

LC振荡型忆阻混沌电路及时滞反馈控制

洪庆辉¹, 刘奇能², 李志军³, 曾以成^{1†}

(1. 湘潭大学 光电工程系, 湖南 湘潭 411105; 2. 湘潭大学 电工与电子技术实验中心, 湖南 湘潭 411105;

3. 湘潭大学 通信工程系, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 将磁控忆阻器耦合于LC振荡电路中, 得到了一种新的忆阻混沌电路. 随后通过理论上的动力学分析、数值仿真、电路实验等验证了该电路的混沌特性. 为了实现电路的混沌控制, 设计了一种新型模拟时滞控制器. 利用该控制器将混沌电路状态变量加以延时并反馈至原电路中. 数值仿真和电路实验结果均表明, 所设计的时滞控制器可实现混沌电路的镇定控制. 进一步研究时滞控制下电路的分岔行为, 发现时滞控制下的电路又可通过倍周期分岔进入超混沌.

关键词: 混沌电路; 忆阻器; 混沌控制; 时滞电路; 电路实验

中图分类号: O415.5; TP273 **文献标识码:** A

LC oscillation of memristor chaotic circuit and its time-delay feedback control

HONG Qing-hui¹, LIU Qi-neng², LI Zhi-jun³, ZENG Yi-cheng^{1†}

(1. Department of Photoelectric Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;

2. Electrical and Electronic Technology Experiment Center, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China;

3. College of Information Engineering, Xiangtan University, Xiangtan Hunan 411105, China)

Abstract: In this work, a new kind of memristor chaotic circuit is developed when the flux-controlled memristor is coupled to the LC oscillator. The chaotic characteristics of the circuit can be verified by the dynamic analysis, numerical simulations and circuit experiments. Furthermore, in order to control the proposed chaotic circuit, a new type of analog time-delay feedback control circuit is designed. The controller is used to realize the time delay in the state variables of the chaotic circuit, and feedback the resultant state variables to the original circuit. The results from the numerical simulation and the circuit experiment show that the proposed time-delay feedback controller can realize the stabilization control for the chaotic circuit. Finally, the bifurcation behavior of the circuit under the time-delay control is studied; results show that this circuit exhibits hyper chaos from double periodicity bifurcation with time-delay control.

Key words: chaotic circuit; memristor; chaos control; time-delay circuit; circuit experiment

1 引言(Introduction)

2008年5月惠普实验室研究小组采用纳米技术实现了具有“记忆”特性的电阻^[1], 从而证实了Chua等^[2-3]提出的忆阻器概念和相关理论. 近年来利用忆阻器作为非线性元件去设计混沌电路成为研究热点, 各种基于忆阻器的混沌系统得到了研究人员的密切关注^[4-10]. 2008年, Itoh和Chua^[4]采用惠普实验室的Williams忆阻器模型替换蔡氏电阻实现了第1个忆阻器混沌电路. Muthuswamy等人^[5]采用分段线性模型的忆阻器实现标准及类蔡氏混沌电路. Bao等对忆阻混沌电路进行了深入的研究, 利用光滑模型的磁控忆阻器实现了一系列新的蔡氏忆阻混沌电路^[6-9]. 分析

上述忆阻器混沌电路可以看出, 现有的忆阻混沌电路均是在蔡氏电路的基础上进行设计的, 将不同类型的忆阻器模型替换蔡氏电阻后进行相应改进而得到, 因此从本质上来讲电路结构仍为忆阻型蔡氏电路. 为此本文首先利用LC振荡器与磁控忆阻器设计了一种新型忆阻混沌电路, 并通过一系列理论分析与电路实验等验证了电路的混沌特性, 本文的研究对丰富忆阻混沌电路设计具有一定的意义.

混沌电路设计往往伴随着混沌控制, 一个新的混沌系统只有在其具有良好的控制方案时, 才能在工程领域很好的发挥其应用价值. 自从1990年Ott, Grebogi和Yorke 3位科学家提出OGY混沌控制方法以来^[11],

收稿日期: 2014-04-03; 录用日期: 2014-10-21.

†通信作者. E-mail: yichengz@xtu.edu.cn.

国家自然科学基金项目(61233010, 61176032), 湖南省研究生科研创新基金项目(CX2014B261)资助.

Supported by National Natural Science Foundation of China (61233010, 61176032) and Hunan Provincial Innovation Foundation for Post Graduate, China (CX2014B261).

混沌控制便开始成为研究对象. 其中K.Pyragas^[12]最先提出混沌电路的时滞反馈控制方法, 随后众多学者从理论和实验两方面对此方法分别进行研究. 在理论研究方面, 汪小帆等首先提出了连续系统的时滞反馈混沌控制方法^[13]. Sun^[14]与Guan等^[15-16]探讨了一类时滞混沌系统的控制器设计问题. Chen等基于Lyapunov稳定性理论研究了时滞反馈的可镇定性问题, 为时滞控制提供理论指导^[17]. 上述研究从理论上详细分析了时滞反馈控制的基本思想、控制器设计和稳定性分析等. 相对于理论研究, 目前时滞混沌控制在实现方面研究却相对较少. 汪晓帆等^[18]在实验中通过采用增加小幅时滞电压的方法, 研究了蔡氏电路中的时滞反馈控制. 2009年, 蒋式勤等^[19]利用传统模拟时滞电路, 从实验中观察时滞Lorenz系统的复杂混沌特性. 2013年, 包伯成等^[20]将传统模拟时滞电路应用于文氏桥混沌振荡电路中, 成功实现了该混沌电路的镇定控制.

为了更好在实践中应用时滞反馈控制, 本文重点关注时滞反馈控制方法在混沌电路中的具体应用和实验研究, 为此设计一种新型模拟时滞反馈控制电路, 并将其应用于所设计的混沌电路中. 仿真结果表明时滞控制下的系统不但能成功实现系统的稳定控制, 且随参数改变时具有更复杂的动力学行为. 最后通过实验验证理论分析的正确性.

2 LC振荡型忆阻混沌电路(LC oscillation of memristor chaotic circuit)

2.1 电路描述(Circuit description)

所提出的电路如图1所示, 其由LC振荡器(虚线框所示回路N)和忆阻器M两部分组成.

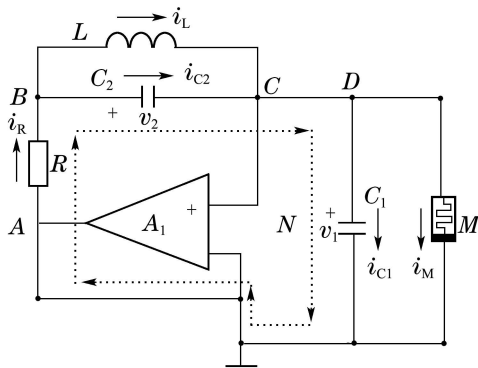


图1 本文提出的忆阻器混沌电路

Fig. 1 The memristor chaotic circuit proposed in this paper

其中: LC振荡器为混沌电路提供能量的同时产生周期振荡, 忆阻器M作为非线性元件将使电路中的电压或电流产生渐变, 从而使电路从周期振荡进入混沌振荡. 在该电路中, 忆阻器的类型为三次光滑磁控忆阻器, 其磁通 ϕ 和电荷 q 之间的关系可以表述为

$$q(\phi) = a\phi + b\phi^3. \quad (1)$$

由此可得, 忆阻器的忆导值 W 与磁通 ϕ 的函数关系式

$$W(\phi) = \frac{dq(\phi)}{d\phi} = a + 3b\phi^2, \quad (2)$$

则忆阻器的端电压 v_M 和电流 i_M 之间的关系满足

$$i_M = W(\phi)v_M = (a + 3b\phi^2)v_M. \quad (3)$$

结合图1分析该电路的工作原理, 首先分别定义流过各元件(电阻 R , 电容 C_1 , 电容 C_2 , 忆阻器 M)的电流依次为 i_R, i_{C1}, i_{C2}, i_M , 其参考方向如图1相应箭头标识, 下面将分析各元件的电流关系. 由伏安定律可求得流过电阻 R 的电流为

$$i_R = (v_A - v_B)/R = (0 - (v_1 + v_2))/R, \quad (4)$$

其中: v_A, v_B 分别表示节点A, B的电压, v_1 和 v_2 分别表示为电容 C_1 和 C_2 两端的电压. 根据基尔霍夫电流定律求解B, D两节点的电流, 可得 i_{C2}, i_{C1} 的电流方程为

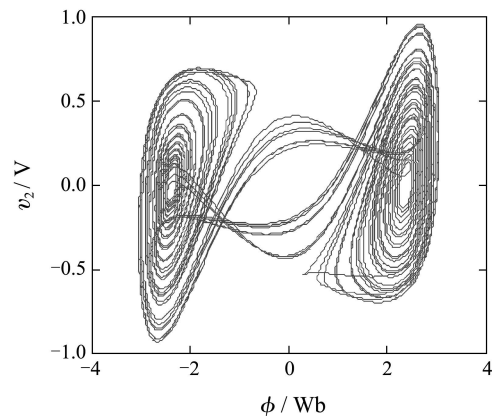
$$i_{C2} = i_R - i_L, \quad (5)$$

$$i_{C1} = i_{C2} + i_L - i_M = i_R - i_M. \quad (6)$$

综合式(3)-(6)可以得到以电容 C_1, C_2 的电压 v_1, v_2 , 流过电感 L 的电流 i_L 和忆阻器的内部状态控制变量 ϕ 为状态变量的系统方程

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = \frac{1}{C_1} [(-v_1 - v_2)/R - W(\phi)v_1], \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{C_2} [(-v_1 - v_2)/R - i_L], \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} v_2, \\ \frac{d\phi}{dt} = v_1. \end{cases} \quad (7)$$

在式(7)中分别选择电路参数 $L = 35 \text{ mH}, C_1 = 12 \text{ nF}, C_2 = 135 \text{ nF}, a = -0.7 \times 10^{-3}, b = 0.3 \times 10^{-3}$. 并设置初始条件 $(0.01, 0, 0, 0)$, 系统(7)产生双涡卷混沌吸引子在相平面上的投影如图2所示. 利用Jacobian方法计算系统的Lyapunov指数得: $L_1 = 0.163, L_2 = 0, L_3 = -0.075, L_4 = -4.891$, Lyapunov维数 $D_L = 3.018$. 由系统(7)的相轨图、Lyapunov指数和维数, 可以判断该系统是混沌振荡的.



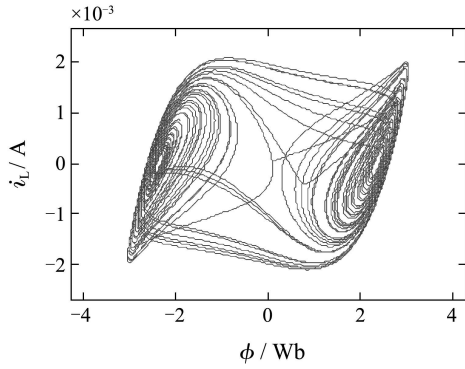


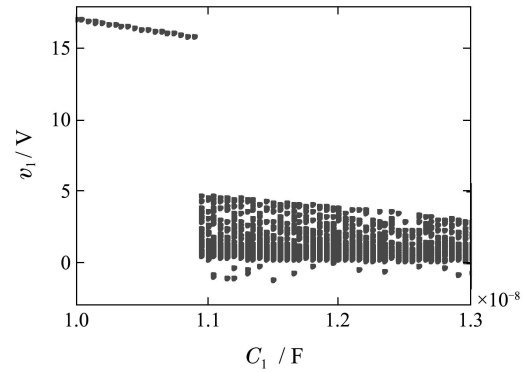
图2 典型混沌吸引子
Fig. 2 Typical chaotic attractors

由式(7)可以看出, 由于忆阻器的忆导值 $W(\phi)$ 受忆阻器内部控制变量 ϕ 控制, 当采用忆阻器为非线性器件实现混沌电路时, 系统会引入一个新的状态变量 ϕ , 从而可以产生更加丰富的动力学行为. 从电路结构上来说, 该电路采用LC振荡器作为核心器件, 相比传统蔡氏忆阻电路具有一定的创新性, 可为忆阻器混沌电路设计提供新思路.

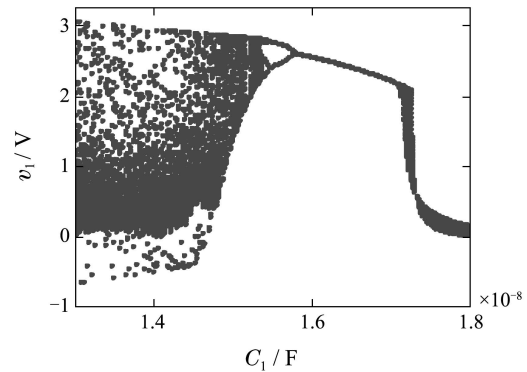
2.2 混沌电路分岔(Chaotic circuit bifurcation)

为了研究电路参数对系统的影响, 选择对电路调控作用最明显的电容 C_1 为可变参数, 结合分岔图和相图对本文提出的混沌电路进行动力学分析. 当 C_1 增加时, 系统状态变量 V_1 的分岔图如图3所示. 当 $C_1 < 11 \text{ nF}$ 时, 对应的分岔图为一根直线, 表明此时系统处于周期态. 当 $11 \text{ nF} \leq C_1 \leq 15.6 \text{ nF}$ 时, 从分岔图中可看出系统为失稳突然进入混沌的, 即为Hopf分岔^[21]形式. 当 $C_1 > 15.6 \text{ nF}$ 时, 从图中可明显看出系统是

经过反倍周期逆分岔退出混沌的. 图4的相图给出了随参数 C_1 变化时, 系统由Hopf分岔进入混沌态, 再经反倍周期分岔退出混沌的全过程.



(a) Hopf分岔图



(b) 反倍周期分岔图

图3 系统随参数 C_1 变化的分岔图
Fig. 3 System bifurcation diagrams vary with parameter C_1

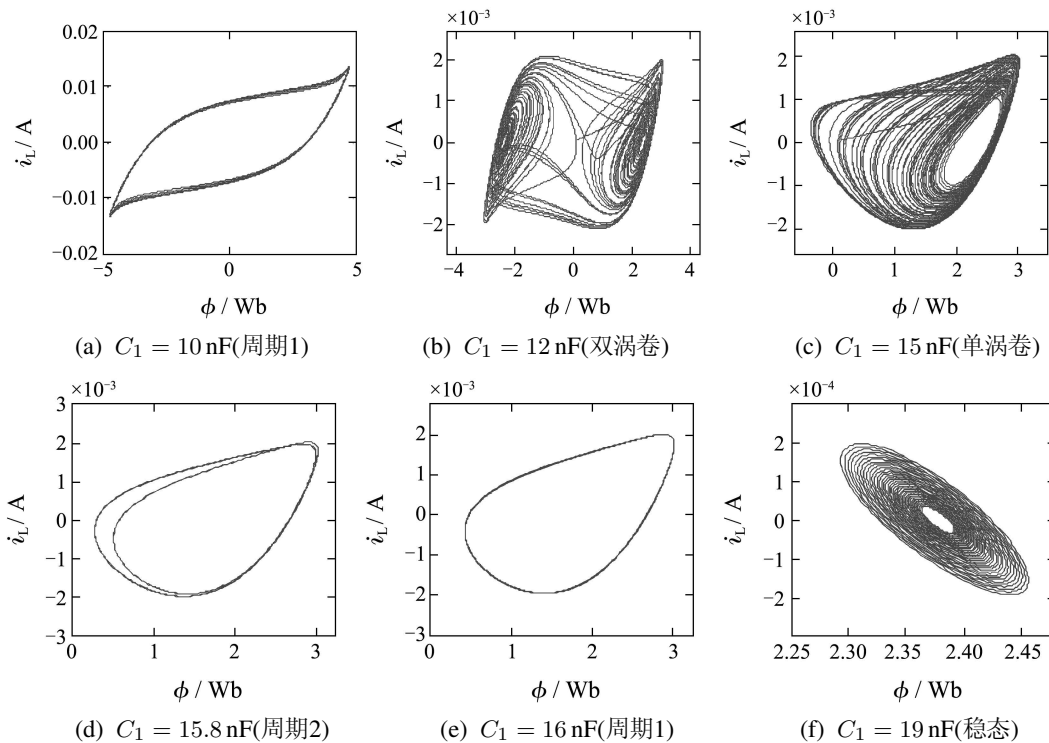


图4 随参数 C_1 变化的典型 $\phi - i_L$ 相图

Fig. 4 Typical $\phi - i_L$ phase diagrams vary with parameter C_1

3 时滞反馈控制(Time-delay feedback control)

为了实现所提混沌电路的稳定控制,设计一种通用的模拟时滞反馈控制电路.时滞反馈控制思想是将电路的状态变量直接延迟一定时间后去作用于原电路,以改变原电路的动力学特性.

3.1 时滞反馈控制电路设计(Circuit design of time-delay feedback control)

本文所设计的时滞反馈混沌控制电路如图5所示,采用电流反馈运算放大器作为核心元件.其中: v_{in} 为输入电压信号,而延时反馈输出既可以为电压输出 v_{out} ,也可以是电流输出 i_{out} .

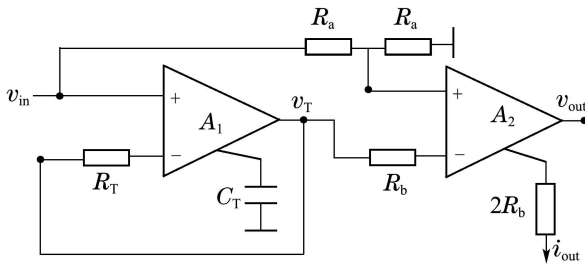


图5 本文所设计的时滞反馈控制器

Fig. 5 Time-delay feedback controller designed in this paper

若要输出延时反馈电压,则电流输出端接地.分析电流反馈运算器 A_1 和 A_2 的端口特性,可得电路的状态方程为

$$C_T \frac{dv_T}{dt} = \frac{v_{in} - v_T}{R_T}, \quad (8)$$

$$v_{out} = 2v_T - v_{in}, \quad (9)$$

其中 v_T 为时滞电路的内部状态变量.结合式(8)和式(9)利用拉普拉斯变换,可得时滞电路的状态方程为

$$F(s) = \frac{v_{out}(s)}{v_{in}(s)} = \frac{1 - R_T C_T s}{1 + R_T C_T s} = 1 - \tau s + \frac{\tau^2 s^2}{2} - \frac{\tau^3 s^3}{4} \dots \quad (10)$$

其中延迟时间 $\tau = 2R_T C_T$,因此延迟时间因可以通过改变电阻 R_T 和电容 C_T 进行调整.

若要输出延时反馈电流,则电压输出端接地.可得运放 A_2 的侧端电流输出为

$$i_{out} = -\frac{2v_T - v_{in}}{2R_b} = -\frac{1}{2R_b} v_{out}, \quad (11)$$

其中 $2R_b$ 为反馈强度系数.

相比传统模拟时滞电路^[19-20],图5电路采用具有高频特性的电流传输器作为核心元件,因此可处理高频信号的时滞延迟输出.另外由于所设计的时滞反馈控制电路可同时输出延时电压和电流信号,将更符合实际应用需求.

3.2 MATLAB 仿真结果 (MATLAB simulation results)

时滞反馈控制下的LC混沌振荡电路如图6所示,其中虚线框内为本文所设计的具有电流反馈输出的时滞控制电路.由图6可知,时滞反馈控制器的输入为电容 C_1, C_2 上的电压 v_1, v_2 之和,延迟一段时间延后输出反馈电流 i_{out} ,再反馈到电容 C_1 和忆阻器 M 并联的结点上.

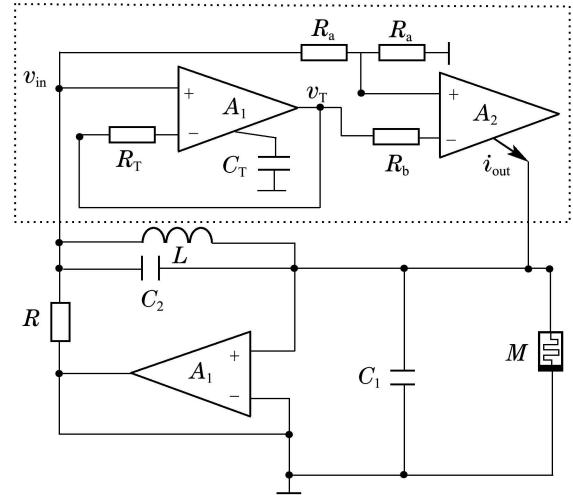


图6 含时滞反馈控制器的混沌电路

Fig. 6 Chaotic circuit containing time-delay feedback controller

结合式(8)–(9)和式(7),可得图6电路的状态方程为

$$\begin{cases} \frac{dv_1}{dt} = [(-v_1 - v_2)/R - i_M - (2v_T - v_1 - v_2)/2R_b]/C_1, \\ \frac{dv_2}{dt} = \frac{1}{C_2} [(-v_1 - v_2)/R - i_L], \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} v_2, \\ \frac{d\phi}{dt} = v_1, \\ \frac{dv_T}{dt} = 2(v_1 + v_2 - v_T)/\tau. \end{cases} \quad (12)$$

选择延迟时间 $\tau = 3 \times 10^{-4}$,反馈强度系数 $R_b = 10k$,混沌电路的相关参数保持不变.采用4阶龙格库塔法,可得加入时滞反馈控制后系统的时序和运行轨迹在相平面上的投影如图7所示.为了对比图7(a)给出了相应的混沌时序图.从图7可以看出,加入时滞反馈控制后系统的运行状态由混沌态被镇定为单周期态.此结果表明,通过调整式(12)中参数 τ 和 R_b ,时滞反馈控制可以成功实现混沌电路的镇定控制.

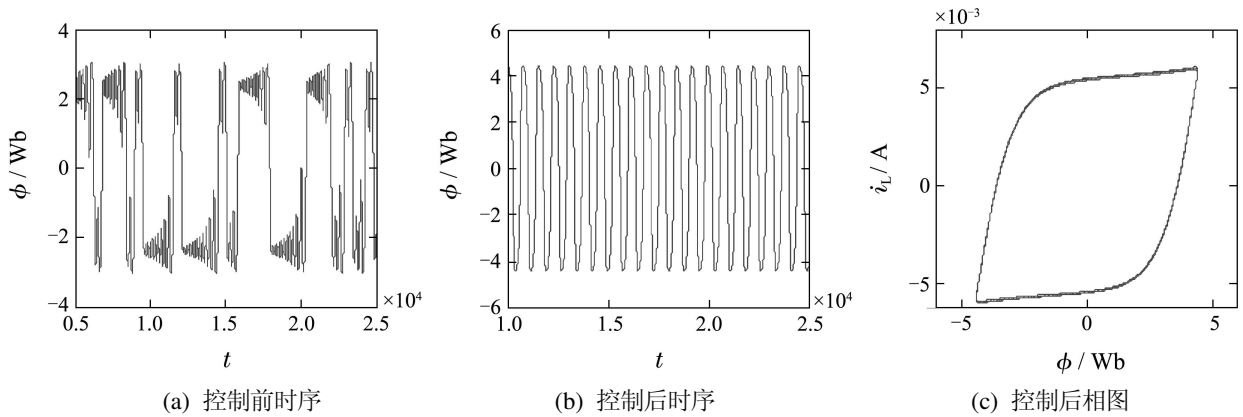


图7 时滞反馈控制下MATLAB仿真结果

Fig. 7 MATLAB simulation results under time-delay feedback control

4 控制情况下电路的分岔(Circuit bifurcation under time-delay feedback control)

为了研究时滞反馈控制下系统的分岔行为,在式(12)系统中,选择电容 C_1 为可变参数,当 C_1 增加时,系统状态变量 v_1 的分岔图如图8所示,相应的电路参数 C_1 所对应的动力学区域列于表1中.

表1 参数 C_1 区间所对应的动力学行为

Table 1 System dynamic behavior correspond with parameters C_1

参数 C_1 范围	动力学状态
$10.0 \text{ nF} < C_1 < 10.7 \text{ nF}$	周期1
$10.7 \text{ nF} < C_1 < 12.8 \text{ nF}$	周期1
$12.8 \text{ nF} < C_1 < 15.9 \text{ nF}$	周期2
$15.9 \text{ nF} < C_1 < 16.2 \text{ nF}$	倍周期分岔
$16.2 \text{ nF} < C_1 < 17.4 \text{ nF}$	混沌、超混沌
$17.4 \text{ nF} < C_1 < 18.2 \text{ nF}$	周期窗
$18.2 \text{ nF} < C_1 < 20.1 \text{ nF}$	瞬态混沌、稳态周期
$20.1 \text{ nF} < C_1 < 22.6 \text{ nF}$	周期2
$C_1 > 22.6 \text{ nF}$	稳态

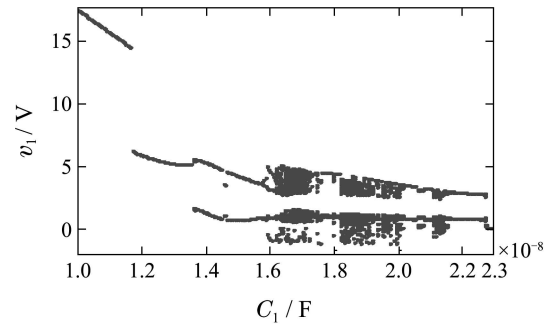
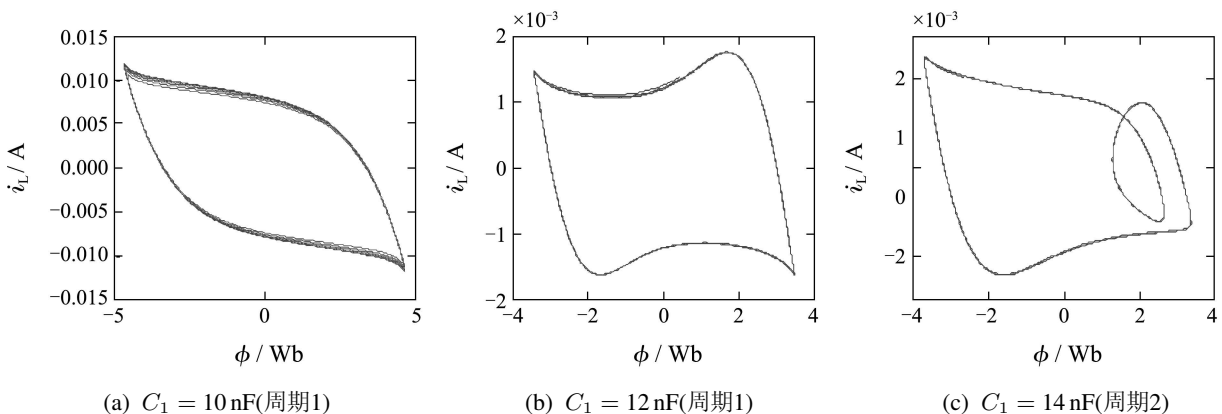


图8 系统随参数 C_1 变化的分岔图

Fig. 8 System bifurcation diagram vary with parameter C_1

从图8中可以看出在 $10 \text{ nF} < C_1 < 15.9 \text{ nF}$ 大范围内系统始终处于周期态,相应区间段的周期相图如图9(a)–(c)所示.对比图3分岔结果可发现时滞反馈下的系统周期态范围明显增大,且调节系统参数可得到不同的周期信号.在 $15.9 \text{ nF} < C_1 < 16.4 \text{ nF}$ 区间段,时滞控制下系统历经倍周期分岔进入混沌和超混沌,相应的混沌相图如图9(d)–(f)所示.此结果表明时滞反馈控制方法,在某些特殊参数下可实现系统反混沌控制,且能产生具有更复杂特性的超混沌吸引子.



(a) $C_1 = 10 \text{ nF}$ (周期1)

(b) $C_1 = 12 \text{ nF}$ (周期1)

(c) $C_1 = 14 \text{ nF}$ (周期2)

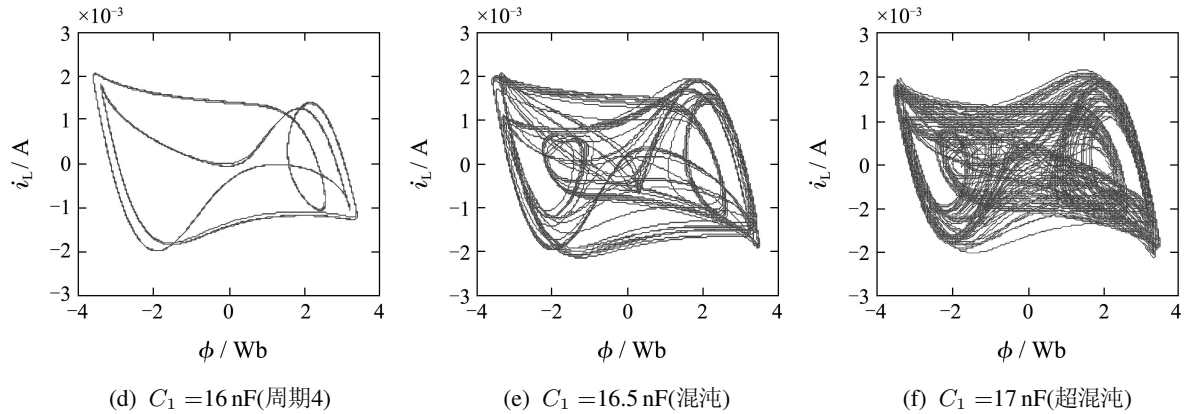


图9 系统随参数 C_1 变化的典型 $\phi - i_L$ 相图

Fig. 9 Typical $\phi - i_L$ phase portraits vary with parameter C_1

5 电路实验(Circuit experiment)

5.1 混沌电路实验(Experiment of chaotic circuit)

混沌电路实验整体制作图如图10所示,其中虚线框内为忆阻器模拟电路,具体实现方法可见文献[10].在电路实验中,理想运放采用AD711,电源电压为 $\pm 15\text{ V}$.选择忆阻器模拟电路参数 $R_1 = 8\text{ k}\Omega$, $C_3 = 55\text{ nF}$, $R_2 = 36\text{ k}\Omega$, $R_3 = 3\text{ k}\Omega$, $R_4 = 1.6\text{ k}\Omega$, $R_5 = R_6 = 2\text{ k}\Omega$.选择电路参数 $C_2 = 168\text{ nF}$, $L = 36\text{ mH}$, $R = 5.5\text{ k}\Omega$ 为固定参数.选择 C_1 为可变参

数,当 C_1 分别取 18 nF 和 20 nF 时,电路分别产生双涡卷和单涡卷混沌吸引子.当 C_1 分别取 22 nF 和 24 nF 时,电路可分别产生二周期和单周期相图.从Instek双踪示波器上得到的各类相图如图11所示,图中纵坐标为流过电感的电流 i_L ,通过电流探头测得,横坐标为理想运放 U_2 输出电压即为磁通 ϕ .通过与图4中MATLAB仿真结果对比,可知电路实验结果与MATLAB仿真结果基本一致,从而证明提出的混沌电路是正确的.

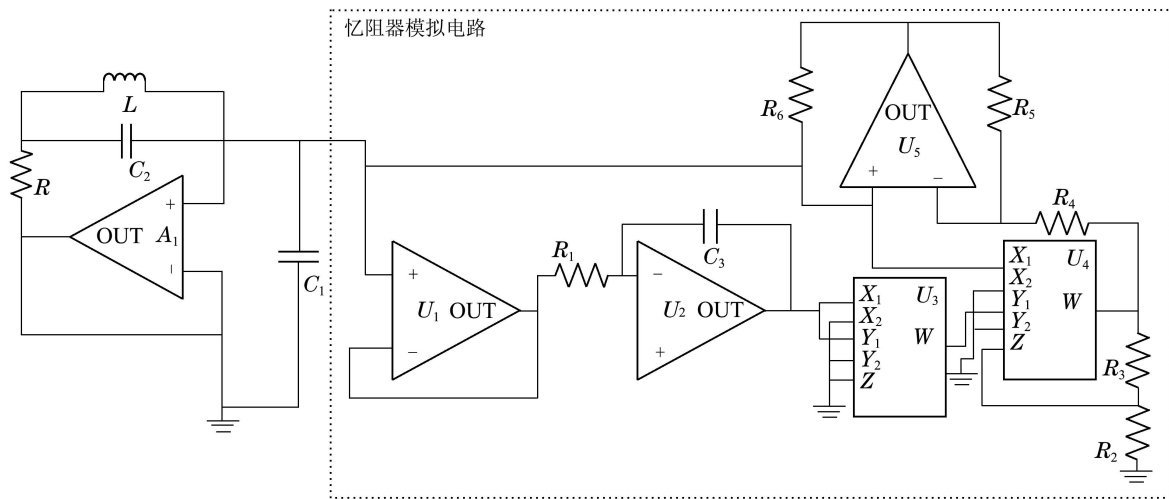
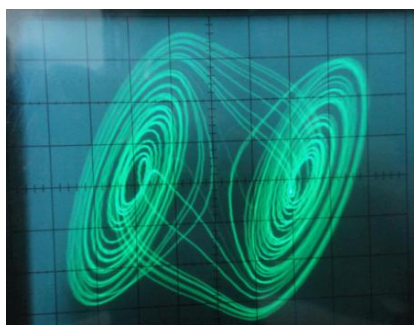
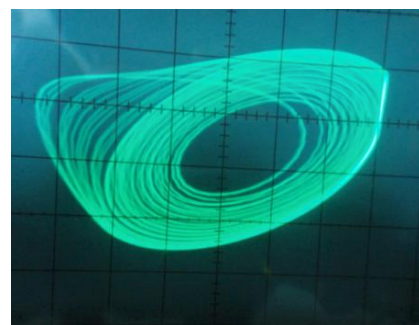


图10 Pspice整体仿真电路图

Fig. 10 Pspice simulation circuit diagram



(a) $C_1 = 18\text{ nF}$ (双涡卷)



(b) $C_1 = 20\text{ nF}$ (单涡卷)

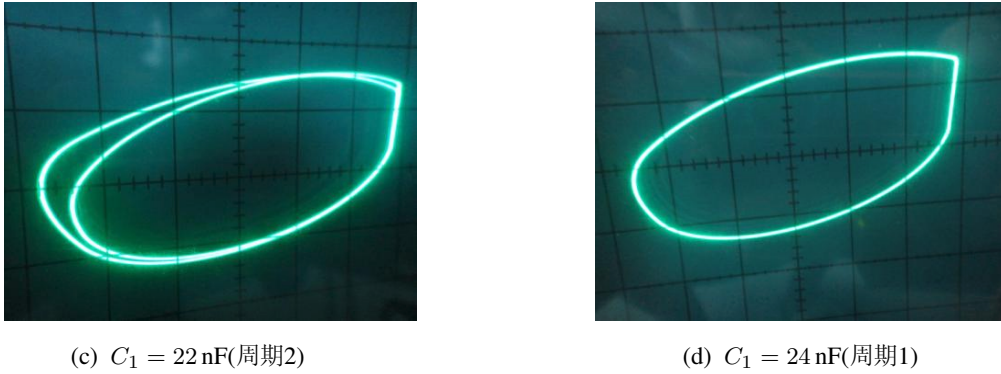


图 11 混沌电路实验结果

Fig. 11 Experiment results of chaotic circuit

5.2 时滞反馈控制实验研究(Experiment research of time-delay feedback control)

为了在电路中验证混沌控制的有效性,对图6电路进行了相应的实验制作,其中时滞电路中的电流反馈运算放大器采用AD844.对照图6所示电路,选择时滞反馈控制器的电路实验参数如下:

$$R_T = 10 \text{ k}\Omega, C_T = 100 \text{ nF}, R_a = R_b = 10 \text{ k}\Omega.$$

从示波器上观察到的控制后时序与相图如图12(b)–(c)所示,同样为了对比给出相应的控制前混沌时序如图12(a)所示.此实验结果与图7所示MATLAB仿真结果一致,验证了时滞反馈控制的有效性.

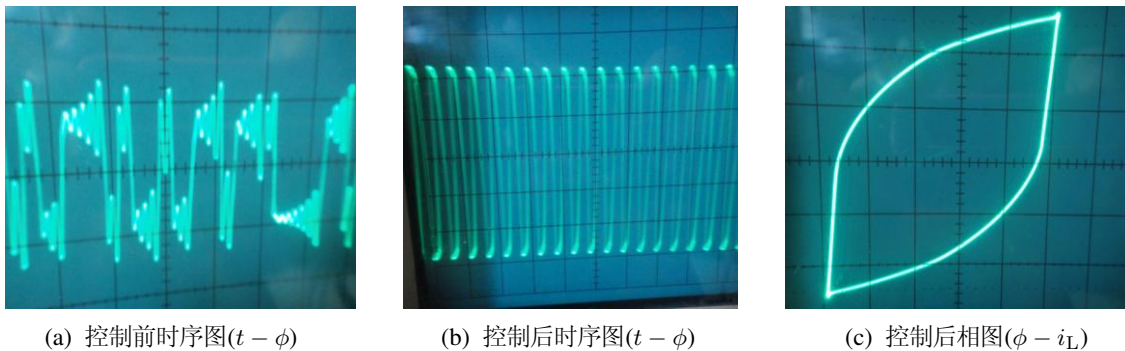


图 12 时滞反馈控制实验结果

Fig. 12 Experiment results under time-delay feedback control

6 总结(Conclusions)

本文采用LC振荡器和磁控忆阻器设计了一种新的混沌电路.数值仿真结果表明随控制参数改变,系统产生双涡卷、单涡卷、周期态等不同相轨道.为了验证电路的正确性,对提出的忆阻混沌电路进行了实验研究.从示波器上观察到的实验结果与数值仿真相吻合,从而验证了电路的正确性,所设计的混沌电路将在保密通信、微弱信号检测和电子测量等领域具有潜在的应用价值.

为了实现电路的混沌控制,设计了一种可同时输出电压和电流信号的模拟时滞控制器,并将其应用于所设计的混沌电路中.数值仿真与电路实验结果均表明该控制电路可实现所提混沌电路的稳定控制.另外,时滞控制下的系统在适当参数范围内,可通过倍周期分岔进入超混沌,产生一种与原混沌电路不同拓扑结构的超混沌吸引子.本文所提模拟时

滞控制电路结构简单,易于实现,且可适应于高频信号,将为忆阻型混沌电路的稳定控制及反混沌控制提供借鉴,具有重要的工程应用价值.

参考文献(References):

- [1] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The missing memristor found [J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 80 – 83.
- [2] CHUA L O. Memristor—the missing circuit element [J]. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1971, 18(5): 507 – 519.
- [3] CHUA L O, KANG S M. Memristive devices and systems [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1976, 64(2): 209 – 223.
- [4] ITOH M, CHUA L O. Memristor oscillators [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2008, 18(11): 3183 – 3206.
- [5] MUTHUSWAMY B, KOKATE P P. Memristor-based chaotic circuits [J]. *IETE Technical Review*, 2009, 26(6): 417 – 429.
- [6] BAO B C, LIU Z, XU J P. Transient chaos in smooth memristor oscillator [J]. *Chinese Physics B*, 2010, 19(3): 030510.

- [7] BAO B C, XU J P, ZHOU G H, et al. Chaotic memristive circuit: equivalent circuit realization and dynamical analysis [J]. *Chinese Physics B*, 2011, 20(12): 120502.
- [8] 包伯成, 刘中, 许建平. 忆阻混沌振荡器的动力学分析 [J]. *物理学报*, 2010, 59(6): 3785 – 3793.
(BAO Bocheng, LIU Zhong, XU Jianping. Dynamical analysis of memristor chaotic oscillator [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(6): 3785 – 3793.)
- [9] BAO B C, XU J P, LIU Z. Initial state dependent dynamical behaviors in a memristor based chaotic circuit [J]. *Chinese Physics Letters*, 2010, 27(7): 070504.
- [10] MUTHUSWAMY B. Implementing memristor based chaotic circuits [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2010, 20(5): 1335 – 1350.
- [11] OTT E, GREBOGI C, YORKE J A. Controlling chaos [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 64(11): 1196 – 1199.
- [12] PYRAGAS K. Continuous control of chaos by self-controlling feedback [J]. *Physics Letters A*, 1992, 170(6): 421 – 428.
- [13] WANG X F, CHEN G R, YU X. Anticontrol of chaos in continuous-time systems via time-delay feedback [J]. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2000, 10(4): 771 – 779.
- [14] SUN J. Delay-dependent stability criteria for time-delay chaotic systems via time-delay feedback control [J]. *Chaos, Solitons & Fractals*, 2004, 21(1): 143 – 150.
- [15] GUAN X, CHEN C, PENG H, et al. Time-delayed feedback control of time-delay chaotic systems [J]. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 2003, 13(01): 193 – 205.
- [16] GUAN X, FENG G, CHEN C. A full delayed feedback controller design method for time-delay chaotic systems [J]. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 2007, 227(1): 36 – 42.
- [17] CHEN L, YU X. On time-delayed feedback control of chaotic systems [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 1999, 46(6): 767 – 772.
- [18] WANG X F, ZHONG G Q, TANG K S. Generating chaos in Chua's circuit via time-delay feedback [J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 2001, 48(9): 1151 – 1156.
- [19] 蒋式勤, 胡国四, 董家鸣, 等. 时滞反馈Lorenz 系统的混沌特性及其电路实现 [J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(8): 911 – 914.
(JIANG Shiqin, HU Guosi, DONG Jiaming, et al. Chaotic characteristics and circuit implementation in time-delay feedback Lorenz system [J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(8): 911 – 914.)
- [20] 潘赛虎, 马正华, 包伯成, 等. 文氏桥超混沌电路时滞反馈混沌控制 [J]. *电路与系统学报*, 2013, 18(1): 182 – 186.
(PAN Saihu, MA Zhenghua, BAO Bocheng. Controlling chaos in Wien bridge hyperchaotic circuit via time-delay feedback [J]. *Journal of Circuits and Systems*, 2013, 18(1): 182 – 186.)
- [21] BENHABIB J, NISHIMURA K. The Hopf bifurcation and the existence and stability of closed orbits in multisector models of optimal economic growth [J]. *Journal of Economic Theory*, 1979, 21(3): 421 – 444.

作者简介:

洪庆辉 (1989–), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为混沌电路、混沌控制, E-mail: hongqinghui@126.com;

刘奇能 (1962–), 男, 副教授, 主要研究方向为电子电路, E-mail: liuqineng@xtu.edu.cn;

李志军 (1973–), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为非线性系统、电流模式电路和数模混合集成电路, E-mail: lizhijun@xtu.edu.cn;

曾以成 (1962–), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向有非线性电路、非线性控制, E-mail: yichengz@xtu.edu.cn.