

基于 QCNN 的非线性跟踪问题研究*

牛德智, 陈长兴, 符 辉, 赵延明, 屈 坤, 王旭婧

(空军工程大学 理学院, 西安 710051)

摘 要: 针对如何快速准确地跟踪到非线性系统的状态问题,研究了量子细胞神经网络(QCNN)在非线性和跟踪中的应用。在满足 Lyapunov 函数指数收敛的条件下,设计了一种新型参数形式的控制器,在此基础上,对三种非线性系统即确定性非线性运动、参数和运动规律未知的非线性数据系统以及典型蔡氏电路进行了 QCNN 跟踪研究。仿真结果表明,在 QCNN 系统中,通过设计合理的控制器可以实现非线性问题状态的有效跟踪,且实验结果为 QCNN 系统复杂度与跟踪的及时性之间关系提供了参考依据和有力的说明。设计的新型控制器及对实际问题处理方法为 QCNN 的理论及应用研究具有借鉴意义。

关键词: 量子细胞神经网络; 非线性跟踪; Lyapunov 函数; 控制器; 蔡氏电路

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2013)12-3634-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2013.12.030

Research for nonlinear tracking problem based on QCNN

NIU De-zhi, CHEN Chang-xing, FU Hui, ZHAO Yan-ming, QU Kun, WANG Xu-jing

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

Abstract: Aiming at method of tracking status of nonlinear system quickly and timely, this paper studied application of QCNN in nonlinear tracking system. In the case that Lyapunov function was convergent in exponent rate, it designed one controller with other parameter. On the basis of this controller, QCNN controlled system tracked three kinds of nonlinear system, which were separately certain system, nonlinear data system without known parameters and its function relation, and system of Chua's circuit. Simulations show that QCNN system can realize effective tracking for status of nonlinear problem by suitable controller. Furthermore, the simulation results provide reference and illustration to relationship between system's complexity and accurate exhausted time of tracking. The new designed controller and disposing adopted methods in the paper can give some thinking means for QCNN theory and its application research.

Key words: QCNN (quantum cellular neural networks); nonlinear tracking; Lyapunov function; controller; Chua's circuit

0 引言

众所周知,纳米科学技术^[1]是科学发展跨时代的内容之一,是21世纪高新科学技术的基础,而纳米科学技术的核心是纳电子学,它是研究纳电子器件及集成纳电路系统理论和技术的基础。纳电子器件的工作机理主要依赖于器件的量子效应特性。作为纳电子器件的重要一类,1993年,Lent等人^[2]正式提出了量子元胞自动机(quantum cellular automata, QCA)的概念,最初的QCA原型是电子QCA,单一的QCA通常由四个、五个或六个单独的量子点组成。在由四个量子点和两个多余电子构成的QCA元胞中,量子点在一个正方形元胞的四个拐角处。由于库仑静电排斥作用,两个电子将占据对角线上的量子点位置,因此,单个元胞具有两个完全极化的状态,形成两个稳定基态。由QCA元胞构成的QCA电路在信息处理上提供了一种新的途径,已经引起了广泛的研究^[3]。国外有学者利用

QCA实现了CNN(cellular neural networks,细胞神经网络)的网络结构,即QCNN^[4]。它融合了QCA和CNN的优点,具有超高集成密度、超低功耗、可对信号进行实时处理,以及并行计算等特点。

QCNN一经出现,就在信息工程、医学生物等领域得到了广泛关注与研究。Csurgay等人^[5]对其进行了信号处理方面的应用研究。Tsai等人^[6]提出了双层QCNN结构并将其运用到图像边缘检测上,Fortuna等人^[7]以两元胞QCNN为基本单元进行了信息交换方面的研究。不同于卡尔曼滤波、粒子滤波等滤波跟踪^[8]方法通过预测、滤波、迭代过程来实现目标或信号跟踪,在控制系统中,通过施加控制使受控系统的输出信号达到事先给定的参考信号更具有有一般性。文献[9]设计了具有四个参数结构的控制器用以实现一维信号跟踪。文献[10]将研究领域扩展到三维信号的跟踪,两者均较好地实现了跟踪控制的效果,但是其采用的控制器参数较多,若采用模块化结构来实现,则无疑增加了系统的结构复杂度。另外,实际中的问

收稿日期: 2013-03-12; **修回日期:** 2013-04-20 **基金项目:** 陕西省电子信息系统集成重点实验室项目(201107Y16);军内武器系统科研项目(KJ2010182, KJ2012184)

作者简介: 牛德智(1984-),男,陕西富平人,博士,主要研究方向为通信系统与雷达信息处理(niudezhi_001@163.com);陈长兴(1964-),男,河北宝坻人,教授,博导,主要研究方向为信号与信息处理、现代通信理论、信息系统建模与仿真;符辉(1986-),男,陕西宝鸡人,硕士,主要研究方向为通信系统建模与仿真;赵延明(1981-),男,陕西西安人,硕士,主要研究方向为通信系统建模与仿真;屈坤(1989-),男,陕西富平人,硕士,主要研究方向为通信系统建模与仿真;王旭婧(1990-),女,陕西西安人,硕士,主要研究方向为故障检测与诊断。

题多为非线性问题,有的可以预知系统的演化规律,有的只能通过接收数据处理来获取最终的跟踪效果,这些情况下如何实现状态的有效跟踪,皆是需要解决的问题。

本文从考虑减少控制器参数个数以简化系统结构、系统运动规律未知情况下的跟踪实现两方面入手,在论述 QCNN 机理的基础上,利用 QCNN 良好的非线性特性,主要对 QCNN 应用于非线性跟踪问题的新型控制器设计、实际不同问题的处理方法进行了论述,并通过仿真实验进行了分析验证。

1 QCNN 的原理介绍

在 QCNN 中,如果将互相作用的量子元胞的每一状态看做一个 QCA,就必须假设两点^[2]:a)量子元胞之间不存在隧道效应;b)每个元胞的极化率 P 仅由其邻近元胞的库仑相互作用来确定,且可在 -1 和 $+1$ 之间连续变化。

QCNN 量子点元胞运动的量子力学方程,它以薛定谔 (Schrödinger) 方程为基础,表现出与 CNN 动力学特性相类似的形式。在 QCNN 中,第 k 个元胞 (即单个 QCA) 的动力学特性可由以下的 Schrödinger 方程来描述:

$$j \hbar \frac{\partial}{\partial t} |\psi_k\rangle = H_k |\psi_k\rangle \quad (1)$$

其中, $\hbar$ 为约化普朗克常数, $|\psi_k\rangle$ 为元胞的量子状态,而 H_k 表示第 k 个元胞的哈密顿量,它可以写为

$$H_k = \begin{bmatrix} E_0 - \frac{1}{2} E_k \bar{P}_k & -\gamma \\ -\gamma & E_0 + \frac{1}{2} E_k \bar{P}_k \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: γ 是量子点间的隧道效应能量; E_k 为两个相邻元胞静电能量的损耗,且这两个相邻元胞具有完全极化的相反极化率; P_k 则是考虑局部相邻元胞互连的影响。若将单个元胞的极化率 P 作为状态变量,量子相位 φ 也作为状态变量,那么 $|\psi_k\rangle$ 的向量形式可用 P_k 和 φ_k 表示为

$$|\psi_k\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha \\ |\beta| e^{j\varphi_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{(1+P_k)/2} \\ \sqrt{(1-P_k)/2} \cdot e^{j\varphi_k} \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中: α 和 β 分别为用两个极化态的基向量所表示的元胞量子状态的系数 (或称为量子力学的幅值), α 可看做实数, $\beta = |\beta| e^{j\varphi_k}$ 为复数。

这样,可将上述 QCNN 中的量子力学描述转换为类似 CNN 形式的描述,即

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

上述方程式 (4) 即为构成 QCNN 第 k 个元胞的状态方程。 $\bar{P}_k$ 为邻近元胞极化率的加权代数和。

2 基于 QCNN 控制系统的新型控制器结构及其统一形式

三元胞六阶的受控 QCNN 系统方程为

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= -2b_1 \sqrt{1-P_1^2} \sin \varphi_1 \\ \dot{P}_2 &= -2b_2 \sqrt{1-P_2^2} \sin \varphi_2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_3 &= -2b_3 \sqrt{1-P_3^2} \sin \varphi_3 \\ \dot{\varphi}_1 &= -w_1 (P_1 - P_2 - P_3) + 2b_1 \frac{P_1}{\sqrt{1-P_1^2}} \cos \varphi_1 + U \\ \dot{\varphi}_2 &= -w_2 (P_2 - P_1 - P_3) + 2b_2 \frac{P_2}{\sqrt{1-P_2^2}} \cos \varphi_2 \\ \dot{\varphi}_3 &= -w_3 (P_3 - P_2 - P_1) + 2b_3 \frac{P_3}{\sqrt{1-P_3^2}} \cos \varphi_3 \end{aligned} \quad (5)$$

其中 $U = k + (2P_1 - 2m - n - 2r - 2\dot{r} - \ddot{r})/l$ 为控制器, $r(t)$ 为参考信号,其他参数如下

$$\begin{aligned} k &= w_1 (P_1 - P_2 - P_3) - 2b_1 \frac{P_1}{\sqrt{1-P_1^2}} \cos \varphi_1 \\ l &= 2b_1 \sqrt{1-P_1^2} \cos \varphi_1 \\ m &= 2b_1 \sqrt{1-P_1^2} \sin \varphi_1 \\ n &= 4b_1^2 P_1 \sin^2 \varphi_1 \end{aligned} \quad (6)$$

由文献[10]知,对于控制器 U , $P_1(t)$ 将按指数形式收敛到参考信号 $r(t)$ 。

进一步,可以得出由 Lyapunov 函数决定的 QCNN 类控制器按指数收敛的满足条件。这里不妨再次对 Lyapunov 函数进行求导运算:

$$\dot{V} = 2(P_1 - r)(\dot{P}_1 - \dot{r}) + 2(r - P_1 + \dot{r} - \dot{P}_1)(\dot{r} - \dot{P}_1 + \ddot{r} - \ddot{P}_1) \quad (7)$$

可知,当上式中的右边第二项的后一个乘积因子满足以下条件时

$$\dot{r} - \dot{P}_1 + \ddot{r} - \ddot{P}_1 = 2P_1 + \dot{P}_1 - 2r - \dot{r} \quad (8)$$

$$\text{即} \quad \dot{P}_1 = 2r + 2\dot{r} + \ddot{r} - 2P_1 - 2\dot{P}_1 \quad (9)$$

受控系统满足按照指数形式收敛到参考信号上。所以在该条件约束下可以设计 $\dot{P}_1$ 中的不同控制器种类 U 。本文此处依据此原则设计出一种新型不同参数形式的控制器如下:

$$U = c + (2P_1 + 2\dot{P}_1 - d - 2r - 2\dot{r} - \ddot{r})/f \quad (10)$$

其中: $c = -\tan^2 \varphi_1$, $d = (2b_1 \sqrt{1-P_1^2} \cos \varphi_1) \cdot (-w_1 (P_1 - P_2 - P_3))$, $f = 4b_1^2 P_1 \cos^2 \varphi_1$ 。容易证明该控制器可以使得系统指数收敛。

需要指出的是,对于 QCNN 的受控系统,受控器无论参数和连接形式如何选取,它都可以化为最终一个统一形式,即

$$U = \xi + (2P_1 + 2\dot{P}_1 - \varepsilon - 2r - 2\dot{r} - \ddot{r})/\Delta \quad (11)$$

至于其中的三个参数如何选取,则应考虑一些实施的方便性和执行的复杂度而定,这里不作为重点内容进行论述。需要说明的是,在以下涉及到仿真实验控制器选取的时候,仍然选取常用的带有四个参数的控制器。

3 QCNN 应用于非线性跟踪

3.1 三元胞 QCNN 和二元胞 QCNN 对确定性非线性运动的跟踪

对于二元胞四阶受控系统, QCNN 系统动力学特性的 Schrödinger 方程应为

$$\begin{aligned} \dot{P}_1 &= -2b_1 \sqrt{1-P_1^2} \sin \varphi_1 \\ \dot{P}_2 &= -2b_2 \sqrt{1-P_2^2} \sin \varphi_2 \\ \dot{\varphi}_1 &= -w_1 (P_1 - P_2) + 2b_1 \frac{P_1}{\sqrt{1-P_1^2}} \cos \varphi_1 + U \end{aligned}$$

$$\dot{\varphi}_2 = -w_2(P_2 - P_1) + 2b_2 \frac{P_2}{\sqrt{1-P_2^2}} \cos \varphi_2 \quad (12)$$

对于同样的控制器 U ,也可得出 $P_1(t)$ 指数收敛的结论。

下面将讨论这两种不同元胞的 QCNN 系统对一确定性参数的非线性运动进行跟踪。

设有一非线性质点运动方程为

$$r_0(t) = Ae^{-Bt}t^C \quad (13)$$

为方便仿真实验研究,此处取一组参数为 $A=1, B=0.1, C=2$ 。在该组参数下,函数的最大值小于 80,由于 $P_1(t)$ 表示元胞极化率,其变化范围为 $(-1, 1)$,所以参考信号 $r(t)$ 选为

$$r(t) = r_0(t)/80 \quad (14)$$

则该情形下的控制器应为

$$U = k + (2P_1 - 2m - n)/l + [-2e^{-0.1t}t^2 - 2(-0.1e^{-0.1t}t^2 + 2te^{-0.1t}) - (-0.1(-0.1e^{-0.1t}t^2 + 2te^{-0.1t}) + 2te^{-0.1t} - 0.2te^{-0.1t})]/(80l) \quad (15)$$

在 MATLAB 中对由 QCNN 系统决定的受控器进行跟踪该非线性运动方程,得到的跟踪图像和误差图像分别如图 1 和 2 所示。

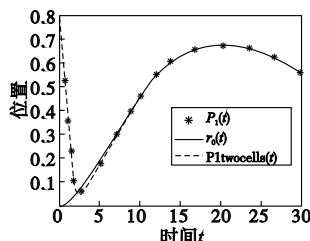


图1 两种 QCNN 跟踪非线性运动目标

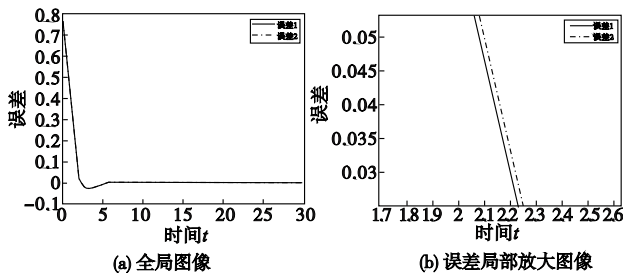


图2 两种 QCNN 跟踪非线性运动目标的误差

由仿真图像可以看出,两种 QCNN 系统均能很好跟踪非线性运动目标,且跟踪较为精确,两者的跟踪误差精度在 5% 以下(二元胞的 QCNN 系统的误差精度略低一些)。这说明, QCNN 控制器不仅可以跟踪非线性运动(非线性信号),且可以跟踪极为精密的非线性系统,这也充分显示了 QCNN 控制器应用在微观领域的优越性。

另外,文中给出了两种 QCNN 跟踪系统伴随不同的时间长度时,稳定跟踪完成所需用的仿真时间(表 1)。分析表中数据可知,当时间长度约小于 100 时,此时尚未达到较为精确的稳定跟踪,二元胞的 QCNN 系统所需时间大于三元胞 QCNN 系统,这一点说明了数量较少的 QCA 元胞所构成的跟踪系统由于结构简单,稳定跟踪到目标所需的时间较长;当时间长度约大于 100 时,二元胞的 QCNN 系统所需时间小于三元胞 QCNN 系统,这时已经实现稳定跟踪,结构复杂的 QCNN 系统耗时较多。

3.2 QCNN 对参数未知的非线性运动跟踪

此处的参数未知,不仅包含质点运动关系的参数无法获

取,而且还应包含质点运动规律的无法预测或先验预知,而仅仅可以获得其运动的一些实测数据。

表 1 两种跟踪系统不同时间长度时的仿真耗时

误差	时间 t					
	10	20	30	100	110	300 1000
误差 e_1	0.0425	0.0451	0.0467	0.0581	0.0610	0.0941 0.2190
误差 e_2	0.0490	0.0505	0.0506	0.0582	0.0586	0.0751 0.1348

为了便于说明问题,此处假定所获得的数据来源为三元胞的 QCNN 驱动系统所产生,但是实际中并不知道该驱动系统的结构或质点运动轨迹函数关系。不妨设所获得的数据序列为 X_N, N 为序列的长度。

为了得到控制器中的 $\dot{r}$ 和 $\ddot{r}$, 对 X_N 作如下处理:

$$\dot{X}_N = [(x_2 - x_1)/\Delta t, (x_i - x_{i-1})/\Delta t], i=2, 3, \dots, N$$

$$\ddot{X}_N = [(\dot{x}_2 - \dot{x}_1)/\Delta t, (\dot{x}_j - \dot{x}_{j-1})/\Delta t], j=2, 3, \dots, N \quad (16)$$

$\dot{x}_N$ 和 $\ddot{x}_N$ 就是控制器中的等效 $\dot{r}$ 和 $\ddot{r}$, 上式中 x_i 为序列 X_N

中的第 i 个元素, x_j 为序列 X_N 中的第 j 个元素。对于该数据序列进行 QCNN 跟踪, 得到图像如图 3 所示。可知, 当经过跟踪开始一段时间后, 系统基本上能跟踪出序列的变化规律, 但是整体的幅值及相位有所偏移, 此现象应理解为本节中的等效替换误差所致。但是当基本能稳定模拟变化状态时, 只要对其经过线性平移处理, 它便能较好地反映质点运动(或信号变化)的实际规律。另外, 可以通过一定的插值方法使序列 X_N 变得更为密集, 这样可以在一定程度上减少这种相位偏差。

3.3 QCNN 对蔡氏电路系统的跟踪同步

作为典型的蔡氏电路^[11], 可以产生出混沌信号, 使得它及其该电路的各种变形电路迅速应用在保密通信等领域, 所以研究 QCNN 控制系统对蔡氏电路的跟踪同步, 对蔡氏电路在微、纳电子领域的扩展应用具有较强的启示意义。

用数学模型描述的典型蔡氏电路系统方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(y - x - f(x)) \\ \dot{y} = x - y - z \\ \dot{z} = -\beta y \end{cases} \quad (17)$$

其中, $f(x) = G_a x + 0.5(G_a - G_b)(|x+1| - |x-1|)$ 。

在式(17)中, 蔡氏电路出现双涡卷的一组参数为 $\alpha = 9.4664, \beta = 14.0205, G_a = -1.4057, G_b = -0.5279$ 。为使受控系统能跟踪该电路系统, 首先应确定控制器参数。为此, 分别计算 $\dot{x}, \dot{y}$ 和 $\dot{z}$, 则

$$\begin{cases} \dot{x} = \alpha(\dot{y} - \dot{x} - f(\dot{x})) \\ \dot{y} = \dot{x} - \dot{y} - \dot{z} \\ \dot{z} = -\beta \dot{y} \end{cases} \quad (18)$$

对于分段非线性函数, 可求得

$$f(\dot{x}) = G_b \dot{x} \times \varepsilon(|\dot{x}| - 1) + G_a \dot{x} \times (\varepsilon(\dot{x} + 1) - \varepsilon(\dot{x} - 1)) \quad (19)$$

其中, $\varepsilon(x)$ 表示阶跃函数。在仿真实验中, 可通过逻辑判断语句实现该函数, 进而可以表示出蔡氏电路系统的微分方程组。

设计三个控制器, 其值分别为

$$U_1 = k + (2P_1 - 2m - n)/l - (2x + 2\dot{x} + \ddot{x})/(5l)$$

$$U_2 = k + (2P_1 - 2m - n)/l - (2y + 2\dot{y} + \ddot{y})/(5l)$$

$$U_3 = k + (2P_1 - 2m - n)/l - (2z + 2\dot{z} + \ddot{z})/(5l) \quad (20)$$

在这组控制器下,对蔡氏电路进行跟踪仿真,得到图像如图 4~6 所示。

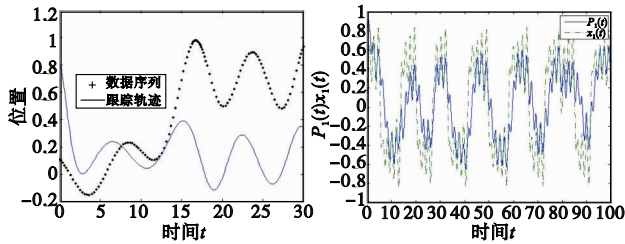


图3 QCNN系统对未知函数关系的非线性序列值跟踪

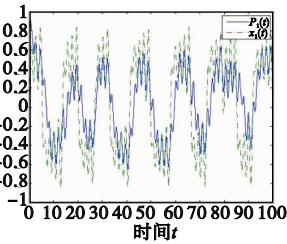


图4 x信号和跟踪信号

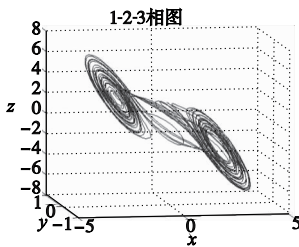


图5 蔡氏电路的三维双涡卷吸引子

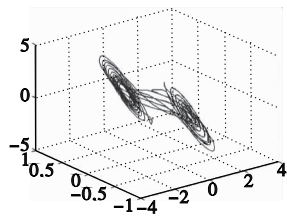


图6 QCNN跟踪所得的三维双涡卷吸引子

由仿真图像可以看出,跟踪系统能很好地实现对蔡氏混沌电路的跟踪。在实际应用时,数学模型中的蔡氏电路四个参数由蔡氏电路的元器件参数综合确定,其对应的变换关系参见文献[12]。实质上,通过该仿真问题的实现说明,QCNN系统可以对多种不同电路参数的蔡氏电路实现跟踪,这无疑对蔡氏电路与其他系统的综合应用提供了一种新的思路。

4 结束语

本文首先对 QCNN 的原理进行了简要介绍,其次由 Lypunov 函数指数收敛的条件,设计了具有另外一种参数形式的控制器,进而指出 QCNN 系统的受控器具有形式上一致的统一形式。本文主要对三种非线性运动系统进行了 QCNN 系统跟踪研究:a)分别通过二元胞和三元胞的 QCNN 系统对一种确定性参数的非线性运动目标进行跟踪,仿真结果为 QCNN 系统用于跟踪时的系统复杂度与跟踪的及时性(仿真耗时的长短)之间关系提供了参考依据和有力的说明;b)对未知参数和函数变化关系的运动系统数据序列实现了跟踪,稳定跟踪时可以在形式上与原数据序列变化规律保持一致,只是幅度和相位有所偏移,但是可以通过相关的措施改进其性能;c)利用 QCNN 系统实现了对典型蔡氏电路的有效跟踪,其关键在于:(a)对体现非线性电阻函数关系式进行求导并连贯表示,而在仿真程

序中则可以用逻辑判断来表示;b)多维控制器的合理设计。文中所取得的仿真实验结果和一些处理方法为 QCNN 的研究提供了一种思路。关于文中对三种非线性系统的跟踪问题,有的地方还研究得不够深入。比如对未知参数的非线性运动的跟踪不理想之处尚缺乏定量的分析与改进;对蔡氏电路的跟踪还只是停留在数学模型研究方面,下一步可以对其电路结构级的实现进行相关研究,这也是后期应该着重考虑的问题。

参考文献:

- [1] WANG Wei, LIU Ming, HSU A. Hybrid nanoelectronics: feature of computer technology[J]. *Journal of Computer Science and Technology*, 2006, 21(6): 871-886.
- [2] LENT C S, TOUGAW P D, BERSTEIN G H. Quantum cellular automata[J]. *Nanotechnology*, 1993, 4(1): 49-57.
- [3] TANG Rui, ZHANG Feng-ming, KIM Y B. QCA-based nano circuits design[J]. *IEEE Trans on Nanotechnology*, 2005, 4(3): 2527-2530.
- [4] TOTH G, LENT C S, TOUGAW P D. Quantum cellular neural networks[J]. *Superlattices and Microstructure*, 1996, 20(4): 473-479.
- [5] CSURGAY A, POROD W, PAKOS B. Signal processing by pulse-driven molecular arrays[J]. *International Journal of Circuit Theory and Applications*, 2003, 31(1): 331-334.
- [6] TSAI T C, SUN Min, LIN Li-ju, et al. A new two-layer quantum-dot large-neighborhood cellular nonlinear network (QLN-CNN) using quantum-dot cellular automata[C]//Proc of the 2nd IEEE Conference on Nanotechnology. 2002: 355-357.
- [7] FORTUNA L, ROSA M L, NICOLSI D, et al. Nanoscale system dynamical behaviors: from quantum-dot-based cell to 1-D arrays[J]. *IEEE Trans on very Large Scale Integration Systems*, 2004, 12(11): 1167-1173.
- [8] 巫春玲, 韩崇昭. 一种新的非线性目标跟踪方法[J]. *计算机工程与应用*, 2011, 47(7): 1-3.
- [9] WANG Sen, CAI Li, WU Gang. Tracking control and synchronization with diverse structure of the quantum cellular neural network[C]//Proc of IEEE International Conference on Control and Automation. 2007: 2210-2213.
- [10] 王森, 蔡理, 吴刚. 量子细胞神经网络超混沌系统的追踪控制与同步[J]. *控制与决策*, 2008, 23(2): 204-208.
- [11] 李亚, 张正明, 陶志杰. 一个超混沌六阶蔡氏电路及其硬件实现[J]. *物理学报*, 2009, 58(10): 6818-6822.
- [12] 高永毅, 李邦彦. 变参数非自治蔡氏电路的混沌同步[J]. *控制理论与应用*, 2011, 28(3): 389-394.

(上接第 3633 页)

- [6] LOCHERT C, SCHEUERMANN B, WEWETZER C, et al. Data aggregation and roadside unit placement for a VANET traffic information system[C]//Proc of the 5th International Workshop on Vehicular Inter-Networking. New York: ACM Press, 2008: 58-65.
- [7] STIBOR L, ZANG Yun-peng, REUMERMAN H J. Evaluation of communication distance of broadcast messages in a vehicular Ad hoc network using IEEE 802. 11p[C]//Proc of IEEE Wireless Communications and Networking Conference. 2007: 254-257.

- [8] RATSCHER H. Robustness in GIS algorithm implementation with application to line simplification[J]. *Geographical Information Science*, 2001, 15(8): 707-720.
- [9] PEUCKER D. Algorithm for the reduction of number of points required to represent a digitized line or its caricature[J]. *Canadian Cartographer*, 1973, 10(2): 112-122.
- [10] 张久红. 面向城市实时交通互助系统的行为仿真与故障模拟技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [11] 赵亮, 陈华, 景宁, 等. 道路网中的移动对象连续 K 近邻查询[J]. *计算机学报*, 2010, 33(8): 1396-1404.