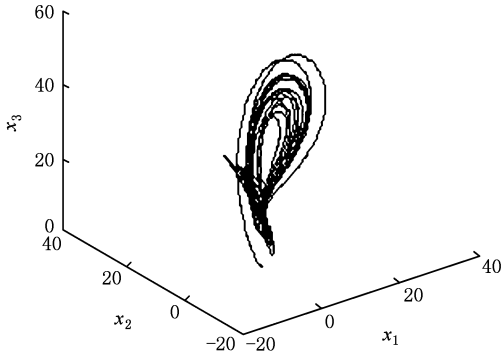


图 1 Lorenz 超混沌吸引子

在由 QCA 耦合而成的 QCNN 中,根据薛定谔方程可得第 k 个 QCA 的状态方程为^[4]

$$\begin{aligned} \hbar \frac{dP_k}{dt} &= -2\gamma \sqrt{1 - P_k^2} \sin\varphi_k, \\ \hbar \frac{d\varphi_k}{dt} &= -E_k \bar{P}_k + 2\gamma \frac{P_k}{\sqrt{1 - P_k^2}} \cos\varphi_k, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 \hbar, γ 和 E_k 分别为普朗克常数、QCA 的量子点隧穿能和静电损耗, \bar{P}_k 为邻近 QCA 极化率 P_k 的加权代数和, φ_k 为 QCA 的量子相位. 对由两个 QCA 耦合的 QCNN 系统,则可以用如下微分方程描述:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= -2w_{01} \sqrt{1 - y_1^2} \sin y_2, \\ \dot{y}_2 &= -w_{03}(y_1 - y_3) + 2w_{01} \frac{y_1}{\sqrt{1 - y_1^2}} \cos y_2, \\ \dot{y}_3 &= -2w_{02} \sqrt{1 - y_3^2} \sin y_4, \\ \dot{y}_4 &= -w_{04}(y_3 - y_1) + 2w_{02} \frac{y_3}{\sqrt{1 - y_3^2}} \cos y_4, \end{aligned} \quad (3)$$

其中状态变量 y_1 和 y_3 是两个 QCA 的极化率,状态变量 y_2 和 y_4 是两个 QCA 的量子相位, w_{01} 和 w_{02} 是与每个 QCA 内量子点间能量成正比的系数, w_{03} 和 w_{04} 是相邻 QCA 极化率之差的加权影响系数. 当系统(3)的参数 $w_{01} = 19.4, w_{02} = 13.1, w_{03} = 9.529, w_{04} = 7.94$ 时,其超混沌吸引子如图 2 所示.

2.2. 函数投影同步的描述

假设存在如下的驱动系统和响应系统:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{x}), \quad (4)$$

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{g}(t, \mathbf{y}) + \mathbf{u}(t, \mathbf{x}, \mathbf{y}), \quad (5)$$

其中 $\mathbf{u}(t, \mathbf{x}, \mathbf{y})$ 是自适应追踪向量控制器. 设 $\alpha(t)$ 为比例函数,它是连续可微的,且对所有 t 有 $\alpha(t)$

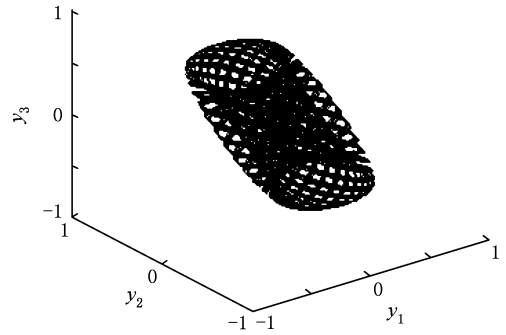


图 2 QCNN 超混沌吸引子

$\neq 0$. 定义两个系统的误差为

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{y} - \alpha(t)\mathbf{x},$$

如果比例函数 $\alpha(t)$ 使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|\mathbf{e}(t)\| = 0$, 则系统(4)和系统(5)被称为函数投影同步.

3. QCNN 系统与 Lorenz 超混沌系统的函数投影同步

3.1. 追踪控制器的设计

设驱动系统为 Lorenz 超混沌系统(1),响应系统为 QCNN 系统

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= -2w_{11} \sqrt{1 - y_1^2} \sin y_2 + u_1, \\ \dot{y}_2 &= -w_{13}(y_1 - y_3) \\ &\quad + 2w_{11} \frac{y_1}{\sqrt{1 - y_1^2}} \cos y_2 + u_2, \\ \dot{y}_3 &= -2w_{12} \sqrt{1 - y_3^2} \sin y_4 + u_3, \\ \dot{y}_4 &= -w_{14}(y_3 - y_1) \\ &\quad + 2w_{12} \frac{y_3}{\sqrt{1 - y_3^2}} \cos y_4 + u_4, \end{aligned} \quad (6)$$

其中 w_{11}, w_{12}, w_{13} 和 w_{14} 是系统(6)中需要被估计的不确定参数, u_1, u_2, u_3 和 u_4 是自适应追踪向量控制器. 当系统(6)和系统(1)满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e_i\| = \lim_{t \rightarrow \infty} \|y_i - \alpha(t)x_i\| = 0 (i = 1, 2, 3, 4)$ 时即可实现函数投影同步.

将系统(6)和系统(1)代入误差动力学系统 $\dot{e}_i = \dot{y}_i - \alpha(t)\dot{x}_i$, 从而可得

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= \dot{y}_1 - \alpha(t)\dot{x}_1 - \dot{\alpha}(t)x_1 \\ &= -2w_{11} \sqrt{1 - y_1^2} \sin y_2 + u_1 \\ &\quad - \alpha(t)[a(x_2 - x_1) + x_4] - \dot{\alpha}(t)x_1, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\dot{e}_2 &= \dot{y}_2 - \alpha(t)\dot{x}_2 - \dot{\alpha}(t)x_2 \\
&= -w_{13}(y_1 - y_3) \\
&\quad + 2w_{11} \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 + u_2 - \alpha(t) \\
&\quad \times [bx_1 - x_1x_3 - x_2 + x_4] - \dot{\alpha}(t)x_2, \\
\dot{e}_3 &= \dot{y}_3 - \alpha(t)\dot{x}_3 - \dot{\alpha}(t)x_3 \\
&= -2w_{12} \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 + u_3 \\
&\quad - \alpha(t)(x_1x_2 - cx_3) - \dot{\alpha}(t)x_3, \\
\dot{e}_4 &= \dot{y}_4 - \alpha(t)\dot{x}_4 - \dot{\alpha}(t)x_4 \\
&= -w_{14}(y_3 - y_1) \\
&\quad + 2w_{12} \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 \\
&\quad + u_4 + \alpha(t)\delta x_2 - \dot{\alpha}(t)x_4.
\end{aligned} \tag{7}$$

要实现系统(6)和系统(1)的同步,必须设计出合适的控制器 $u_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 以满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0$.

设计的追踪控制器如下:

$$\begin{aligned}
u_1 &= 2w_{01} \sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 \\
&\quad + \alpha(t)[a(x_2 - x_1) + x_4] \\
&\quad + \dot{\alpha}(t)x_1 - k_1e_1, \\
u_2 &= w_{03}(y_1 - y_3) - 2w_{01} \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 \\
&\quad + \alpha(t)[bx_1 - x_1x_3 - x_2 + x_4] \\
&\quad + \dot{\alpha}(t)x_2 - k_2e_2, \\
u_3 &= 2w_{02} \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 + \alpha(t) \\
&\quad \times (x_1x_2 - cx_3) + \dot{\alpha}(t)x_3 - k_3e_3, \\
u_4 &= w_{04}(y_3 - y_1) - 2w_{02} \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 \\
&\quad - \alpha(t)\delta x_2 + \dot{\alpha}(t)x_4 - k_4e_4.
\end{aligned} \tag{8}$$

随着控制器的作用,同步误差 e_1, e_2, e_3, e_4 将逐步减小,同时不确定参数 $w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}$ 按如下规律变化:

$$\begin{aligned}
\dot{w}_{11} &= 2 \left(\sqrt{1-y_1^2} e_1 \sin y_2 - \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} e_2 \cos y_2 \right) \\
&\quad - k_5(w_{11} - w_{01}), \\
\dot{w}_{12} &= 2 \left(\sqrt{1-y_3^2} e_3 \sin y_4 - \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} e_4 \cos y_4 \right) \\
&\quad - k_6(w_{12} - w_{02}), \\
\dot{w}_{13} &= (y_1 - y_3)e_2 - k_7(w_{13} - w_{03}),
\end{aligned}$$

$$\dot{w}_{14} = (y_3 - y_1)e_4 - k_8(w_{14} - w_{04}). \tag{9}$$

(8)和(9)式中,变量 $k_i > 0 (i = 1, 2, \dots, 8)$. 按照(8)式设计的控制器及(9)式给出的不确定参数更新规则,响应系统(6)和驱动系统(1)的同步误差随着时间的变化将趋于零,同时待估计的不确定参数将按(9)式趋于理想值.

3.2. 收敛性的证明

下面对以上两系统的函数投影同步进行证明.

定理 对于任意给定的比例函数 $\alpha(t)$, 当满足控制规律(8)式和 QCNN 响应系统参数变化(9)式时,系统(6)和系统(1)实现了函数投影同步.

证明 选取 Lyapunov 函数为

$$\begin{aligned}
V &= \frac{1}{2}(e_1^2 + e_2^2 + e_3^2 + e_4^2 + \tilde{w}_1^2 \\
&\quad + \tilde{w}_2^2 + \tilde{w}_3^2 + \tilde{w}_4^2),
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
\tilde{w}_1 &= w_{11} - w_{01}, \\
\tilde{w}_2 &= w_{12} - w_{02}, \\
\tilde{w}_3 &= w_{13} - w_{03}, \\
\tilde{w}_4 &= w_{14} - w_{04},
\end{aligned}$$

则 Lyapunov 函数沿着误差轨道对时间的导数为

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + e_3\dot{e}_3 + e_4\dot{e}_4 + \tilde{w}_1\dot{\tilde{w}}_1 \\
&\quad + \tilde{w}_2\dot{\tilde{w}}_2 + \tilde{w}_3\dot{\tilde{w}}_3 + \tilde{w}_4\dot{\tilde{w}}_4,
\end{aligned}$$

因而有

$$\begin{aligned}
\dot{V} &= e_1[-2w_{11}\sqrt{1-y_1^2}\sin y_2 + u_1 \\
&\quad - \alpha(t)[a(x_2 - x_1) + x_4] - \dot{\alpha}(t)x_1] \\
&\quad + e_2 \left[-w_{13}(y_1 - y_3) + 2w_{11} \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 \right. \\
&\quad \left. + u_2 - \alpha(t)[bx_1 - x_1x_3 - x_2 + x_4] - \dot{\alpha}(t)x_2 \right] \\
&\quad + e_3[-2w_{12}\sqrt{1-y_3^2}\sin y_4 + u_3 \\
&\quad - \alpha(t)(x_1x_2 - cx_3) - \dot{\alpha}(t)x_3] \\
&\quad + e_4 \left[-w_{14}(y_3 - y_1) + 2w_{12} \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 \right. \\
&\quad \left. + u_4 + \alpha(t)\delta x_2 - \dot{\alpha}(t)x_4 \right] \\
&\quad + \tilde{w}_1 \left[2 \left(\sqrt{1-y_1^2} e_1 \sin y_2 \right. \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} e_2 \cos y_2 \Big) - k_5 \tilde{w}_1 \Big] \\
& + \tilde{w}_2 \left[2 \left(\sqrt{1-y_3^2} e_3 \sin y_4 \right. \right. \\
& \left. \left. - \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} e_4 \cos y_4 \right) - k_6 \tilde{w}_2 \right] \\
& + \tilde{w}_3 [(y_1 - y_3) e_2 - k_7 \tilde{w}_3] \\
& + \tilde{w}_4 [(y_3 - y_1) e_4 - k_8 \tilde{w}_4] \\
= & -k_1 e_1^2 - k_2 e_2^2 - k_3 e_3^2 - k_4 e_4^2 - k_5 \tilde{w}_1^2 \\
& - k_6 \tilde{w}_2^2 - k_7 \tilde{w}_3^2 - k_8 \tilde{w}_4^2 \\
= & -(\mathbf{e}')^T \mathbf{P} \mathbf{e}',
\end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned}
\mathbf{e}' &= (e_1, e_2, e_3, e_4, \tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \tilde{w}_4)^T, \\
\mathbf{P} &= \text{diag}(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8).
\end{aligned}$$

由于 $\dot{V} < 0$, 故当 $t \rightarrow \infty$ 时, 同步误差 e_1, e_2, e_3, e_4 和不确定参数的误差 $\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \tilde{w}_3, \tilde{w}_4$ 均收敛于零, 系统 (6) 和系统 (1) 实现了函数投影同步. 定理得证.

3.3. 系统不确定参数可识别性

在混沌系统同步中, 要对任何时间范围的不确定参数进行识别和估计, 则系统不确定参数的系数向量必须是线性无关的^[12,13], 这样才能保证系统参数收敛到真实值. 而在实际应用中, 直接证明函数系数向量组的线性无关是非常困难的. 因此, 采取计算不确定参数系数向量的革兰矩阵是否满秩进而判断系数向量的线性无关, 如革兰矩阵满秩, 则系数向量线性无关, 这时可对系统的不确定参数进行正确的识别和估计.

在上述函数投影同步中, 由系统 (6) 可得 QCNN 系统不确定参数的系数向量为

$$\mathbf{D}(\mathbf{y}) = \begin{pmatrix} -2 \sqrt{1-y_1^2} \sin y_2 & 0 & 0 & 0 \\ 2 \frac{y_1}{\sqrt{1-y_1^2}} \cos y_2 & 0 & -(y_1 - y_3) & 0 \\ 0 & -2 \sqrt{1-y_3^2} \sin y_4 & 0 & 0 \\ 0 & 2 \frac{y_3}{\sqrt{1-y_3^2}} \cos y_4 & 0 & -(y_3 - y_1) \end{pmatrix}. \quad (10)$$

对任意 $t, \Delta t > 0$, 该系数向量的革兰矩阵为

$$\begin{aligned}
\mathbf{G} &= \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{D}^T(\mathbf{y}) \mathbf{D}(\mathbf{y}) d\tau \\
&= \int_t^{t+\Delta t} \begin{pmatrix} P_1 & 0 & Q_1 & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & Q_2 \\ Q_1 & 0 & W_1 & 0 \\ 0 & Q_2 & 0 & W_2 \end{pmatrix} d\tau, \quad (11)
\end{aligned}$$

其中

$$P_1 = 4 \frac{((1-y_1^2) \sin y_2)^2 + (y_1 \cos y_2)^2}{1-y_1^2},$$

$$P_2 = 4 \frac{((1-y_3^2) \sin y_4)^2 + (y_3 \cos y_4)^2}{1-y_3^2},$$

$$W_1 = (y_1 - y_3)^2,$$

$$W_2 = (y_3 - y_1)^2,$$

$$Q_1 = -2 \frac{(y_1 - y_3) y_1 \cos y_2}{\sqrt{1-y_1^2}},$$

$$Q_2 = -2 \frac{(y_3 - y_1) y_3 \cos y_4}{\sqrt{1-y_3^2}}.$$

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, 两 QCA 细胞极化率 $y_1 \neq y_3$, 且所有量子相位 $y_2, y_4 \neq 0$, 故有

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

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

因此 $\text{rank}(\mathbf{G}) = 4$, 即 \mathbf{G} 是满秩的, 故不确定参数的系数向量线性无关.

通过上述论述可知, 系统不确定参数可以进行正确识别, 故 QCNN 系统 (6) 和 Lorenz 超混沌系统 (1) 实现函数投影同步时不确定参数将按 (9) 式逐步收敛到真实值, 即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (w_{11} - w_{01}) = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (w_{12} - w_{02}) = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (w_{13} - w_{03}) = 0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} (w_{14} - w_{04}) = 0.$$

当然,不确定参数的估计还与其初始值的选取和 QCNN 系统的先验信息有关,在大范围内选取不确定参数初始值进行了数值仿真,结果表明参数收敛(9)式是有效的.

4. 数值研究结果

采用 Matlab 软件对 QCNN 系统(6)和 Lorenz 超混沌系统(1)的函数投影同步情况进行了仿真,其同步误差 $e(t)$ 和 QCNN 响应系统的参数估计的仿真结果分别如图 3 和图 4 所示.

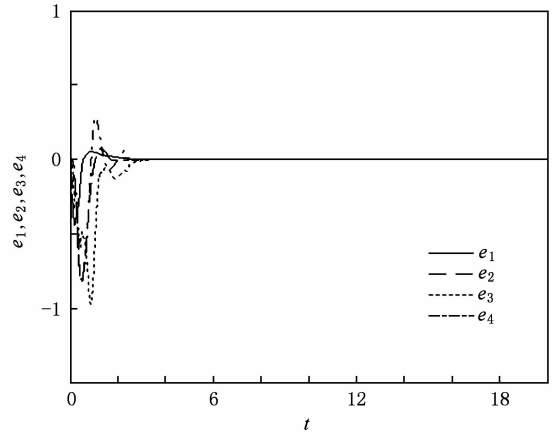


图 3 同步误差信号曲线

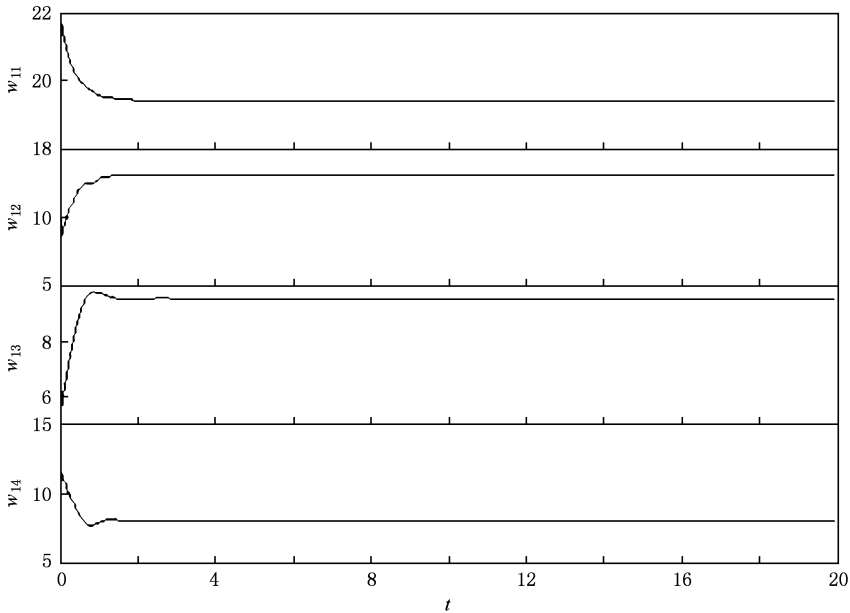


图 4 QCNN 不确定参数的估计值

仿真中,使用四阶 Runge-Kutta 法对系统(1)、系统(6)和系统(7)进行数值积分,积分步长 $\tau = 0.001$. 选取系统(1)的初始值为 $x_1(0) = 2.2$, $x_2(0) = 2.4$, $x_3(0) = 0$, $x_4(0) = 0$; 选取系统(6)的初始值为 $y_1(0) = 0$, $y_2(0) = 0$, $y_3(0) = 0$, $y_4(0) = 0$. 此外,选取 QCNN 不确定参数 $w_{11}, w_{12}, w_{13}, w_{14}$ 的初始值为 $w_{11}(0) = 22$, $w_{12}(0) = 8$, $w_{13}(0) = 5$, $w_{14}(0) = 12$, 它们的真实值为 $w_{01} = 19.4$, $w_{02} = 13.1$, $w_{03} = 9.529$, $w_{04} = 7.94$. 比例函数为 $\alpha(t) = 0.1 + 0.05\sin t$, 变量值为 $(k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6, k_7, k_8) = (3, 3, 3, 3, 3, 3, 3, 3)$. 从图 3 和图 4 可看出,误差 $e(t)$ 在时间 $t \approx 2.5$ 以后趋于零,

不确定参数在时间 $t \approx 2.5$ 以后 $w_{11} \rightarrow w_{01}, w_{12} \rightarrow w_{02}, w_{13} \rightarrow w_{03}, w_{14} \rightarrow w_{04}$, 因此两系统同步到了给定的比例函数并实现了不确定参数的估计. 为了进一步说明同步的有效性,定义响应系统幅度和驱动系统幅度分别为

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

$$R_d = \sqrt{x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2},$$

则两者之比 R_r/R_d 及给定的比例函数 $\alpha(t)$ 随时间的变化如图 5 所示,图中实线表示 R_r/R_d 的值,虚线表示给定的比例函数. 从图 5 可见,两系统在时间 $t \approx 2.5$ 后渐进同步到了已知的比例函数 $\alpha(t)$.

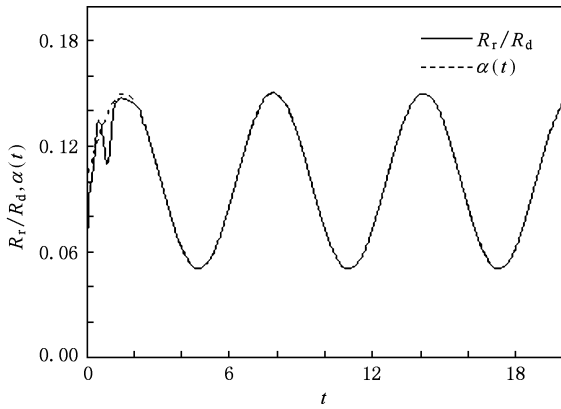


图5 R_r/R_d 和比例函数 $\alpha(t)$ 的变化

5. 结 论

本文针对两个 QCA 耦合的 QCNN 超混沌系统设计了自适应追踪控制器,使得系统实现了与 Lorenz 超混沌系统的函数投影同步.设计的追踪控制器和给出的不确定参数变化式收敛速度快,数值仿真验证了同步方案的有效性,并实现了不确定参数的估计.文中的 QCNN 函数投影同步方案用于混沌保密通信时将会有效增强通信的安全性,同时采用了由纳米结构尺度的 QCA 构成的混沌振荡系统,因此所得结果对于未来纳米级集成电路在军事保密通信上的应用是非常重要的.

- [1] Amlani I, Orlov A, Toth G, Bernstein G, Lent C S, Snider G 1999 *Science* **284** 5412
- [2] Chua L O, Yang L 1988 *IEEE Trans. CAS* **35** 1257
- [3] Tóth G, Lent C S 2001 *Phys. Rev. A* **63** 5231
- [4] Cai L, Ma X K, Wang S 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 3002 (in Chinese) [蔡理、马西奎、王森 2003 物理学报 **52** 3002]
- [5] Fortuna L, Manuela L R, Donata N, Domenico P 2004 *IEEE Trans. VLSI* **12** 1167
- [6] Wang S, Cai L, Kang Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2837
- [7] Femat R, Perales G S 1999 *Phys. Lett. A* **262** 50
- [8] Krawiecki A, Sukiennicki A 2000 *Chaos Solitons Fract.* **11** 1445
- [9] Ge Z M, Yang C H 2008 *Chaos Solitons Fract.* **35** 980
- [10] Li L, Li J F 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6093 (in Chinese) [李农、李建芬 2008 物理学报 **57** 6093]
- [11] Luo R Z 2008 *Phys. Lett. A* **372** 3667
- [12] Lu W L 2007 *Phys. Rev. E* **75** 018201
- [13] Sun F, Peng H P, Luo Q, Li L X, Yang Y X 2009 *Chaos* **19** 023109

Function projective synchronization of quantum cellular neural network and Lorenz hyperchaotic system with uncertain parameters*

Yang Xiao-Kuo[†] Cai Li Zhao Xiao-Hui Feng Chao-Wen

(College of Science, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China)

(Received 25 July 2009; revised manuscript received 24 November 2009)

Abstract

In the paper, function projective synchronization of quantum cellular neural network with uncertain system parameters and Lorenz hyperchaotic system is studied. The adaptive controllers are proposed to make the states of two different chaotic systems asymptotically synchronized up to a desired scaling function. We also present the relevant proof by applying Lyapunov stability theory. Moreover, linear independence of coefficient vector of uncertain system parameters in quantum cellular neural network is analyzed theoretically, which aims to realize the unknown parameter identification and estimation. Numerical simulations are made to show the effectiveness of the function projective synchronization and parameter estimation.

Keywords: quantum cellular neural network, Lorenz hyperchaotic, function projective synchronization, nanoelectronic device

PACC: 0545

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2008JJA225).

[†] E-mail: shen_007828@sina.com