

一个超混沌系统及其分数阶电路仿真实验

刘崇新

(西安交通大学电气工程学院, 电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

(2007 年 2 月 19 日收到, 2007 年 5 月 31 日收到修改稿)

提出了一个新的四维自治超混沌系统, 对其基本动力学特性进行了数值仿真和深入的研究. 运用 EWB 软件对实现该超混沌系统的分数阶振荡器电路进行了仿真实验证实.

关键词: 分数阶超混沌系统, 动力学行为, 分数阶电路

PACC: 0545, 4265

1. 引 言

分数阶微积分是研究分数阶次的微积分算子特性及其应用的数学理论, 它几乎与整数阶微积分理论具有同样长的发展历史, 但由于分数阶微积分理论长期没有实际应用背景而发展缓慢. 1983 年, 文献 [1] 首次指出了自然界及许多科学技术领域中存在大量的分维数的事实, 且在整数阶微积分与分数阶微积分理论描述的动力学系统之间存在着自相似现象. 此后, 作为分形几何和分维数的动力学基础, 分数阶微积分才重新获得了新的发展而成为当前国际上的一个研究热点, 并在电磁振荡、系统控制、材料力学等领域得到了有效的应用.

近年来, 分数阶混沌系统的电路实现及其应用已引起人们广泛的兴趣和深入的研究. 整数阶微积分是分数阶微积分理论的特例, 整数阶混沌系统都是对实际混沌系统的理想化处理^[2]. 分数阶微积分是整数阶微积分理论的推广, 利用分数阶微积分算子能更准确地描述实际混沌系统的动力学特性. 特别是在最近, 在 Lorenz 混沌系统、Chua's 混沌系统、Chen 混沌系统、Liu 混沌系统以及 Rössler 超混沌系统中, 通过计算机数值仿真, 发现当系统的阶数为分数时仍然出现混沌状态, 且更能反映系统呈现的工程物理现象^[3-5]. 这促进了人们利用分数阶微积分理论更深入地研究混沌这一自然界普遍存在的物理现象, 也促进了分数阶微积分理论的发展.

本文提出了一个新的四维自治超混沌系统, 对其超混沌特性和复杂动力学行为进行了理论分析. 应用分数阶微积分理论, 基于 EWB 软件, 对这个新

的超混沌系统设计了分数阶振荡器电路, 并进行了电路仿真实验验证. 结果表明, 这个新的超混沌系统的分数阶振荡器电路仿真实验与数值分析结果相符. 通过分数阶超混沌振荡器电路仿真实验证实了分数阶超混沌系统的存在性, 也证实了超混沌系统固有的更为复杂的分数阶非线性动力学特性, 为分数阶微积分理论在超混沌振荡器电路设计与研究中的应用提供了实例. 分数阶微积分理论在超混沌理论中的应用将会使超混沌在航空航天、自动控制、检测技术、自然灾害预测等不同学科和各种工程技术领域里得到更为广泛的应用^[6].

2. 基本分析

在分数阶微积分理论发展过程中, 共有若干种定义^[7], 但是最常用的是 Riemann-Liouville 定义的分数阶微积分, 其数学表达式如下:

$$\frac{d^q f(t)}{dt^q} = \frac{1}{\Gamma(n-q)} \frac{d^n}{dt^n} \int_0^t \frac{f(\tau)}{(t-\tau)^{q-n+1}} d\tau, \quad (1)$$

其中 $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数, $n-1 < q < n$, q 为分数, n 为整数. (1) 式是分数阶微分和分数阶积分的统一表示, 它显示了分数阶微积分具有记忆功能, 因此分数阶微积分更适合于电路系统特性的描述. (1) 式的拉普拉斯变换表达式为

$$L\left\{\frac{d^q f(t)}{dt^q}\right\} = s^q L\{f(t)\} - \sum_{k=0}^{n-1} s^k \left[\frac{d^{q-1-k} f(t)}{dt^{q-1-k}} \right]_{t=0}. \quad (2)$$

若时域函数 $f(t)$ 的初始值均为零, 则 (2) 式可表示为

$$L\left\{\frac{d^q f(t)}{dt^q}\right\} = s^q L\{f(t)\}. \quad (3)$$

在实际计算中,实施分数阶微积分运算的求解方法有多种,但目前工程中最常用的是时域与复频域转换法.通过求解复频域的传输函数 $1/s^q$,得到复频域的展开形式,再将复频域形式转化为时域形式进行数值求解.文献 [8] 介绍了一种用波德图形逼近法来确定 $1/s^q$ 的展开式.文献 [9] 推导出 q 从 0.1 到 0.9 的 $1/s^q$ 展开式.在本文中,我们根据近似误差为 2 dB 的 $1/s^q$ 展开式,设计了实现 q 从 0.1 到 0.9 的 $1/s^q$ 展开式的单元电路,如图 1 所示.图 1 中 A 与 B 之间的等效电路的复频域表达式为

$$H(s) = \frac{1/C_1}{s + 1/R_1 C_1} + \frac{1/C_2}{s + 1/R_2 C_2}$$

$$H(s) = \frac{1/C_a}{s + 1/R_a C_a} + \frac{1/C_b}{s + 1/R_b C_b} + \frac{1/C_e}{s + 1/R_e C_e}$$

$$= \frac{1}{C_0} \frac{\left(\frac{C_0}{C_a} + \frac{C_0}{C_b} + \frac{C_0}{C_e} \right) \left[s^2 + \frac{\left(\frac{C_b + C_e}{R_a} + \frac{C_a + C_e}{R_b} + \frac{C_a + C_b}{R_e} \right) s + \frac{R_a + R_b + R_e}{R_a R_b R_e} \right]}{(s + 1/R_a C_a) (s + 1/R_b C_b) (s + 1/R_e C_e)}$$

式中 C_0 为单位参数.若 $C_0 = 1 \mu\text{F}$, 则

$$H(s) = F(s) C_0.$$

对于 $F(s) = 1/s^{0.9}$ 时,将上式与文献 [9] 中

$$\frac{1}{s^{0.9}} \approx \frac{2.2675(s + 1.292)(s + 215.4)}{(s + 0.01292)(s + 2.154)(s + 359.4)}$$

进行比较,从图 2 可得 $R_a = 62.84 \text{ M}\Omega$, $R_b = 250 \text{ k}\Omega$, $R_e = 2.5 \text{ k}\Omega$, $C_a = 1.232 \mu\text{F}$, $C_b = 1.835 \mu\text{F}$, $C_e = 1.1 \mu\text{F}$.这样,我们就得到了 $n = 3$, $F(s) = 1/s^{0.9}$ 时的分数阶单元电路的元件参数值,从而就可以根据分数阶单元电路构造超混沌振荡器电路.

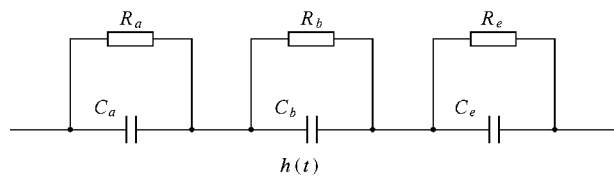


图 2 实现 $1/s^{0.9}$ 的单元电路

在此,我们提出一个新的超混沌系统.超混沌振荡通常发生在四维以上的非线性自治动力学系统和三维以上的非自治动力学系统,超混沌系统的重要特征是系统至少具有两个或两个以上正的 Lyapunov 指数,因而称为超混沌系统.超混沌系统能产生更为复杂的非线性动力学行为,表现出更为复杂的非线性

$$+ \frac{1/C_3}{s + 1/R_3 C_3} + \dots + \frac{1/C_n}{s + 1/R_n C_n}. \quad (4)$$

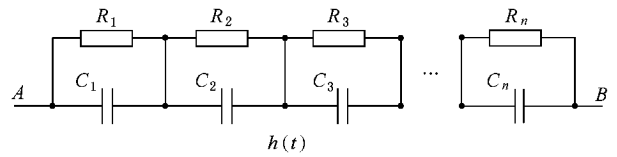


图 1 实现 $1/s^q$ 的单元电路

当分数阶微积分 (1) 式中的 $n = 3$, $q = 0.9$ 取 $1/s^q$ 波特图近似值的最大误差为 2 dB, 则可实现 $1/s^{0.9}$ 的单元电路如图 2 所示.从图 2 中可以得到 A 与 B 之间的传递函数 $H(s)$ 为

性动力学特性.描述这个新的超混沌系统的状态方程组为

$$\frac{dx_1}{dt} = -ax_1 + by_1 z_1 + mz_1,$$

$$\frac{dy_1}{dt} = ey_1 - hx_1 z_1,$$

$$\frac{dz_1}{dt} = kx_1 y_1 - cz_1 - gw_1,$$

$$\frac{dw_1}{dt} = -dx_1. \quad (5)$$

在 (5) 式中我们令 $a = 10$, $m = 1$, $b = 1$, $e = 2.5$, $h = 1$, $k = 1$, $g = 2$, $c = 4$, $d = 0.25$ 系统有三个非线性项,有四个状态变量,分别为 x_1 , y_1 , z_1 和 w_1 .为了求其平衡点,我们令

$$-ax_1 + ey_1 z_1 + mz_1 = 0,$$

$$ey_1 - hx_1 z_1 = 0,$$

$$kx_1 y_1 - cz_1 - gw_1 = 0,$$

$$-dx_1 = 0. \quad (6)$$

求解 (6) 式,可得系统的平衡点为 $O(0, 0, 0, 0)$.在这个系统中仅有一个平衡点,这是该超混沌系统的一个显著特点.

在平衡点 $O(0, 0, 0, 0)$ 对 (5) 式进行线性化,得系统 Jacobi 矩阵为

$$J_0 = \begin{bmatrix} -a & bz_1 & m + by_1 & 0 \\ -hz_1 & e & -hx_1 & 0 \\ ky_1 & kx_1 & -c & -g \\ -d & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} -10 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 2.5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -4 & -2 \\ -0.25 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

为了求解(5)式相应的特征根,令

$$\det(J_0 - \lambda I) = 0,$$

得系统特征根为 $\lambda_1 = 0.0124, \lambda_2 = 2.5, \lambda_3 = -9.9916, \lambda_4 = -4.0208$. 可见 λ_1 和 λ_2 是正实数, 而 λ_3 和 λ_4 则为负实数, 因此平衡点 $O(0, 0, 0, 0)$ 为鞍点. 显然, 平衡点 $O(0, 0, 0, 0)$ 是不稳定的.

由于超混沌运动具有局部不稳定和整体稳定的特征, 因此取任意初始值, 都可以得到几乎完全相同的长时间的系统定常运动状态行为. 在数值分析时, 我们选系统的初始值为 $(2.4, 2.2, 0.8, 0)$, 则系统是超混沌的. 这个新超混沌吸引子的三维图像如图 3 所示. 此超混沌吸引子在 $x-z, x-y, y-z$ 和 $x-w$ 平面的相图分别如图 4、图 5、图 6 和图 7 所示. 轨线在系统的吸引域内具有遍历性, 因此超混沌吸引子是整体稳定和局部不稳定的产物, 轨道在相空间的表现是伸长和折叠^[10-12]. 这个超混沌系统的奇怪吸引子与 Lorenz 发现的第一个蝴蝶型吸引子形状完全不同, 也与近年来发现的 Chen 吸引子、Li 吸引子以及最近报道的 Liu 吸引子也不同, 它们均有三个平衡点. 而本文提出的这个新超混沌系统却存在一个平衡点, 因此这个新超混沌系统的拓扑结构与上述发现的一般混沌系统拓扑结构完全不同, 当参数 a 或 c 变化时, 它表现出更为复杂的非线性超混沌动力学行为.

超混沌运动的一个基本特性就是运动对系统的初始条件极为敏感, 两条极靠近的系统轨线之间的距离随时间按指数速率相互分离. Lyapunov 指数就是在混沌系统中定量地描述状态空间混沌吸引子的相邻轨线收缩或扩张的量. 通过计算, 系统中两个正的 Lyapunov 指数分别为 $L_1 = 0.4675, L_2 = 0.0152$. 由此可见, 这个非线性系统是一个超混沌系统. 而系统的两个负的 Lyapunov 指数分别为 $L_3 = -11.9512$ 和 $L_4 = -0.0275$. 这个新的超混沌系统的 Lyapunov 维数 D_L 表示为

$$D_L = j + \frac{1}{|L_{j+1}|} \sum_{i=1}^j L_i$$

$$= 3 + \frac{(L_1 + L_2)}{|L_3 + L_4|}$$

将 Lyapunov 指数代入后计算可得 $D_L = 3.04$. 由此可知, 这个新的超混沌系统的维数是分数维数.

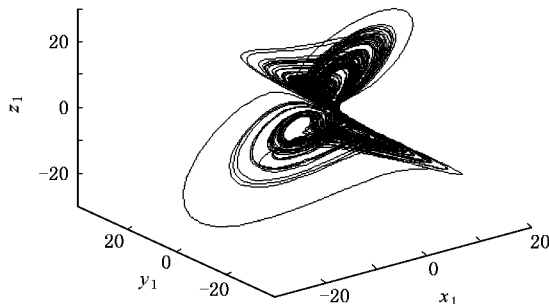


图 3 超混沌系统的奇怪吸引子

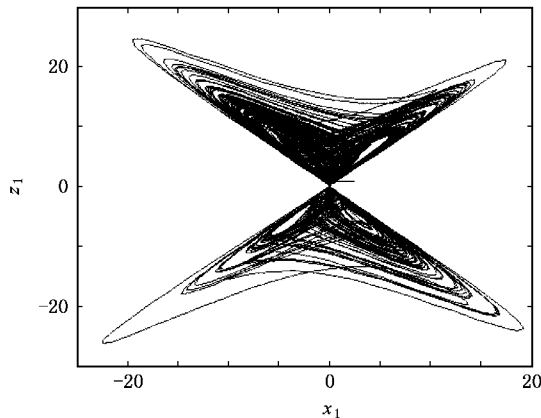


图 4 $x-z$ 平面奇怪吸引子

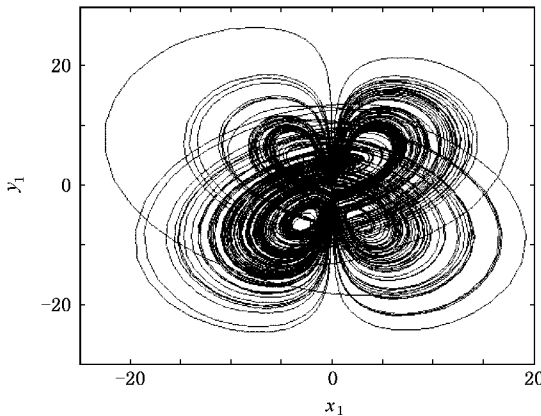


图 5 $x-y$ 平面奇怪吸引子

当系统参数 c 改变时, 系统的分岔变化如图 8

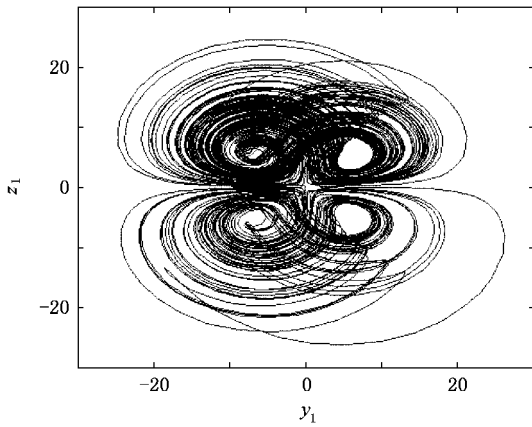


图 6 y_1 - z_1 平面奇怪吸引子

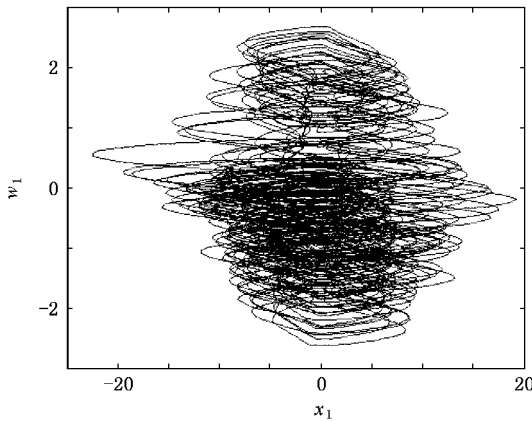


图 7 x_1 - w_1 平面奇怪吸引子

性. 它的时域波形如图 9 所示. 而它的频谱是连续谱, 系统频谱如图 10 所示.

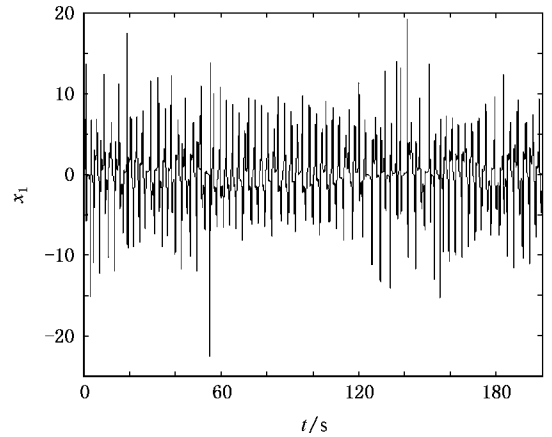


图 9 $x_1(t)$ 的时域波形

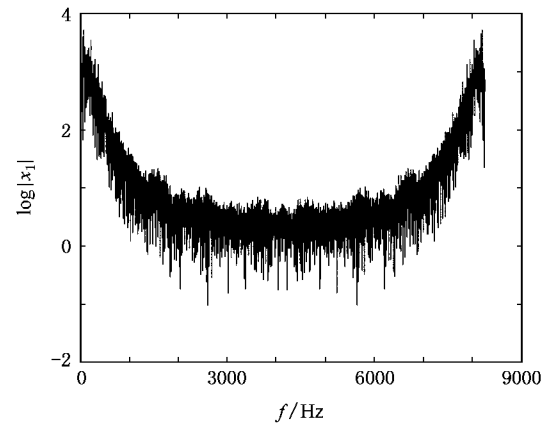


图 10 系统的频谱

所示.

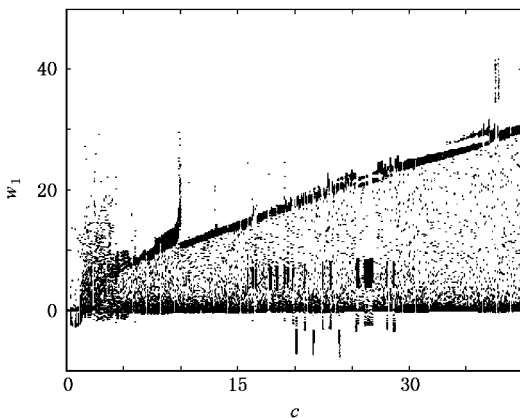


图 8 参数 c 改变时系统的分岔图

该超混沌系统振荡的时域波形具有非周期性, 解的对初始值极为敏感, 当初始值改变后, 超混沌振荡就立即消失, 这也是超混沌振荡的一个基本特

该超混沌系统是一个耗散系统, 由方程组(5)可得 $\nabla V = \frac{\partial \dot{x}_1}{\partial x_1} + \frac{\partial \dot{y}_1}{\partial y_1} + \frac{\partial \dot{z}_1}{\partial z_1} + \frac{\partial \dot{w}_1}{\partial w_1} = -(a - e + c) = -11.5$. 这意味着, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, 包含这个超混沌系统轨迹的每个体积元均以指数速率 $-(a - e + c)$ 收敛到零. 事实上, 随着时间的推移, 这个超混沌系统的轨迹渐近运动最终将安居到一个特定的零体积的极限集中, 即一个吸引子上.

通过上述理论分析和数值仿真证明了这个新系统确实是一个超混沌系统^[13, 14].

3. 系统的整数阶振荡器电路和分数阶振荡器电路实现

我们对本文所提出的超混沌系统应用 EWB 软

件进行了振荡器电路设计^[11-14]，由于 EWB 软件采用的是实际电路元件模型，所以 EWB 软件平台被国际公认为是基于计算机仿真的电路设计实验仿真平台。基于 EWB 设计的电路由三个部分构成。LM741

型电子集成运算放大器、AD633 型电子模拟乘法器、线性电阻和电容器等用来执行加、减、乘法和微分运算，并将四个状态变量 x_1, y_1, z_1 和 w_1 连接成一个整体，其整数阶电路如图 11 所示。

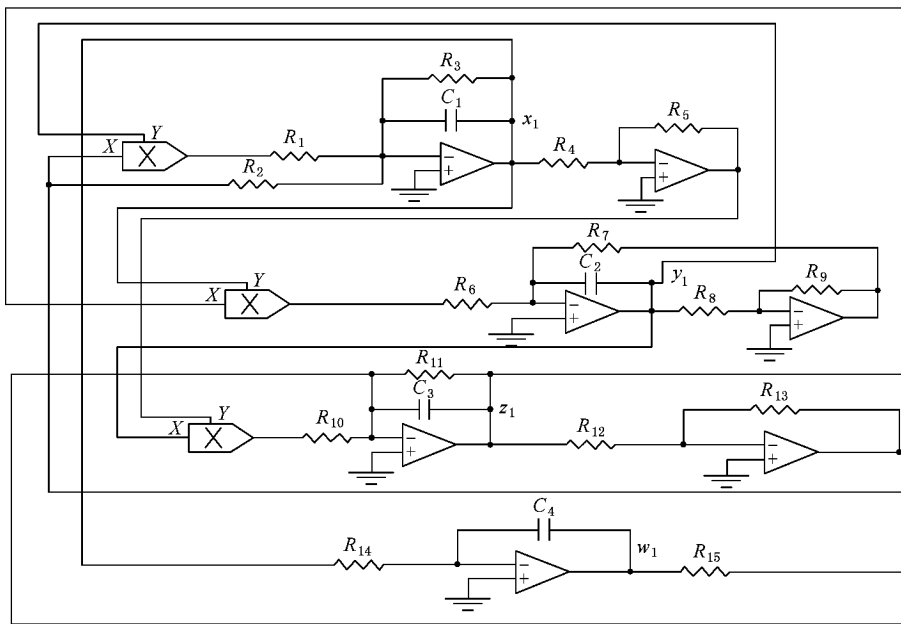


图 11 超混沌系统的整数阶振荡器电路

整数阶振荡器的电路方程为

$$\begin{aligned} \frac{du_{c_1}}{dt} &= -\frac{1}{R_3 C_1} u_{c_1} + \frac{R_{13}}{10R_1 R_{12} C_1} u_{c_2} u_{c_3} \\ &\quad + \frac{R_{13}}{R_2 R_{12} C_1} u_{c_3}, \\ \frac{du_{c_2}}{dt} &= \frac{R_9}{R_7 R_8 C_2} u_{c_2} - \frac{1}{10R_6 C_2} u_{c_1} u_{c_3}, \\ \frac{du_{c_3}}{dt} &= \frac{R_5}{10R_{10} R_4 C_3} u_{c_1} u_{c_2} - \frac{1}{R_{11} C_3} u_{c_3} \\ &\quad - \frac{1}{R_{15} C_3} u_{c_4}, \\ \frac{du_{c_4}}{dt} &= -\frac{1}{R_{14} C_4} u_{c_1}. \end{aligned} \quad (7)$$

这里电阻值分别取为 $R_1 = 100 \text{ k}\Omega, R_2 = 1000 \text{ k}\Omega, R_3 = 100 \text{ k}\Omega, R_4 = 10 \text{ k}\Omega, R_5 = 10 \text{ k}\Omega, R_6 = 100 \text{ k}\Omega, R_7 = 400 \text{ k}\Omega, R_8 = 10 \text{ k}\Omega, R_9 = 10 \text{ k}\Omega, R_{10} = 100 \text{ k}\Omega, R_{11} = 250 \text{ k}\Omega, R_{12} = 10 \text{ k}\Omega, R_{13} = 10 \text{ k}\Omega, R_{14} = 4000 \text{ k}\Omega, R_{15} = 500 \text{ k}\Omega$. 电容值取为 $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1 \text{ }\mu\text{F}$.

令

$$\begin{aligned} u_{c_1} &= x_1, \\ u_{c_2} &= y_1, \end{aligned}$$

$$u_{c_3} = z_1,$$

$$u_{c_4} = w_1,$$

则(7)式和(5)式是等价的。我们采用 EWB 软件对电路进行了仿真实验，仿真结果如图 12 和图 13 所示。

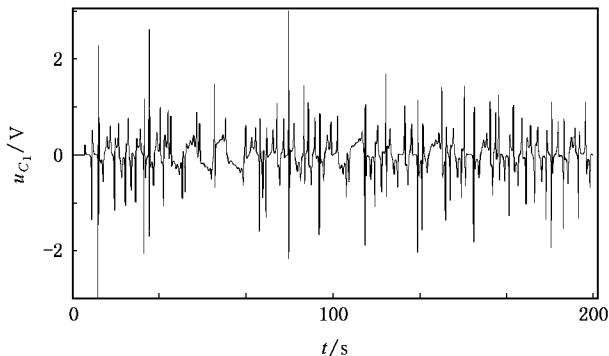


图 12 整数阶振荡器电路 EWB 仿真实验 $u_{c_1}(t)$ 时域波形

当这个超混沌系统用分数阶微积分描述时，则系统的分数阶数学模型为

$$\begin{aligned} \frac{d^q x_1}{dt^q} &= -ax_1 + by_1 z_1 + mz_1, \\ \frac{d^q y_1}{dt^q} &= ey_1 - hx_1 z_1, \end{aligned}$$

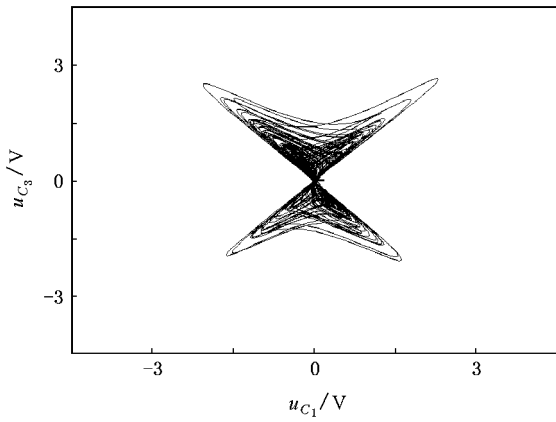


图 13 整数阶振荡器电路 EWB 仿真实验 $u_{c_1} - u_{c_3}$ (即 $x_1 - z_1$) 相图

$$\frac{d^q w_1}{dt^q} = -dx_1 \quad (8)$$

当 $q = 0.9$ 时,设计的 3.6 阶分数阶振荡器电路如图 14 所示.

超混沌系统的分数阶振荡器电路方程为

$$\frac{d^q u_{c_1}}{dt^q} = -\frac{1}{R_3 C_1} u_{c_1} + \frac{R_{13}}{10 R_1 R_{12} C_1} u_{c_2} u_{c_3} + \frac{R_{13}}{R_2 R_{12} C_1} u_{c_3} ,$$

$$\frac{d^q u_{c_2}}{dt^q} = \frac{R_9}{R_7 R_8 C_2} u_{c_2} - \frac{1}{10 R_6 C_2} u_{c_1} u_{c_3} ,$$

$$\frac{d^q u_{c_3}}{dt^q} = \frac{R_5}{10 R_{10} R_4 C_3} u_{c_1} u_{c_2} - \frac{1}{R_{11} C_3} u_{c_3} - \frac{1}{R_{15} C_3} u_{c_4} ,$$

$$\frac{d^q z_1}{dt^q} = kx_1 y_1 - cz_1 - gw_1 ,$$

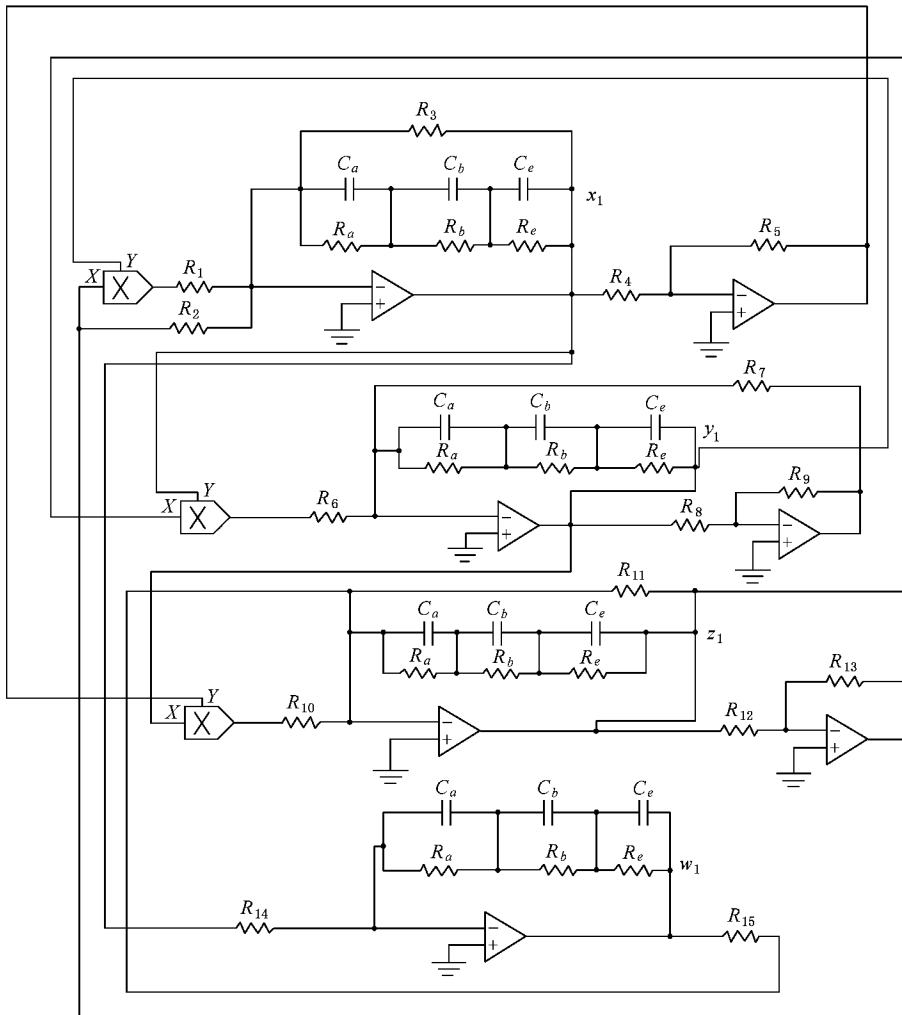


图 14 超混沌系统的分数阶振荡器电路

$$\frac{d^q u_{C_4}}{dt^q} = -\frac{1}{R_{14} C_4} u_{C_1} \quad (9)$$

从图 14 可见,我们用图 2 中实现 $1/s^{0.9}$ 的单元电路取代了图 11 中超混沌系统整数阶振荡器电路图中的电容,从而设计的电路图就实现了分数阶振荡器电路方程组(9)所描述的超混沌系统的分数阶振荡器电路的动力学行为。

对于图 14 所示超混沌系统的分数阶振荡器电路,我们应用 EWB 软件进行了仿真实验,得到的结果如图 15—图 18 所示,这个超混沌系统的分数阶振荡器电路的最小阶数为 0.4 阶。

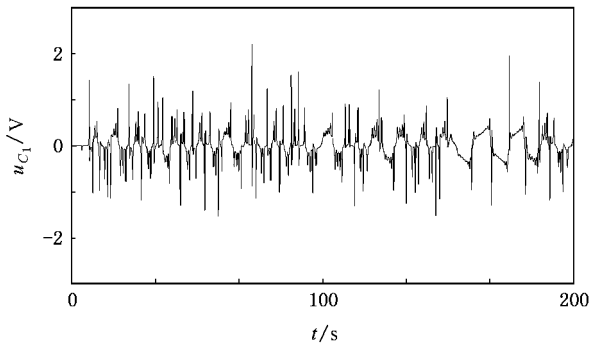


图 15 分数阶振荡器电路 EWB 仿真实验 $u_{C_1}(t)$ 时域波形

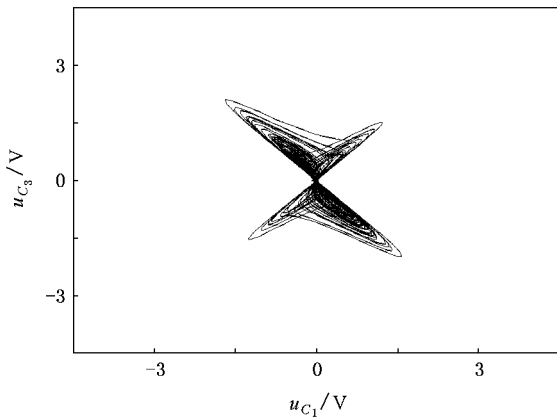


图 16 分数阶振荡器电路 EWB 仿真实验 $u_{C_1}-u_{C_3}$ (即 x_1-z_1) 相图

由于 EWB 软件采用的是实际电路元件模型,所以其仿真实验与实际电路实验应该是基本符合的。我们可以看到 EWB 仿真实验结果与数值仿真结果是基本一致的,所以仿真实验结果是有效的。

通过上述理论分析和仿真实验验证,证实了本文提出的这个非线性系统确实是一个新的超混沌系统,它显示了超混沌系统的共有特征。目前的研究进

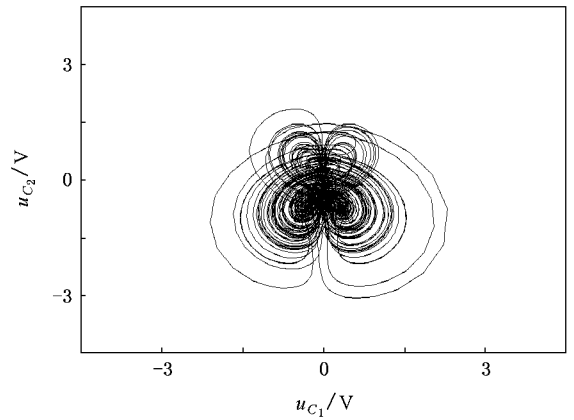


图 17 分数阶振荡器电路 EWB 仿真实验 $u_{C_1}-u_{C_2}$ (即 x_1-y_1) 相图

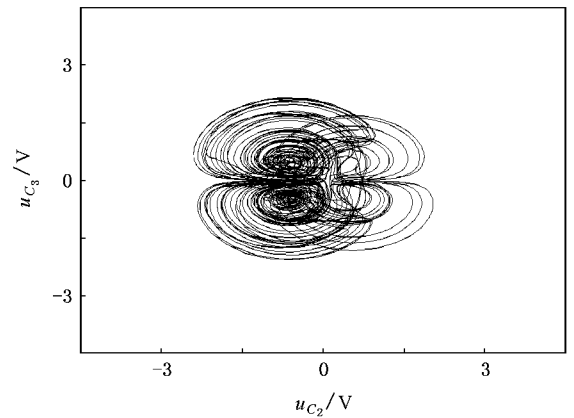


图 18 分数阶振荡器电路 EWB 仿真实验 $u_{C_2}-u_{C_3}$ (即 y_1-z_1) 相图

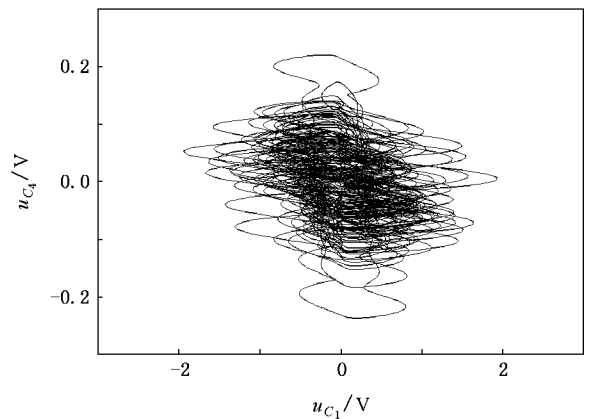


图 19 分数阶振荡器电路 EWB 仿真实验 $u_{C_1}-u_{C_4}$ (即 x_1-w_1) 相图

展表明:不是任一超混沌系统都能够用分数阶电路

来实现的,而本文的研究表明该超混沌系统能够用分数阶系统来描述,它的最低阶数只有 0.4 阶,而且能够用分数阶电路来实现^[15-18].

4. 结 论

对提出的新超混沌系统的超混沌特性和复杂动力学行为进行了理论分析,并对实现这个超混沌系统的振荡器电路做了研究.

1) 提出的新超混沌系统拓扑结构特殊,仅有一个平衡点.

2) 在这个新的超混沌系统中存在着复杂的混沌动力学行为,它具有一切超混沌系统的共有特性:确

定性、有界性、对初值的极端敏感性、长期不可预测性、两个正的最大 Lyapunov 指数、一定频率范围内的连续谱和轨道的遍历性等.

3) 这个系统可以用整数阶电子振荡器电路来实现,更重要的是它能够用分数阶系统来描述,它的最低阶数只有 0.4 阶,而且能够用分数阶电子振荡器电路来实现.分数阶系统更能反映系统的超混沌特性和系统的稳定性,因而该超混沌系统在电子测量、保密通信等领域具有潜在的极其重要的应用价值.

对这个四维自治超混沌系统复杂的动力学行为和特性、它的同步与控制及其在工程中的应用都值得深入研究和探索.

-
- [1] Mandelbort B B 1983 *The Fractal Geometry of Nature* (New York : Freeman)
- [2] Liu C X 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1198 (in Chinese) [刘崇新 2002 物理学报 **51** 1198]
- [3] Li C G , Chen G R 2004 *Chaos Solitons Fract.* **22** 549
- [4] Wang F Q , Liu C X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3922 (in Chinese) [王发强、刘崇新 2006 物理学报 **55** 3922]
- [5] Wang F Q , Liu C X 2006 *Chin. Phys.* **15** 963
- [6] Liu C X , Liu T , Liu L , Liu K 2004 *Chaos Solitons Fract.* **22** 1031
- [7] Podlubny I 1999 *Fractional Differential Equations* (New York : Academic Press)
- [8] Charef A , Sun H H , Tsao Y Y , Onaral B 1992 *IEEE Trans. Aut. Contr.* **37** 1465
- [9] Ahmad W M , Sprott J C 2003 *Chaos Solitons Fract.* **24** 1097
- [10] Tao C H , Lu J A , Lü J H 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 1497 (in Chinese) [陶朝海、陆君安、吕金虎 2002 物理学报 **51** 1497]
- [11] Tan W , Wang Y N , Zeng Z F , Huang D , Zhou S W 2004 *Chin. Phys.* **13** 459
- [12] Guan X P , He Y H , Wu J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2718 (in Chinese) [关新平、何宴辉、邬 晶 2003 物理学报 **52** 2718]
- [13] Li Y , Yu S M , Dai Q Y , Liu M H , Liu Q 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3938 (in Chinese) [李 亚、禹思敏、戴青云、刘明华、刘 庆 2006 物理学报 **55** 3938]
- [14] Liu L , Su Y C , Liu C X 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3933 (in Chinese) [刘 凌、苏燕臣、刘崇新 2006 物理学报 **55** 3933]
- [15] Wang J Z , Chen Z Q , Yuan Z Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 3956 (in Chinese) [王杰智、陈增强、袁著祉 2006 物理学报 **55** 3956]
- [16] Chen Z S , Sun K H , Zhang T S 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 2580 (in Chinese) [陈志盛、孙克辉、张泰山 2005 物理学报 **54** 2580]
- [17] Tu L L , Lu J A 2005 *Acta Phys. Sin.* **14** 1755 (in Chinese) [涂俐兰、陆君安 2005 物理学报 **14** 1755]
- [18] Lu J J , Liu C X 2007 *Chin. Phys.* **16** 1586

A hyperchaotic system and its fractional order circuit simulation

Liu Chong-Xin

(*State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment* , *College of Electrical Engineering* ,
Xi'an Jiaotong University , *Xi'an 710049 ,China*)

(Received 19 February 2007 ; revised manuscript received 31 May 2007)

Abstract

In this paper a novel four-dimensional autonomous hyperchaotic system is presented. Some basic dynamical properties are investigated. The fractional order oscillator circuit of this novel hyperchaotic system realized is simulated using EWB.

Keywords : fractional order hyperchaotic system , dynamical behavior , fractional order circuit

PACC : 0545 , 4265