

文章编号:1671-6833(2005)03-0102-04

模拟电感与集成化混沌信号发生器实现研究

高金峰, 徐惠芳

( 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002)

摘 要: 在基本有源模拟电感实现方法的基础上, 以有源模拟电感代替理想电感元件, 对混沌信号发生器的集成化进行研究. 以著名 Chua 氏电路为例, 给出了混沌信号发生器的实现方案, 进行了集成化混沌信号产生电路的分析. PSpice 软件的仿真结果表明, 使用模拟电感代替混沌电路中的理想电感, 若设计合理, 不会影响原混沌电路的非线性动态行为, 可以实现混沌信号发生器的集成化.

关键词: 模拟电感; 蔡氏电路; 运算放大器

中图分类号: X 522 文献标识码: A

0 引言

混沌是非线性动力学系统所特有的一种运动形式, 是自然界普遍存在的一种复杂现象<sup>[1]</sup>. 随着混沌理论及其应用研究的不断深入, 混沌已被广泛应用于各个领域中, 如改善开关电源的电磁干扰<sup>[2]</sup>、保密通讯<sup>[3]</sup>、模式识别、优化预测等.

应用混沌需要获取特定性质的混沌信号, 对不同混沌信号源的需求也越来越迫切. 目前产生混沌信号的众多电路<sup>[4~9]</sup> 中的电感元件使用线圈和磁性材料制成, 体积大, 尤其不利于集成电路实现, 成为混沌信号产生电路中目前急需解决的关键问题. 使用有源电路与阻容元件相结合实现模拟电感是一种众所周知的解决电感元件集成化的途径. 但将模拟电感用于非线性电路, 尤其是用于解决混沌信号发生器的集成化问题, 目前文献则很少讨论.

笔者根据混沌信号发生器集成化的需要, 首先对混沌电路的特征进行了分析, 找出混沌信号发生器集成化需要解决的问题; 接下来对影响集成化的模拟电感实现问题进行了深入研究, 最后以著名的 Chua 氏混沌电路为例, 进行了混沌信号发生器的集成化研究.

1 混沌与混沌电路的特征

混沌(Chaos)是指在确定性系统中, 不需附加任何随机因素亦可出现的类似随机行为(内在随机性). 混沌最大特点是其对初始条件的极端敏感性和长期不可预测性. 非线性是电路产生混沌的

必备条件. 即产生混沌的电路中应至少包含有一个非线性元件.

比较典型并已得到深入研究的蔡氏电路(Chua's circuit)如图 1(a)所示<sup>[7]</sup>, 它是一个三阶自治振荡电路. 电路中唯一的非线性元件是一具有分段线性  $v-i$  特性的电阻如图 1(b)所示, 也称为蔡氏二极管, 其他元件均为线性元件, 相应的电路方程为:

$$\begin{cases} C_1 \frac{dv_{c1}}{dt} - G(v_{c2} - v_{c1}) - g(v_{c1}) \\ G_2 \frac{dv_{c2}}{dt} = G(v_{c1} - v_{c2}) + i_L \\ -L \frac{di_L}{dt} = -v_{c2} \end{cases} \quad (1)$$

其中,  $v_{c1}$  是电容  $C_1$  上的电压;  $v_{c2}$  是电容  $C_2$  上的电压;  $i_L$  是电感  $L$  上的电流;  $g(\cdot)$  是  $N_R$  的非线性特性函数, 其形式为:  $g(v_{c1}) = m_0 v_{c1} + 1/2 (m_0 - m_1)(|v_{c1} + E_0| - |v_{c1} - E_0|)$ , 式中:  $m_0$  和  $m_1$  分别表示  $N_R$  的  $v-i$  特性之内折线段的斜率,  $E_0$  为其折点电压.

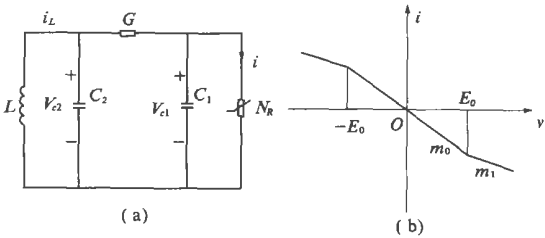


图 1 蔡氏电路及其非线性电阻伏安特性  
Fig. 1 Chua's circuit & the V-A characteristic of its nonlinear resistance

收稿日期:2005-03-30; 修订日期:2005-04-19

作者简介:高金峰(1963-),男,河南省项城县人,郑州大学教授,博士,主要从事非线性系统理论与控制研究.  
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图1在使用理想电感的情况下,改变电路参数,电路会依次出现丰富的非线性现象,例如分岔、混沌等.

若在电路中使用模拟电感代替理想电感,并且不影响原混沌电路的非线性动态行为,首先必须解决模拟电感与理想电感的等效、频率特性、动态范围、以及模拟电感的动态范围与非线性元件特性的有效区域的协调等问题.

2 模拟电感电路

为实现模拟电感在混沌电路中代替理想电感的目标,首先对模拟电感电路加以介绍.模拟电感分为接地电感和浮地电感两种,浮地电感的电路简单,分析简便,但稳定性较差;接地电感电路简单并且稳定性较好,从制作工艺上来讲容易实现.

2.1 接地电感电路

图2所示是一通用阻抗变换器,它由两个运算放大器组成.在运算放大器的线性区域中,可以列出下列方程:

$$ZI(s) = -Z_2 I_3(s) \tag{2}$$

$$Z_3 I_3(s) = Z_4 I_5(s) \tag{3}$$

由式(1)和式(2)得出:

$$I(s) = -Z_2 I_3(s) / Z_1 = -Z_2 Z_4 I_5(s) / Z_1 Z_3 \tag{4}$$

因此输入阻抗为:

$$Z_{in}(s) = V(s) / I(s) = Z_1 Z_3 Z_5 / Z_2 Z_4 \tag{5}$$

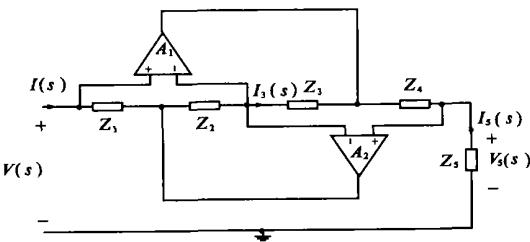


图2 接地电感  
Fig.2 Earth inductor

为实现接地模拟电感,可以将 $Z_2$ 或 $Z_4$ 选为电容.当将 $Z_2$ 选为电容时,有 $Z_2 = 1/sC_2$ ,  $Z_k = R_k$  ( $k=1, 3, 4, 5$ ),求得 $Z_{in} = sR_1R_3R_5C_2/R_4$ ,即

$$L_{eq} = R_1R_3R_5C_2/R_4 \tag{6}$$

从式(6)中可以看到,改变式中任一个电阻或电容值均可以改变模拟电感的数值,获得需要的电感值.

如前所述,在非线性电路中运用的模拟电感数值仅是其一项指标,为保证模拟电感在特定电

路中正常工作,还需要根据不同非线性电路的要求,设计其动态范围.

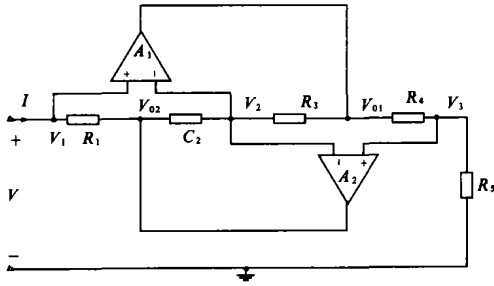


图3 典型接地模拟电感电路  
Fig.3 Simulated typical earth induction circuit

为讨论模拟电感电路的动态范围,图3给出了按式(6)设计的典型接地模拟电感电路.通过对该电路进行分析知道,影响其动态范围的主要因素是运算放大器 $A_1$ 的饱和电压.即当模拟电感的输入信号幅度增加时,运算放大器首 $A_1$ 先进入饱和区.基于这一考虑,设运算放大器 $A_1$ 的饱和电压为 $E$ ,在从线性区进入饱和区的转折点上,根据图3有

$$\frac{V}{R_5} = \frac{E - V}{R_4}$$

于是有

$$V_d \leq \frac{R_4 R_5}{R_4 R_5 + R_4^2} E \tag{7}$$

即接地模拟电感的动态范围由式(7)给出.典型情况,若选择 $R_4 = R_5$ ,此时的动态范围为

$$V_d \leq \frac{E}{2} \tag{8}$$

由上述分析可知,随着加在模拟电感两端电压幅值的增加,当输入电压满足式(7)的约束时,就保证接地模拟电感工作在线性区域.

2.2 浮地电感电路

图4所示为一浮地模拟电感电路,由理想运算放大器的条件可以求得 $V_{01} = 2V_i$ ,又由 $\frac{V_0 - V_1}{Z} = \frac{V_i - V_{01}}{R_2}$ ,得出

$$V_0 = (1 - \frac{Z}{R_2}) V_i \tag{9}$$

根据基尔霍夫电压定律,得到

$$V_0 = V_i - I_i R_3 \tag{10}$$

由式(9)和式(10)求得图4电路的输入阻抗为

$$Z_i = \frac{V_i}{I_i} = \frac{R_2 R_3}{Z} \tag{11}$$

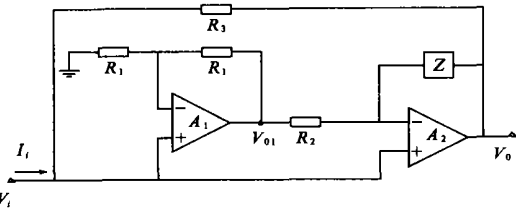


图 4 浮地电感

Fig. 4 Floating earth inductor

若图中  $Z$  取电容  $C$ , 其容抗为  $Z = \frac{1}{j\omega C}$ , 则电路的输入阻抗为

$$Z_i \approx \omega R_2 R_3 C \approx \omega L_e \tag{12}$$

根据前述的分析可知,图 4 可以看作是模拟电感,其电感值

$$L_e = R_2 R_3 C \tag{13}$$

改变电容  $C$  值或者  $R_2$ 、 $R_3$  值,均可以改变模拟电感的大小.

按照分析接地电动态范围的方法,也可以得到浮地电感的动态范围.

3 基于模拟电感实现的混沌信号发生器

为验证使用模拟电感实现混沌信号发生器集成化的可能性,现给出使用接地模拟电感代替理想电感元件构成的蔡氏电路实现电路如图 5 所示.

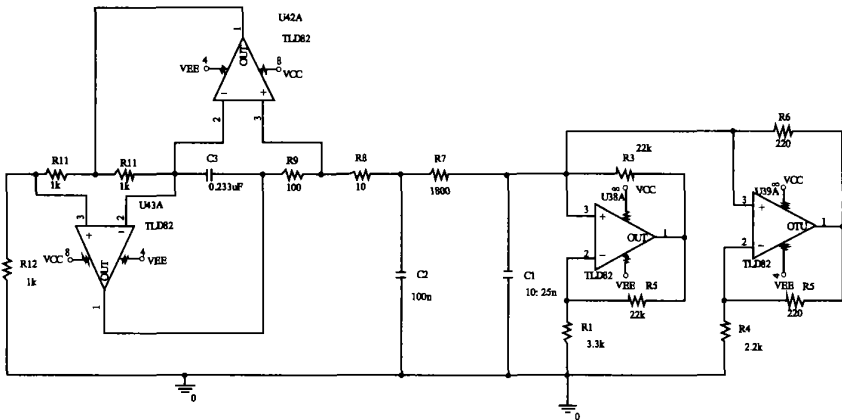


图 5 蔡氏电路的实现电路

Fig. 5 Chua's circuit's realization circuit

由于理想蔡氏电路中仅有一个非线性电阻,实现电路中可以用两个具有不同转折点电压和符合要求的负电阻并联实现.电路设计中关键要考虑的是模拟电感的动态范围与非线性电阻元件特性的有效区域的协调问题.即应保证设计的模拟电感在代替混沌电路中的理想电感时,不影响原混沌电路的非线性动态行为.

按照前面的思路,进行了图 5 中各元件及元件参数的选择.实现模拟电感及非线性电阻的运算放大器均选用最普通的 TL 082 运放,以  $R_7$  作为连续可调电阻.

按图 5 中电路,当  $R_7$  从  $2\ 030\ \Omega$  开始由大到小变化时,系统将经过周期 1、周期 2、周期 3...,以及各种周期的逐渐出现;继续减小  $R_7$  则会出现单涡卷混沌,随后又出现双涡卷混沌.所呈现的非

线性现象与理想蔡氏电路一致,这说明了使用模拟电感实现集成化混沌信号发生器的可行性.图 6 给出了  $R_7$  取不同值的情况下, Pspice 仿真所得的蔡氏电路经倍周期到混沌时  $V_{c1}-V_{c2}$  的平面相图.

4 结论

通过对模拟电感及其动态范围的讨论,以蔡氏电路为例进行了混沌信号发生器的集成化可行性探讨.结果表明,用有源器件构成的有源模拟电感代替理想电感元件,若设计合理,可以产生理想混沌电路中所有的混沌行为而不影响其性能.由于有源模拟电感具有体积小,重量轻,便于制作和集成化的优点,因此该方法具有一定的实际应用价值,有着广泛的应用前景.

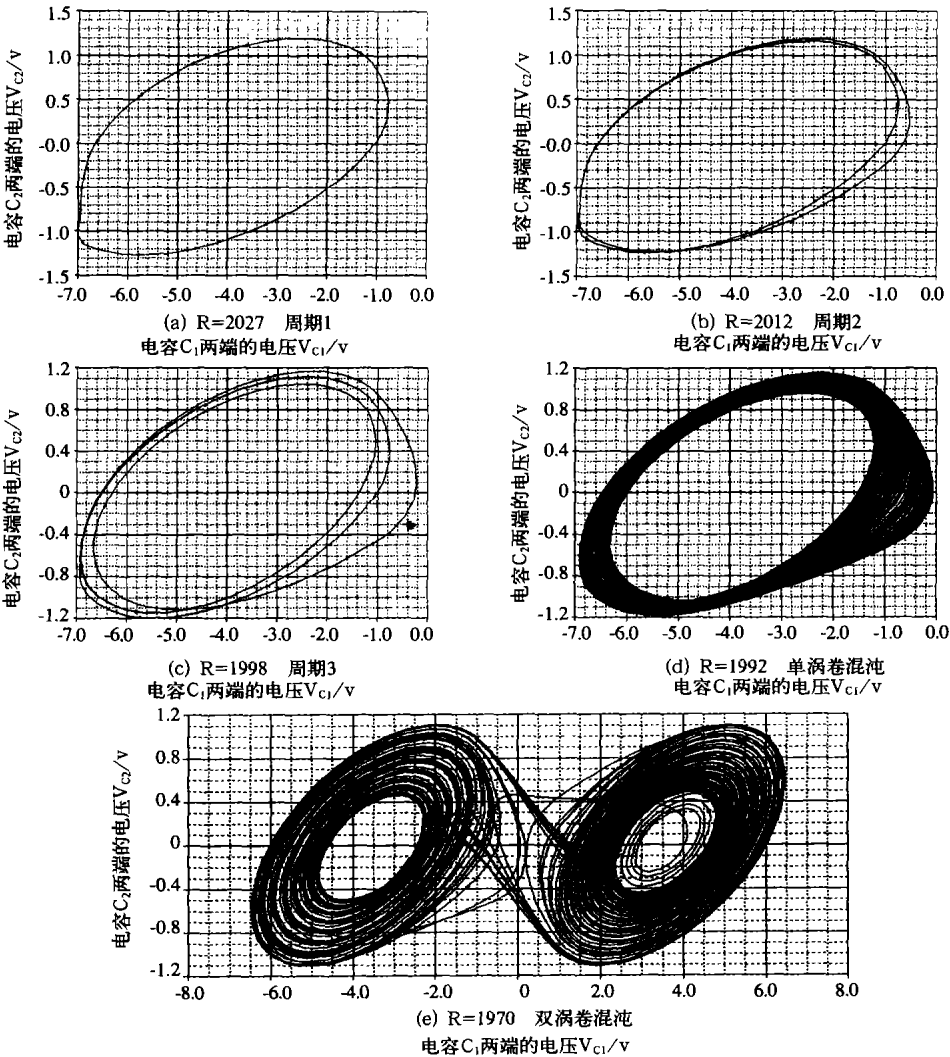


图 6 蔡氏电路周期与混沌相图

Fig. 6 Chua's circuit & Chaos phase diagram

参考文献:

[ 1 ] BOCCALETTI S, GEBOGI C, LAI Y C, et al. 2000 Physics Reports , 329, 103.

[ 2 ] 高金峰, 吴振军, 赵坤. 混沌调制信号生成及其改善开关电源电磁兼容性的研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2003, 24( 4) : 85~92.

[ 3 ] KOCAREV L, PARITZ U. General approach for chaotic synchronization with application to communication[J]. Phys Rev , 1995, 74, 5208~5212.

[ 4 ] MATSUMOTO T, CHUA L O. The double scroll[J]. IEEE Trans , 1985, CAS -32( 8) : 797~818.

[ 5 ] MATSUMOTO T. Chaos in electronic circuits . Proc IEEE , 1987, 76( 8) : 1033~1057.

[ 6 ] MATSUMOTO T, CHUA L O, KOBAYASHI K. Hyper - chaos[J]. IEEE Trans CAS , 1986, 33, 1~10.

[ 7 ] 邱关源. 现代电路理论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001.

Research on Simulated Inductances and Integrative Chaotic Signal Generator

GAO Jin -feng, XU Hui -fang

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract :** This paper is on the basis of the realized method which introduces active simulated inductances , using the active simulated inductances to replace ideal inductances to make research of the realization of integrative chaotic signal generator . Gting the famous Chua 's circuit as the example , this paper gives the realized scheme , and makes an analysis of integrative chaotic signal generator . According to the simulation results of PSpice software , using the active simulated inductances in the place of ideal inductances has no influence on the original circuit 's nonlinear dynamic characteristic if the design is reasonable and the chaotic signal generator can be integrated .

**Key words :** simulated inductance ; Chua 's circuit ; operational amplifier