

# 混沌原理及应用实验

## 实验一 非线性电阻的伏安特性实验

- 1. 实验目的  
测量非线性电阻的伏安特性曲线
- 2. 实验装置  
混沌原理及应用实验仪
- 3. 实验对象  
非线性电阻模块
- 4. 实验原理框图

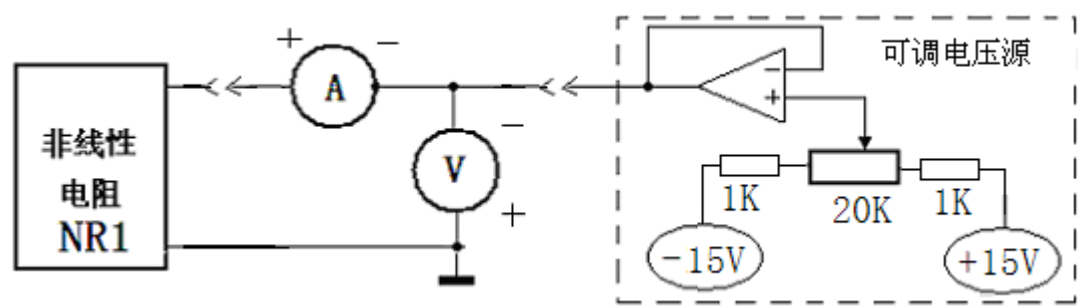


图 1 非线性电阻伏安特性原理框图

- 5. 实验方法
  - a) 在混沌原理及应用实验仪面板上插上跳线 J1、J2，并将可调电压源处电位器旋钮逆时针旋转到头，在混沌单元 1 中插上非线性电阻 NR1。
  - b) 连接混沌原理及应用实验仪电源，打开机箱后侧的电源开关。面板上的电流表应有电流显示，电压表也应有显示值。
  - c) 按顺时针方向慢慢旋转可调电压源上电位器，并观察混沌面板上的电压表上的读数，每隔 0.2V 记录面板上电压表和电流表上的读数，直到旋钮顺时针旋转到头，将数据记录于表 1 中。

表 1 非线性电阻的伏安特性测量

电压（V）	.....	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2	1.4	.....
电流（mA）										

- d) 以电压为横坐标、电流为纵坐标用第三步所记录的数据绘制非线性电阻的伏安特性曲线如图 2所示。

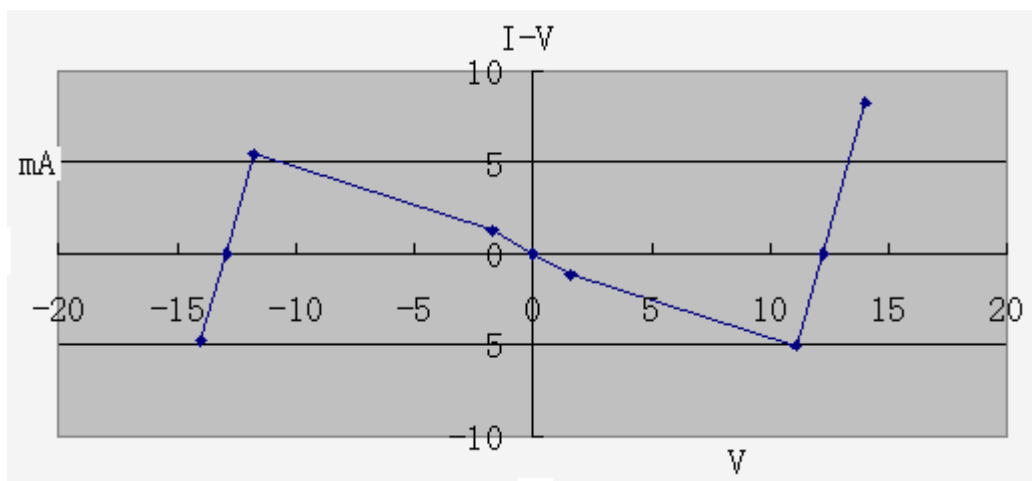


图 2 非线性电阻伏安特性曲线图

- e) 找出曲线拐点，分别计算五个区间的等效电阻值。

## 实验二 混沌波形发生实验

### 1. 实验目的

调节并观察非线性电路振荡周期分岔现象和混沌现象

### 2. 实验装置

混沌原理及应用实验仪、双通道数字示波器 1 台（自备）、电缆连接线 2 根。

### 3. 实验原理图

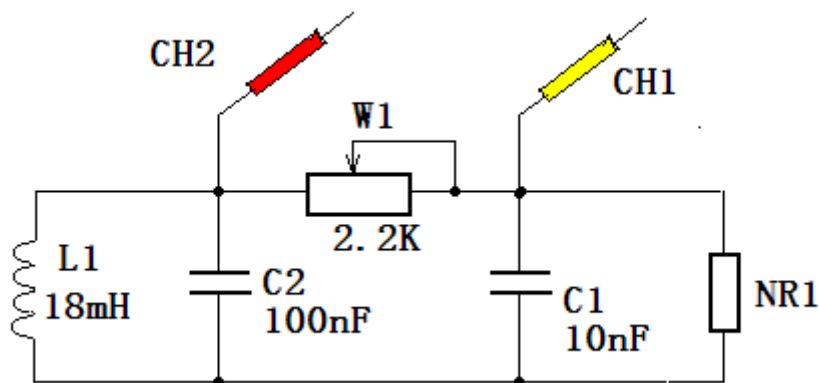


图 3 混沌波形发生实验原理框图

### 4. 实验方法

- 拔除跳线 J1、J2（本次和接下来的实验内容均不需要用跳线 J1、J2），在混沌原理及应用实验仪面板的混沌单元 1 中插上电位器 W1、电感 L1、电容 C1、电容 C2、非线性电阻 NR1，并将电位器 W1 上的旋钮顺时针旋转到头。
- 用两根 Q9 线分别连接示波器的 CH1 和 CH2 端口到混沌原理及应用实验仪面板上标号 Q8 和 Q7 处。打开机箱后侧的电源开关。
- 把示波器的时基档切换到 X-Y。调节示波器通道 CH1 和 CH2 的电压档位使示波器显示屏上能显示整个波形，逆时针旋转电位器 W1 直到示波器上的混沌波形变为一个点，然后慢慢顺时针旋转电位器 W1 并观察示波器，示波器上应该逐次出现单周期分岔(见图 4)、双周期分岔(见图 5)、四周期分岔(见图 6)、多周期分岔(见图 7)、单吸引子(见图 8)、双吸引子

(见图 9)现象。



图 4 单周期分岔



图 5 双周期分岔



图 6 四周期分岔



图 7 多周期分岔

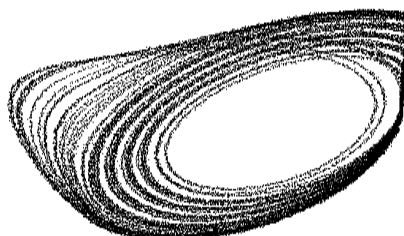


图 8 单吸引子

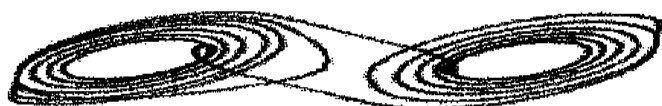


图 9 双吸引子

注：在调试出双吸引子图形时，注意感觉调节电位器的可变范围。即在某一范围内变化，双吸引子都会存在。最终应该将调节电位器调节到这一范围的中间点，这时双吸引子最为稳定，并易于观察清楚。

### 实验三 混沌电路的同步实验

#### 1. 实验目的

调试并观察混沌同步波形

#### 2. 实验装置

混沌原理及应用实验仪、双通道数字示波器 1 台（自备）、电缆连接线 2 根。

#### 3. 实验原理图

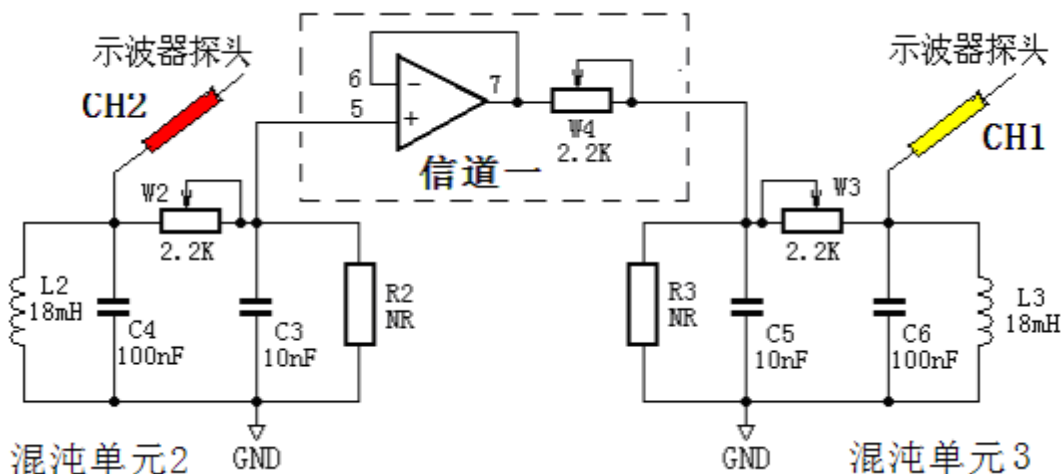


图 10 混沌同步原理框图

#### 4. 工作原理

- 由于混沌单元 2 与混沌单元 3 的电路参数基本一致，它们自身的振荡周期也具有很大的相似性，只是因为它们的相位不一致，所以看起来都杂乱无章。看不出它们的相似性。
- 如果能让它们的**相位同步**，将会发现它们的振荡周期非常相似。特别是将 W2 和 W3 作适当调整，会发现它们的振荡波形不仅周期非常相似，幅度也基本一致。整个波形具有相当大的等同性。
- 让它们**相位同步**的方法之一就是让其中一个单元接受另一个单元的影响，受影响大，则能较快同步。受影响小，则同步较慢，或不能同步。为此，在两个混沌单元之间加入了“信道一”。
- “信道一”由一个射随器和一只电位器及一个信号观测口组成。

射随器的作用是单向隔离，它让前级（混沌单元 2）的信号通过，再经 W4 后去影响后级（混沌单元 3）的工作状态，而后级的信号却不能影响前级的工作状态。

混沌单元 2 信号经射随器后，其信号特性基本可认为没发生改变，等于原来混沌单元 2 的信号。即 W4 左方的信号为混沌单元 2 的信号。右方的为混沌单元 3 的信号。

电位器的作用：调整它的阻值可以改变混沌单元 2 对混沌单元 3 的影响程度。

#### 5. 实验方法

- 插上面板上混沌单元 1、混沌单元 2 和混沌单元 3 的所有电路模块，即在混沌原理及应用实验仪面板的 3 个混沌单元中对应插上电位器 W1、W2、W3，电感 L1、L2、L3，电容 C1、C2、C3、C4、C5、C6，非线性电阻 NR1、NR2、NR3。按照实验二的方法将混沌单元 1、混沌单元 2 和混沌单元 3 分别调节到混沌状态，即双吸引子状态。电位器调到保持双吸引子状态的中点。

调试混沌单元 2 时示波器接到 Q5、Q6 座处。

调试混沌单元 3 时示波器接到 Q3、Q4 座处。

- 插上信道一和键控单元，键控单元上的开关置“1”。用电缆线连接面板上的 Q3 和 Q5 到示波器上的 CH1 和 CH2，调节示波器 CH1 和 CH2 的电压档位到 0.5V。
- 细心微调混沌单元 2 的 W2 和混沌单元 3 的 W3 直到示波器上显示的波形成为过中点约 45 度的细斜线，如图 11。

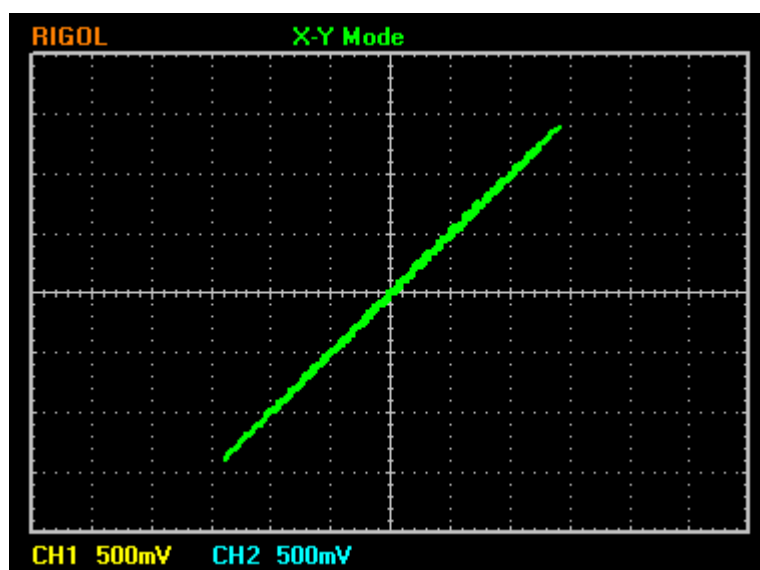


图 11 混沌同步调节好后示波器上波形状态示意图

这幅图形表达的含义是：若两路波形完全相等，这条线将是一条  $45^\circ$  的非常干净的直线。 $45^\circ$  表示两路波形的幅度基本一致。线的长度表达了波形的振幅，线的粗细代表两路波形的幅度和相位在细节上的差异。所以这条线的优劣表达出了两路波形的同步程度。所以，应尽可能的将这条线调细，但同时必须保证混沌单元 2 和混沌单元 3 处于混沌状态。

- d) 用电缆线将示波器的 CH1 和 CH2 分别连接 Q6 和 Q5，观察示波器上是否存在混沌波形，如不存在混沌波形，调节 W2 使混沌单元 2 处于混沌状态。再用同样的方法检查混沌单元 3，确保混沌单元 3 也处于混沌状态，显示出双吸引子。
- e) 用电缆线连接面板上的 Q3 和 Q5 到示波器上的 CH1 和 CH2，检查示波器上显示的波形为过中点约  $45^\circ$  的细斜线。

将示波器的 CH1 和 CH2 分别接 Q3 和 Q6，也应显示混沌状态的双吸引子。

- f) 在使 W4 尽可能大的情况下调节 W2，W3，使示波器上显示的斜线尽可能最细。

思考题：为什么要将 W4 尽可能调大呢？如果 W4 很小，或者为零，代表什么意思？会出现什么现象？

## 实验四 混沌键控实验

### 1. 实验目的

用混沌电路方式传输键控信号

### 2. 实验装置

混沌原理及应用实验仪、双通道数字示波器 1 台（学校自备）、信号发生器 1 台（自备）、电缆连接线 2 根。

### 3. 实验原理框图

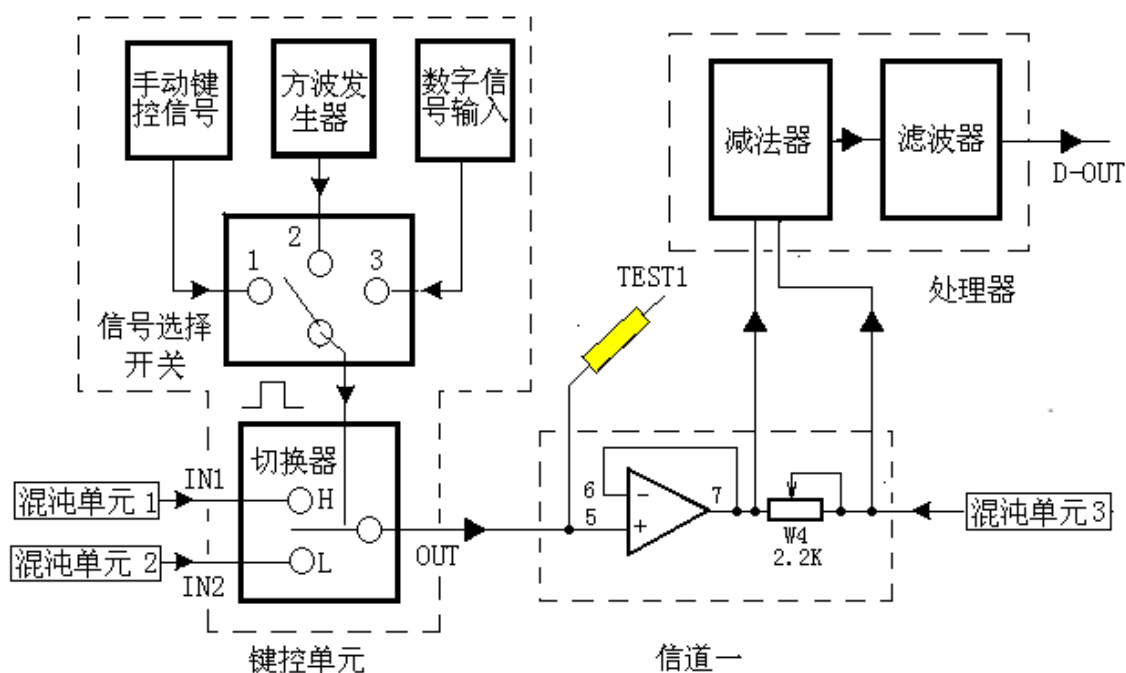


图 12 混沌键控实验原理框图

**键控单元说明：**键控单元主要由三个部分组成：

a) 控制信号部分：控制信号有三个来源。

- 1) 手动按键产生的键控信号。低电平 0V，高电平 5V。
- 2) 电路自身产生的方波信号，周期约 40mS。低电平 0V，高电平 5V。
- 3) 外部输入的数字信号。要求最高频率小于 100Hz，低电平 0V，高电平 5V。

b) 控制信号选择开关：

- 1) 开关拨到“1”时，选择手动按键产生的键控信号。按键不按时输出低电平，按下时输出高电平。
- 2) 开关拨到“2”时，选择电路自身产生的方波信号。
- 3) 开关拨到“3”时，选择外部输入的数字信号。

c) 切换器：利用选择开关送来的信号来控制切换器的输出选通状态。当到来的控制信号为高电平时，选通混沌单元 1，低电平选通混沌单元 2。

#### 4. 实验方法

- a) 在面板上插上混沌单元 1、混沌单元 2 和混沌单元 3（即在混沌原理及应用实验仪面板的 3 个混沌单元中对应插上电位器 W1、W2、W3，电感 L1、L2、L3，电容 C1、C2、C3、C4、C5、C6，非线性电阻 NR1、NR2、NR3）、键控单元以及信号处理，按照实验二的方法分别将混沌单元 1、2 和 3 调节到混沌状态，键控单元开关掷“1”（这里需要注意的是调节混沌单元 2 和 3 的状态时，信道一模块必须取下）。
- b) 将 CH-1 与 Q6 连接，示波器时基切换到“Y-T”，在混沌单元 2 的混沌状态内，调整 W2 以挑选一个的峰-峰值（例如选择 9V 左右），然后保证 W2 不动。
- c) 将 CH-1 与 Q4 连接，在混沌单元 3 的混沌状态内，调整 W3 使输出波形峰-峰值与第二步一样，然后保证 W3 不动。
- d) 在面板上将信道一插上（本次实验暂未用到其他模块），旋钮 W4 置中或更大，将 CH1 与信道一上的测试插座“TEST1”联接好。此时按住键控单元上的蓝色按键，示波器上将显示混沌单元 1 的输出波形。松开键控单元上的蓝色按键，示波器上将显示混沌单元 2 的输

出波形。

- e) 按下蓝色按键，在混沌单元 1 的混沌状态内，调整 W1，使此时混沌单元 1 的峰-峰值为  $V_{pp}$ （例如调到 10V 左右）；然后松开按键，调整 W5 使混沌单元 2 的峰-峰值也为  $V_{pp}$  左右。然后将键控单元开关掷“2”，此时示波器上显示的波形为混沌单元 1 与混沌单元 2 的交替输出的波形，如图 13，此波形的峰-峰值应看不出交替的痕迹。最后保证 W1 和 W5 不动。

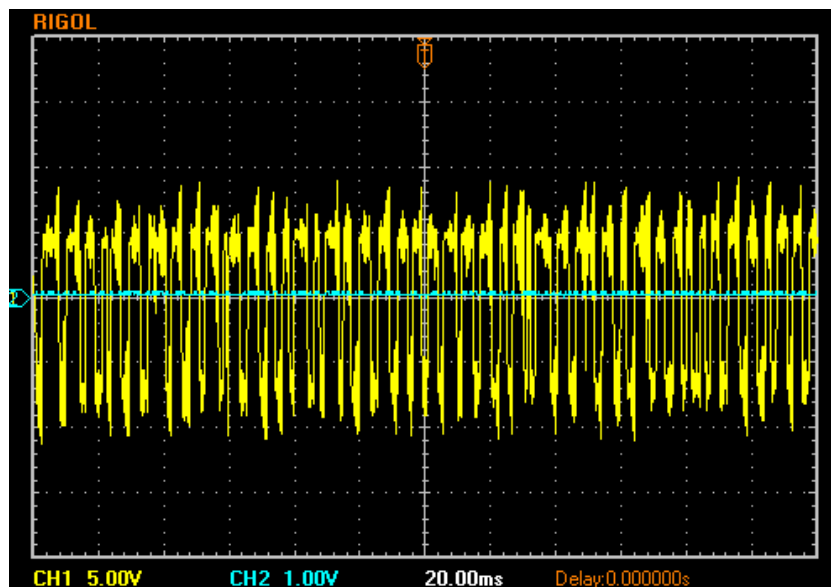


图 13

- f) 时基切换到“X-Y”，将拨动开关拨到“1”，CH1 换接 Q3，CH2 接 Q5，示波器上将显示一条约 45 度的过中心的斜线（如图 14）。

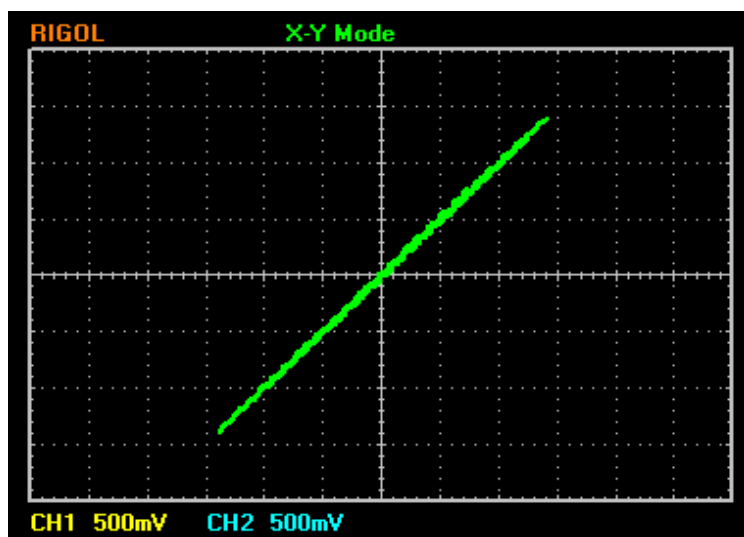


图 14

- g) CH2 换接 Q7，按住键控单元上的蓝色按键，也将出现一条约 45° 的过中心的斜线，（如图 15）。若保证前面步骤调整过程中仔细正确，可以发现图 15 斜线粗细明显大于图 14（否则按该部分内容下方“注”操作）。

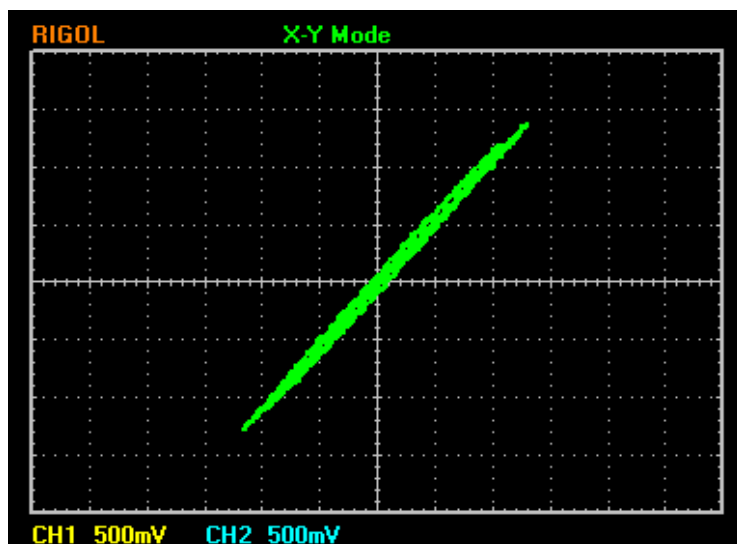


图 15

- h) 将示波器时基切换到“Y-T”，CH1 接 Q1，将开关掷“2”，示波器将显示解密波形（如图 16）。要得到图 16，可调整 W4，使低电平尽可能的低，高电平尽可能的高。

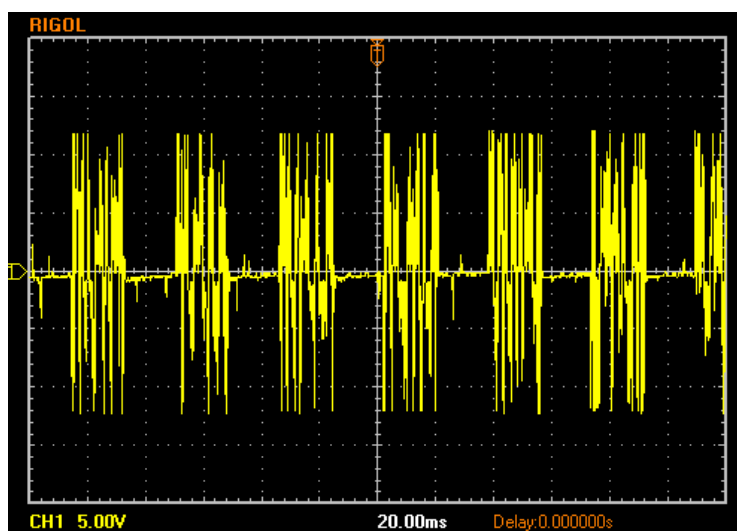


图 16

- i) 将开关掷“1”，快速敲击按键，观测示波器波形随按键的变化。

- j) 控制信号为外部输入波形的情况下混沌加解密波形的观察：

将键控单元上的拨动开关拨向“3”，此时的控制信号为外部接入信号。接入信号的位置为“Q9”，外接输入信号幅值需为 0V 到+5V，频率需小于 100Hz。输出到示波器上的信号为：当外输入为高电平时为高杂波电平，当外输入为低电平时波形幅度约为 0V。观察输出信号周期与输入信号周期的关系，以及及输入波形改变时占空比的变化。

- k) 用示波器探头测量信道一上面的测试座“TEST1”的输出信号波形，该波形即键控加密波形，比较该波形与外部接入信号，解调输出信号，观察键控混沌的效果。

注：A、正确的按上述步骤实验的过程中，可能出现图 14 与图 15 粗细对比不明显而导致后续结果很难得到的情况，这时可以通过返回第五步，改变 W1 与 W5，使混沌单元 1 和混沌单元 2 的 Vpp 改变到一个新的值（需仍保证处于混沌状态）。

B、通过以上实验步骤和注 1，有很小几率仍然难以得到所需的实验结果，此时是 b)、c) 设定



的峰-峰值过大或过小造成的，需根据情况重新设定。

## 实验五 混沌掩盖与解密实验

### 1. 实验目的

用混沌电路方式实现传输信号的掩盖与解密

### 2. 实验装置

混沌原理及应用实验仪、双通道数字示波器 1 台（自备）、信号发生器 1 台（自备）、电缆连接线 2 根。

### 3. 实验原理框图

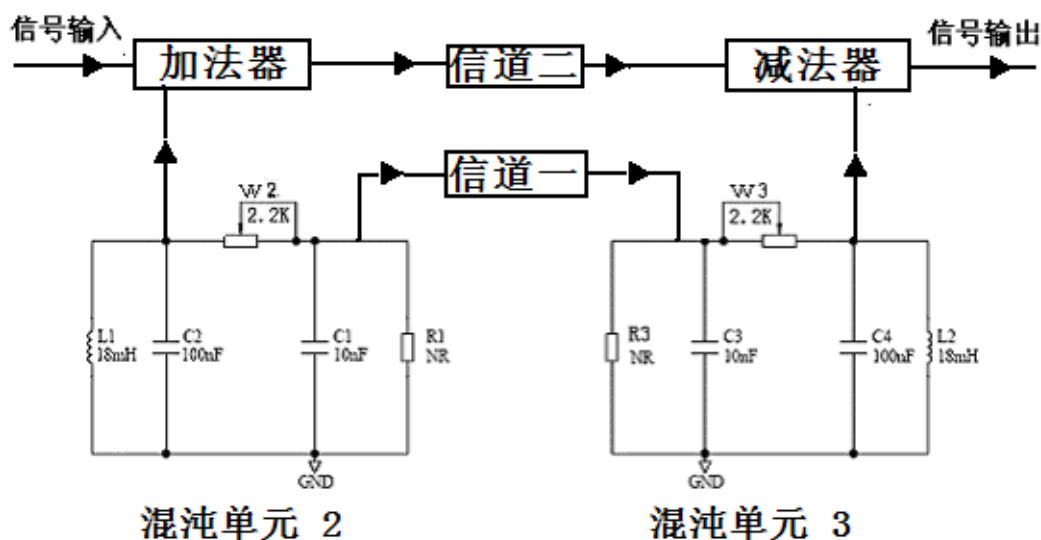


图 17 混沌掩盖与解密原理框图

### 4. 实验方法

- 第一步：在混沌原理及应用实验仪的面板上插上混沌单元 1、混沌单元 2 和混沌单元 3 的所有电路模块，即在混沌原理及应用实验仪面板的 3 个混沌单元中对应插上电位器 W1、W2、W3，电感 L1、L2、L3，电容 C1、C2、C3、C4、C5、C6，非线性电阻 NR1、NR2、NR3。按照实验二的方法将混沌单元 2 和 3 调节到混沌状态。
- 插上键控单元模块、信号处理模块、信道一模块，按照实验三的步骤将混沌单元 2 和 3 调节到混沌同步状态。
- 插上减法器模块、信道二模块、加法器模块，示波器 CH1 端口连接到 Q2 处。
- 把示波器的时基切换到 Y-T 并将电压档旋转到 500mV 位置、时间档旋转到 10ms 位置、耦合档切换到交流位置，Q10 处连接信号发生器的输出口，调节信号发生器的输出信号的频率为 100~200Hz、输出幅度为 50mV 左右的正弦信号。
- 逆时针调节电位器 W4 上的旋钮，直到示波器上出现频率为的输入频率、幅度约为 0.7V 左右叠加有一定噪声的正弦信号。细心调节 W2 和 W3，使噪声最小。如图 18。

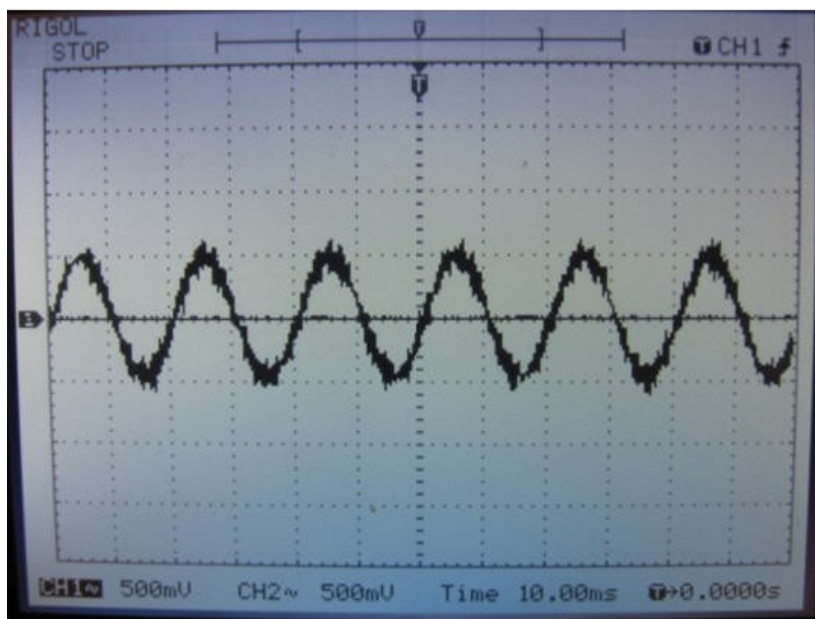


图 18 混沌解密波形

- f) 用示波器探头测量信道二上面的测试口“TEST2”的输出波形，如图 19。观察外输入信号被混沌信号掩盖的效果，并比较输入信号波形与解密后的波形（第五步中输出的波形）的差别。

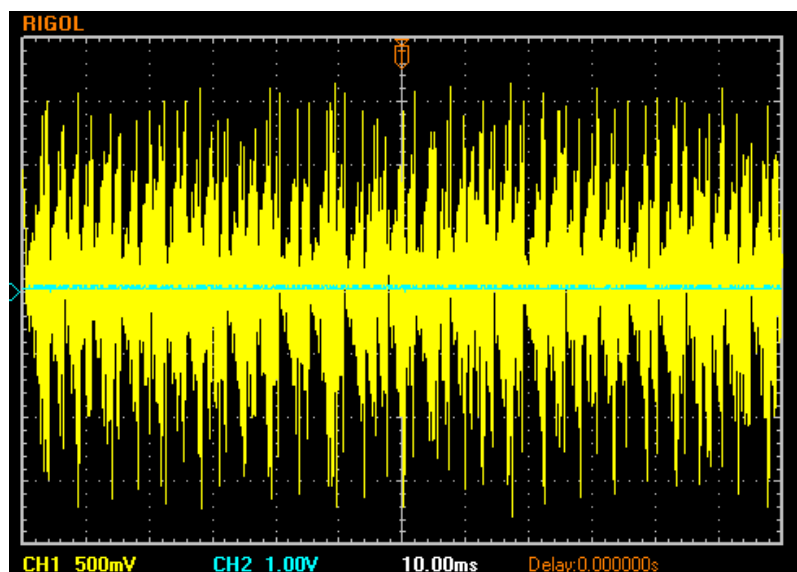


图 19

## 附录一 原理说明

### 一、离散混沌系统的电路实验原理提示

一般说来，非线性离散系统可以写成

$$X_{n+1} = G(X_n, \mu) \quad (1)$$

这里  $X \in R^N$  ( $N$  维空间的矢量)， $\mu$  为系统的参量集合， $G$  为非线性函数。构造离散系统的电路大致可以分两步进行：首先由方程 (1) 的  $G$  函数形式建立对应的模拟电路，为了简便起见，假设  $G$  函数是多项式的形式，且最高次幂是二阶的，这样只需用运放和乘法器以及电阻和电容等器件就可以组成相应的模拟电路；然后再利用采样保持电路实现连续状态量的离散化。下面以一种最典型的离散映象——Logistic 映象为例说明具体的电路实现过程。

Logistic 映象也称为虫口模型，可以描述某些昆虫世代繁衍的规律，方程为：

$$x_{n+1} = \mu x_n (1 - x_n), \quad \mu \in [0, 4], \quad x_n \in [0, 1] \quad (2)$$

其中  $\mu$  是系统的可调参量， $x_n$  是第  $n$  年昆虫的数目。Logistic 映象简单，只有二次项，在时间上离散，状态上连续，是一个很好的研究混沌基本特性的模型。理论研究表明，随着  $\mu$  值由小至大变化，系统出现倍周期分岔，并通过倍周期分岔通向混沌。

实现 Logistic 映象的电路如图 52-1 所示：虚线框 I 为使连续信号离散化的电路，它由采样保持器 S/H(1) 和 S/H(2) 组成，它们的工作状态分别受相位相反的脉冲电压的控制；虚线框 II 内是模拟电路部分，由它实现方程 (2) 的右端函数形式，电路中的运放  $A_1$  和  $A_2$  分别构成反向器和反向加法器，乘法器  $M$  用来实现非线性平方项。

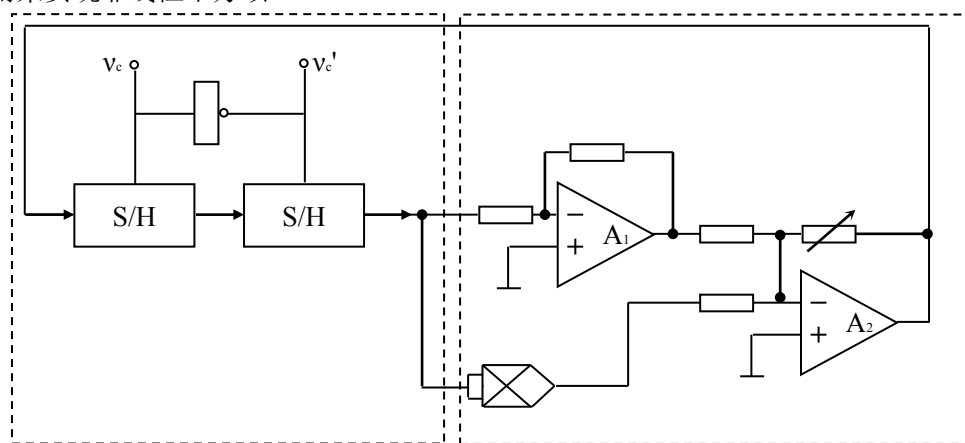


图 52-1 离散 Logistic 系统电路

电路的状态方程为

$$u_{n+1} = \frac{R_w}{R} u_n \left( 1 - \frac{0.1R}{R_1} u_n \right) \quad (3)$$

作如下标度变换

$$x_n = \varepsilon u_n, \quad \varepsilon = \frac{0.1R}{R_1}, \quad \mu = \frac{R_w}{R} \quad (4)$$

方程 (3) 变为方程 (2)。实验中，固定  $R=10k\Omega$ ， $R_1=5k\Omega$ ，标度变换因子  $\varepsilon=0.2$ ，引入这个因子是为了保证实验的观测值在一个合适的范围。 $R_w$  为可调节电位器，调节它相当改变方程 (2) 中的参量  $\mu$ 。

实验结果表明：当  $R_w$  的值从小到大改变，即  $\mu$  由小到大变化时，可以通过示波器观察到这个电路出现了倍周期分岔现象以及混沌现象。

## 二、基于混沌同步的蔡氏电路加密通信原理

### 1、蔡氏电路与混沌同步

蔡氏电路部分可参考实验讲义“用非线性电路研究混沌现象”部分。

1990 年，Pecora 和 Carroll 首次提出了混沌同步的概念，从此研究混沌系统的完全同步以及广义同步、相同步、部分同步等问题成为混沌领域中非常活跃的课题，利用混沌同步进行保密通信也成为混沌理论研究的一个大有希望的应用方向。

我们可以对混沌同步进行如下描述：两个或多个混沌动力学系统，如果除了自身随时间的演化外，还有相互耦合作用，这种作用既可以是单向的，也可以是双向的，当满足一定条件时，在耦合的影响下，这些系统的状态输出就会逐渐趋于相近进而完全相等，称之为混沌同步。实现混沌同步的方法很多，本实验介绍利用驱动—响应方法实现混沌同步。

混沌同步实验电路如图 52-2 所示。电路由三部分组成，第 I 部分为驱动系统（蔡氏电路 1），第 II 部分为响应系统（蔡氏电路 2），第 III 部分为单向耦合电路，由运算放大器组成的隔离器和耦合电阻实现单向耦合和耦合强度的控制。当耦合电阻无穷大（即电路 1 和电路 2 断开）时，驱动和响应系统为独立的两个蔡氏电路，用示波器分别观察电容  $C_1$  和电容  $C_2$  上的电压信号组成的相图  $V_{C1}$ - $V_{C2}$ ，调节电阻  $R$ ，使系统处于混沌态。调节耦合电阻，当混沌同步实现时，即  $V_{C1(1)} = V_{C1(2)}$ ，两者组成的相图为一通过原点的  $45^\circ$  直线。影响这两个混沌系统同步的主要因素是两个混沌电路中元件的选择和耦合电阻的大小。在实验中当两个系统的各元件参数基本相同时（相同标称值的元件也有  $\pm 10\%$  的误差），同步态实现较容易。

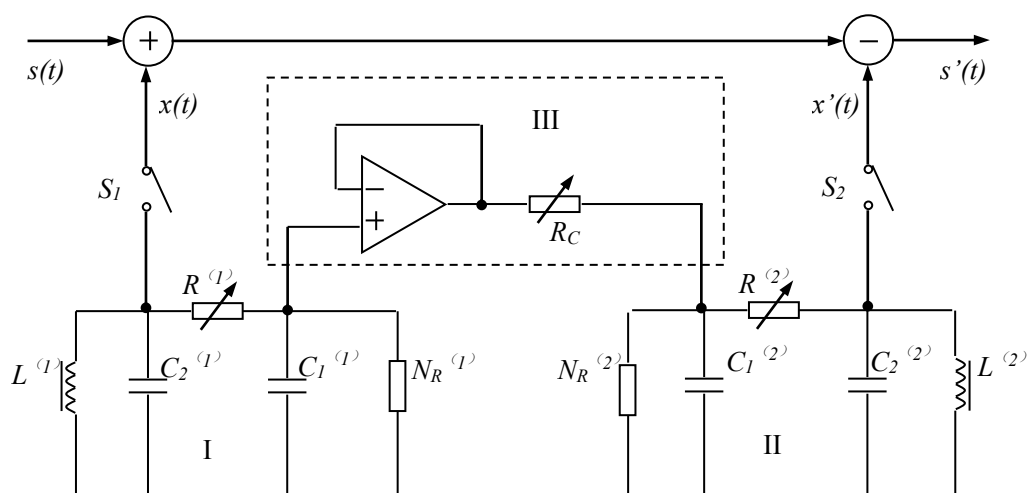


图 52-2 用蔡氏电路实现混沌同步和加密通信实验的参考图

### 2 基于混沌同步的加密通信实验

由于混沌信号具有非周期性、类噪声、宽频带和长期不可预测等特点，所以适用于加密通信、扩频通信等领域。混沌掩盖是较早提出的一种混沌加密通信方式，又称混沌遮掩或混沌隐藏。其基本思想是在发送端利用混沌信号作为载体来隐藏信号或遮掩所要传送的信息，使得消息信号难以从混合信号中提取出来，从而实现加密通信。在接收端则利用与发送端同步的混沌信号解密，恢复出发送端发送的信息。混沌信号和消息信号结合的主要方法有相乘、相加或加乘结合。这里仅介绍将消息信号和混沌信号直接相加的掩盖方法以供参考。

在混沌同步的基础上，接通图 52-2 中的开关  $S_1$ 、 $S_2$ ，可以进行加密通信实验。

假设  $x(t)$  是发送端产生的混沌信号， $s(t)$  是要传送的消息信号，实验中消息信号由信号发生器输出，为方波或正弦信号。经过混沌掩盖后，传输信号为  $c(t) = x(t) + s(t)$ 。接收端产生的混沌信号为  $x'(t)$ ，当接收端和发送端同步时，有  $x'(t) = x(t)$ ，由  $c(t) - x'(t) = s(t)$ ，即可恢复出消息信号。用示波器观察传输信号，并比较要传送的消息信号和恢复的消息信号。实验中，信号的加法运算及减法运算可以通过运算放大器来实现。

需要指出的是，在实验中采用的是信号直接相加进行混沌掩盖，当消息信号幅度比较大，而混沌信号相对比较小时，消息信号不能被掩蔽在混沌信号中，传输信号中就能看出消息信号的波形，因此，实验中要求信号发生器输出的消息信号比较小。

附录二 原理说明

HD\_混沌原理及应用实验仪工作原理图

