

基于 CCCII 非线性电阻实现的蔡氏电路及其研究

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: 利用具有低电压、低功耗、低噪声以及电可调等优点的第二代电流控制电流传输器(CCCII), 实现了一种具有“蔡氏二极管”特性的非线性电阻, 并结合 Pspice 软件对由它构成的蔡氏电路进行了计算机仿真研究. 仿真结果表明: 调节非线性电阻电路的相关参数, 不仅可以实现具有不同斜率的非线性电阻, 而且由其构成的蔡氏电路也出现了诸如平衡态、周期、倍周期、单涡卷混沌吸引子、双涡卷混沌吸引子等丰富的混沌现象. 同时还给出了蔡氏电路处于混沌状态时, 各相关元件的参数变化范围.

关键词: 蔡氏电路; 第二代电流控制电流传输器; 非线性电阻; 混沌

中图分类号: TN431.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2014)08-0090-04

The Implementation and Research of Chua's Circuit Employing Nonlinear Resistor Based on CCCII

WANG Yu-zhen, PENG Liang-yu

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

Abstract: A new nonlinear resistor circuit based on CCCII which have the low voltage, low power, low noise and adjustable advantages is presented, and Chua's circuit that contain the proposed circuit is simulated with Pspice software. The result of the simulation indicate that through the changes of the parameters of the nonlinear Resistor circuit, we can get many nonlinear resistors that have different slopes and Chua's circuit displays rich chaotic process, such as equilibrium point, period, period-doubling bifurcation, single-scroll strange attractor and double-scroll strange attractor. And we also give the respective parameter ranges in the circuit in a chaotic state.

Key words: Chua's circuit; CCCII; nonlinear resistor; Chaos

1 引言

自 1903 年庞加莱提出混沌的存在后, 人们改变了用线性动力学描述物体运动的思维方式, 他们意识到确定的物体运动不一定有确定的运动规律, 在大多数情况下, 非线性现象起着主导作用. 而混沌作为非线性系统中一种特别的运动状态, 广泛存在于各种动力系统中, 并在计算机通信、医学、经济等领域有着巨大的应用前景, 因而人们对其进行了深入而广泛的研究^[1]. 1983 年, 蔡少棠教授提出了至今为止最有效而简单的混沌产生电路—Chua 电路^[2-4]. 改变 Chua 电路的元件参数, 便可产生诸如倍周期分岔, 单涡卷、周期 3、双涡卷等丰富的混沌

现象. 其中被称为蔡氏二极管的非线性负阻是 Chua 电路最主要的元件, 也是研究电路中混沌现象极为重要的一个方面. 目前, 大部分非线性电阻是由运算放大器、二极管以及电阻元件组成. 而运算放大器因其自身内部元件的缺陷, 限制了由其构成的非线性负阻电路的应用范围. 具有低电压、低功耗、低噪声、动态范围大以及电可调等优点的电流传输器可以很好地解决在运放电路中出现的. 在此基础上, 本文提出一种基于 CCCII 的非线性电阻的实现方法, 通过调节 CCCII X 端的寄生电阻 R_x 实现不同斜率的非线性电阻函数, 并用其代替经典蔡氏电路中的蔡氏二极管进行 Pspice 仿真, 取得在不同 R_x 值下的混沌信号相轨迹图.

收稿日期: 2013-10-19; 修回日期: 2013-12-12

2 经典蔡氏电路的结构与状态方程

蔡少棠教授于 1983 年提出了一种电路结构简单,电路输出动态特性却极其复杂的三阶自治混沌产生电路——“蔡氏电路”。它的提出不仅促进了现代非线性电路理论的发展,而且掀起了一股研究非线性电路的热潮。蔡氏电路一般由电容 C_2 与电感 L 组成的振荡电路、线性电阻 R 与电容 C_1 组成的移相电路以及非线性部分蔡氏二极管 R_{NL} 三部分组成,其结构如图 1 所示。

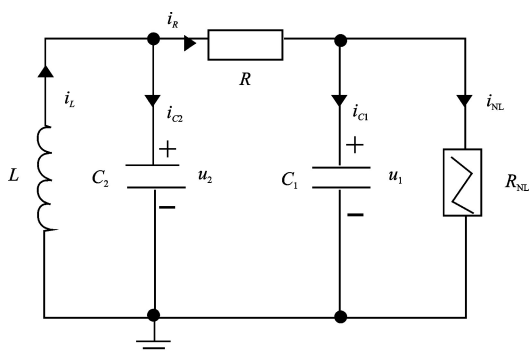


图 1 经典蔡氏电路图

图 1 所示蔡氏电路的状态方程如下:

$$\begin{cases} \frac{du_1}{dt} = \frac{u_2 - u_1}{RC_1} - \frac{f_{NL}(u_1)}{C_1} \\ \frac{du_2}{dt} = -\frac{u_2 - u_1}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{u_2}{L} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_1 、 u_2 分别表示电容 C_1 、 C_2 两端的电压; i_L 是流过电感 L 的电流; $f_{NL}(u_1)$ 表示蔡氏二极管 R_{NL} 的 I - V 特性的分段线性多项式,其表达式如式(2)所示,伏安特性曲线如图 2 所示。

$$f_{NL}(u_1) = \begin{cases} m_1 u_1 + (m_1 - m_0)E & u_1 > E \\ m_0 u_1 & -E \leq u_1 \leq E \\ m_1 u_1 + (m_0 - m_1)E & u_1 < -E \end{cases} \quad (2)$$

或

$$f_{NL}(u_1) = m_1 u_1 + \frac{1}{2}(m_0 - m_1)(|u_1 + E| - |u_1 - E|) \quad (3)$$

式中, E 为转折电压, m_0 、 m_1 分别表示伏安特性曲线上内外折线段的斜率。

在众多涉及到非线性电阻的文献资料中(如文献[2]),其电路结构一般是由运算放大器以及非线性单元电路(一般为二极管)、电阻等外围元件组成,或是用分段线性单端口电阻网络综合的方法[5]构

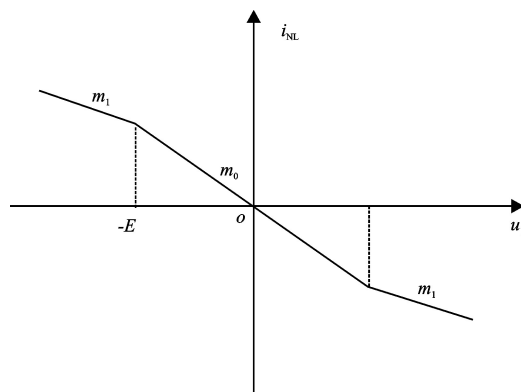


图 2 分段线性负阻伏安特性曲线

造。然而,运算放大器固有的两个缺点却严重阻碍着其在高频率、高速度电路中的应用。为了能更进一步研究混沌电路在高频段的理论特性,需要研究能工作在高频区的非线性电阻的实现方法。

3 基于 CCCII 的非线性电阻实现

3.1 第二代电流控制电流传输器特性

第二代电流控制电流传输器(CCCII)[6]是 Fa-bre 等人将在 CCII 中忽略的 X 端寄生电阻与跨导线性环的特性结合起来,实现的具有电调谐功能的电流传输器,其电路结构如图 3 所示。

其端口特性方程为

$$\begin{bmatrix} I_y \\ V_x \\ I_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & R_x & 0 \\ 0 & \pm 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_y \\ I_x \\ V_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, R_x 是 CCCII X 端的寄生电阻,它的大小是由 CCCII 内部电路的偏置电流 I_B 决定的, $R_x = \frac{V_T}{2I_B}$ (V_T 是温度的电压当量,且当 $T = 300 \text{ K}$ 时, $V_T = 26 \text{ mV}$)。

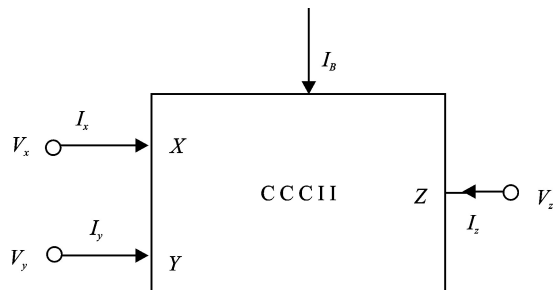


图 3 CCCII 电路符号

3.2 基于 CCCII 的非线性电阻实现

为实现具有蔡氏二极管特性的非线性电路,除了基本元件 CCCII 外,还需非线性元件二极管以及其他一些简单外围电路元件。由 CCCII 实现的一种

非线性电阻的电路结构图如图 4 所示.

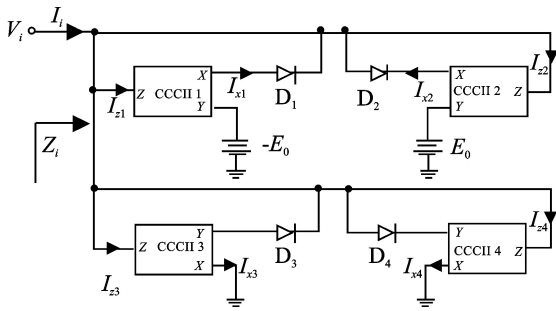


图 4 基于 CCCII 实现的非线性电阻电路结构

在图 4 中,假设 CCCII1 与 CCCII2 的偏置电流 I_B 相等, CCCII3 与 CCCII4 的偏置电流 I_B 相等,则令 $R_{x1} = R_{x2} = R_m$, $R_{x3} = R_{x4} = R_n$. 根据 CCCII 的端口特性,对图 4 进行分析可得:

①若 $-E_0 \leq V_i \leq 0$, 则二极管 D1、D2、D4 皆截止, D3 导通. 对图 4 所示的电路进行分析有

$$\begin{cases} V_i = V_{y3} \\ I_i = I_{z3} = -I_{x3} \\ V_{x3} = V_{y3} + I_{x3} R_{x3} \end{cases} \quad (5)$$

则图 4 所示电路形成的等效电阻 R_3 为 $R_3 = Z_i = \frac{V_i}{I_i} = R_n$.

②若 $0 \leq V_i \leq E_0$, 则二极管 D1、D2、D3 皆截止, D4 导通. 对图 4 所示的电路进行如式(5)的分析,同理可得电路形成的等效电阻 R_4 为 $R_4 = R_n$.

③若 $V_i > E_0$, 则二极管 D1、D3 截止, D2、D4 导通. 对图 4 所示的电路进行分析有

$$\begin{cases} V_i = V_{x2} = V_{y4} \\ V_{y4} + I_{x4} R_{x4} = 0 \\ V_i = I_{x2} R_{x2} \\ I_{x4} = -I_{z4} \\ I_{x2} = -I_{z2} \\ I_i = I_{z2} - I_{x2} + I_{z4} \end{cases} \quad (6)$$

则图 4 所示电路形成的等效电阻 R_{24} 为

$$R_{24} = I_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_m R_n}{R_m - 2R_n}.$$

④若 $V_i < -E_0$, 则二极管 D2、D4 截止, D1、D3 导通. 按 ③ 中的分析同理可得电路形成的等效电阻 R_{13} 为

$$R_{13} = z_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_m R_n}{R_m - 2R_n}.$$

综上所述,由图 4 所示电路构成的非线性电阻可表示为

$$R_{NL}(V_i) = \begin{cases} \frac{R_m R_n}{R_m - 2R_n}, & V_i > E_0 \\ R_n, & -E_0 \leq V_i \leq E_0 \\ \frac{R_m R_n}{R_m - 2R_n}, & V_i < -E_0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,通过调节 CCCII(1-4) 内部电路的偏置电流 I_B 便可非常方便地改变非线性电阻伏安特性曲线斜率.

4 基于 CCCII 非线性电阻的蔡氏混沌电路的实现与分析

4.1 基于 CCCII 非线性电阻的蔡氏混沌电路提出

将图 4 所示的等效非线性电阻代替经典蔡氏电路中的蔡氏二极管,得到如图 5 所示的混沌电路图^[6]. 仿真参数如下: $E_0 = 9 \text{ V}$, $C_1 = 12 \text{ nF}$, $C_2 = 200 \text{ nF}$, $L = 19 \text{ mH}$, $R_{x1} = R_{x2} = R_m = 218.6 \Omega$, $R_{x3} = R_{x4} = R_n = 1869 \Omega$, $R = 1750 \Omega$. 其中 R_m 、 R_n 可以通过 CCCII 的偏置电流 I_B 进行调节,进而改变非线性电阻伏安特性曲线的斜率.

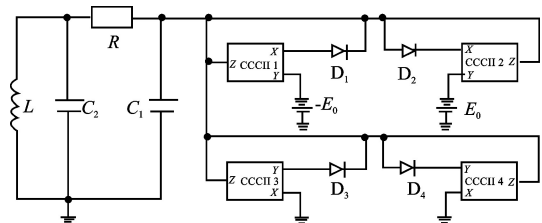


图 5 基于 CCCII 非线性电阻实现的蔡氏混沌电路

4.2 非线性电阻伏安特性曲线对混沌电路的影响分析及仿真结果

在电路研究中发现,电路元件参数的改变,能让电路变得不稳定,甚至烧毁电路元件. 而蔡氏电路作为对初始条件敏感的混沌电路之一,元件参数值的变化更是使该电路产生了平衡态—周期—倍周期分岔—单涡卷混沌吸引子—双涡卷混沌吸引子—失稳等一系列丰富的运动形态^[7-10]. 在文献[8]中,罗荣芳等人就对蔡氏电路中的各种线性元件参数变化对产生的混沌信号的影响进行了详细分析,而非线性电阻特性对其的影响鲜有论述. 本文就非线性电阻电路参数对蔡氏电路混沌信号的影响进行了详细讨论. 由式(5)可知,非线性电阻 R_{NL} 有两个变量,一是控制其伏安特性曲线转折点的转折电压 E ;二是,控制其伏安特性曲线斜率的 CCCII X 端的寄生电阻. 在此我们讨论非线性电阻斜率的变化对混沌信号产生的影响.

将电路参数调整到合适的值,依次改变 R_n 的值,从仿真中得出在 R_n 由小变大的过程中,电路依次经历了平衡态—周期—倍周期分岔—单涡卷混沌吸引子—双涡卷混沌吸引子—失稳等一系列丰富的运动形态,其各个运动形态如图 6 所示.同时测得 R_n 的变化范围为(1 088~1 670 Ω).当 $R_n > 1 589 \Omega$ 时,信号的幅度变得比较小了.因而,为了更好观察混沌现象,在仿真过程中应取比较靠中的值.同样的方法改变 R_m ,也可让电路展现丰富的混沌变化过程.

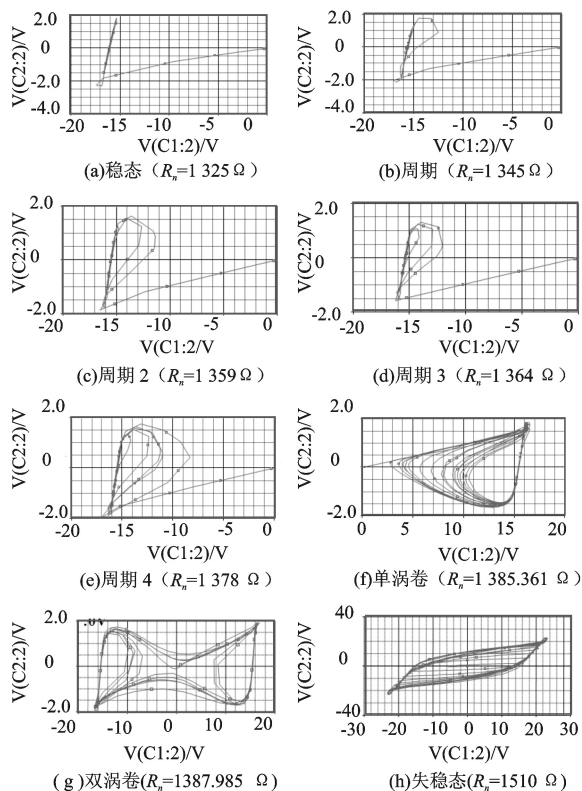


图 6 R_n 值变化时,蔡氏电路的 V_{C1} — V_{C2} 混沌行为轨迹图

从以上仿真结果可以看出,图 5 所示电路结构在恰当的元件参数值下能出现混沌吸引子和稳定周期轨道等丰富的混沌现象.且随着分段电阻 R_n 阻值的增大,蔡氏电路的状态大概可以分为以下几个类型:

① 稳定态,此状态电路开始经历一段阻尼振荡,最终停在一个稳定态.

② 周期态,电路在此状态时,进行周期和概周期振荡, R_n 的极小变化就会使周期发散为概周期.

③ 混沌态,此时进入电路混沌振荡态,在相空间中,轨线趋近于一个混沌吸引子.

④ 负阻尼振荡态,此时,电路的振荡振幅越来越大.

5 结束语

本文用电流控制电流传输器实现了具有“蔡氏二极管”特性的非线性负阻电路.用 Pspice 软件对其构成的蔡氏电路进行了仿真,电路也产生了诸如周期、倍周期、双涡卷吸引子、单涡卷吸引子等非常丰富的混沌现象,并且讨论了在蔡氏电路处于混沌状态时,该非线性电阻电路元件参数的变化范围.并且随着电流传输器越来越受到人们的重视,其应用范围也变得越来越广.本文用其构成的蔡氏电路得到了丰富的混沌现象,为混沌信号的产生提供了一个新的研究方法.

参考文献:

- [1] 黄润生.混沌及其应用[M].武汉:武汉大学出版社,2000:112-130.
- [2] 张华,王牛,李幸.蔡氏电路及蔡氏振荡器中非线性电阻实现的研究[J].西南工学院学报,2000,15(3):11-16.
- [3] 张新国.现代非线性电路[M].兰州:兰州大学出版社,2005.
- [4] 蒋国平,陈艳云.蔡氏混沌非线性电路及其频率特性研究[J].大学物理,2002,24(1):5-7.
- [5] 刘建东.含分段线性项的混沌动力学系统的 PSPICE 电路模拟[J].电气电子教学学报,2002,24(6):35-36.
- [6] 彭良玉,何怡刚,黄满池,等.电流模式 N 阶 CCCII - C 低通滤波器的系统设计[J].电子学报,2003,31(8):1234 - 1236.
- [7] 卢云鹏,梁昊,郑斌琪,等.负阻斜率对 Chua 电路的影响[J].核电子学与探测技术,2003,23(6):574-576.
- [8] 罗荣芳,林土胜.蔡氏混沌电路硬件实现的容差分析[J].华南理工大学学报:自然科学版,2006,34(9):13-17.
- [9] 王育飞,姜建国.不对称非线性蔡氏电路产生的混沌现象分析[J].系统工程与电子技术,2007,29(12):2029-2031.
- [10] 王殿学.蔡氏电路中混沌现象与非线性电阻伏安曲线关系的研究[J].辽东学院学报:自然科学版,2010,17(4):317-320.

作者简介:

彭良玉 女,(1965-),教授,研究生导师.研究方向为信号处理和有源滤波器设计.

宇珍 女,(1989-),硕士研究生.研究方向为有源滤波器的设计.