



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

高等院校基础教育“十二五”规划教材

大学物理实验 (下册)

余剑敏 彭斌 主编

*College Physics
Experiment*



人民邮电出版社

POSTS & TELECOM PRESS



工业和信息化部普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

高等院校基础教育“十二五”规划教材

大学物理实验 (下册)

余剑敏 彭斌 主编

*College Physics
Experiment*

人民邮电出版社

北京

图书在版编目(CIP)数据

大学物理实验. 下册 / 余剑敏, 彭斌主编. — 北京:
人民邮电出版社, 2014.9
高等院校基础教育“十二五”规划教材
ISBN 978-7-115-35470-9

I. ①大… II. ①余… ②彭… III. ①物理学—实验
—高等学校—教材 IV. ①04-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第195242号

内 容 提 要

本书是九江学院物理实验教学中心基于本校物理实验开设实际情况及多年的大学物理实验教学实践编写而成的。本书分上、下两册, 体系按基础性实验、综合设计性实验组织教学内容; 内容主要包括误差和数据处理的基本知识和涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理实验等共 59 个实验。本书在叙述介绍实验基本原理与实验方法、实验内容与步骤时, 力求繁简适当、通俗易懂, 在部分实验的附录中还介绍了几位物理学家, 介绍了与实验相关的技术发展、最新成果和展望, 希望激发学生的学习兴趣, 并能适应不同层次学校教学的需求, 具有较强的可读性和实用性。

本书可作为高等学校理工科本科生的大学物理实验课程的教材或参考书。

-
- ◆ 主 编 余剑敏 彭 斌
责任编辑 马小霞
执行编辑 喻智文
责任印制 张佳莹 焦志炜
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京铭成印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.75 2014 年 9 月第 1 版
字数: 457 千字 2014 年 9 月北京第 1 次印刷
-

定价: 38.00 元

读者服务热线: (010) 81055256 印装质量热线: (010) 81055316
反盗版热线: (010) 81055315

大学物理实验（下册）

编 委 会

主 编 余剑敏 彭 斌

副 主 编 刘志强 陈振华

编 者 余剑敏 江长双 刘志强 陈振华 钟健松
陈爱霞

前言

PREFACE

物理实验在物理学的建立和发展中一直起着十分重要的作用,而且它又有自身的特点和一套实验知识、实验方法、实验仪器的使用等独特的内容,所以在高等学校开设大学物理理论课的同时,往往还开设一定量的大学物理实验课。学生可通过“普通物理实验”这门课的学习,学会一些基本的实验方法、基本仪器的使用和基本的数据处理方法,得到规范化的实验方法训练,养成良好的实验习惯,独立完成实验,在实验能力和实验素养等方面得到严格良好的培养,为后续的实验课乃至今后的科学技术工作打下坚实的基础。

本书是九江学院物理实验教学中心基于本校物理实验开设实际情况及多年的大学物理实验教学实践,吸取了目前高校物理实验的一些新实验、新思想,结合我校实验教学改革的实际情况改编而成的。本书的原讲义由担任相关课程的余剑敏、钟健松、江长双、刘志强、陈振华等教师完成,在使用过程中又经过了九江学院物理实验教学中心全体任课教师的补充和完善,因此它是九江学院物理实验教学中心实验任课教师集体劳动的成果。

实验教学需要由实验教师和实验技术人员组成的一个协作团体共同承担教学任务,是一项集体事业,是一项需要讲责任、讲精神、讲奉献的事业。本书的编写,是众多教师共同努力的成果,是集体智慧的结晶。本次的参编者有魏健宁、余剑敏、钟健松、江长双、刘志强、陈振华等老师,统稿和定稿者为余剑敏、彭斌。本书的完成还要特别感谢谢卫军、王殿元、魏健宁、罗江龙、刘坚强、潮兴兵、邹俊生、余傲秋、黄天成、胡华、杨锋涛、孙光厚、常章用、周利玲、周雪云、李杰、余里生、张逸等老师,感谢他们在物理实验教学与物理实验室建设中付出了艰辛的劳动和提出了很多宝贵的建议。

在本书的编写过程中,九江学院实验中心的领导和老师给编者提供了很大的便利。在此,我们谨对所有对本书做过贡献的同志表示衷心的感谢。编者也参阅了兄弟院校的大学物理实验教材。在此一并致谢。

由于编者知识水平和教学经验所限,书中难免存在不妥之处,望使用者提出宝贵意见,促进本书的进一步完善与提高。

编者

2014年4月

目录

CONTENTS

实验 29	混沌特性及加密通信实验	1
实验 30	方波的傅里叶分解与合成	11
实验 31	高温超导材料的导电性能 与转变温度的测量	19
实验 32	迈克尔逊干涉仪的调整 及应用	27
实验 33	单缝衍射光强分布的研究	34
实验 34	光速的测量	41
实验 35	全息照相	46
实验 36	光电比色计测溶液的浓度	52
实验 37	磁光效应综合实验	57
实验 38	液晶电光效应实验	74
实验 39	光谱综合测量	86
实验 40	塞曼效应实验	100
实验 41	冉绍尔-汤森效应实验	108
实验 42	各向异性磁阻传感器 (AMR) 的使用和磁场 测量	119
实验 43	密立根油滴实验	127
实验 44	夫兰克-赫兹实验	136
实验 45	连续核磁共振实验	144
实验 46	微波段电子自旋共振 综合实验	149
实验 47	超声波探伤与测厚	161
实验 48	巨磁电阻效应实验	170
实验 49	红外通信特性实验	179
实验 50	CCD 特性实验	190
实验 51	光电探测器特性的测量	199
实验 52	氢燃料电池特性研究	213
实验 53	空气热机测量实验	220
实验 54	偏振光的观测与研究	228
实验 55	光纤特性及传输实验	234
实验 56	太阳能电池性能检测 实验	244
实验 57	光伏发电原理与应用 综合实验	258
实验 58	风力发电实验	268

混沌特性及加密通信实验

非线性电路中混沌现象的实验研究

长期以来,物理学用两类体系描述物质世界:以经典力学为核心的完全确定论描述一幅完全确定的物质及其运动图像,过去、现在和未来都按照确定的方式稳定而有序地运行;统计物理和量子力学的创立,提示了大量微观粒子运动的随机性,它们遵循统计规律,因为大多数的复杂系统是随机和无序的,只能用概率论方法得到某些统计结果。确定论和随机性是相互独立的两套体系,分别在各自领域里成功地描述过世界。混沌的英文意思是混乱的,无序的。由于长久以来世界各地的物理学家都在探求自然的秩序,而面对无秩序的现象如大气、骚动的海洋、野生动物数目的突然增减及心脏跳动和脑部的变化,却都显得相当无知。这些大自然中不规则的部分,既不连续且无规律,在科学上一直是个谜。但是在 20 世纪 70 年代,美国和欧洲有少数的科学家开始穿越混乱来开辟一条出路。包括数学家、物理学家、生物学家及化学家等,所有人都在找寻各种不规则间的共相。混沌的研究表明,一个完全确定的系统,即使非常简单,由于自身的非线性作用,同样具有内在的随机性。绝大多数非线性动力学系统,既有周期运动,又有混沌运动,而混沌既不是具有周期性和对称性的有序,又不是绝对的无序,而是可用奇异吸引子来描述的复杂的有序,混沌是非周期的有序性。本实验将借助非线性电阻,从实验上对这一现象进行一番探索。

混沌研究最先起源于 Lorenz 研究天气预报时用到的 3 个动力学方程。后来的研究表明,无论是复杂系统,如气象系统、太阳系,还是简单系统,如钟摆、滴水龙头等,皆因存在着内在随机性而出现类似无序,但实际是非周期有序运动,即混沌现象。现在混沌研究涉及的领域包括数学、物理学、生物学、化学、天文学、经济学及工程技术的众多学科,并对这些学科的发展产生了深远影响。混沌包含的物理内容非常广泛,研究这些内容更需要比较深入的数学理论,如微分动力学理论、拓扑学、分形几何学等。目前混沌的研究重点已转向多维动力学系统中的混沌、量子及时空混沌、混沌的同步及控制等方面。

一、实验目的

- 学习测量非线性电阻的伏安特性;
- 通过研究一个简单的非线性电路,了解混沌现象和产生混沌的原因;
- 用混沌电路方式传输键控信号;
- 用混沌电路方式实现传输信号的掩盖与解密。

二、实验仪器

混沌通信实验仪、数字信号发生器、示波器。

三、实验原理

1. 非线性电阻

实验所用电路原理如图 29-1 所示,电路中电感 L 和电容 C_1 、 C_2 并联构成一个振荡电路。方程如式 (29-1) 所示:

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt} &= G(U_{C_2} - U_{C_1}) - gU_{C_1} \\ C_2 \frac{dU_{C_2}}{dt} &= G(U_{C_1} - U_{C_2}) + i_L \\ L \frac{di_L}{dt} &= -U_{C_2} \end{aligned} \quad (29-1)$$

这里, U_{C_1} 、 U_{C_2} 是电容 C_1 、 C_2 上的电压, i_L 是电感 L 上的电流, $G=1/R_0$ 是电导, g 为 R 的伏安特性函数。如果 R 是线性的, g 是常数,电路就是一般的振荡电路,得到的解是正弦函数。电阻 R_0 的作用是调节 C_1 和 C_2 的位相差,把 C_1 和 C_2 两端的电压分别输入到示波器的 x 、 y 轴,则显示的图形是椭圆。如果电路中的 R 是非线性元件,它的伏安特性如图 29-2 所示,是一个分段线性的电阻,整体呈现出非线性。 gU_{C_1} 是一个分段线性函数,由于 g 总体是非线性函数,三元非线性方程组 (29-1) 没有解析解。若用计算机编程进行数值计算,当取适当电路参数时,可在显示屏上观察到模拟实验的混沌现象。

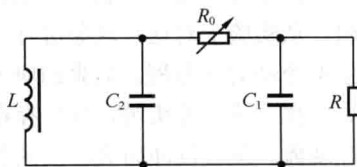


图 29-1 电路原理图

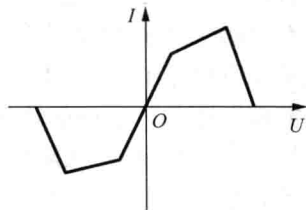


图 29-2 非线性元件 R 的 U - I 特性

2. 混沌波形的发生

除了计算机数学模拟方法之外,更直接的方法是用示波器来观察混沌现象,实验电路如图 29-3 所示。图 29-3 中,非线性电阻是电路的关键,它是通过一个双运算放大器和 6 个电阻组合来实现的。电路中, LC 并联构成振荡电路, R_0 的作用是分相,使 a 、 b 两处输入示波器的信号

产生位相差,可得到 x 、 y 两个信号的合成图形。双运放 TL082 的前级和后级正、负反馈同时存在,正反馈的强弱与比值 R_3/R_0 和 R_6/R_0 有关,负反馈的强弱与比值 R_2/R_1 和 R_5/R_4 有关。当正反馈大于负反馈时,振荡电路才能维持振荡。若调节 R_0 ,正反馈就发生变化,TL082 处于振荡状态,表现出非线性,从 c、d 两点看,TL082 与 6 个电阻等效于一个非线性电阻,它的伏安特性大致如图 29-3 所示。

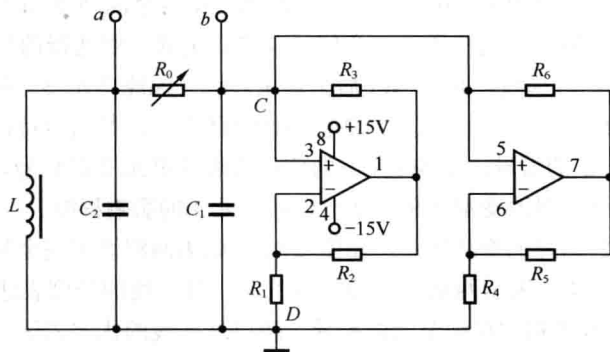


图 29-3 实验电路图

混沌现象表现了非周期有序性,看起来似乎是无序状态,但呈现一定的统计规律,其基本判断有:

(1) 频谱分析: R_0 很小时,系统只有一个稳定的状态(对应一个解),随 R_0 的变化系统由一个稳定状态变成在两个稳定状态之间跳跃(两个解),即由一周期为二周期,进而两个稳定状态分裂为 4 个稳定状态(4 周期,4 个解),8 个稳定状态(8 周期,8 个解)……直至分裂进入无穷周期,即为连续频谱,接着进入混沌,系统的状态无法确定;分岔是进入混沌的途径。

(2) 无穷周期后,由于产生轨道排斥,系统出现局部不稳定。

(3) 奇异吸引子 (Strange Attractor) 存在。奇异吸引子有一个复杂但明确的边界,这个边界保证了在整体上的稳定,在边界内部具有无穷嵌套的自相似结构,运动是混合和随机的,它对初始条件十分敏感。

3. 混沌电路的同步

图 29-4 所示为混沌同步原理框图。

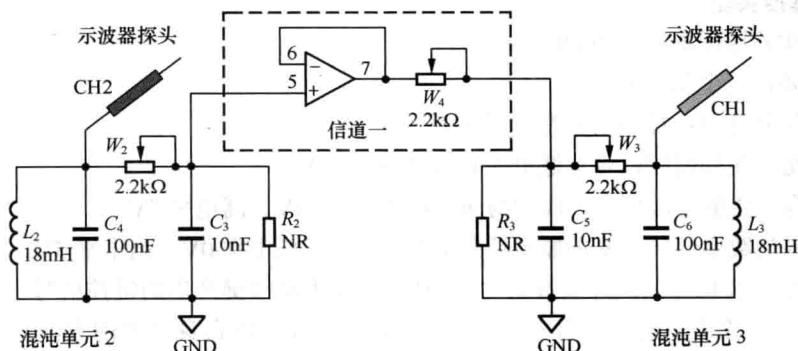


图 29-4 混沌同步原理框图

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 W_2 和 W_3 做适当调整, 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 W_4 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 W_4 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。调整 W_4 的阻值可以改变混沌单元 2 对混沌单元 3 的影响程度。

观察 CH1 和 CH2 信号的李萨如图, 如图 29-5。如果两路波形完全相等, 这条线将是一条 45° 的非常干净的直线。 45° 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, 应尽可能地将这条线调细, 但同时必须保证混沌单元 2 和混沌单元 3 处于混沌状态。

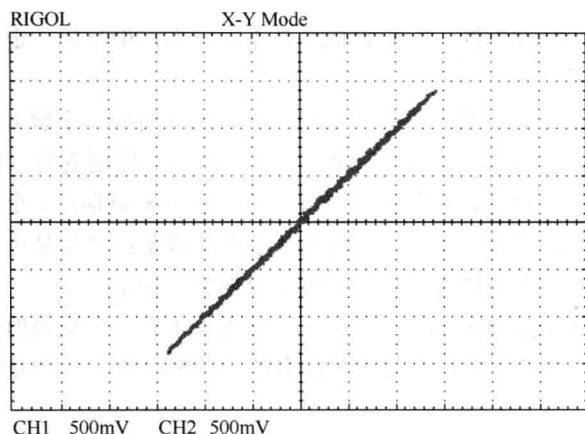


图 29-5 混沌同步调节好后示波器上波形状态示意图

4. 混沌键控实验

混沌键控实验原理框图见图 29-6。

键控器主要由三个部分组成:

(1) 控制信号部分: 控制信号有 3 个来源。

A 手动按键产生的键控信号。低电平 0V、高电平 5V。

B 电路自身产生的方波信号, 周期约 40ms。低电平 0V、高电平 5V。

C 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。

(2) 控制信号选择开关: 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。开关拨到“2”时, 选择电路自身产生的方波信号。开关拨到“3”时, 选择外部输入的数字信号。

(3) 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, 低电平时选通混沌单元 2。

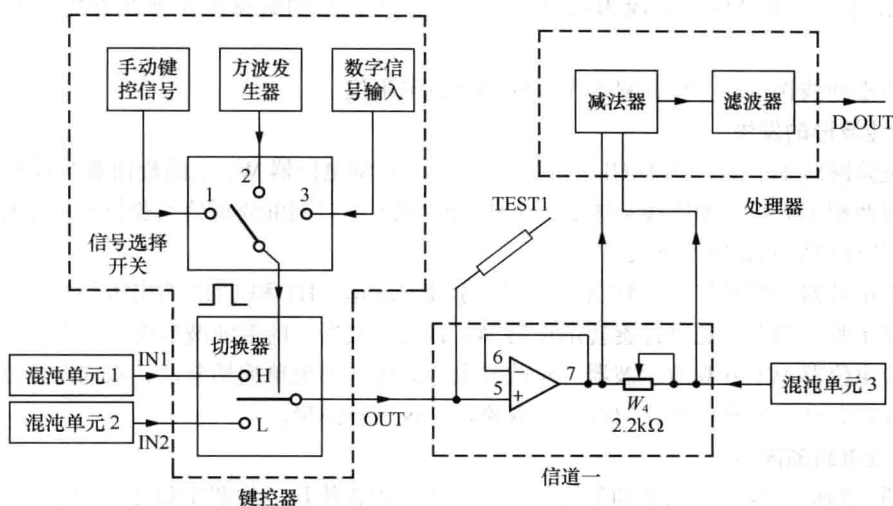


图 29-6 混沌键控实验原理框图

5. 混沌掩盖与解密实验

图 29-7 所示为混沌掩盖与解密原理框图。

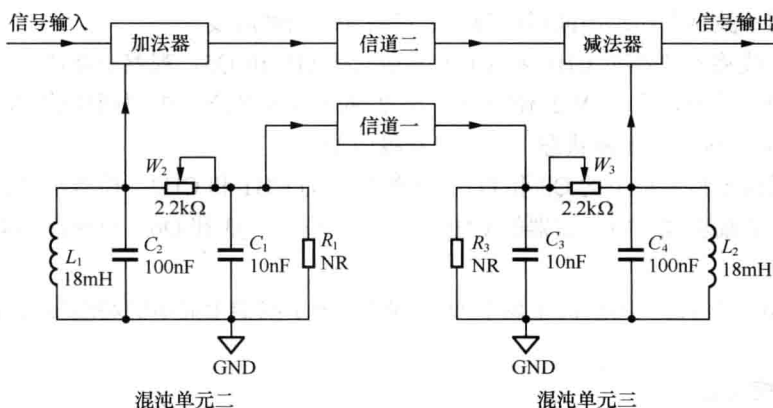


图 29-7 混沌掩盖与解密原理框图

四、实验内容

1. 非线性电阻

(1) 在混沌通信实验仪面板上插上跳线 J1、J2, 并将可调电压源处电位器 W_0 旋钮逆时针旋转到头, 在混沌单元 1 中插上非线性电阻 NR_1 。

(2) 连接混沌通信实验仪电源, 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。

(3) 按顺时针方向慢慢旋转可调电位器 W_0 , 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 (当调节 W_0 电流急剧变化

时可换 W_1)。

(4) 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。

(5) 找出曲线拐点, 分别计算 5 个区间的等效电阻值。

2. 混沌波形的发生

(1) 拔除跳线 J1、J2, 插上 C1、C2、L1、L2, 并将电位器 W1 上的旋钮顺时针旋转到头。

(2) 用两根 Q9 线分别连接示波器的 CH1 和 CH2 端口到混沌通信实验仪面板上标号 Q8 和 Q7 处。打开机箱后侧的电源开关。

(3) 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、双周期分岔、四周期分岔、多周期分岔、单吸引子、双吸引子现象, 记录这些波形。

3. 混沌电路的同步

(1) 插上面板上混沌单元 2 和混沌单元 3 的所有电路模块。按照实验 2 的方法将混沌单元 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)。

(2) 插上“信道一”, 不插键控器, 在键控器插座左边的两个黄色香蕉插座上插上跳线。用 Q9 线连接面板上的 Q3 和 Q5 到示波器上的 CH1 和 CH2, 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° 的细斜线。

(3) 用 Q9 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。

(4) 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° 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。

(5) 在使 W_4 尽可能大的情况下调节 W_2 、 W_3 , 使示波器上显示的斜线尽可能最细。记录同步时李萨如图形。

4. 混沌键控实验

(1) 在混沌通信实验仪的面板上插上混沌单元 1、2 和 3 的所有电路模块。按照实验 1 的方法分别将混沌单元 1、2 和 3 调节到混沌状态。

(2) 在面板上插上键控单元、信道一和信号处理单元。将键控器上的拨动开关拨到“1”, 此时通过切换器的是来自混沌单元 2 的信号(未按按键)。

(3) 参照实验 1 把混沌单元 2 和 3 调节到同步状态, 按下信道一上蓝色按键, 调节混沌单元 1 和 3 不同步(要求图 29-8 尽可能又细又长又干净, 图 29-9 又短又粗不干净)。

(4) 将拨动开关拨到“2”, 此时该单元自动产生的控制信号为周期约 40ms 的方波信号。它将以方波的半周期为时间单位, 周期性地分别把混沌单元 1 和混沌单元 2 的信号送过切换器。用示波器观察信道一上 TEST1 座处的信号, 将观察到“混沌单元 1”与“混沌单元 2”的交替输出的波形, 如图 29-10 所示。

(5) 观察 Q1 输出的解调出来的波形, 如图 29-11。

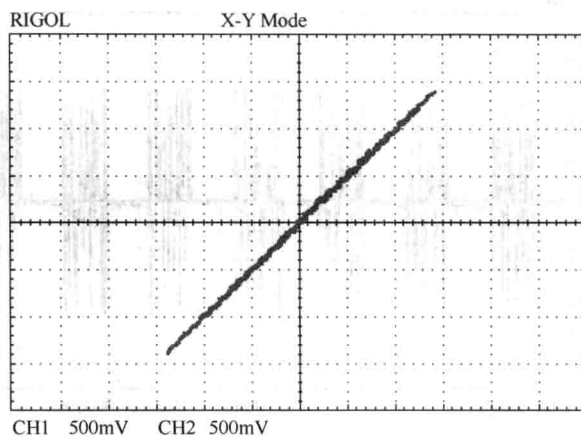


图 29-8 同步参考波形

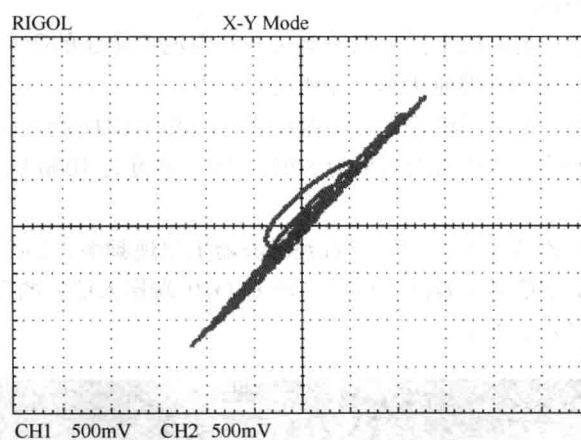


图 29-9 不同步参考波形

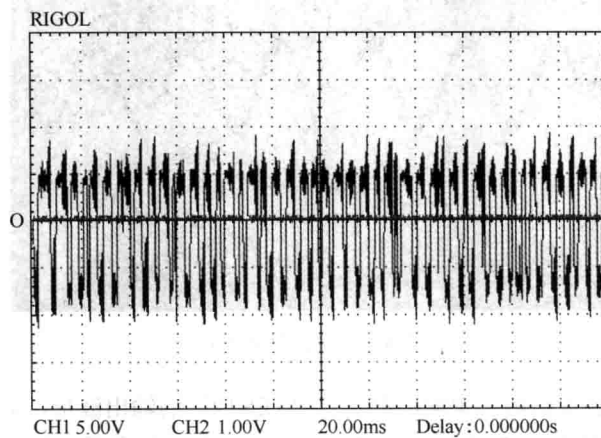


图 29-10 键控信号

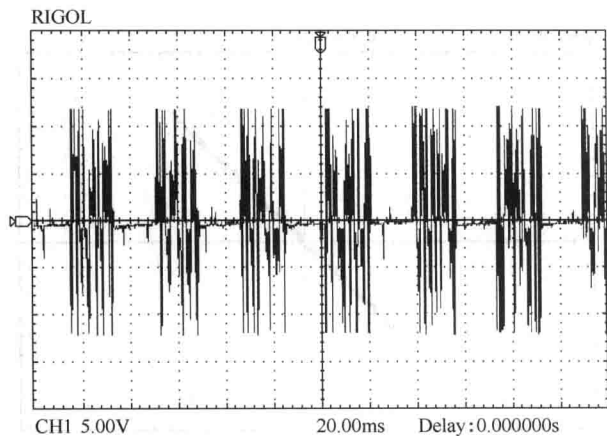


图 29-11 解调波形

5. 混沌掩盖与解密实验

(1) 在混沌通信实验仪的面板上插上混沌单元 2 和混沌单元 3 的所有电路模块。按照实验 1 的方法将混沌单元 2 和 3 调节到混沌状态, 并使它们同步。

(2) 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。

(3) 调节信号发生器的输出信号的频率为 50Hz、输出幅度为 100mV 左右的正弦信号, 接入 Q10 端口。

(4) 逆时针调节电位器 W_4 上的旋钮, 直到示波器上出现频率、幅度与 Q10 端接入信号相当, 叠加有一定噪声的正弦信号 (若没有可适当增大 Q10 端接入信号的幅度)。细心调节 W_2 和 W_3 , 使噪声最小。如图 29-12 所示。

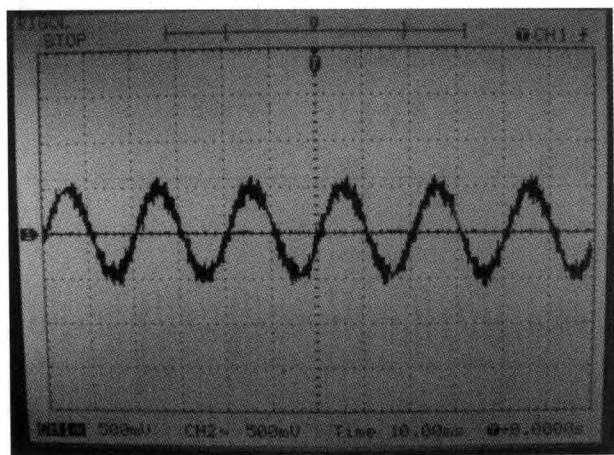


图 29-12 混沌解密波形

(5) 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 29-13 所示。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。

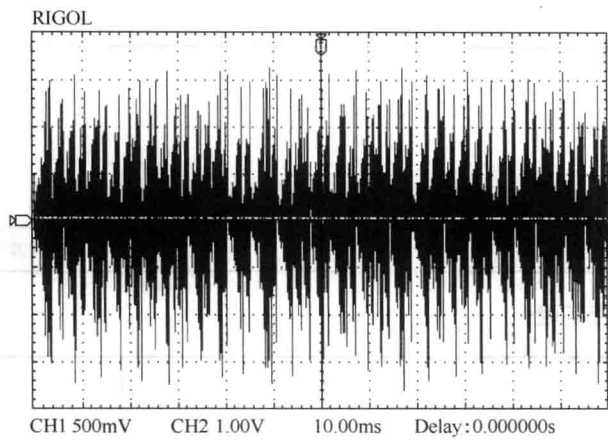


图 29-13 混沌掩盖波形

五、数据表格及数据处理

1. 非线性电阻

电压 U/V								
电流 I/mA								

作非线性电阻伏安特性曲线，横轴为电压，纵轴为电流。
计算各区间等效电阻值：_____。

2. 混沌波形的发生

单周期分岔	双周期分岔	四周期分岔
多周期分岔	单吸引子	双吸引子

3. 混沌电路的同步

混沌单元 2 波形	混沌单元 3 波形	同步波形

4. 混沌键控实验

键控信号	解调波形

5. 混沌掩盖与解密实验

输入信号 频率：____幅值：____	混沌解密波形 频率：____幅值：____	混沌掩盖波形

六、注意事项

- 1. 关掉电源后拆线。
- 2. 仪器应预热 10min 开始测量数据。

七、思考题

- 1. 非线性负阻电路（元件），在本实验中的作用是什么？
- 2. 为什么要采用 RC 移相器，并且用相图来观测倍周期分岔等现象？如果不用移相器，可用哪些仪器或方法？
- 3. 通过本实验请阐述：倍周期分岔、混沌、奇怪吸引子等概念的物理含义。

方波的傅里叶分解与合成

一、实验目的

- 用 RLC 串联谐振方法将方波分解成基波和各次谐波，并测量它们的振幅与相位关系；
- 了解傅里叶分析的物理含义和分析方法；
- 将一组振幅与相位可调正弦波由加法器合成方波。

二、实验仪器

FD-FLY-A 型傅里叶分解与合成、示波器、电阻箱、电感、电容箱。

三、实验原理

任何具有周期为 T 的波函数 $f(t)$ 都可以表示为三角函数所构成的级数之和，即

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (30-1)$$

其中： T 为周期， ω 为角频率。 $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ；第一项 $\frac{a_0}{2}$ 为直流分量。

所谓周期性函数的傅里叶分解就是将周期性函数展开成直流分量、基波和所有 n 阶谐波的迭加。如图 30-1 所示的方波可以写成：

$$f(t) = \begin{cases} h & (0 \leq t < \frac{T}{2}) \\ -h & (-\frac{T}{2} \leq t < 0) \end{cases} \quad (30-2)$$

此方波为奇函数，它没有常数项。数学上可以证明此方波可表示为

$$\begin{aligned} f(t) &= \frac{4h}{\pi} (\sin \omega t + \frac{1}{3} \sin 3\omega t + \frac{1}{5} \sin 5\omega t + \frac{1}{7} \sin 7\omega t + \dots) \\ &= \frac{4h}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{2n-1} \right) \sin[(2n-1)\omega t] \end{aligned} \quad (30-3)$$