

含磁控和荷控两种忆阻器的混沌电路设计与仿真*

洪庆辉¹⁾ 曾以成^{1)†} 李志军²⁾

1) (湘潭大学光电工程系, 湘潭 411105)

2) (湘潭大学通信工程系, 湘潭 411105)

(2013年7月31日收到; 2013年8月25日收到修改稿)

利用惠普实验室荷控和磁控两种忆阻器模型设计了一个五阶混沌电路. 数值仿真结果表明该电路在参数变化情况下能产生 Hopf 分岔和反倍周期分岔两种分岔行为, 并能产生双涡卷、单涡卷、周期态等不同相轨道. 为了验证电路的混沌行为, 利用基本元器件设计了惠普实验室荷控和磁控忆阻器模拟器, 并将其应用到对所设计电路中进行 Pspice 仿真, 电路仿真结果验证了理论分析的正确性.

关键词: 混沌电路, HP 忆阻器, 模拟器, Pspice 仿真

PACS: 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.62.230502

1 引言

1971年, Chua^[1] 根据电路变量的完备性, 从理论上预测了描述电荷与磁通关系的元件 - 忆阻器, 并分析了忆阻器的磁控和荷控两种表达形式. 2008年美国 HP 实验室 Williams 等人^[2] 成功研制出第一个忆阻器器件, 此后忆阻器便引起众多研究者的兴趣和关注, 而基于忆阻器的混沌电路则成为其中的研究热点之一^[3-14]. 目前基于忆阻器的混沌电路均是利用磁控忆阻器而展开的, 在文献^[3-6]中利用分段磁控忆阻器代替蔡氏电路中的蔡氏二极管, 设计了一系列基于忆阻器的混沌电路, 由于其忆导值的是不连续的, 在物理上实现这类忆阻器是不现实的. 在文献^[7-9]中则利用三次非线性光滑曲线磁控忆阻器进行混沌电路设计, 这些忆阻器混沌电路在一定的电路参数条件下均可以生产不同形状的混沌吸引子. 但由于忆阻器尚未商业化, 上述混沌电路均只进行了数值仿真研究. 为了验证忆阻电路的混沌行为, 必须构建忆阻器的模拟器, 将其应用于电路仿真中, 从电路中观察到了混沌吸引子^[10-12].

多忆阻器混沌电路由于其含有更复杂的拓扑结构, 更适合保密通信等工程应用. 包伯成等^[13]首次提出了含有两个忆阻器的混沌电路设计, 采用磁控忆阻器与电容的并联得到一个五阶混沌电路, Buscarino 等^[14]利用两个并联的磁控忆阻器代替蔡氏电路中的蔡氏二极管得到一个新的混沌电路, 分析表明其相对于含有一个忆阻器的混沌电路具有更复杂的动力学行为.

根据忆阻器理论可知忆阻器有荷控和磁控两种表达形式, 通过分析可知目前忆阻器混沌电路设计都是基于磁控忆阻器展开的, 电路形式上均是利用忆阻器与电容并联进行设计. 而在忆阻器模型上大多采用分段线性和三次光滑模型两种. 基于此, 文章利用 HP 实验室磁控忆阻器和荷控忆阻器两种模型设计了一个五阶混沌电路, 结合磁控忆阻器与电容的并联和荷控忆阻器与电感的串联两种形式. 利用分岔图, Lyapunov 指数等非线性分析方法研究系统在参数变化情况下的动力学行为, 并得到不同的非线性相轨图. 利用基本元器件构建了 HP 实验室的荷控忆阻器模拟器和磁控忆阻器模拟器, 对所设计的电路进行 Pspice 仿真, 电路仿真结果验证理论分析的准确性.

* 国家自然科学基金 (批准号: 61233010, 61176032) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yichengz@xtu.edu.cn

2 HP 实验室忆阻器模拟器

2.1 HP 实验室荷控忆阻器

2008 年, HP 实验室研制了首个忆阻器器件实物^[2], 它由夹在铂电极间的两层不同掺杂的二氧化钛构成. 由文献 [15] 可得忆阻器的忆阻值与流过其电荷的关系式如下式所示:

$$M(q) = M_0 - kq(t), \quad (1)$$

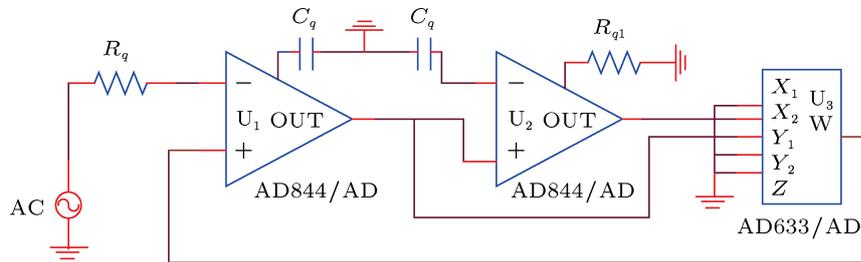


图 1 HP 荷控忆阻器模拟器

在输入电流 $i(t)$ 作用下可得整个电路的输入输出关系为

$$v(t) = (R_q - 0.1q(t)R_{q1}/C_q)i(t), \quad (3)$$

即可得相应忆阻值表达式为

$$M(q) = R_q - (0.1R_{q1}/C_q)q. \quad (4)$$

2.2 HP 实验室磁控忆阻器

文献 [15] 给出了 HP 实验室磁控忆阻器的表达式为

$$W(\varphi) = 1/\sqrt{M_0^2 - 2k|\varphi(t)|}. \quad (5)$$

将 HP 实验室中 P 型与 N 型忆阻器进行合并可得统一化的磁控忆阻器表达式为

$$W(\varphi) = 1/\sqrt{M_0^2 - 2k|\varphi(t)|}. \quad (6)$$

取 $M_0 = 1 \times 10^3$, $k = 1.25 \times 10^5$, $\varphi(t)$ 在 -3 到 3 的范围内作出 φ - w 曲线如图 2(a) 所示.

由图 2(a) 可知该曲线近视为一条纵轴对称的抛物线, 故可用抛物线函数式

$$W(\varphi) = a_\varphi + b_\varphi\varphi^2 \quad (7)$$

拟合图 2(a) 曲线. 通过拟合函数可得 $a_\varphi = 1 \times 10^{-3}$, $b_\varphi = 0.1 \times 10^{-3}$, 作出拟合后 φ - w 曲线如图 2(b) 所示.

其中 $k = u_v \frac{R_{on}}{D} \Delta R$, $\Delta R = R_{off} - R_{on}$, 式中 u_v 为平均离子迁移率.

将物理模型 (1) 式变换为数学模型可得

$$M(q) = a_q - b_q q(t), \quad (2)$$

其中 a_q, b_q 为相应数学模型参数, (2) 式即为 HP 荷控忆阻器的数学模型表达式.

根据 (2) 式描述的荷控忆阻器表达式, 设计了一种荷控忆阻器模拟器, 具体电路如图 1 所示. 该电路主要由电流跟随器、乘法器和基本电路元件电容、电阻构成.

比较图 2(a), (b) 曲线可知两曲线具有相似性, 则说明 (7) 式曲线能很好拟合 (6) 式, 在实际电路仿真过程中为了设计方便, 一般用 (7) 式代替 (6) 式进行电路仿真设计.

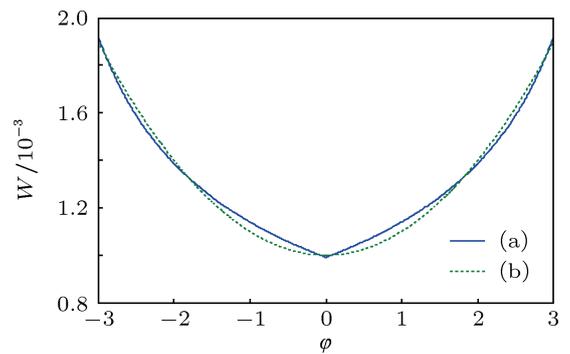


图 2 φ - w 曲线对比 (a) $W(\varphi) = 1/\sqrt{M_0^2 - 2k|\varphi(t)|}$; (b) $W(\varphi) = a_\varphi + b_\varphi\varphi^2$

根据 (7) 式描述的磁控忆阻器表达式, 设计了一种磁控忆阻器模拟器, 具体电路如图 3 所示.

分析图 3 所示的电路可得整个电路输入输出关系为

$$i(t) = [1/R_\varphi - 0.01\phi(t)^2/(C_\varphi R_{\varphi 1})^2 R_\varphi]v(t), \quad (8)$$

即可得相应忆导值表达式为

$$W(\varphi) = 1/R_\varphi - 0.01\phi(t)^2/(C_\varphi R_{\varphi 1})^2 R_\varphi. \quad (9)$$

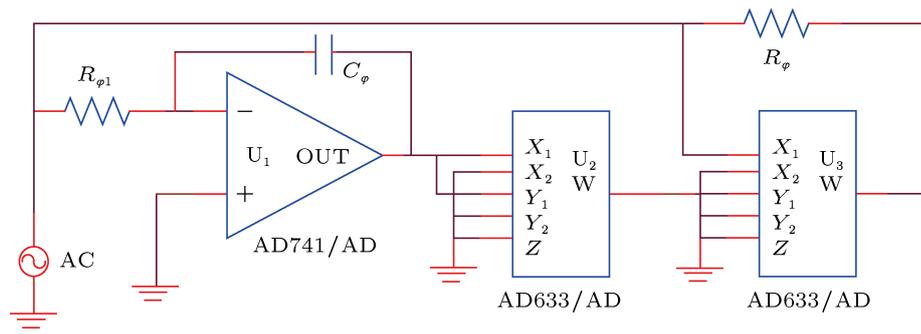


图3 磁控忆阻器模拟器

3 基于荷控和磁控忆阻器的混沌电路

所设计的含两个忆阻器的混沌电路如图4所示,区别于文献[13, 14]中电路,图4电路用磁控和荷控两种忆阻器巧妙结合了串并两种连接方式.图中磁控忆阻器 $W(\phi)$ 与电容 C_2 并联,荷控忆阻器 $M(q)$ 与电感 L 串联.其中荷控忆阻器 $M(q)$ 和磁控忆阻器 $W(\phi)$ 的表达式分别为(2)式和(6)式.

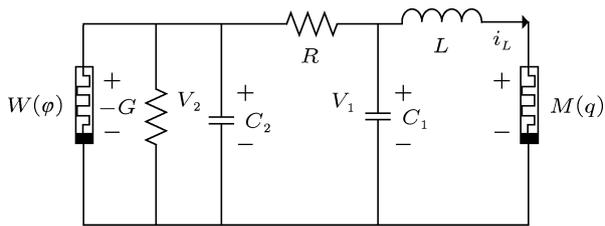


图4 含荷控和磁控忆阻器的混沌电路

新电路由五个动态元件组成,分别为一个电感、两个电容和两个忆阻器.它们所对应的五个状态变量分别为 (i_L, v_1, v_2, q, ϕ) .其中 q, ϕ 为忆阻器内部状态变量,运用基尔霍夫电压、电流定律以及元件的伏安特性,可得图4电路状态方程组为

$$\begin{aligned} L \frac{di_L}{dt} &= v_1 - i_L \cdot M(q), \\ C_1 \frac{dv_1}{dt} &= (v_2 - v_1)/R - i_L, \\ C_2 \frac{dv_2}{dt} &= (v_1 - v_2)/R + v_2 \cdot G - v_2 \cdot W(\phi), \\ \frac{dq}{dt} &= i_L, \quad \frac{d\phi}{dt} = v_2. \end{aligned} \quad (10)$$

令 $i_L = v_1 = v_2 = q = \phi = 0$, 可得系统的平衡点为集合

$$E = \{(i_L, v_1, v_2, q, \phi) | i_L = v_1 = v_2 = 0, q = c_1, \phi = c_2\}. \quad (11)$$

由此可知,即位于 $q-\phi$ 平面上的每一个点均是系统的平衡点,这里的 c_1, c_2 是实常数.不同于一般的忆

阻混沌系统^[3-14],系统(10)的平衡点由磁控和荷控两种忆阻器的初值状态决定,从不同区域出发的运行轨线将有着不同的动力学行为^[13].

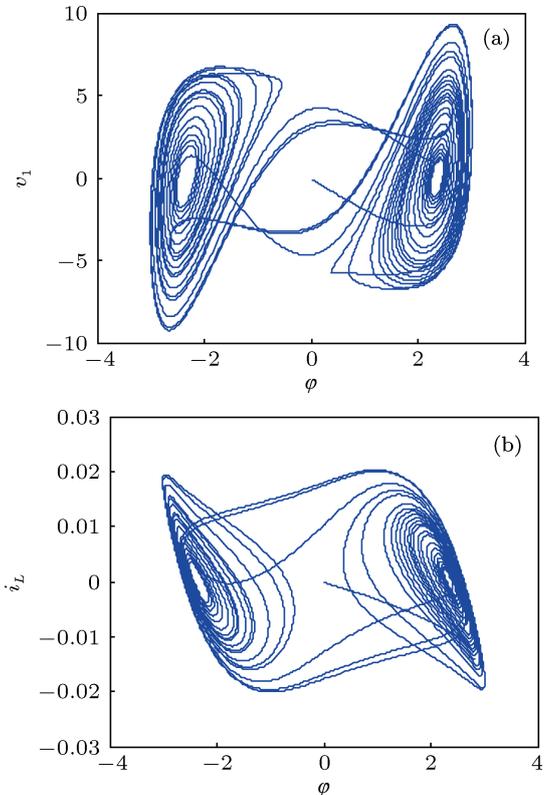


图5 系统(10)的典型混沌吸引子 (a) $\phi-v_1$; (b) $\phi-i_L$

分别选择电路参数 $L = 36 \text{ H}$, $C_1 = 135 \text{ nF}$, $C_2 = 13 \text{ nF}$, $R = 2 \text{ k}\Omega$, $G = 1.7 \text{ mS}$. 忆阻器参数 $a_q = 1$, $b_q = 450$, $M_0 = 1 \times 10^3$, $k = 1.25 \times 10^5$. 对于初始条件 $(0, 0.1, 0.1, 0)$ 系统(10)生成双涡卷混沌吸引子,它在相平面上的投影如图5所示.利用LET工具箱计算系统的Lyapunov指数为 $L_1 = 0.141$, $L_2 = -0.024$, $L_3 = -0.051$, $L_4 = -0.056$, $L_5 = -21.828$, 系统Lyapunov维数 $d_L = 4.0004$. 因此从系统相轨图、Lyapunov指数和维数,可知系统是混沌振荡的.

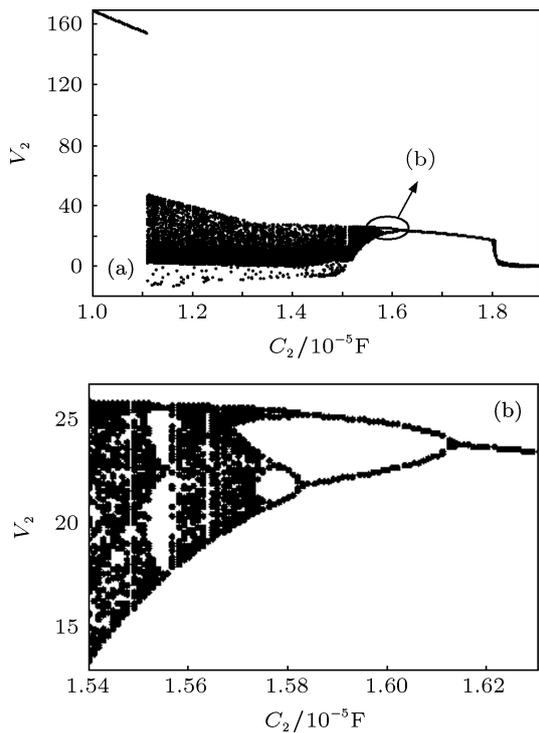


图6 电路参数 C_2 变化时的分叉图

4 依赖于电路参数的动力学分析

借助分岔图和 Lyapunov 指数谱等常规的动力学分析工具, 对图 4 电路在参数变化时进行

动力学分析. 选择初始状态为 $(0,0.1,0.1,0)$, 选择电路中电容 C_2 的值为可变参数, 当 C_2 变化时系统的状态变量 v_2 的分岔图如图 6 所示, 其中当 $15.4 \text{ nF} < C_2 < 16.3 \text{ nF}$ 时的分岔图如图 6(b) 所示. 系统的 Lyapunov 指数谱如图 7 所示, 为了图示清晰, 图 7 第五根 Lyapunov 指数曲线没有画出.

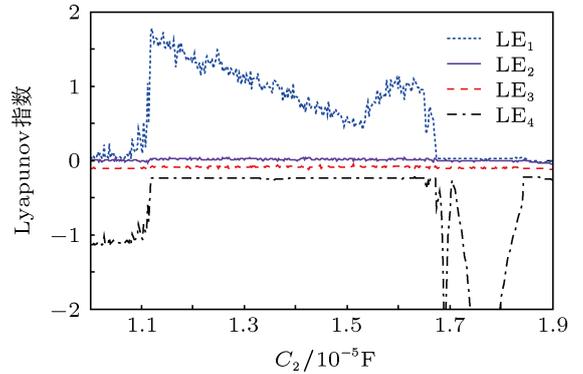


图7 电路参数 C_2 变化时的 Lyapunov 指数谱

对比图 6 与图 7 中的参数 C_2 可知, Lyapunov 指数谱与分岔图所表现的运行轨线稳定与不稳定区域基本是一致的. 由图 6 可见系统通向混沌的道路为 Hopf 分岔, 然后又经反倍周期分岔逐步过渡为周期轨, 最后突变为一个有界点. 由图 6 可知, $C_2 = 11 \text{ nF}$ 为 Hopf 分岔临界点. 当 $C_2 < 11 \text{ nF}$ 时,

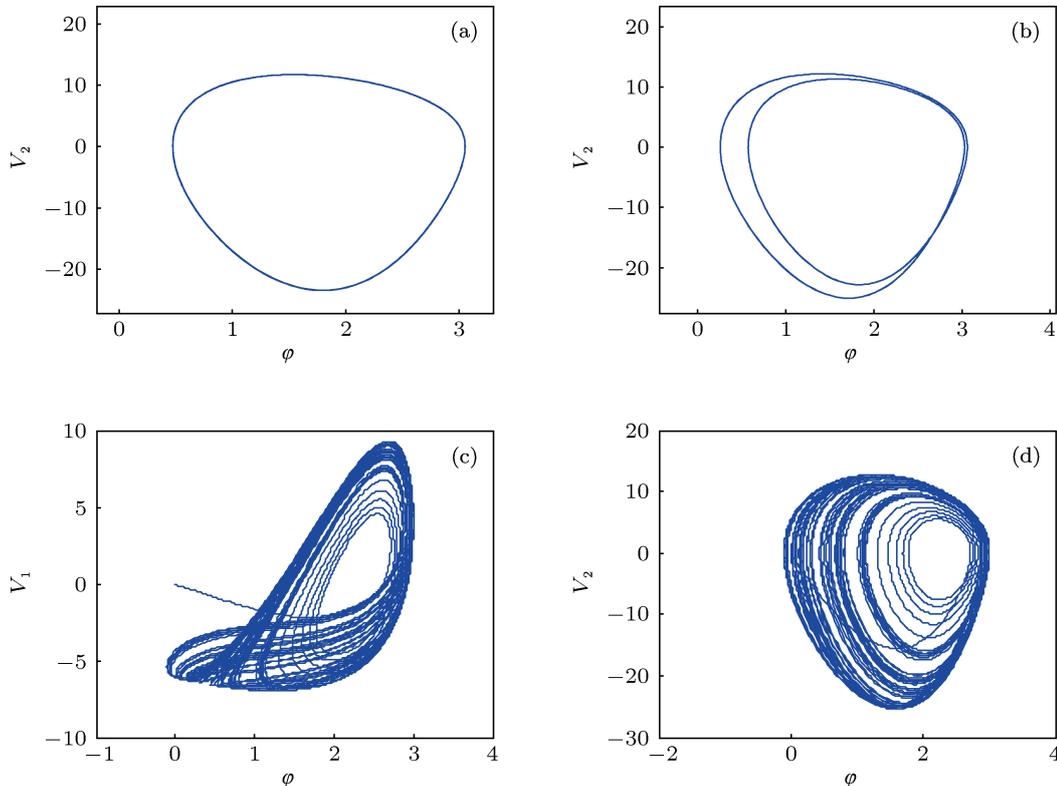


图8 电路参数 C_2 变化时的相轨图 (a) $C_2 = 16.4 \text{ nF}$; (b) $C_2 = 16 \text{ nF}$; (c) $C_2 = 15.61 \text{ nF}$; (d) $C_2 = 15.63 \text{ nF}$

系统相轨道为极限环, 当 $C_2 \geq 11 \text{ nF}$ 系统进入混沌态. 在区间 $11 \text{ nF} < C_2 < 15 \text{ nF}$ 和 $15 \text{ nF} < C_2 < 15.8 \text{ nF}$ 内, 系统分别产生双涡卷和单涡卷混沌吸引子. 其中 $C_2 = 15.8 \text{ nF}$, $C_2 = 16.2 \text{ nF}$ 为反倍周期分岔临界点, 此后在系统历经二周期, 周期极限环最终进入稳态. 选取不同的电路参数 C_2 , 系统的几种典型的相图如图 8 所示.

5 电路仿真和实验结果

所设计混沌电路 Pspice 整体仿真电路如图 9 所示, 其中荷控忆阻器为图 1 电路, 磁控忆阻器为图 3 电路.

分别选择电路参数 $C_1 = 158 \text{ nF}$, $L = 34 \text{ mH}$, $R = 6.4 \text{ k}\Omega$, $C_q = 10 \text{ nF}$, $R_q = 15 \Omega$, $R_{q1} = 450 \Omega$,

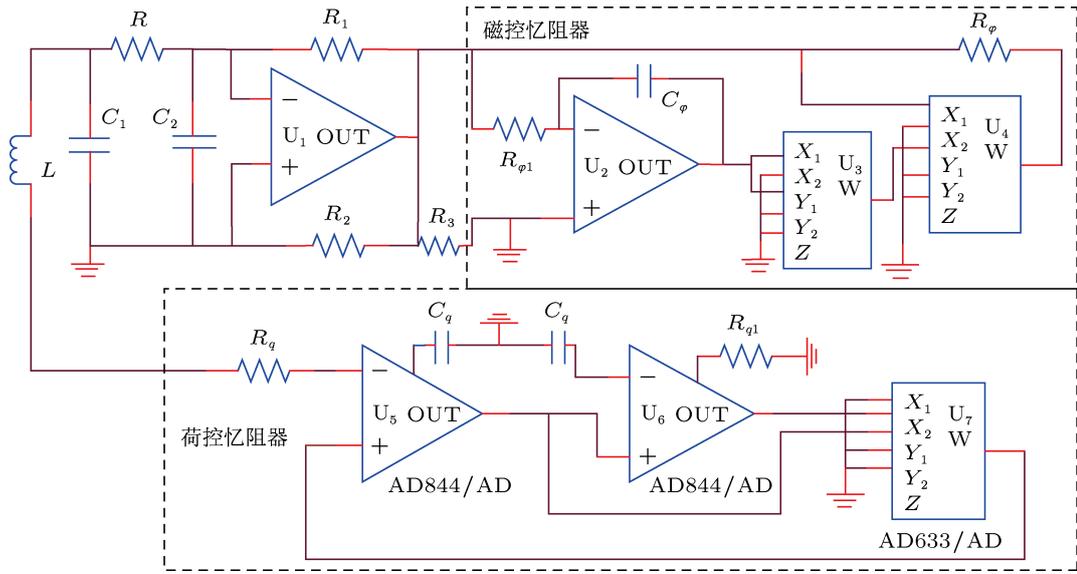


图 9 Pspice 整体仿真电路图

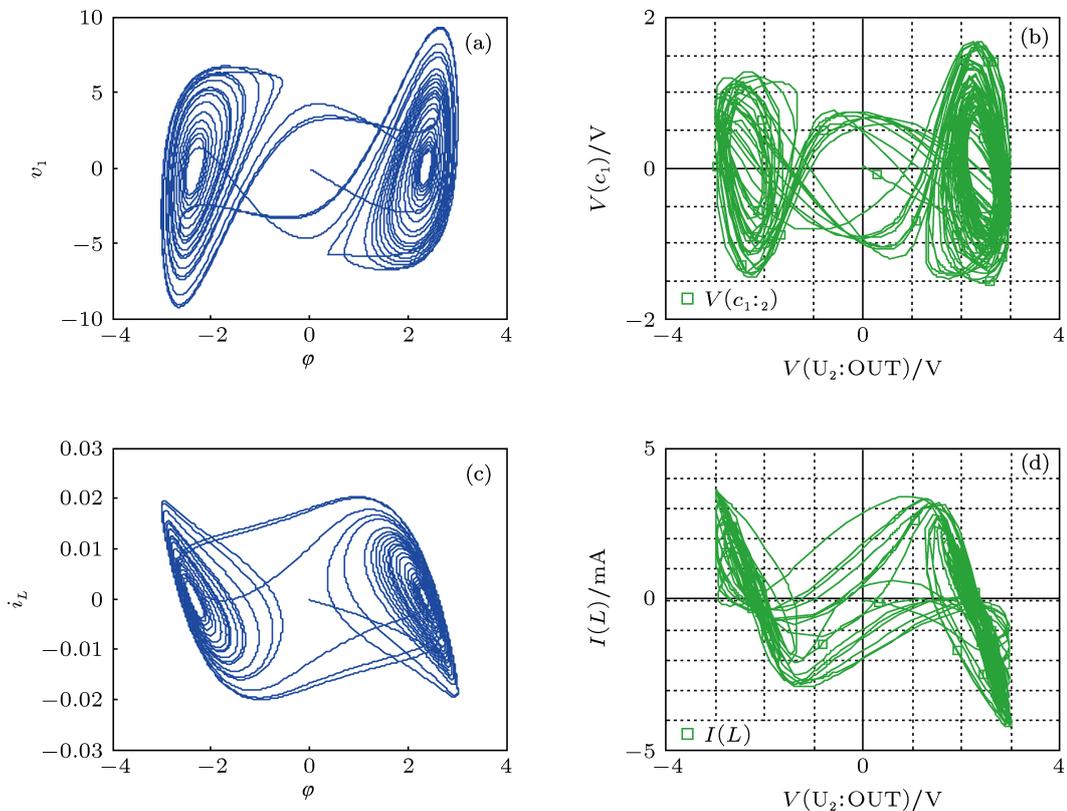


图 10 双涡卷混沌吸引子仿真结果对比 (a) $\phi-v_1$; (b) $\phi-V(c_1)$; (c) $\phi-i_L$; (d) $\phi-I(L)$

$R_{\phi 1} = 8 \text{ k}\Omega$, $C_{\phi} = 55 \text{ nF}$, $R_1 = R_2 = 1 \text{ k}\Omega$, $R_3 = 1.5 \text{ k}\Omega$, $R_{\phi} = 1 \text{ k}\Omega$ 为固定参数. 选择 C_2 为可变参数, 当 C_2 分别取 18 nF 和 20 nF 时, 系统可产生双涡卷和单涡卷混沌吸引子. 仿真结果如图 10 和图 11 所示, 为了对比观察同时分别给出相应 Matlab 仿真图. 通过对比图 10 和图 11 的左右两边, 可知 Pspice 与 Matlab 两者仿真相图形状基本一致. 而相应的电路仿真幅值与 Matlab 数值仿真的差异, 主要是由于模拟器中积分漂移引起的.

6 结论

根据忆阻器理论, 可知忆阻器有荷控忆阻器和磁控忆阻器两种. 利用 HP 磁控和荷控两种忆阻器

模型设计了一个五阶混沌电路, 数值仿真结果表明该电路在参数变化情况下能产生丰富的混沌动力学行为. 为了验证电路的混沌行为, 利用基本元器件设计了 HP 实验室荷控和磁控忆阻器模拟器. 将其应用到对所设计电路中进行 Pspice 仿真, 在电路中观察到了单涡卷、双涡卷混沌现象, 电路仿真结果验证理论分析的正确性. 本文忆阻器模型均是在 HP 实验室忆阻器基础上建立的, 进一步拓展了 HP 忆阻器在混沌电路中的应用. 电路连接上巧妙结合磁控忆阻器与电容并联和荷控忆阻器与电感串联两种形式, 将更加符合电路的一般化设计, 对其进行深入的研究具有重要的理论和工程应用价值. 而其展现的丰富混沌动力学行为, 将在保密通信、图像加密中得到广泛应用.

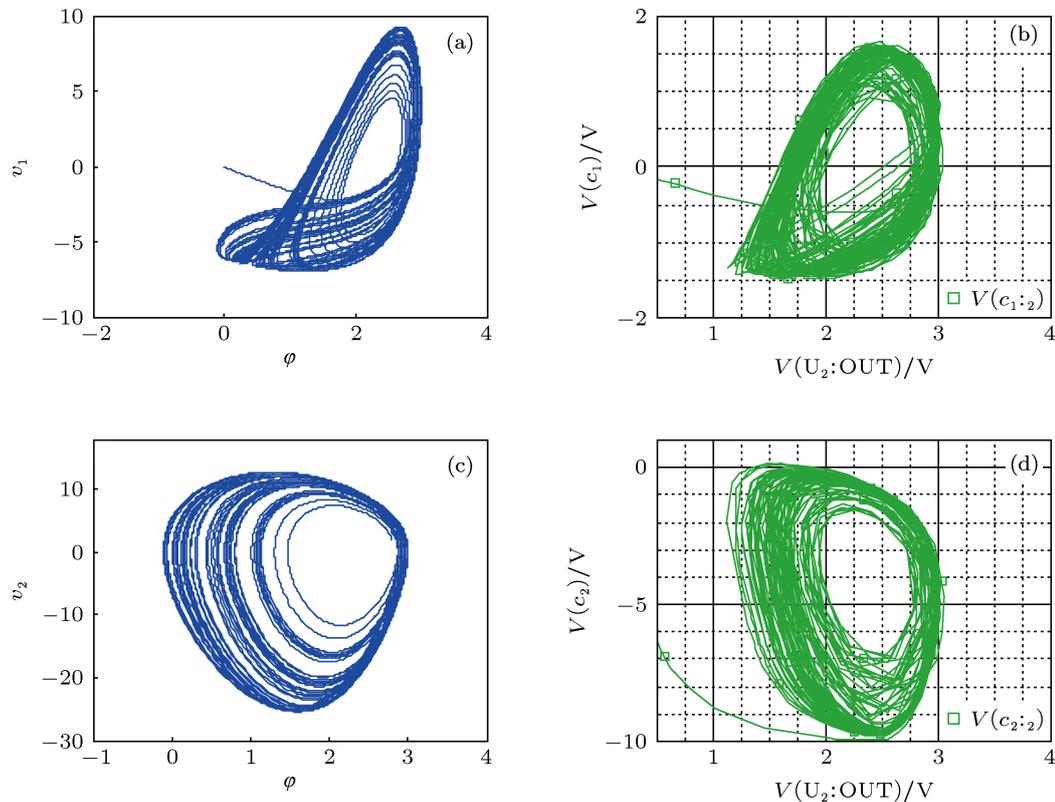


图 11 单涡卷混沌吸引子仿真结果对比 (a) $\phi-v_1$; (b) $\phi-V(c_1)$; (c) $\phi-v_2$; (d) $\phi-V(c_2)$

[1] Chua L O 1971 *IEEE Trans. Circ. Theory* **18** 507
 [2] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R, Williams R S 2008 *Nature* **453** 80
 [3] Itoh M, Chua L O 2008 *Int. J. Bifurc. Chaos* **18** 3183
 [4] Muthuswamy B, Kokate P P 2009 *IETE Tech. Rev.* **26** 417
 [5] Wen S, Zeng Z, Huang T 2012 *Phys. Lett. A* **376** 2775
 [6] Lin Z, Wang H 2010 *IETE Tech. Rev.* **27** 318
 [7] Bao B C, Liu Z, Xu J P 2010 *Acta. Phys. Sin.* **59** 3785 (in Chinese)

[包伯成, 刘中, 许建平 2010 物理学报 **59** 3785]
 [8] Bao B C, Liu Z, Xu J P 2010 *Chin. Phys. B* **19** 030510
 [9] Li Y X, Zhao L Y, Chi W Q, Lu S L, Huang X 2013 *Appl. Mech. Mater.* **275** 2481
 [10] Muthuswamy B 2010 *Int. J. Bifur. Chaos* **20** 1335
 [11] Ishaq A A, Srinivasan K, Murali K, Lakshmanan M 2011 *Int. J. Bifur. Chaos* **21** 737
 [12] Li Z J, Zeng Y C 2013 *Chin. Phys. B* **22** 040502

[13] Bao B C, Shi G D, Xu J P, Pan S H 2011 *Sci. China Tech. Sci.* **41** 1135
(in Chinese) [包伯成, 史国栋, 许建平, 刘中, 潘赛虎 2011 中国科学:
技术科学 **41** 1135]

[14] Buscarino A, Fortuna L, Frasca M, Valentina G L 2012 *Int. J. Non.*

Sci. **22** 023136

[15] Kavehei O, Kim Y S, Iqbal A, Eshraghian K, Al-Sarawi S F, Abbott D
2009 *Proc. R. Soc. A* **466.2120** 2175

Design and simulation of chaotic circuit for flux-controlled memristor and charge-controlled memristor*

Hong Qing-Hui¹⁾ Zeng Yi-Cheng^{1)†} Li Zhi-Jun²⁾

1) (Department of Photoelectric Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

2) (College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

(Received 31 July 2013; revised manuscript received 25 August 2013)

Abstract

In this work, we design a fifth-order chaotic circuit with HP memristors, which consists of a flux-controlled memristor and a charge-controlled memristor. By changing the control parameters, the circuit evolves into different orbits, such as periodic orbits, double-scroll, or single-scroll. In order to ensure the occurrence of chaotic behaviors in the circuit, simulators of the charge-controlled memristor and the flux-controlled memristor are designed with conventional electronic devices, and Pspice simulation is conducted on the resulting circuit. Pspice simulation results verify the correctness of the theoretical analysis.

Keywords: chaotic circuit, HP memristor, simulator, Pspice simulation

PACS: 05.45.-a

DOI: 10.7498/aps.62.230502

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61233010, 61176032).

† Corresponding author. E-mail: yichengz@xtu.edu.cn