

基于 CCCII 的多涡卷混沌电路设计及实现

王宇珍, 彭良玉

(湖南师范大学 物理与信息科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘 要: 提出了一种基于第二代电流控制电流传输器(CCCII)实现多涡卷混沌吸引子的方法. 首先, 分析了 Jerk 双涡卷混沌系统的基本动力学特性; 其次, 在双涡卷 Jerk 混沌电路的基础上, 构建了基于 CCCII 的阶跃函数序列电路, 并利用此非线性函数电路来扩展双涡卷 Jerk 混沌电路的指标 2 的鞍焦平衡点, 设计了多方向的多涡卷混沌电路, 而且设计的混沌电路能在高速高频环境中应用; 最后, 通过硬件电路实验验证了该方法的可行性.

关键词: 多涡卷混沌吸引子; Jerk 系统; 第二代电流控制电流传输器; 阶跃函数

中图分类号: TN431.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2015)03-0156-05

The Design and Implementation of Multi-scroll Chaotic Circuit Based on CCCII

WANG Yu-zhen, PENG Liang-yu

(College of Physics and Information, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

Abstract: In this paper, we propose a new method of generating multi-scroll chaotic attractors base on CCCII. Firstly, some basic dynamical properties of Jerk double-scroll chaotic system are studied. Furthermore, we construct the SNFS with CCCII and design the multi-scroll chaotic system by using this circuit based on the double scroll chaotic Jerk circuit. By analyzing the characteristics of CCCII we could learn that the circuit can work in a higher frequency range and the structure of the circuit is simple. Finally, the effectiveness of this method is verified by the Pspice simulation results of the circuit.

Key words: Multi-scroll chaotic attractors; Jerk system; CCCII; SNFS

1 引言

混沌现象自被发现以来, 就受到了众多学者的重视, 并对其进行了深入的探讨与研究. 多涡卷混沌吸引子, 与单涡卷混沌吸引子相比, 具有更复杂的电路结构及动力学行为且有多个螺旋密钥的特点, 因而在神经网络、数字水印、保密通信及流体力学等领域有着非常广泛的应用前景^[1-3]. 自从单方向的多涡卷混沌电路被 Suykens 等人成功地构造出来后^[4], 众学者及工程师们通过构造不同的非线性函数, 诸如多分段线性函数、阶梯波序列、正弦函数、时滞函数、饱和函数、多项式等在不同的混沌系统上实现了单方向、数量有限的多涡卷混沌吸引子电路的设

计^[5-8]. 为将多涡卷混沌吸引子扩展到多个方向, Yalcin 等学者^[9]利用阶跃函数在蔡氏电路基础上成功地构造了网格多涡卷混沌电路. 之后, 多方向多涡卷混沌吸引子的研究成为了学者们热衷的混沌研究方向, 他们利用运算放大器、跨导放大器、电流传输器及集成电路等元器件成功地构造了形式多样的多涡卷混沌电路^[10-13]. 其中, 因电流传输器具有良好的频率增益特性及端口特性, 成为研究混沌电路的重要电流模式器件, 且由其构成的混沌电路具有结构简单、功能强大、使用灵活的特点, 更重要的是它不需像运放电路那样要考虑增益与带宽之间的关系. 目前, 基于电流传输器实现的混沌电路大部分是单方向的, 而多方向的鲜有报道. 如文献^[13]中利用

电流传输器实现了单方向的 5 涡卷混沌吸引子电路,不过因电流传输器是用集成电路构成的,故该混沌电路结构复杂且用硬件实现困难;文献[14]中通过利用传输器构造饱和函数的方法实现了 3~4 个涡卷的混沌电路,但该电路不利于混沌吸引子在多方向上的扩展。

本文以第二代电流控制电流传输器(CCCII)为基本电路模块以及二极管、电阻、电容等基本元器件,实现单方向及网格多涡卷混沌吸引子。

2 多涡卷混沌系统动力学特性分析研究

根据文献资料可知,在经典 Chua 电路及 Jerk 系统基础上,利用非线性函数扩展系统的指标 2 的鞍焦平衡点便可构成多方向分布的多涡卷混沌系统。现以双涡卷 Jerk 系统为基础,通过设计能扩展系统指标 2 的鞍焦平衡点的非线性函数(如阶跃函数序列),来对其构造的多涡卷混沌电路进行相应的混沌特性分析。一维多涡卷混沌系统的无量纲状态方程一般表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = y \\ \dot{y} = z \\ \dot{z} = -x - y - \alpha z + f(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中, x, y, z 是混沌系统的状态变量, α 是系统参数, $f(x)$ 是阶跃函数序列,其表达式如式(2)、(3)所示:

$$f(x) = A \operatorname{sgn}(x) + A \sum_{n=1}^N \operatorname{sgn}(x - 2nA) + A \sum_{n=1}^N \operatorname{sgn}(x + 2nA) \quad (2)$$

或

$$f(x) = A \sum_{n=1}^N \operatorname{sgn}(x - (2n-1)A) + A \sum_{n=1}^N \operatorname{sgn}(x + (2n-1)A) \quad (3)$$

式中, A 是一个大于零的可调参数,它的大小可以控制产生的涡卷的大小,值越小,涡卷就越小;而参数 N 可控制涡卷个数的多少,式(2)一般用来产生 $(2N+2)$ 偶数个涡卷,而式(3)用来产生 $(2N+1)$ 奇数个涡卷。

当选择合适的 α 值时,该系统便可在一定的范围内产生单方向的多涡卷混沌吸引子。图 1、图 2 中给出了该系统随 α 变化时的分岔图及系统的最大 Lyapunov 指数图,从图中可以看出, $\alpha \in (0, 1]$ 的区

间内,式(1)所示的系统处于混沌状态。

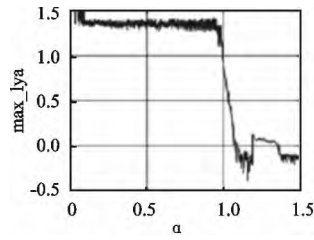


图 1 随 α 变化的最大 Lyapunov 指数

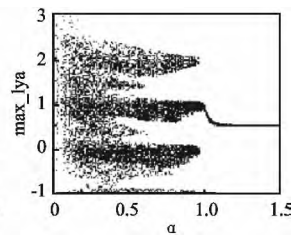


图 2 随 α 变化的混沌系统分岔图

基本动力学分析如下所示。

(1) 对称性

根据式(1),对其做如下变换: $(x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$ 。可知该系统方程保持不变,但方向与之前的相反,其相图是关于原点对称的。

(2) 耗散性

对于式(1),可计算得出

$$\nabla \cdot V = \frac{\partial \dot{x}}{\partial x} + \frac{\partial \dot{y}}{\partial y} + \frac{\partial \dot{z}}{\partial z} = -\alpha \quad (4)$$

根据耗散系统的相关知识可知,当 $\alpha > 0$ 时,式(1)所示的系统是耗散的,系统经过多次迭代后最终会固定在一个混沌吸引子上。

(3) 稳定性

根据平衡点的概念,令式(1)的左边为 0,得系统的平衡点方程:

$$\begin{cases} y = 0 \\ z = 0 \\ -x - y - \alpha z + f(x) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其对应的 Jacobi 矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \quad (6)$$

若取 $\alpha = 0.6$,则其混沌系统 Jacobi 矩阵对应的特征值为

$$\lambda_1 = -0.8356, \lambda_{2,3} = 0.1178 \pm 1.0876i,$$

可知它满足 Shilnikov 定理,因而该系统的相轨迹能在平衡点处形成向外扩展的涡卷运动。

在式(1)的基础上,若利用非线性函数同时扩展 y 方向或 y 和 z 两个方向上的指标 2 鞍焦平衡点,且根据非线性函数表达式的不同,则可形成任意数的二维或三维多涡卷混沌吸引子,即网格多涡卷混沌系统,其系统的状态方程如式(7)及式

(8) 所示.

$$\begin{cases} \dot{x} = y - f(y) \\ \dot{y} = z \\ \dot{z} = -\alpha[x - f(x)] - \alpha[y - f(y)] - \alpha z \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = y - f(y) \\ \dot{y} = z - f(z) \\ \dot{z} = -\alpha[x - f(x)] - \alpha[y - f(y)] - \alpha[z - f(z)] \end{cases} \quad (8)$$

3 多涡卷混沌电路的模块化设计及仿真结果

由上述对 Jerk 系统的分析可知,当系统参数 α 的取值合适时,利用非线性函数可以扩展 Jerk 系统的指标 2 的鞍焦平衡点,从而使系统产生多涡卷混沌吸引子.而常用的非线性函数产生电路从报道来看,大多基于运算放大器这种电压模式电子元件,使其在高频高速环境中的应用领域受到了限制.电流传输器作为一种既具有良好高频特性,又有良好的通用性和灵活性的电流模式电子元件,在电子电路设计领域受到了广大国内外学者的关注.现以电流传输器为基本电路单元构造阶跃函数序列,并用模块化设计的方法实现多涡卷混沌信号产生电路的设计.根据混沌系统的状态方程及模块化设计方法可知,混沌信号产生电路主要由以下几部分电路单元构成:比例运算电路单元、积分器、反向运算单元及非线性函数电路单元.

3.1 基于 CCCII 的阶跃函数序列单元电路设计

首先,我们分析基于 CCCII 构造的饱和函数产生电路,如图 3 所示.其中,电压源 E_{x1} 表示转折点电压;电压源 E_{x2} 则用来控制函数曲线的移动;而输出电阻 R 及 CCCII 端的寄生电阻 R_x 共同用来控制输出电压的大小.图 3 中 CCCII_{x3} 极性与 CCCII_{x1}、CCCII_{x2} 的相反.根据 CCCII 的端口特性及二极管的单向导电性,对图 3 所示的电路分析可知(令 $E_{x2} = 0$):当输入电压 $V_{in} \in [-E_{x1}, E_{x1}]$ 时,图 2 中的两个二极管均导通,从而得到输出 $V_{out} = \frac{R}{R_x} V_{in}$;而当输入电压 $V_{in} \in [E_{x1}, \infty]$ 或 $V_{in} \in [-\infty, -E_{x1}]$ 时,两

个二极管中只有一个导通,得出输出电压是一个稳定的值,即 $V_{out} = \pm \frac{R}{R_x} E_{x1}$,它不随输入的变化而变化.若将转折点 E_{x1} 的取值趋近 0,调节输出电阻 R 及 R_x 的值使饱和函数线性部分的斜率很大,图 2 所示的电路结构便可产生输入——输出特性为阶跃函数的非线性函数.若将多个如图 2 所示结构的电路单元并联在一起,便形成了阶跃函数序列产生电路.

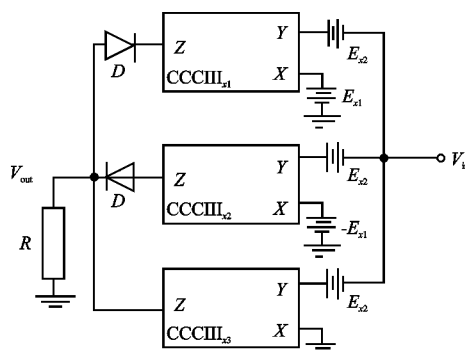


图 3 阶跃函数序列产生电路

3.2 基于 CCCII 的比例运算单元及积分器

由 CCCII 构造的比例运算单元及积分电路如图 4 所示.根据 CCCII 的端口特性,令图 4(a) 中的 $R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_{in}$,可得比例运算单元电路的输入输出关系为: $V_{out} = \pm \frac{R}{nR_x} (V_{i1} + V_{i2} + \dots + V_{in})$;而图 4(b) 所示的积分电路其输入输出关系为: $V_{out} = \pm \frac{V_{in}}{sR_x C}$. (式中的 $\pm$ 由 CCCII 的极性决定, R_x 表示 CCCII 端的寄生电阻 $s = j\omega$)

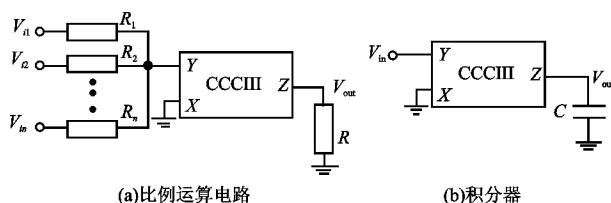


图 4 CCCII 构成的比例运算电路及积分器

3.3 多涡卷混沌电路的设计与实现

根据模块化法设计的三方向立体分布的网格多涡卷混沌电路如图 5 所示.图 5 中电路结构大概可以分为 4 部分:

- (1) CCCII 实现的非线性函数(阶跃函数序列);
- (2) 由 CCCII_{i1} ($i = 1, 2, 3$) 构成的比例运算

单元;

(3) 由 $\text{CCCII}_{i2} (i=1,2,3)$ 构成的积分电路;

(4) 由 $\text{CCCII}_{i3} (i=1,2,3)$ 构成的反相器。

以上四部分单元电路根据混沌电路的状态方程按照模块化设计要求有机的组合在一起,形成了能产生多涡卷混沌吸引子的混沌电路.若要构造单方向或二方向分布的多涡卷混沌吸引子,则只需根据状态方程调整图5中相应的支路模块,同时适当地调整电路参数即可。

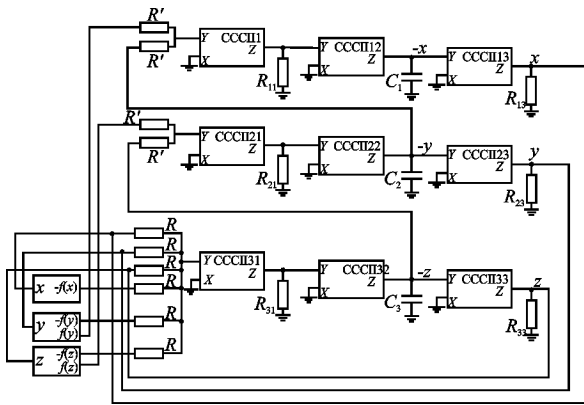
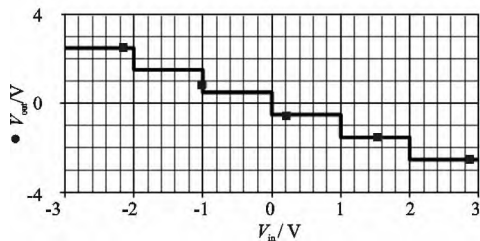


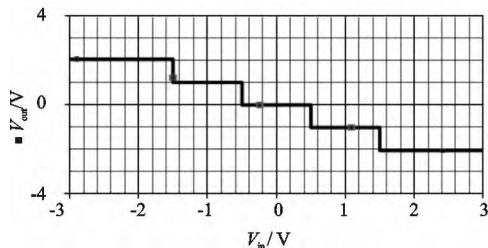
图5 基于 CCCII 实现的多涡卷混沌电路

4 电路实验仿真结果

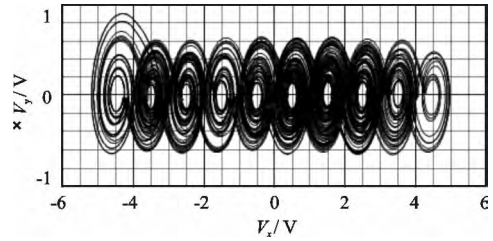
根据阶跃函数序列表达式的不同,选取合适的系统参数及元器件值,对图5所示的电路及单方向或二方向多涡卷混沌电路进行相应的 Pspice 仿真.图6中给出了相应的阶跃函数序列曲线图及多涡卷混沌吸引子的相图。



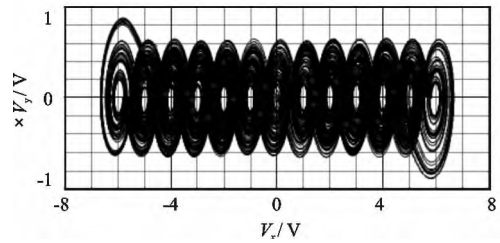
(a)6 涡卷阶跃序列函数曲线



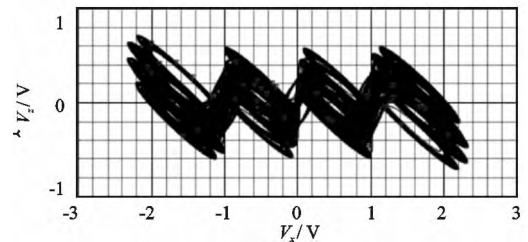
(b)5 涡卷阶跃序列函数曲线



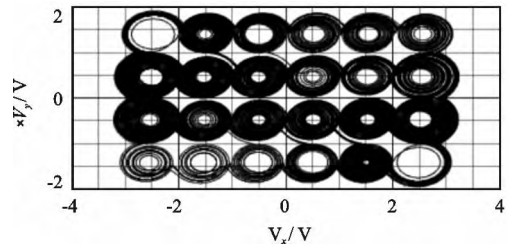
(c)10 涡卷 V_x-V_y



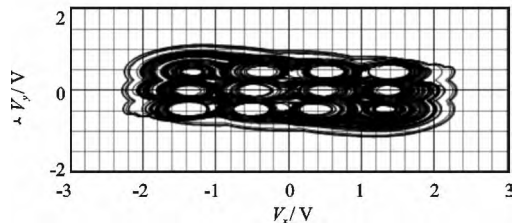
(d)13 涡卷 V_x-V_z 相图



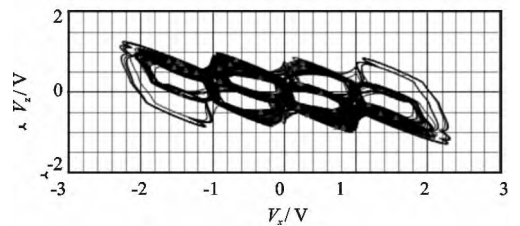
(e)4×2 二方向分布 V_x-V_z 相图



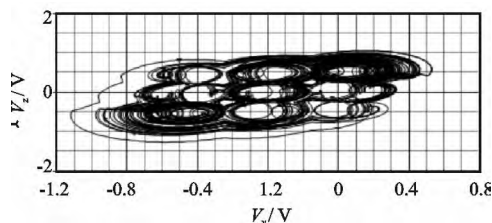
(f)6×4 二方向分布 V_x-V_y 相图



(g)4×3×3 三方向分布 V_x-V_y 相图



(h)4×3×3 三方向分布 V_x-V_z 相图



(j) $4 \times 3 \times 3$ 三方向分布 V_y-V_z 相图

图 6 基于 CCCII 实现的多涡卷混沌电路仿真结果

5 结束语

利用第二代电流控制电流传输器构造了阶跃函数序列电路,并利用此非线性函数依据模块化设计方法设计了单方向、二方向分布及三方向分布的多涡卷混沌吸引子电路.分析该混沌电路的动力学特性,包括其随系统参数变化时的分岔图及最大 Lyapunov 指数,同时也通过 Pspice 软件对构造的硬件电路进行了仿真验证,证实了这一方案的可行性.基于 CCCII 构造的混沌电路与基于运算放大器构造的混沌电路相比,它具有如下优点:①因电流传输器的带宽与增益无直接的联系,其具有很好的高频特性,因而能够得到更高频率的混沌吸引子;②电路结构简单且使用的元器件少,同时可以通过调节电路参数方便控制混沌过程;③使用考虑了寄生参数的 CCCII,使得电路实现与理论分析更接近.

参考文献:

- [1] 吕金虎,陆君安,陈士华.混沌时间序列分析及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2002:1-183.
- [2] Lorenz E N. Deterministic nonperiodic flow [J]. J Atmos Sci, 1963(20):130-141.
- [3] 张旭,唐国宁.基于多涡卷混沌系统的数字保密通信方案[J].计算机应用,2009,29(12):89-91.
- [4] Suykens J A K, Vandewalle J. Quasilinear approach to nonlinear systems and design of n-double scroll($n=1, 2, 3, 4, \dots$) [J]. Inst Elect Eng Proc G, 1991,138(5): 595-603.
- [5] 常文利,王新新.蔡氏电路的计算机仿真研究[J].兰

州铁道学院学报,2002,21(6):17-20.

- [6] Simin Yu, Shuisheng Qiu, Qinghua Lin. New results of study on generating multiple-scroll chaotic attractors [J]. Science in china series F: information sciences, 2003,46(2):104-115.
- [7] Tang K S, Zhong G Q, Chen G, et al. Generation of n-scroll attractors via sine function[J]. IEEE Trans Circuits Syst I, Fundam Theory Appl, 2001, 48 (11): 4-12.
- [8] Zhang G, Man K F, Chen G. A systematic approach to generating n-scroll attractors[J]. Int J Bifurc Chaos, 2002,12(12):1-9.
- [9] Yacine M E, Suykens J A K, Vandewalle J. Families of scroll grid attractors[J]. Int J Bifurcation and chaos, 2002, 12(1):23-41.
- [10] 禹思敏.用三角波序列产生三维多涡卷混沌吸引子的电路实验[J].物理学报,2005,54(4):1500-1510.
- [11] 王春华,尹晋文,林愿.基于电流传输器的网格多涡卷混沌电路设计与实现[J].物理学报,2012, 21(61):1-8.
- [12] Yu S M, Ma Z G, Qiu S S, et al. Generation and synchronization of N-scroll chaotic and hyperchaotic attractors in four-order systems[J]. Chinese Physics, 2004,13(3): 317-328.
- [13] Yalcin M E, Suykens J, Vandewalle J. Experimental confirmation of 3- and 5-scroll attractors from a generalized Chua's circuit[J]. IEEE Trans. Circuit Syst., 2000,47(3):425-429.
- [14] Z Zhang, G R Chen, S M Yu. Hyperchaotic signal generation via DSP for efficient perturbations to liquid mixing[J]. International Journal of Circuit Theory and Applications, 2009, 37(1): 31-41.

作者简介:

王宇珍 女,(1989-),士研究生.研究方向为有源滤波器设计. E-mail:15638460@qq.com

彭良玉 女,(1965-).研究方向为信号处理和有源滤波器设计.