

混沌系统的参数开关调制法研究^{*}

罗晓曙^{1,2)} 汪秉宏¹⁾ 陈关荣³⁾ 蒋品群²⁾ 方锦清⁴⁾ 全宏俊¹⁾

¹⁾ 中国科学技术大学近代物理系,合肥 230026)

²⁾ 广西师范大学物理与电子科学系,桂林 541004)

³⁾ 香港城市大学电子工程系,香港九龙)

⁴⁾ 中国原子能科学研究院,北京 102413)

(2001 年 8 月 20 日收到,2001 年 10 月 9 日收到修改稿)

提出了参数开关调制控制混沌方法,通过对蔡氏电路中的电容参数进行开关调制,可把蔡氏电路由混沌状态控制到其平衡态和 nP 周期轨道.数值模拟和电路仿真的结果证实了本方法的有效性,丰富了蔡氏电路的工程应用方法.

关键词:混沌控制,蔡氏电路,参数开关调制

PACC: 0545

1. 引言

近年来,混沌控制由于在许多工程领域具有巨大的应用前景而受到广泛的关注^[1-9,11-16].目前已提出的诸多混沌控制方法,从控制原理上可分为闭环控制法(有反馈)和开环控制法(无反馈).典型的有反馈闭环控制法如 OGY 法^[1]、自适应控制法^[5]、正比于系统变量的脉冲反馈法^[6]等均依赖于系统的全部或一部分可测状态变量.实际上,非线性系统的状态变量可观测性至今仍是一个很困难的问题.无反馈开环控制法虽然较难于严密的理论分析,例如参数共振微扰法^[7]和弱周期微扰控制法^[8],信号注入法^[9],但这类控制方法不涉及系统的状态变量的可观测性问题,因而在工程上很容易实现.本文提出的系统参数开关调制也属于无反馈开环控制法,其控制策略是:将控制信号直接输入到被控的混沌系统,改变受控混沌系统的某个参数,达到控制目标.研究表明,通过改变外部控制信号的幅度、极性、宽度等参数均可以实现 Chua's 混沌系统的各种不稳定周期轨道的稳定控制(包括不动点).我们通过考察电路系统的能量和最大 Lyapunov 指数在控制前后的变化,讨论了这种控制方法的控制机制.

2. 控制模型和控制方法

蔡氏自治电路的原理图模型如图 1 所示,其动力学方程

$$\begin{aligned}C_1 du_{c1}/dt &= G(u_{c2} - u_{c1}) - g(u_{c1}), \\C_2 du_{c2}/dt &= G(u_{c1} - u_{c2}) + i_L, \\L di_L/dt &= -u_{c2},\end{aligned}\quad (1)$$

其中 u_{c1} , u_{c2} 分别是电容 C_1 和 C_2 两端的电压, i_L 是通过电感 L 的电流, $G = 1/R$ 是电阻 R 的电导, NR 是非线性电阻,通常叫做蔡氏二极管,其 $i-v$ 特性

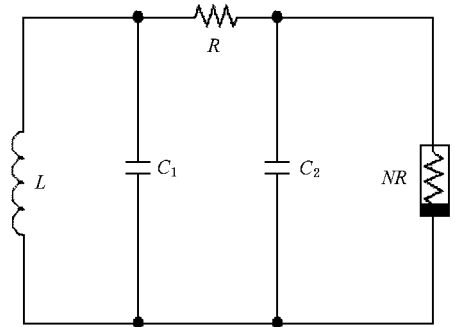


图 1 蔡氏自治电路的原理图

^{*} 广西自然科学基金(批准号: 0135063),国家重点基础研究专项基金(973 计划),国家攀登计划“非线性科学”,国家自然科学基金(批准号: 19932020, 19974039, 59876039, 19875080, 70071047),香港特区政府研究资助局基金(RGC-CUHK4241/01P)及中国加拿大大学与工业联合基金 CCUIPP-NSFC(批准号: 70142005)资助的课题.

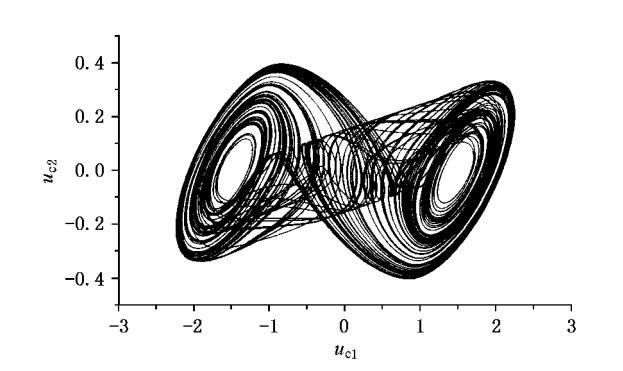


图2 典型的双涡卷混沌吸引子

可用以下分段线性函数 $g(u_{c1})$ 来表示：

$$g(u_{c1}) = m_0 u_{c1} + (1/2 \chi |m_1 - m_0| |u_{c1} + B_p| + (1/2 \chi |m_0 - m_1| |u_{c1} - B_p|), \quad (2)$$

其中 m_0, m_1 分别是外折线和内折线的斜率, B_p 是折点的电压。

当系统参数取为 $1/C_1 = 9, C_2 = 1, 1/L = 7, G = 0.7, m_0 = -0.5, m_1 = -0.8, B_p = 1.0$, Chua's 电路出现混沌运动^[10], 其典型的双涡卷混沌吸引子如图 2 所示。

本文采取对此电路中电容参数 C_2 进行开关调制达到混沌控制, 即

$$C'_2 = C_2(1 + Am(t)), \quad (3)$$

式中, A 为二值开关调制信号 $m(t)$ 的幅度, 取值满足 $|A| < 1$ 。控制时, 选择不同性质的 $m(t)$ 信号如双极性或非极性信号, 对称或非对称信号, 可以稳定各种不同的周期轨道。从 (3) 式所示的调制方式可知, 这种控制方法属于无反馈开环控制法, 它不要求系统的状态变量可观测, 因而在实际控制应用中可以不必知道被控系统的动力学方程及模型, 这使得该控制方法十分易于工程实现, 以下的电路仿真结果证实了这一结论。该控制方法的另一个优点是: 达到控制目标的可选策略多。除了改变调制信号的幅度 A 外, 还可以通过改变调制信号的宽度、极性、对称性等多种方式达到不同的控制目标。其控制机理可以通过物理系统在能量最低状态下最稳定的原理和控制后系统的最大 Lyapunov 指数随时间的转变来解释。

3. 控制机制分析

在自然界, 一个物理系统总是在能量最低状态下最稳定。稳定的非线性动态系统也总是朝能量低的方向运动。据此, 我们在文献 [11] 中提出了能量最

小法控制混沌的方法, 并发现相当一大类控制混沌方法满足能量最小准则, 即若控制方法使系统的能量减少, 并收敛到某个极小值状态, 则系统进入某个稳定运动状态, 下面用上述方法分析本文控制方法的物理机制。

由图 1 可见, Chua's 电路的贮能由电能和磁能组成, 由下式给出：

$$E = \frac{1}{2} C_1 U_{C_1}^2 + \frac{1}{2} C_2 U_{C_2}^2 + \frac{1}{2} L I_L^2. \quad (4)$$

在数值模拟中, 我们计算了 Chua's 电路从混沌状态控制到不动点的过程中, 能量平均值 E 随时间 t 的变化情况, 如图 3 所示。由图可见, 随着 Chua's 电路被控制到不动点, E 单调减小, 并收敛到一个极小值。因此, 本文采用的控制方法仍然满足能量最少可控性准则。另外, 我们还计算了 Chua's 电路从混沌状态控制到不动点的过程中, 最大 Lyapunov 指数 u_1 随时间 t 的变化情况, 如图 4 所示。由图可见, 随着 Chua's 电路被控制到不动点, u_1 也单调减小, 并收敛到一个值为负的极小值。因此, 本控制方法也符合通常的混沌控制机制: 转变正的 Lyapunov 指数为负值。

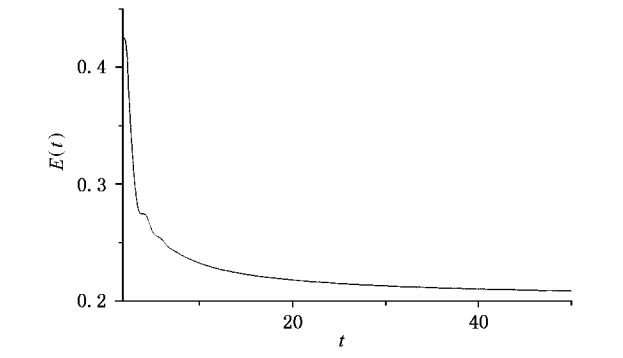


图3 电路能量平均值 E 随时间的变化

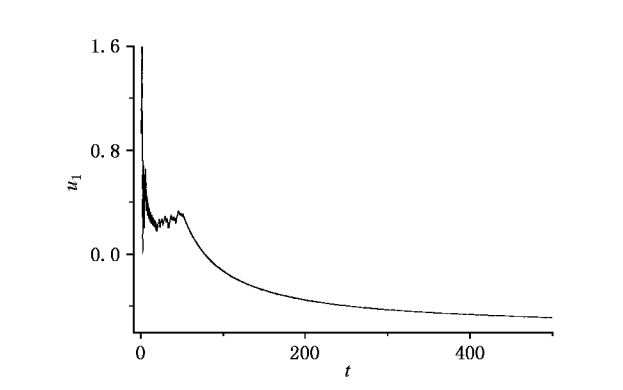


图4 电路最大 Lyapunov 指数 u_1 随时间的变化

4. 数值模拟结果

本文选择 $m(t)$ 为双极性、对称的开关信号(平均直流为零),其波形如图 5 所示.图中脉冲宽度 $T_w = n \Delta t$, n 为正整数, Δt 为积分步长.用四阶龙格-库塔法求解方程组(1)积分步长 $\Delta t = 0.01$,系统参数取文献[10]中 Chua's 电路出现混沌运动的参数,采用(3)式所示的参数调制方式, n 取为 1,改变 $m(t)$ 的幅度 A ,得到了电路系统不动点,1P,2P,4P,6P,8P 等各种稳定周期轨道的控制结果,分别如图 6—11 所示.其中不动点的控制稳态值和理论计算值精确相等.不动点的理论值的计算方法是:令(1)式各方程右边等于零,然后解方程组,得到三个不动点为 $(1.5, 0.0, -1.05)$, $(0.0, 0.0, 0.0)$, $(-1.5, 0.0, 1.05)$.我们是控制到右边不动点.当然也可以控制到左边不动点,这与起控时间有关.

数值研究表明:固定控制信号 $m(t)$ 的幅度 A ,改变其脉冲宽度 T_w ,即改变 n ,也可以得到电路系统的不动点及各种稳定的周期轨道,甚至 $m(t)$ 信号取非对称(直流不为零),也可以实现稳定的控制.因此,控制信号 $m(t)$ 可根据控制目标灵活调整.

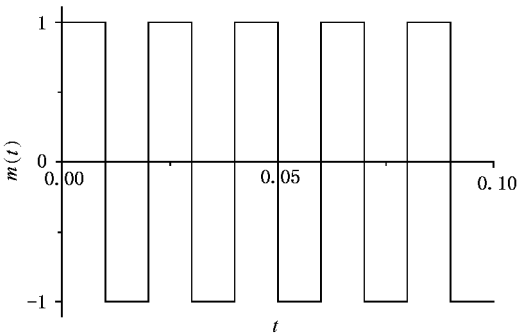


图 5 控制信号 $m(t)$ 的波形图

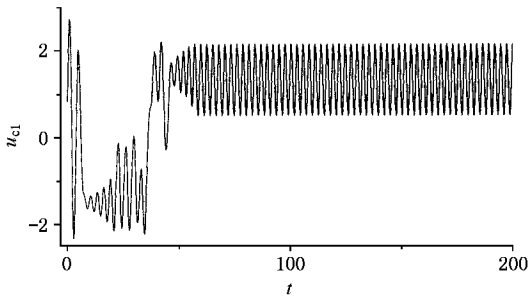


图 7 1P 轨道的控制结果($A = 0.6$)

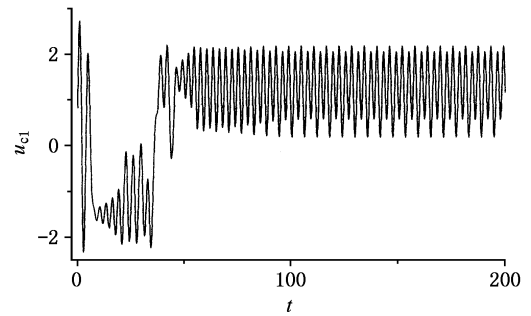


图 8 2P 轨道的控制结果($A = 0.5$)

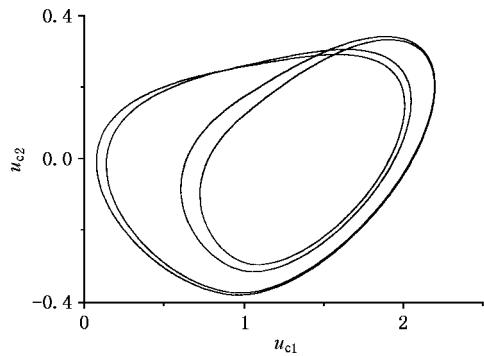


图 9 4P 轨道的控制结果($A = 0.46$)

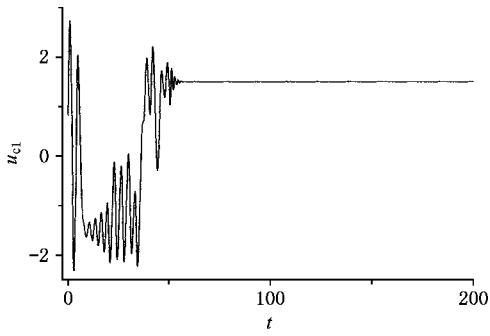


图 6 不动点的控制结果($A = 0.9$)

5. 电路仿真结果

为了进一步证实上述控制方法的正确性和有效性,并检验该控制方法工程应用的可能性,我们用 PSPICE 电路仿真软件进行了电路不动点、1P 轨道的控制仿真.由数值模拟结果可知, $m(t)$ 的幅度 $|A| = 0.9$ 时,系统被稳定控制到一个不动点,此时 C_2 交替取值为

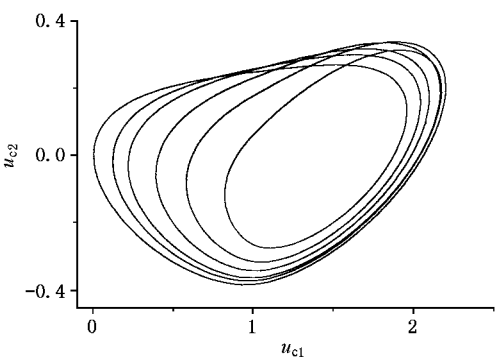


图 10 6P 轨道的控制结果($A = 0.436$)

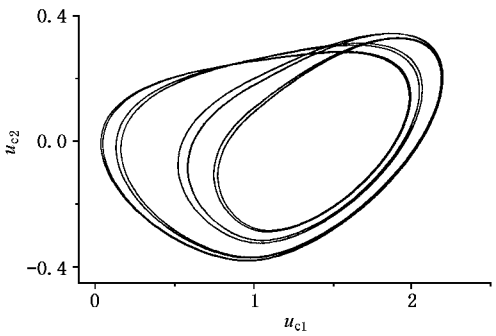


图 11 8P 轨道的控制结果($A = 0.448$)

$$C_2 = \begin{cases} 1.9C_2 & A = 0.9, \\ 0.1C_2 & A = -0.9. \end{cases} \quad (5)$$

根据上述取值方式 ,我们设计的控制仿真电路如图 12 所示 ,图中开关 k_1 在起控前处于闭合状态 ,开关 k_2, k_3 处于断开状态 ,电路系统出现混沌运动 .

$t = 10\text{ms}$ 时开始加入控制 ,此时开关 k_1 断开 , k_2, k_3 闭合 ,开关 S 在脉冲电压 V_5 的控制下周期性地断开、闭合 ,使得 Chua's 电路系统的电容 C_2 取值满足 (5) 式表达的规律 ,系统被控制到一个稳定的不动点 ,如图 13 所示 .改变受控后系统电容参数的取值 ,

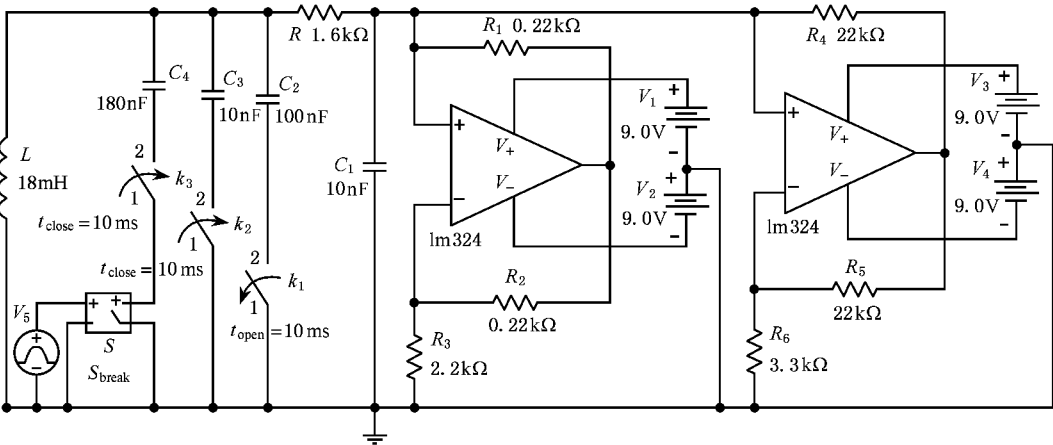


图 12 Chua's 电路混沌控制仿真图

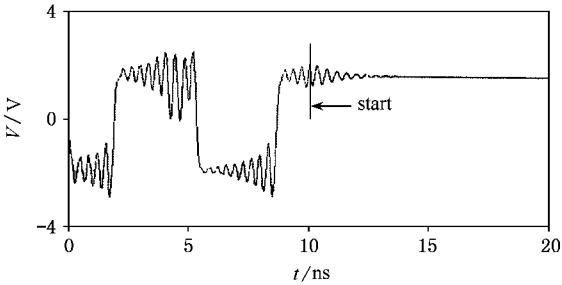


图 13 电路不动点的控制仿真结果

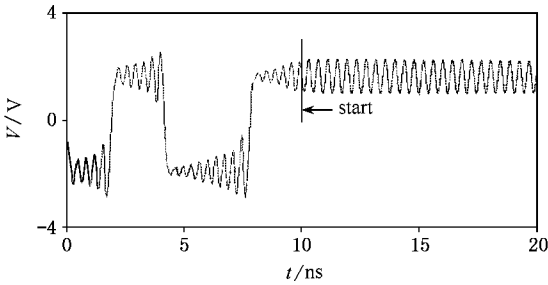


图 14 电路 1P 轨道的控制仿真结果($C_3 = 17.45\text{nF}, C_4 = 165.1\text{nF}$)

系统被控制到一个稳定的 $1P$ 轨道 ,如图 14 所示.

6. 结 论

本文采用开环控制策略 ,通过对 Chua 's 电路的电容参数进行开关调制 ,把混沌 Chua 's 电路控制到

各种稳定的周期态 .数值模拟结果和电路仿真结果具有很好的一致性 .这为本文方法的工程应用奠定了较好的基础 ,例如 ,通过改变电路系统的电容参数 ,可使混沌 Chua 's 电路成为一个多用途的信号发生器和信号变换器 ,对此 ,我们将进行进一步的研究 .

[1] Ott E , Grebogi C and Yorke J A 1990 *Phys. Rev. Lett.* **64** 1196

[2] Chen G R and Ueta T 1999 *Int. J. Bifurcation and Chaos* **9** 1465

[3] Chen G and Dong X 1993 *IEEE Trans. Circuit and System* **4** 591

[4] Chen G 1993 *IEEE Inst. Symp. Circuit and System* **1** 139

[5] Tong P Q 1995 *Acta Phys. Sin.* **44** 196 (in Chinese) [童培庆 1995 物理学报 **44** 196]

[6] Guemez J and Matias M A 1993 *Phys. Lett. A* **181** 29

[7] Lima B and Pettini M 1991 *Phys. Rev. Lett.* **66** 2545

[8] Chacon R and Bejarana G D 1993 *Phys. Rev. Lett.* **71** 313

[9] Yan S L *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 428 (in Chinese) [颜森林等 2001 物理学报 **50** 428]

[10] Takashi Matsumoto , Leon O Chua and Motomasa Komuro 1985 *IEEE Trans. Circuits and Systems* CAS-32 No 8

[11] Luo X S *et al* 1999 *Acta Phys. Sin.* (Overseas Edition) **8** 895

[12] Fang J Q *et al* 2001 *Progress in Nature Science* **11** 113 (in Chinese) [方锦清等 2001 自然科学进展 **11** 113]

[13] Fang J Q and Ali M K 1999 In :G Chen(ed) (New York :CRC Press) p107

[14] Qu S X and He D R 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1307 (in Chinese) [屈世显、何大韧 1997 物理学报 **46** 1307]

[15] Li W *et al* 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 1343 (in Chinese) [李 伟、陈式刚 2001 物理学报 **50** 1434]

[16] Pei L Q *et al* 1998 *Sci. Chin. (Series E)* **28** 83 (in Chinese) [裴留庆、戴心来、李宝东 1998 中国科学 (E 辑) **28** 83]

Study of parameter switching modulation for chaos control^{*}

Luo Xiao-Shu^{1,2)} Wang Bing-Hong¹⁾ Chen Guan-Rong³⁾ Jiang Pin-Qun²⁾ Fang Jin-Qing⁴⁾ Qun Hong-Jun¹⁾

¹⁾ (Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

²⁾ (Department of Physics and Electronic Science, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

³⁾ (Department of Electronic Engineering, City University of Hong Kong, Kowloon, Hong Kong, China)

⁴⁾ (China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

(Received 20 August 2001; revised manuscript received 9 October 2001)

Abstract

In this paper, a new method for controlling chaos is proposed, which is based on the parameter switching modulation. The chaotic Chua's circuit is controlled to its fixed point as well as nP periodic orbits by using switching modulation on one of its capacitor parameters. Experimental results of numerical simulation and circuit simulation have demonstrated that this method of chaos control is effective. Due to this method of controlling chaos the engineering application methods of Chua's circuit becomes richer.

Keywords: chaos control, Chua's circuit, parameter switching modulate

PACC: 0545

^{*} Project supported by the Guangxi Natural Science Foundation (Grant No. 0135063), the Special Foundation for State Major Basic Research Program in China (973 Project), the National Basic Research in "Climbing" Program "Nonlinear Science", The National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 19932020, 19974039, 59876039, 19875080, 70071047), the Research Grant Council of the HongKong SAK Government (Grant No. CUHK4241/01P), and the China-Canada University Industry Partnership Program (CCUIPP-NSFC Grant No. 70142005).