

混沌信号产生装置

摘要：常见的混沌信号产生大多采用蔡氏电路、范德坡电路、考比兹电路等。本装置以蔡氏电路为产生混沌信号的基本模块，经过放大电路放大信号波形，并通过单片机控制继电器从而在示波器上依次显示各信号波形，具有电路结构简洁易实现，转换显示清晰直观，信号波形稳定等优点。经测试，能在示波器上稳定显示单双三倍周期稳定周期相图，单双涡旋混沌信号相图的幅度达到不小于电源电压 V_{CC} 的 80%，并且实现双涡旋的带宽达到 40Mhz，改进电路，用模拟电感模块替代电感，仅使用电阻、电容和运算放大器搭建电路，并实现控制运算放大器总个数不超过 6 个。基本完成题目基本要求，用电感代替电路拓展带宽，并创新性的利用单片机控制继电器模块实现电路参数转换。

关键词：混沌电路；蔡氏电路；单片机；硬件设计；

1. 方案设计

混沌（chaos）是指确定性动力学系统因对初值敏感而表现出的不可预测的、类似随机性的运动。混沌信号（chaotic signal）波形是非常不规则的，表面上看来就像噪声，但实际上它却是由确定性的规则所产生的。

1.1 系统原理

本系统期望实现基于蔡氏电路的混沌电路：产生稳定周期信号相图，通过改进装置达到元件及带宽要求，且控制所用运算放大器个数，并依次在示波器上显示信号相图。

混沌信号产生装置的主要原理是利用双运放和线性电阻构成蔡氏二极管，根据其特性曲线，与电阻电容电感组成三阶自治电路从而产生混沌信号。同时，可以利用电阻电容和运算放大器构成模拟电感，以替代电感来进行电路搭建。

1.2 技术方案分析比较

1.2.1 混沌信号产生电路的选择：

【方案一】范德坡电路、考比兹电路：这两种电路适用于高频混沌电路的产生，但是二者电路中都含有三极管，考虑利用电路中的运放内部三极管实现，选用的运放类型对应的三极管无法产生振荡，故舍弃。

【方案二】蔡氏电路：蔡氏电路是经典的混沌信号产生电路，符合题目不含三极管

设计电路的要求，并且通过电路改进，实现高带宽的要求。

【总结】综上所述，本装置选择蔡氏电路产生混沌信号。

1.2.2 混沌信号发生芯片的选择：

【方案一】TL082：TL082 为常用运算放大器，常见经典蔡氏混沌电路采用该运放可产生稳定的混沌信号相位图，但查阅数据手册可知，该运放增益带宽积最大达 4MHZ，不适用于产生更宽的带宽信号。

【方案二】THS3001：THS3001 是一款高速电流反馈运算放大器，420MHZ 带宽，具有极低失真度，且电源范围广，其输出信号幅度可达 $\pm 12V$ 。

【总结】综上所述分析，选择采用方案二，THS3001 运算放大器芯片，从而获得较大幅度、宽带宽的信号波形。

1.2.3 控制电路电阻参数改变方法的选择：

【方案一】采用开关选择控制：设计电路结构简洁易实现，但手动切换开关可能对电路造成影响，不确定性较大。

【方案二】采用编程设置：利用 51 单片机控制继电器，编程控制使实际操作简便，能依次生成相图信号。

【总结】综上所述分析，选择采用方案二，采用编程设置。

2. 系统设计分析

2.1 系统组成框图及工作原理

本设计基于经典蔡氏电路的改进混沌电路作为主要混沌信号产生模块，采用单片机控制的继电器控制信号波形转换，通过示波器显示，基本系统组成框图如图 1 所示。

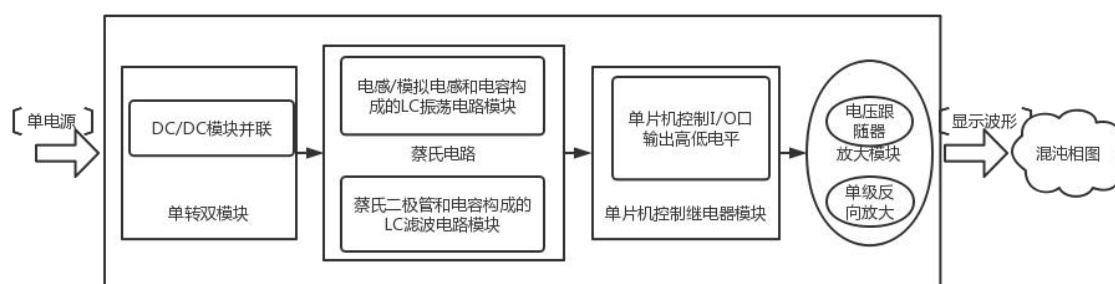


图 1 系统组成框图

2.2 理论分析与参数计算

2.2.1 混沌电路原理分析

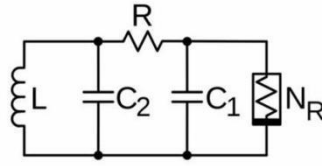


图 2 蔡氏混沌电路

蔡氏电路由一个线性电感 L ，两个线性电容 C_1 、 C_2 ，一个线性可变电阻 R 以及一个非线性电阻构成, 电路如图所示。根据基尔霍夫定律，由上图可以得到电路的状态方程：

$$\frac{du_1}{dt} = -\frac{u_1}{RC_1} + \frac{u_2}{RC_1} - \frac{f(u_1)}{C_1} \quad (1)$$

$$\frac{du_2}{dt} = \frac{u_1}{RC_2} - \frac{u_2}{RC_2} + \frac{i_L}{C_2} \quad (2)$$

$$\frac{di_L}{dt} = -\frac{u_2}{L} - \frac{ri_L}{L} \quad (3)$$

(1) 式中， $f(u_1)$ 是描述非线性电阻的伏安关系特性函数， r 是电感的寄生电阻值，由于 i_L 非线性，上述方程组没有解析解，所以该电路会在特定参数条件下出现混沌现象。

一般的蔡氏二极管是一个具有分段线性函数形式的非线性负电阻，其流过的电流 i_N 和两端的电压 u_N 之间的伏安关系表达式为：

$$i_N = f(u_N) = G_b u_N + 0.5(G_a - G_b)[|u_N + B_p| - |u_N - B_p|] \quad (4)$$

(4) 式中， G_a 是内区间电导， G_b 是外区间电导， B_p 是内外区间的转折点电压。

2.2.2 宽带混沌电路设计

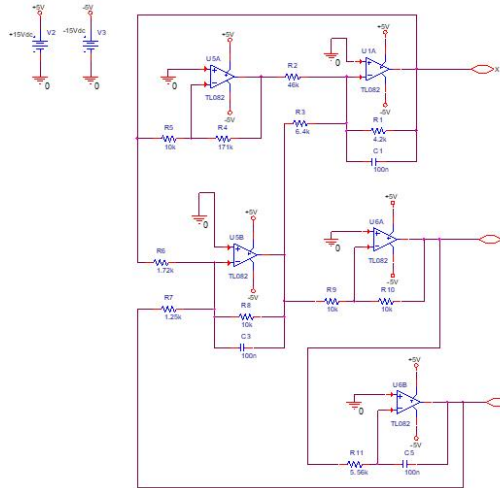


图 3 宽带混沌电路设计

将蔡氏方程进行无量纲处理，得到其电路参数的简便形式：

$$a = \frac{G_a}{G} \quad , \quad b = \frac{G_b}{G} \quad , \quad \alpha = \frac{C_2}{C_1} \quad , \quad \beta = \frac{C_2}{LG^2}$$

从蔡氏电路的设计原理可知当参数 α 和 β 在相对应的单涡卷和双涡卷的区域中时，可以分别产生单涡卷和双涡卷信号。因此，只要选取合适的 a 和 b 以及 α 和 β ，我们就能得到蔡氏混沌电路产生的涡旋信号。

此外，蔡氏电路混沌信号频带宽具有非周期性，因此可以利用蔡氏电路处于 Hopf 分岔时的频率来估算混沌频谱的分布范围。当蔡氏电路在 Hopf 分岔点时为周期 1，此时频率记为 f_H 。随着周期倍增，新增的信号频谱分量将位于直流和 f_H 之间，因此，只要得到处于 Hopf 分岔时的振荡频率，就可以估算出信号带宽。由 Hopf 分岔来估算混沌信号频谱的公式：

$$F_N = \frac{1}{RC_1} \sqrt{(-RG_b) \times (1 + RG_b)} \quad (5)$$

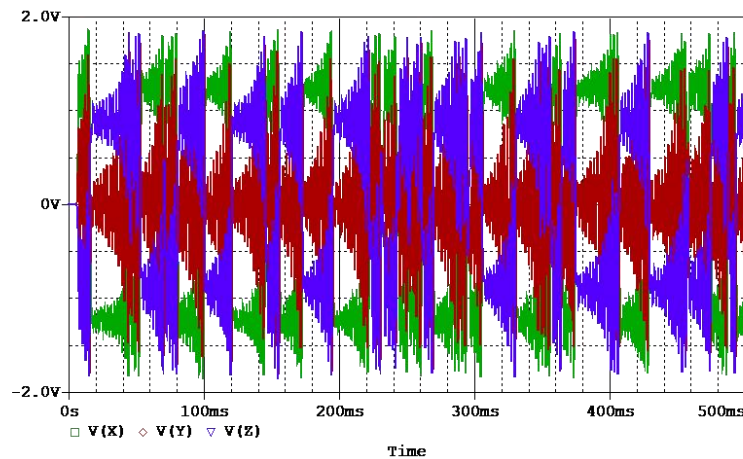


图 4 PSpice 仿真——39.56Mhz

为达到 40Mhz 的带宽，由于电路参数 a , b , α 和 β 在一个相对固定的范围内就能形成单双涡旋信号，在秉着以下三种原则的情况下：1. 一种动态元件和所有的电阻同步改变，另一种动态元件保持不变。2. 如果保持所有电阻保持不变，则同时同向改变动态元件参数。3. 电感和所有电阻变化相同，电容变化趋势与之相反，如电感和所有电阻都增大为原来的 m 倍，电容减小为原来的 m 分之一。进行带宽电路参数的调试。同时，通过改电阻参数来影响 G 的参数，从而调整整个电路的带宽参数。

2.2.3 不使用电感的设计

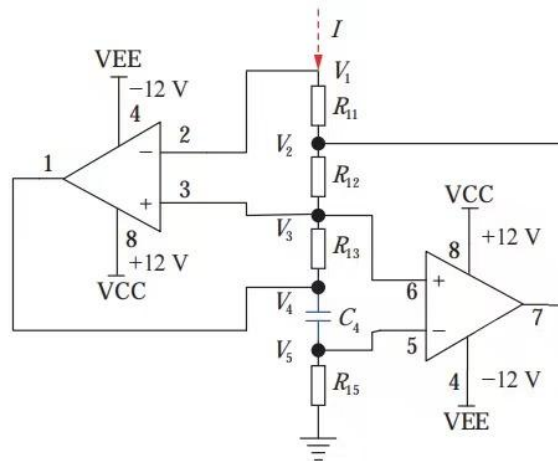


图 5 模拟电感电路

假设流入节点 V1 的电流为 I，从上至下 4 个节点的电压分别为 V2、V3、V4、V5，记 R11、R12、R13、C4、R15 的阻抗为 Z1、Z2、Z3、Z4、Z5。根据运算放大器的虚拟短路和断路，有：

$$V_1 = V_3 = V_5 \quad (6)$$

$$I = \frac{V_1 - V_2}{Z_1} \quad (7)$$

$$\text{又: } \frac{V_1 - V_2}{Z_2} + \frac{V_1 - V_4}{Z_3} = 0 \quad (8), \quad \frac{V_1 - V_4}{Z_4} + \frac{V_1}{Z_5} = 0 \quad (9)$$

$$\text{所以: } V_1 - V_2 = -\frac{V_1 - V_4}{Z_3} Z_2 \quad (10), \quad V_1 - V_4 = -\frac{V_1}{Z_5} Z_4 \quad (11)$$

最终模拟的总阻抗为：

$$Z = \frac{V_1}{I} = \frac{Z_1 Z_3 Z_5}{Z_2 Z_4} \quad (12)$$

当 Z1、Z3、Z5 全为电阻，Z2 与 Z4 中的一个为电容，则电路呈现电感形态，则模拟电感的数值为：

$$Z = L = \frac{R_{11} R_{13} R_{15}}{R_{12} C_4} \quad (13)$$

2.3 电路主要模块设计

本发生器主要分为 5 个模块

(1) LC 振荡电路模块

要求 1 中电感 L 和电容 C2 构成一个 LC 振荡电路；要求 3 中，用 1 个 LM358 运算放大器的 2 个单元以及电阻 R8、R9、R10、R11、电容 C3 构成模拟电感。

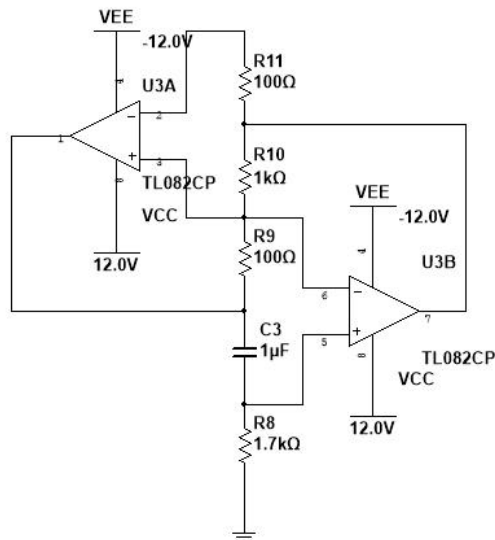


图 6 LC 振荡模块

(2) LC 滤波电路模块

蔡氏二极管是蔡氏电路产生混沌现象的重要元件，可采用多种方式实现，本发

生器选择较为简单的实现方式，用两片 THS3001 和 6 个电阻组成等效电路。

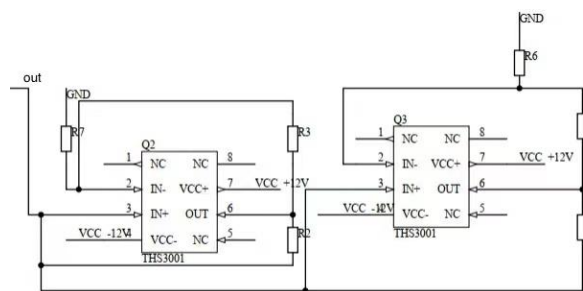


图 7 LC 滤波电路模块

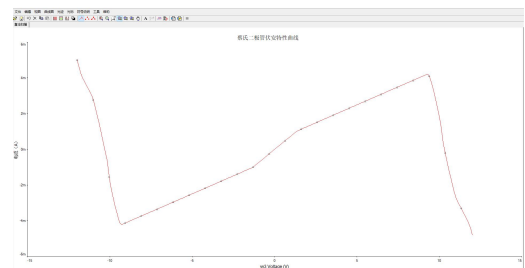


图 8 蔡氏二极管伏安特性曲线

(3) 单片机控制继电器模块

为实现对电路参数的智能管理，通过 C51 单片机的矩阵键盘控制高低电平，控制继电器的开闭，实现对电路中不同参数的电阻支路控制。

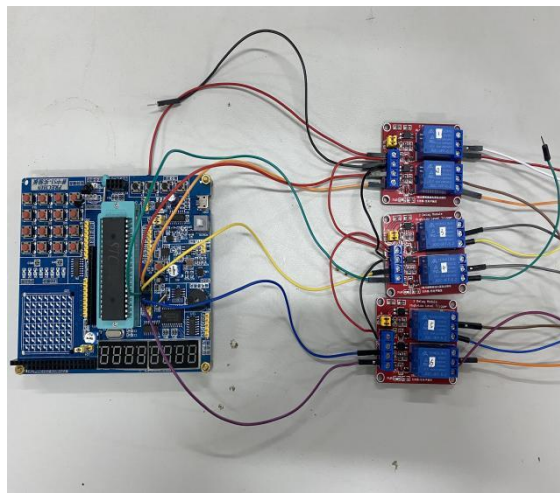


图 9 单片机控制继电器

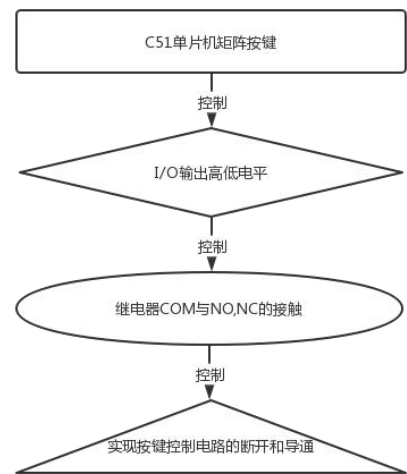


图 10 控制流程图

(4) 放大模块

为实现单双涡旋混沌信号幅度不小于电源电压 V_{cc} 的 80%，需要对小信号幅值进行放大。在原来的小信号输出加上由 LM358 运算放大器和 R14、R15 组成的一个电压跟随器和一个反向放大器模块。

(5) 单电源转双电源模块

为实现题目要求的单电源转双电源要求，利用两个 6.8V 输出的 DC/DC 并联，从而实现题目仅使用单电源激励的要求。

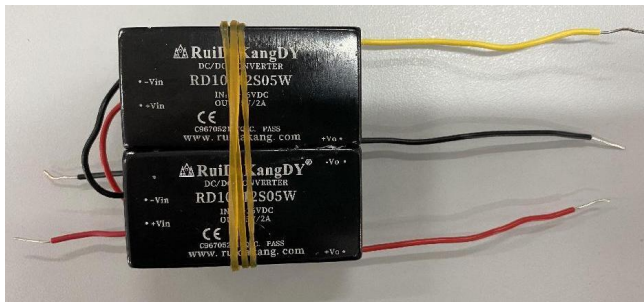


图 11 单电源转双电源模块

3. 作品成效总结分析

3.1 测试仪器

- (1) AG1022F 双通道信号发生器
- (2) IPS3303 三通道可调直流稳压电源
- (3) UP08152Z 双通道示波器
- (4) MBHFC08729 数字多用表

3.2 测试方法

3.2.1 软件测试:

利用 Multisim 和 Pspice 进行电路仿真:

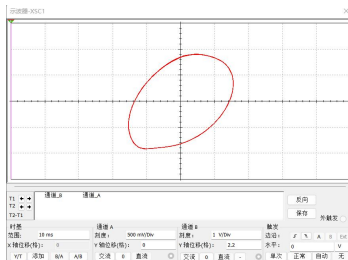


图 12 单倍周期相图

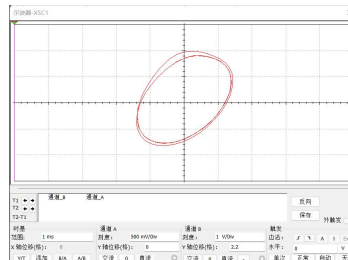


图 13 双倍周期相图

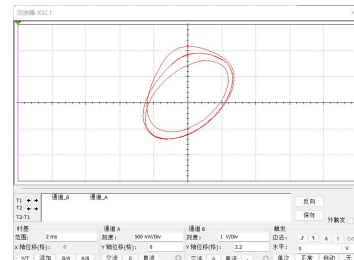


图 14 三倍周期相图

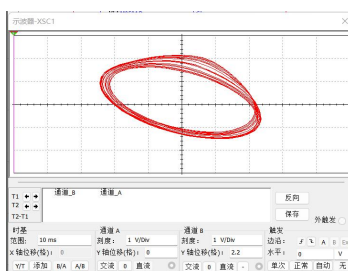


图 15 单涡旋相图

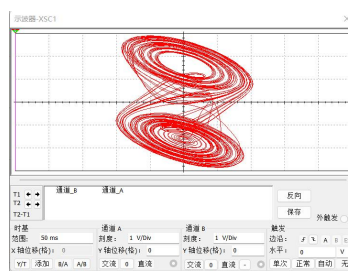


图 16 双涡旋相图

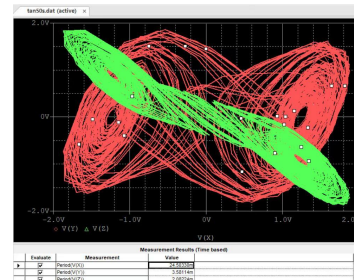


图 17 PSpice 仿真带宽 39.65Mhz

3.2.2 硬件测试:

利用 Altium Designer 进行硬件电路设计, 并在此基础上进行 PCB 的绘制与制作。

利用面包板和洞洞板搭建测试电路, 利用测试器件先对实物电路进行调试, 通过设置多个测试点, 通过外接示波器对测试点检测, 验证无误后, 在此基础上将器件焊在设计好的 pcb 板上。

3.2.3 软硬件测试:

首先利用软件仿真对电路的正确性进行测试,排除对应的软硬件问题,在硬件调试时先输出到示波器。此后利用 Multisim 设置测试点,同时对实物对应的测试点接上示波器接线,实时观测系统的运行情况,软硬联合调试。

4. 总结

由于混沌运动对于电路元件参数的误差特别敏感,蔡氏电路中电路元件的精度和整体电路的设计至关重要,基于经典蔡氏电路的改进混沌电路,配合 Multisim、PSpices 进行电路仿真,实现题目中不同显示信号相图波形要求,而后采用 Altium Designer 绘制出所要的 PCB 板,在实际搭建电路的过程中,电路元件的参数细微的变化就会引起电路波形的改变,这对实际搭建电路的提出了很大的要求,在实现基本功能后,进行电路改进,利用单片机控制继电器依次在示波器上显示波形,操作方便,清晰直观。

参考资料及文献

- [1]刘恒,刘远林,吴朝阳,孙亚坤,刘泽.一种蔡氏混沌电路实验设计[A].第六期.实验科学与技术,南京信息工程大学电子与信息工程学院.2020.
- [2]徐慧芳.混沌信号发生器及其集成化研究[D].河南:郑州大学,2005
- [3]包伯成.混沌电路导论[M].1版.北京:科学出版社,2013:86-95
- [4]薛雪,刘晓文,陈桂真,梁睿.蔡氏混沌电路综合设计性实验[A].第六期.实验技术与管理,中国矿业大学信息与控制工程学院、电气与动力工程学院.2017