



百科荣创
B I E K E S I T I R I O I N G

EXPERIMENT GUIDE
BOOK

实验指导书

百科荣创（北京）科技发展有限公司

信号与系统实验平台

——多功能综合信号源单元

前 言

信号与系统实验平台设计采用“虚实结合”的实验设计理念，利用 FPGA 与高速 AD/DA 完成激励信号的产生和响应信号的采集，结合 Matlab 强大的信号分析、处理及可视化功能实现各种典型信号系统的特性分析与信号处理。平台同时支持选配立体声语音信号采集单元与数字图像采集单元，通过 USB3.0 接口完成语音和图像数据的高速传输，利用 Matlab 强大的语音信号处理功能和数字图像处理功能完成语音信号处理与数字图像处理实现各类信号系统的特性分析与信号处理。

信号与系统是电子信息工程、通信工程、无线电技术、自动控制、生物医学、电子工程等专业的一个重要基础课，也是国内各院校相应专业的主干课程。平台主要针对《信号与系统》、《数字信号处理》、《数字图像处理》等课程实验教学设计。平台主要针对《信号与系统》等课程实验教学与实验验证设计。平台提供多功能综合信号源单元，支持实验过程中常用信号源，不仅支持教学使用，还支持二次开发，可用于学生开展创新创意设计以及大学生电子设计竞赛赛前训练等用途。

本指导书旨在为学生提供更好的信号与系统实验体验，并提供必要的理论支持和实验指导。本指导书包括丰富的实验内容、详细的实验步骤、实验原理及分析以及实验要求等，力求使每位学生轻松地理解和掌握相关知识，并深入掌握基本理论和分析方法。

通过本指导书基于多功能综合信号源单元进行学习，学生将能够培养分析问题和解决问题的能力，具备实验设计与实施的能力，能够独立开展实验工作。同时，抽象的概念和理论也会在实验中得到形象化和具体化，从而增强学生对该课程的兴趣和理解。

本实验指导书虽然在主观上力求谨慎从事，但限于时间和编者的学识、经验，疏漏之处，在所难免。恳请广大读者不吝赐教以便今后修改提高。

为了给您提供更加优质的服务，在使用过程中，如果您有任何问题需要咨询或者需要服务，请与本公司相关部门联系，我们定当竭诚为您服务。

免费服务热线：400-067-7899。

欢迎您在使用的过程中为我们提出宝贵的意见和建议。

目 录

第1章 信号与系统简介	1
1.1 多彩的信号世界	1
1.2 初步了解信号与系统设备结构	2
1.3 注意事项及说明	4
第2章 信号与系统实验项目	5
2.1 常用信号的分类和观察实验	5
2.2 可调信号的调节与观察实验	9
2.3 信号的基本运算实验	13
2.4 滤波器基本实验	24
2.5 滤波器综合实验	36
2.6 一阶电路时域特征实验	42
2.7 一阶电路频域分析实验	53
2.8 一阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验	63
2.9 一阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验	76
2.10 二阶电路频域分析实验	84
2.11 二阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验	91
2.12 二阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验	98
2.13 二阶网络函数的模拟幅度调制与解调实验	105
2.14 抽样定理与信号恢复实验	112
2.15 RC 振荡器特性测量实验	118
2.16 频分复用(FDM)实验	123
附录	129
附录 I 常用测量仪器仪表简介	129

第1章 信号与系统简介

1.1 多彩的信号世界

信号与系统是一门重要的电子工程学科，它研究的是信号的产生、传输、处理和控制在方面的基本理论和方法。该课程旨在介绍信号与系统的基本概念、数学工具和分析方法，以及它们在实际应用中的应用。该课程的主要内容包括：

1. 信号的基本概念：信号的分类、信号的表示和描述、信号的特性等。
2. 系统的基本概念：系统的分类、系统的表示和描述、系统的特性等。
3. 时域分析：时域信号的表示和分析、时域系统的表示和分析、卷积和相关等。
4. 频域分析：傅里叶变换和傅里叶级数、频域系统的表示和分析、滤波器等。
5. 采样和量化：采样定理、量化误差、PCM 编码等。
6. 信号处理：数字信号处理、滤波器设计、信号压缩等。

通过本课程的学习，学者将掌握信号与系统的基本概念和分析方法，了解信号与系统在实际应用中的应用，以及数字信号处理、滤波器设计、信号压缩等方面的知识，并能够应用所学知识解决实际问题，为进一步学习和研究相关领域打下坚实的基础



图 1.1.1 信号与系统实验平台实物图

为了让学者们更加高效深入地学习该课程，百科荣创研制了“信号与系统实验平台”，供学者们学习使用。学者可以基于该平台进行相关实验，将课本中学习的理论知识与实际电路进行有效结合，帮助学者深入理解信号与系统的基本概念和分析方法，同时培养学者的实验能力和创新能力，为进一步学习和研究相关领域打下坚实的基础。

1.2 初步了解信号与系统设备结构

信号与系统实验平台，主要由信号源+开放实验区+扩展模块三大部分组成。信号源为信号变换提供丰富的信号源头；开放实验区内学者，可根据课程内容以及课程扩展进行信号基本变换相关实验；同时配有扩展模块，如信号合成与分解装置可进行课程综合应用创新。

分区学习，遵循由易到难、循序渐进的规律，让学者轻快地将课程中所学的理论知识在本系统中进行展现。理实一体化的教学理念，以更好地促进学生理论及实践应用知识体系的构建。

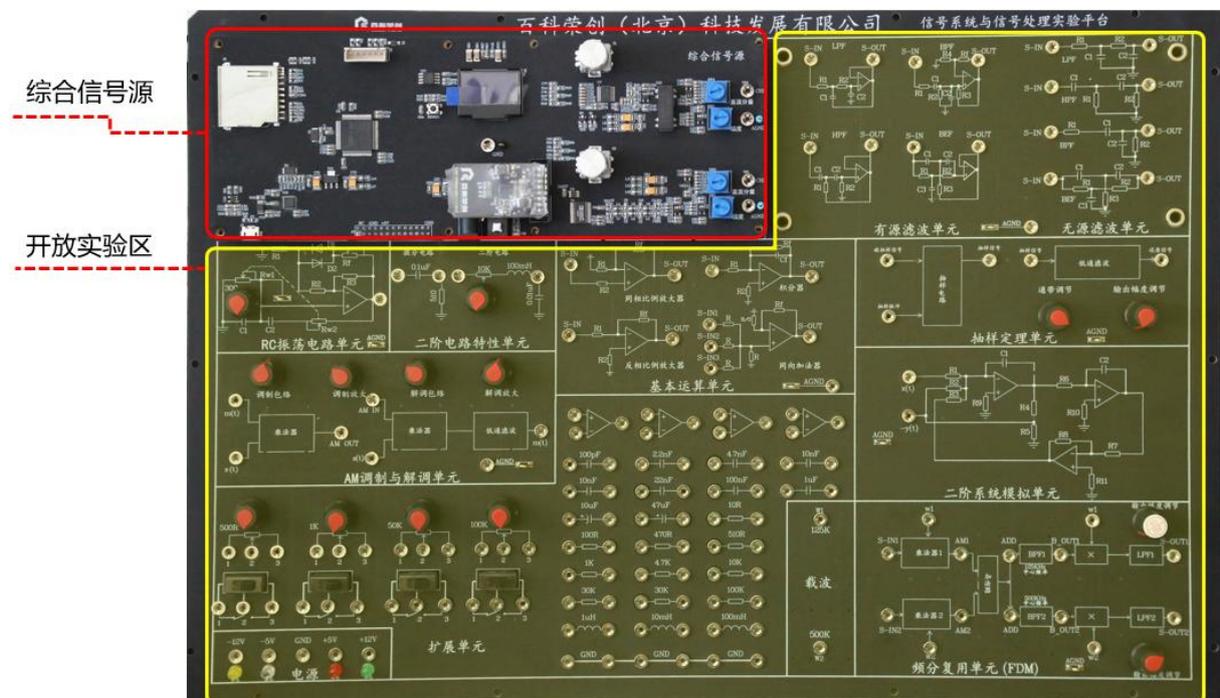


图 1.2.1 设备区间划分

为了让学者能快速上手使用设备，这里我们对设备以下三大部分进行讲解：

1. 多功能综合信号源单元

图 1.2.2 为多功能综合信号源单元实物图，该硬件设备为系统提供了信号源。除了能产生方波、正弦波、锯齿波、三角波等常规信号以外，还能产生衰减指数信号、高斯函数信号、抽样函数信号、扫频信号等特殊信号。从而满足滤波器、时域分析、频域分析、抽样定理等相关实验。

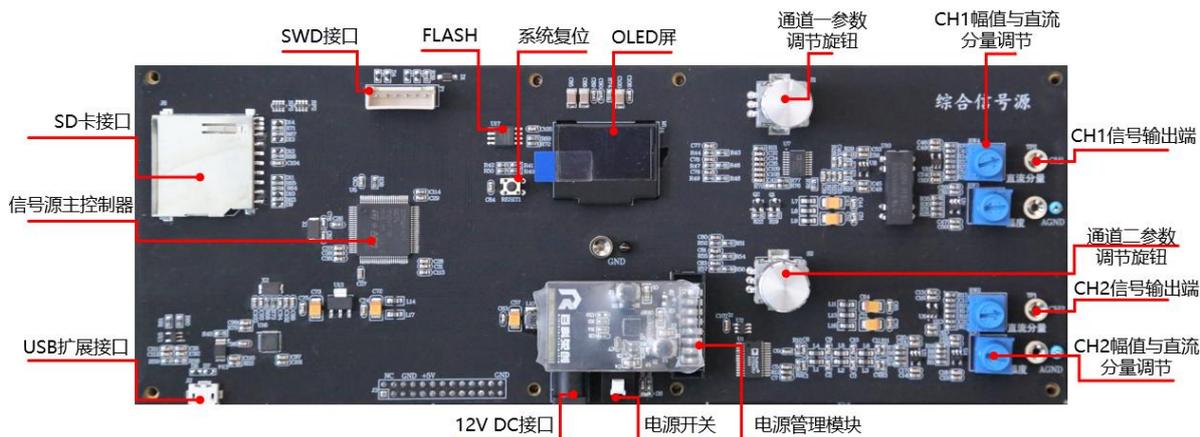


图 1.2.2 多功能综合信号源单元面板

多功能综合信号源单元如图 1.2.2 所示, 信号源主控制器检测用户参数调节旋钮状态, 实现波形、频率等参数的调节, 并实时更新在 OLED 屏幕中, 便于用户观察。设定的信号产生由主控制器产生相关信号, 发送给高速 DAC 转换芯片, 再通过后级信号调制电路, 实现幅值的调控, 最终通过 CH1 和 CH2 两路端口输出指定频率、幅值的波形。

2. 开放实验区

开放实验区是学者们进行相关信号处理实验的主要操作区域。开放实验区图 1.2.3 中划分了很多子模块, 可以把在课中学习的信号运算、滤波器、时域分析、频域分析、抽样定理、频分复用等内容, 通过子模块或者模块组合的形式进行相关实验。

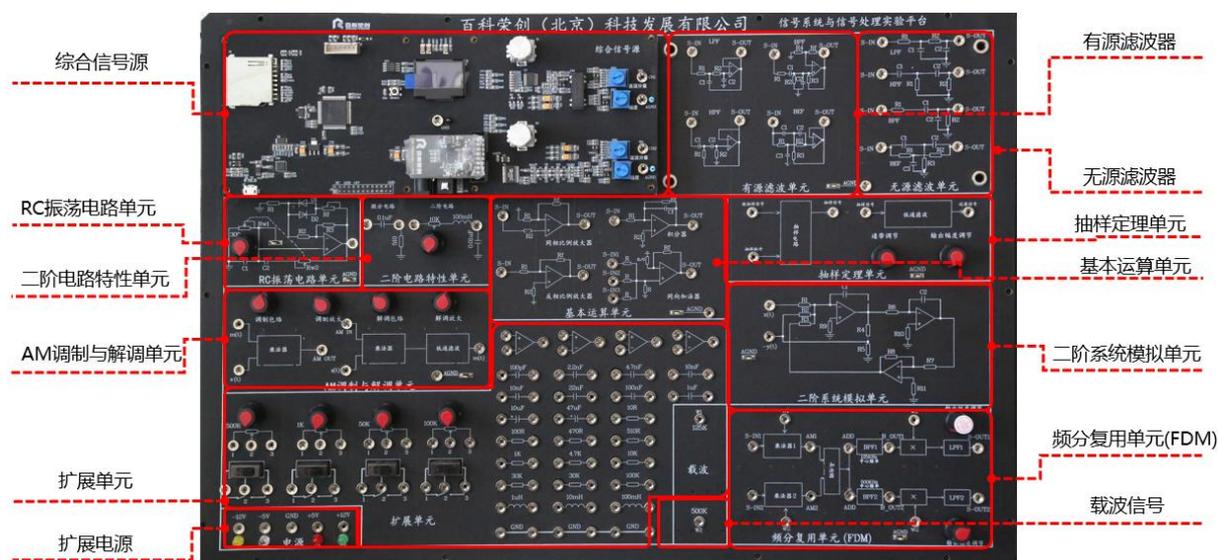


图 1.2.3 开放实验区组成说明图

子模块的相关功能通过名称即可得知, 如有源滤波器区域, 则可以进行低通、高通、带通以及带阻滤波器等实验。同时也配有扩展单元, 其中有独立的可调电位器、开关、集成运放以及电阻电容等电子元器件, 便于学者搭建自己所需的电路进行相关技术研究。

3. 扩展单元

在满足本课程基础理论学习研究的同时,为了便于学者进行相关功能扩展以及境界学习,本系统特设计有扩展单元,可让学者研究更加复杂的信号处理方式。

1.3 注意事项及说明

1. 电源的打开顺序是:先开电源开关(实验箱中的箱体开关)再打开各个模块的控制开关,电源关掉的顺序刚好与此相反。
2. 切忌在实验中带电连接线路,正确的方法是断电后再连线,进行通电实验。
3. 实验箱中的叠插连接线的使用方法为,连线插入时要垂直,切忌用力,拔出时用手捏住连线靠近插孔的一端然后左右旋转几下连线自然会从插孔中松开、弹出,切忌用力向上拉线,这样很容易造成连线和插孔的损坏。
4. 模块放置在箱体供电时,注意模块正向垂直插入供电口,禁止反插烧坏模块。

第2章 信号与系统实验项目

2.1 常用信号的分类和观察实验

2.1.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 观察和了解常见信号的波形和特点;
- (2) 理解信号相关参数的作用和意义;
- (3) 掌握多功能综合信号源单元的使用;
- (4) 学会使用多功能数字示波器。

2. 实验任务

- (1) 学习了解常用信号的分类和描述,了解信号的数学表达式中各个变量的含义;
- (2) 学习使用多功能综合信号源单元产生常用信号,并使用示波器采集观察信号波形,测量波形相关参数。

2.1.2 实验原理

1. 信号的分类

- (1) 根据函数值是否确定分为确定信号与随机信号。确定信号可分为周期信号和非周期信号。
- (2) 根据所定义的时间范围分为连续信号和离散信号。
- (3) 根据信号自变量个数分为一维信号和 multidimensional 信号。
- (4) 根据信号是否可积分为能量信号和功率信号。

2. 信号的描述

常用信号的描述方法有3种:①数学表达式;②画信号波形;③进行频谱分析、各类正交变换以及其他方式来描述。这3种方法不仅适用于连续信号,也适用于数字信号。

(1) 常用信号

1) 指数信号: $f(t) = Ke^{at}$, $\tau = \frac{1}{|a|}$ (式中, a 为实数)。

单边指数衰减信号: $f(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ e^{-\frac{t}{\tau}} & t > 0 \end{cases}$, 当 $t = 0$ 时 $f(0) = 1$, 当 $t = \tau$ 时, $f(t) = 1/e$

$e = 0.368$, 即经过时间 τ 信号衰减到原来的 3.68%。

指数衰减信号的一个重要特性是它对时间的微分和积分仍然是指数形式。

2) 正弦信号: $f(t) = K \sin(\omega t + \theta)$ 。(式中, K 为振幅, ω 为角频率, θ 为初相位)。
 正弦信号对时间的微分与积分仍为同频率的正弦信号。

3) 抽样函数信号: $sa(t) = \frac{\sin t}{t}$, 即 $\sin t$ 与 t 之比构成的函数。

抽样信号的性质: ①偶对称性; ②在 t 的正负两方向振幅都逐渐衰减、无限延伸;

③当 $t = \pm \pi, \pm 2\pi, \dots, \pm n\pi$ 时, 函数值等于零; 曲线面积: ④左右各 $\pi/2$, 共 π 。

4) 高斯函数: $f(t) = E e^{-\left(\frac{t}{\tau}\right)^2}$ 。

当 $t = \tau/2$ 时, $f(t) \approx 0.78E$, 这表明函数式中的参数 τ 是当 $f(t)$ 由最大值 E 下降到 $0.78E$ 时, 所占据的时间宽度。

除了以上列举的信号之外, 常见的信号还有方波、三角波、锯齿波和一些直流信号等。

3. 多功能综合信号源单元使用

图 2.1.1 中标注的区域, 是本次实验中主要操作的区间, 可以实现波形的类型、频率和幅值的调节:

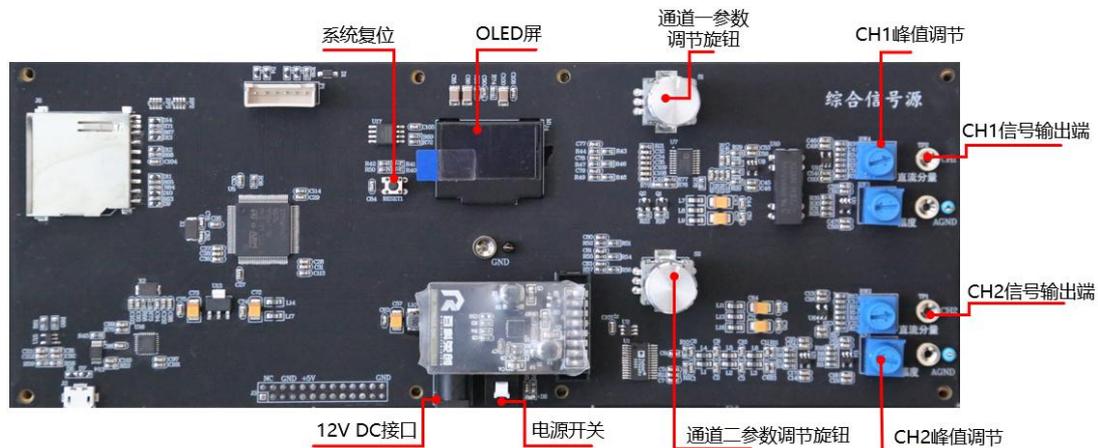


图 2.1.1 多功能综合信号源单元操作平面

① 系统复位: 进行波形参数设定后, 若想恢复至上电时的信号, 点击该按钮即可;

② OLED 屏幕: 采用无背光 0.96 寸 OLED 屏幕, 可视角大, 便于对设定参数进行观察, 界面中绘制显示出波形类型以及频率等信息;

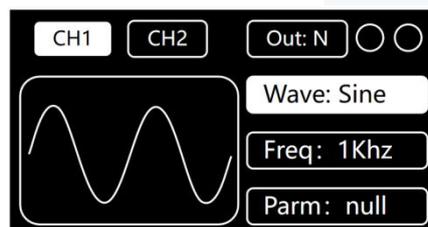


图 2.1.2 OLED 屏幕信息展示

③ DC 接口与电源开关：信号源可独立使用时，可采用 12V 适配器进行供电。在系统中使用时，无需外接电源，点击电源开关，即可控制信号源电源通断；

④ 参数调节旋钮：可通过参数调节旋钮调节参数，详细使用请见使用手册。同时为了保证信号源输出信号稳定，因此 CH1 和 CH2 通道输出波形有一定差异，如表 2.1.1 所示：

表 2.1.1 信号源各通道波形输出说明

通道	频率范围	波形类别
CH1	1Hz~1MHz	正弦波、三角波、方波
CH2	1Hz~100KHz	正弦波、矩形波、三角波、锯齿波、阶梯波、衰减指数信号、高斯函数信号、抽样函数信号、调幅信号、扫频信号

⑤ 峰值调节：信号源不仅能进行波形和频率的调节，也支持进行峰值调节，通过调节两个旋钮，并通过示波器观察其峰值数值；

⑥ 输出端：信号源支持两路信号输出，为 CH1 和 CH2。波形参数设定完成以后，先使用数字示波器进行观测，如图 2.1.3 所示。

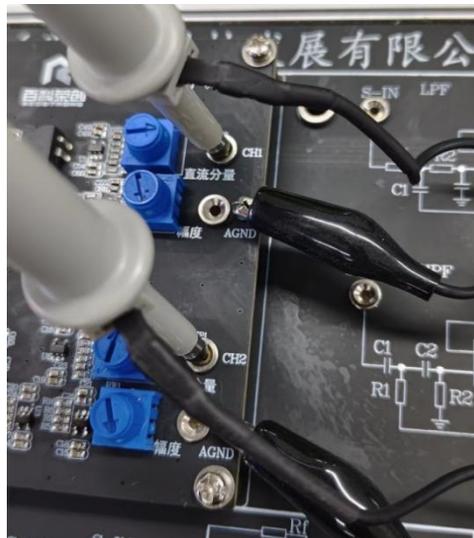


图 2.1.3 信号源输出波形检测

2.1.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台（含信号源单元）1 台。
2. 多功能数字示波器 1 台。

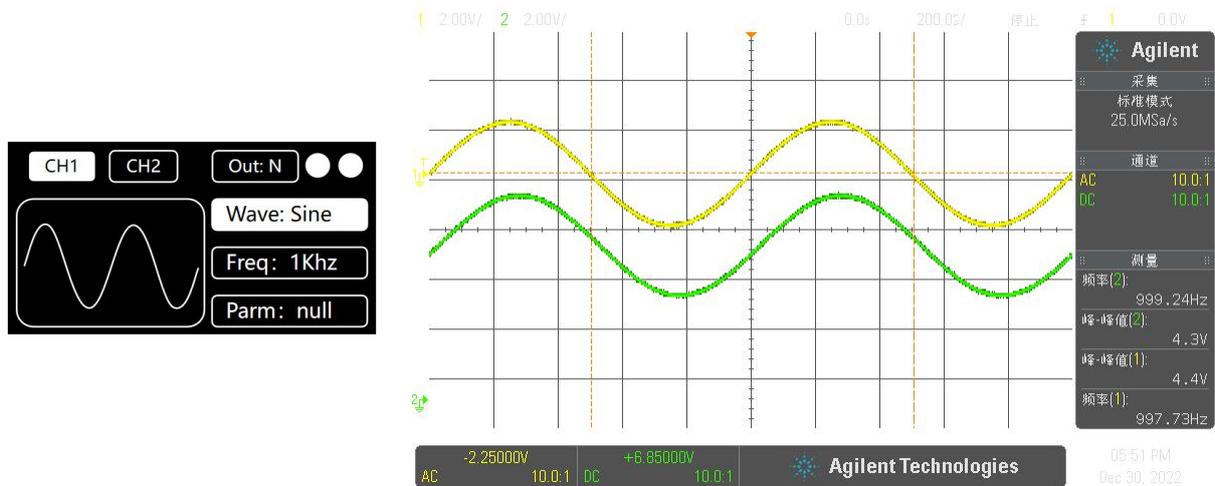
2.1.4 实验步骤

1. 示波器、实验平台等仪器仪表设备检测；

2. 将示波器的通道 1, 连接至多功能综合信号源单元的 CH1 通道; 示波器的通道 2, 连接至多功能综合信号源单元的 CH2 通道;
3. 设备上电后, 使用示波器观察 CH1 和 CH2 通道输出波形。

2.1.5 实验结果

多功能综合信号源单元上电后, CH1、CH2 默认参数为 1KHz 的正弦波, 此时我们通过参数调节旋钮, 控制两通道输出, 通过示波器能观测到其波形, 如图 2.1.4 所示:



(a) 信号源参数

(b) 示波器检测波形

图 2.1.4 多功能综合信号源单元默认输出波形

从图中可以看出, 输出信号的波形和频率都满足我们设定参数, 峰峰值可以通过调节幅值旋钮实现调整。至此说明, 我们的多功能综合信号源单元设备正常, 即可以进行相关扩展实验。

2.2 可调信号的调节与观察实验

2.2.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 熟悉正弦波、方波与三角波信号的波形和特点;
- (2) 熟悉操作多功能综合信号源单元使得产生正弦波、方波和三角波;
- (3) 熟练使用多功能数字示波器。

2. 实验任务

使用多功能综合信号源单元生成正弦波、方波与三角波信号,其频率、幅值可调节,并通过示波器观察记录输出信号,分析各参数对波形的影响。

2.2.2 实验原理

1. 正弦波信号

正弦信号: $f(t) = K \sin(\omega t + \theta)$ 。(式中, K 为振幅, ω 为角频率, θ 为初相位)。正弦信号可变为 $f(t) = K \sin\left[\omega\left(t + \frac{\theta}{\omega}\right)\right]$, 其波形如图 2.2.1 所示。

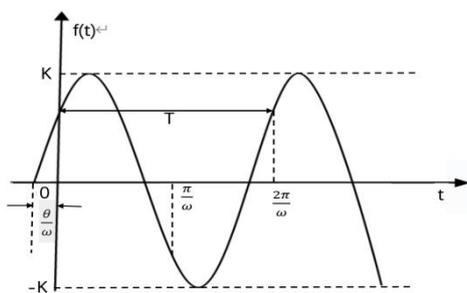


图 2.2.1 正弦波信号

由图 2.2.1 可知,正弦信号的一个周期时间 T 等于 $2\pi/\omega$, 表示每间隔 $T = 2\pi/\omega$ 的时间,波形重复一遍,即波形重复的频率为 $1/T$, 即角频率 ω 与频率 f 的关系为 $\omega = 2\pi f$ 。

正弦信号的振幅为 K , 即 $f(t)$ 的最大值等于 K , 最小值等于 $-K$, 幅度为 $2K$ 。

2. 方波信号

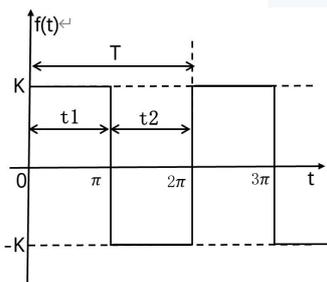


图 2.2.2 方波信号

占空比为方波信号为周期内 $f(t)$ 为正所持续的时间 t_1 占周期时间 T 的百分比。

3. 三角波信号

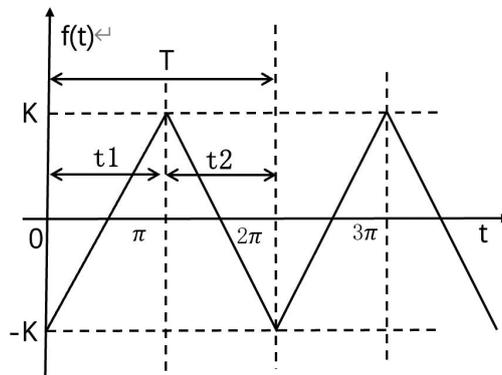


图 2.2.3 三角波信号

如图 2.2.3 所示，三角波在周期内， $f(t)$ 从最小值增加到最大值所用时间 t_1 等于从最大值减小到最小值所用时间 t_2 ，波形沿 $T/2$ 处左右对称。改变三角波的斜率，可改变三角波的频率，即改变 $f(t)$ 的周期时间 T 的长短。

三角波是锯齿波的一种，当 $t_1 \gg t_2$ 时，此时即产生正斜率的锯齿波，当 $t_1 \ll t_2$ 时，则产生负斜率的锯齿波。

4. 多功能综合信号源单元

多功能综合信号源单元可以产生前面内容中所述的波形，信号源的操作方式在此就不做过多赘述，读者可阅读 2.1 章节进行学习。

2.2.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台（含信号源单元）1 台。
2. 多功能数字示波器 1 台。

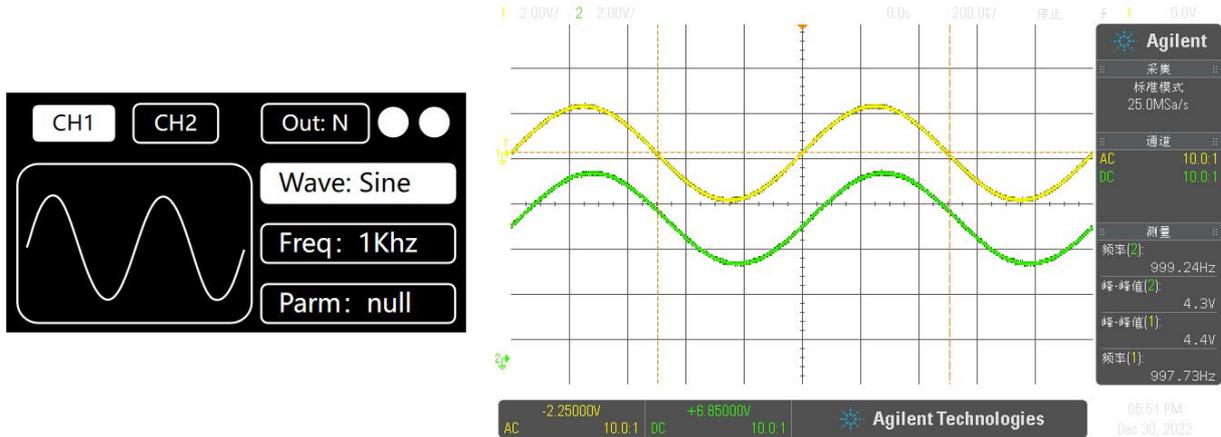
2.2.4 实验步骤

1. 示波器、实验平台等仪器仪表设备检测。
2. 将示波器的通道 1, 连接至多功能综合信号源单元的 CH1 通道; 示波器的通道 2, 连接至多功能综合信号源单元的 CH2 通道;
3. 设备上电后, 使用示波器观察 CH1 和 CH2 通道输出波形。
4. 调节旋钮参数设定原型, 进行波形频率、类型调整, 调节幅值旋钮进行波形峰峰值调节, 并通过示波器观察波形变换情况。

2.2.5 实验结果

1. 初始信号观测

多功能综合信号源单元上电后，CH1、CH2 默认参数为 1KHz 的正弦波，此时我们通过参数调节旋钮，控制两通道输出，通过示波器能观测到其波形，如图 2.2.4 所示：



(a) 信号源参数

(b) 示波器检测波形

图 2.2.4 多功能综合信号源单元默认输出波形

2. 调节信号源参数

这里我们将 CH1 和 CH2 通道的波形，设置为三角波输出模式，其频率均为 1KHz，幅值为 4.3V，如图 2.3.5 所示。

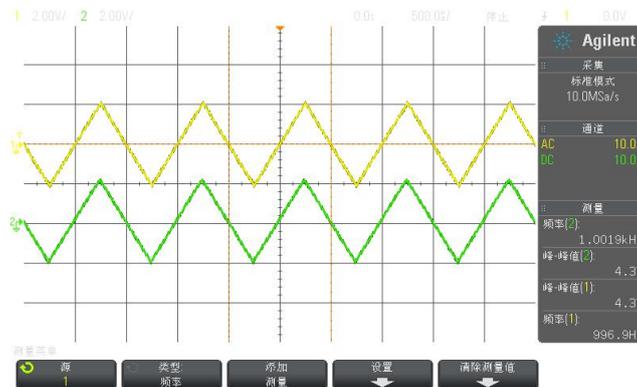


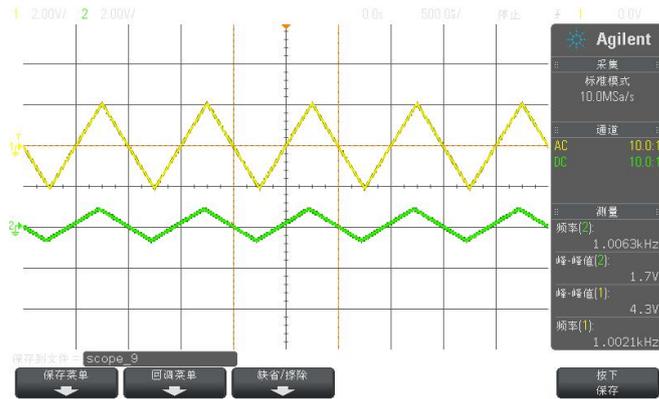
图 2.2.5 输出三角波

3. 改变波形幅值

这里我们选择图 2.2.6 (a) 中 CH2 通道的幅值调节，通过逆时针旋转使得，峰峰值下降至 1.7V，示波器测量结果如图 2.2.6 (b) 所示：



(a) 幅值调节旋钮



(b) 示波器测量波形

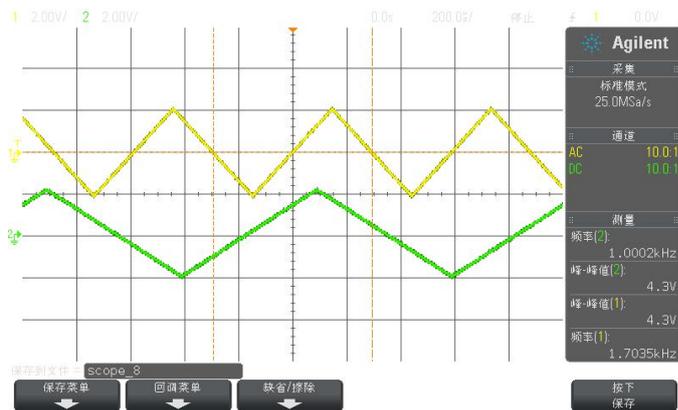
图 2.2.6 三角波幅值调节

4. 改变波形频率

除了可以调节三角波的幅值以外，还可以进行频率调节，如图 2.2.7 (a) 所示，顺时针使得频率增加，示波器测得数据如图 2.2.7 (b) 所示：



(a) 频率调节旋钮



(b) 示波器测量波形

图 2.2.7 三角波频率调节

2.3 信号的基本运算实验

2.3.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 熟悉以运算放大器为核心元件组成的基本运算单元;
- (2) 熟悉各运算单元的功能;
- (3) 掌握基本运算单元特性的测试方式。

2. 实验任务

(1) 加法器实验

- 1) 根据加法器原理图, 推导输入信号与输出信号的关系式。
- 2) 使用信号源模块输出方波和正弦波信号, 分别接入加法器的两个输入端, 加法器的另一个输入端接地, 使用数字示波器分别观察输入的方波信号与加法器输出信号、输入的正弦波信号与加法器输出信号, 对比分析输入信号和输出信号的。

(2) 乘法器实验

- 1) 根据同相标量乘法器和反相标量乘法器的原理图, 推导输入信号与输出信号的关系式。
- 2) 使用信号源模块输出占空比不等于 50% 的方波信号, 接入同相标量乘法器和反相标量乘法器的输入端, 使用数字示波器分别观察方波信号的乘法器输出信号, 对比分析。

(3) 积分器实验

- 1) 根据积分器的原理图, 推导输入信号与输出信号的关系式。
- 2) 使用信号源模块输出方波信号, 接入积分器的输入端, 使用数字示波器分别观察方波信号的积分器输出信号, 对比分析。

2.3.2 实验原理

1. 运算放大器

运算放大器(简称“运放”)是具有很高放大倍数的电路单元。在实际电路中, 通常结合反馈网络共同组成某种功能模块。它是一种带有特殊耦合电路及反馈的放大器。其输出信号可以是输入信号加、减或微分、积分等数学运算的结果。由于早期应用于模拟计算机中, 用以实现数学运算, 故得名“运算放大器”。

运算放大器由两个输入端，一个为同相输入端，其输出信号和输入信号同相，另一个输入端为反相输入端，其输出信号和输入信号反相，如图 2.3.1 所示。

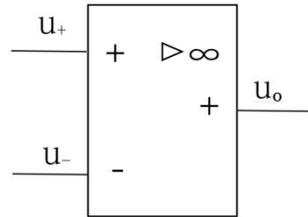


图 2.3.1 运算放大器的电路符号

运算放大器电路的特性：

(1) 虚短。是指在分析运放处于线性状态时，可把两输入端视为等电位，即 $u_+ = u_-$ ，这一特性称为虚假短路，简称虚短。

由于运放的电压放大倍数很大，一般通用型运算放大器的开环电压放大倍数都在 80dB 以上。而运放的输出电压是有限的，一般在 10V~14V，因此运放的差模输入电压不足 1mV，两输入端近似等电位，相当于“短路”。开环电压放大倍数越大，两输入端的电位越接近相等。

(2) 虚断。是指在分析运放处于线性状态时，可以把两输入端视为等效开路，即 $I_+ = 0$ ， $I_- = 0$ ，这一特性称为虚假开路，简称虚断。

由于运放的差模输入电阻很大，一般通用型运算放大器的输入电阻都在 $1M\Omega$ 以上。因此流入运放输入端的电流往往不足 $1\mu A$ ，远小于输入端外电路的电流。故通常可把运放的两输入端视为开路，且输入电阻越大，两个输入端越接近于开路。

2. 基本运算单元

常见的运算单元有加法器、比例运算器、积分器等运算。

(1) 加法器

加法器是一个执行加法运算的数学运算的电路。本实验箱中所设计的加法器原理图如图 2.3.2 所示，采用的是同相输入信号，最多可同时输入三路信号进行运算，其中 $R_F = R$ 。

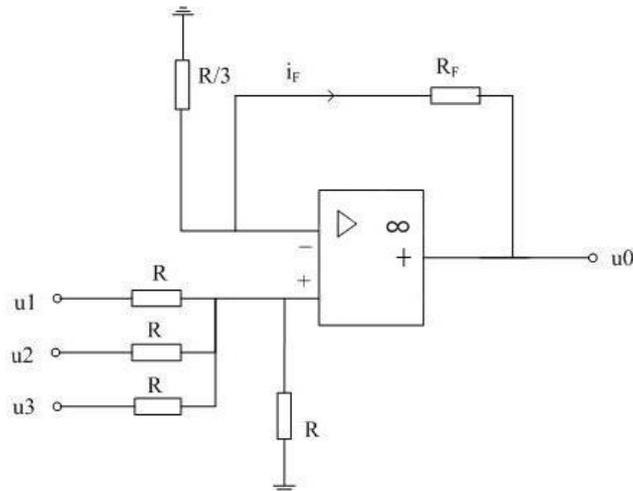


图 2.3.2 加法器原理图

根据运算放大器电路的特点可得：

同相端：

$$\frac{u_1 - u_+}{R} + \frac{u_2 - u_+}{R} + \frac{u_3 - u_+}{R} = \frac{u_+}{R}$$

化简得：

$$u_1 + u_2 + u_3 = 4u_+$$

反相端：

$$\frac{u_o - u_-}{R_F} = \frac{u_-}{\frac{R}{3}}$$

因为 $R_F = R$ ，所以化简得：

$$u_o = 4u_-$$

又因为运算放大器的 $u_+ = u_-$ ，因此

$$u_1 + u_2 + u_3 = u_o$$

在实验中通常将 u_3 接地。

(2) 比例运算器

比例运算器是一个执行乘法运算的数学运算的电路。本实验箱中所设计比例运算器为同相标量乘法器和反相标量乘法器。顾名思义，由运放组成乘法器，一个仅由正相输入端输入信号，一个仅反相输入端输入信号，信号通过固定比例进行放大。其原理图如图 2.3.3、图 2.3.4 所示，其中， $R_F = 20K\Omega$ ， $R_f = 10K\Omega$ 。

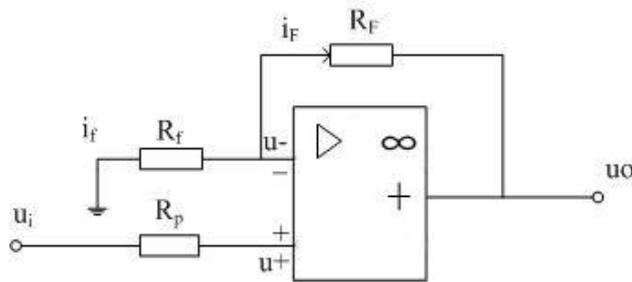


图 2.3.3 同相比例放大器

根据运算放大器电路的特点可得：

同相端：

$$u_i = u_+$$

反相端：

$$\frac{u_o - u_-}{R_F} = \frac{u_-}{R_f}$$

因为 $R_F = 2R_f$ ，所以化简得：

$$u_o = 3u_-$$

又因为运算放大器的 $u_+ = u_-$ ，因此

$$3u_i = u_o$$

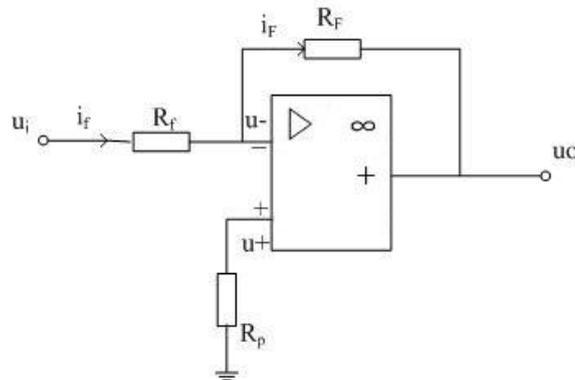


图 2.3.4 反相比例放大器

根据运算放大器电路的特点可得：

同相端：

$$u_+ = 0$$

反相端：

$$\frac{u_i - u_-}{R_f} = \frac{u_- - u_o}{R_F}$$

因为 $R_F = 2R_f$ ，所以化简得：

$$u_o = 2u_-$$

又因为运算放大器的 $u_+ = u_-$ ，因此

$$2u_i = u_o$$

(3) 积分器

积分器是一个执行积分的数学运算的电路，输出响应随输入电压随时间的变化而变化，因为运算放大器积分器产生的输出电压与输入电压的积分成正比。积分器的反馈电路采用的是电容，电容连接在运算放大器的反相输入（地电位）之间和运算放大器的输出（负极）。因为输入信号直接连接到运算放大器的反相输入端，所以积分器具有反相功能，其原理图如所示，其中 $R_f = R_F = 5.1K\Omega$ ， $C_F = 47nF$ 。

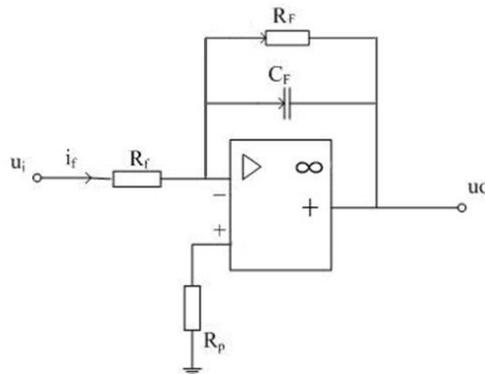


图 2.3.5 积分器

根据运算放大器电路的特点可得：

同相端：

$$u_+ = 0$$

反相端：

$$\frac{u_i - u_-}{R_f} = \frac{u_- - u_o}{R_F} + \frac{u_- - u_o}{X_{CF}}$$

其中， X_{CF} 为电容的容抗， $X_{CF} = \frac{1}{SC}$ 。

因为 $u_+ = u_-$ ，所以化简得：

$$\frac{u_i}{R_f} = -\frac{u_o}{R_F} - \frac{u_o}{X_{CF}}$$

令 $R_f = r_1$ ， $R_F = r_2$ ， $C_F = c$ ，计算功能将上式进行化简：

系统传递函数为：

$$H(s) = \frac{u_i(s)}{u_o(s)} = \frac{r_2}{cr_1r_2s + r_1}$$

2.3.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台(含信号源单元、基本运算单元)1台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器1台。

2.3.4 实验步骤

1. 示波器、实验平台等仪器仪表设备检测。
2. 同相加法器实验

(1) 基本运算单元菜单栏处选择“加法器”，将信号源的CH1、CH2输出端口与S-IN1、S-IN2采集端口用实验导线连接，加法器的S-IN3与AGND连接。

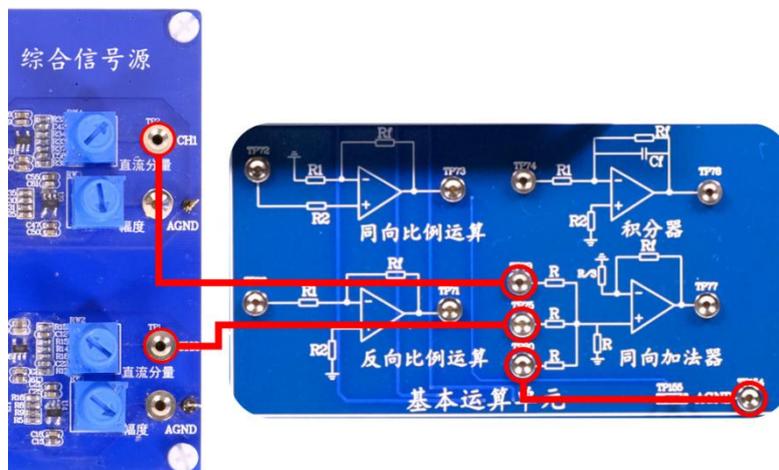


图 2.3.6 加法器实验接线示意图

(2) 设备通电以后，调节多功能综合信号源单元参数，将CH1、CH2通道参数修订为表 2.3.1:

表 2.3.1 加法电路信号源输出参数

通道	波形	频率	峰峰值
CH1	正弦波	300Hz	1V
CH2	方波	50Hz	2.5V

(3) 参数调节完成以后，可以使用示波器的CH1和CH2接入S-IN1、S-IN2端口进行测量，并且可打开示波器数字运算功能，并进行加法运算，观察示波器计算出的加法后的波形，如图 2.3.7所示。

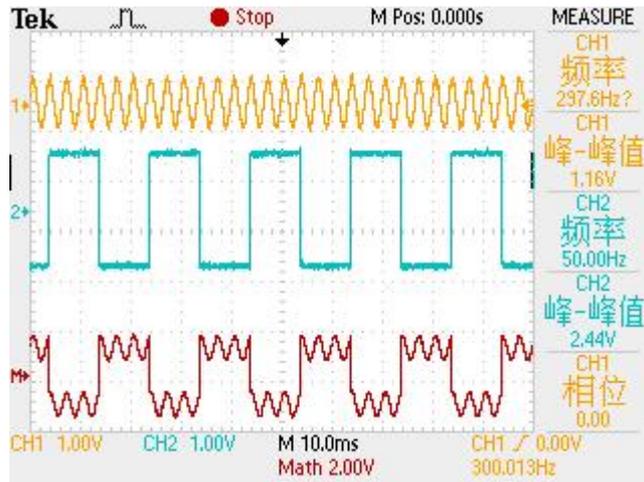


图 2.3.7 示波器运算 CH1、CH2 加法

(4) 使用示波器观测基本运算单元的加法器输出端信号，记录波形，对比分析示波器软件中运算的结果。

3. 同相标量乘法器实验

(1) 将信号源的 CH1 输出端口与同相比例运算的输入端口 S-IN 用实验导线连接，如图 2.3.8 所示。

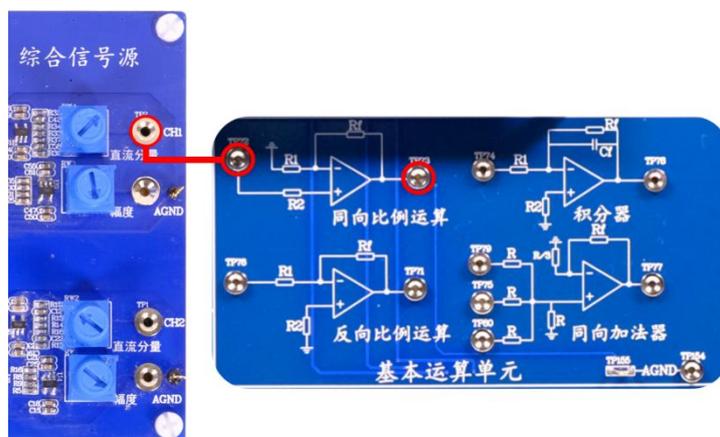


图 2.3.8 同相标量乘法器实验接线

(2) 将示波器的 CH1 通道连接至同相比例放大器电路的 S-IN 端，CH2 通道连接至同相比例放大器电路的 S-OUT 端。

(3) 设定多功能综合信号源单元 CH1 通道信号参数为：频率 1KHz、峰峰值 1V 且占空比为 50%的方波，如图 2.3.9 所示：

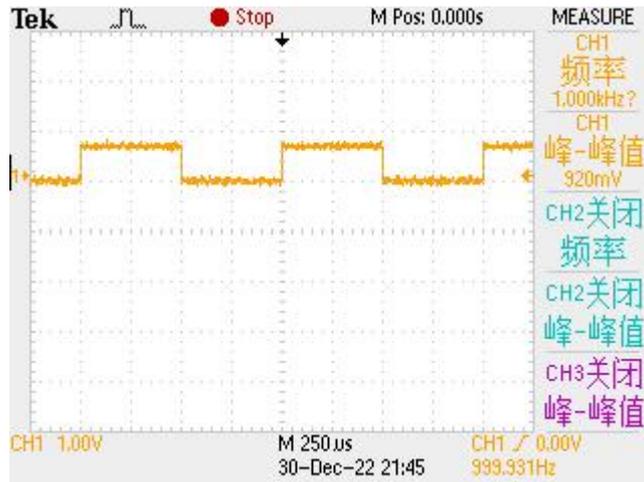


图 2.3.9 乘法电路输入信号

(4) 使用示波器观测基本运算单元的同相标量乘法器输出端信号，记录波形并分析运算的结果。

4. 反相标量乘法器实验

反相标量乘法器实验步骤与同相标量乘法器实验步骤相同，仅在选择乘法器时，需选择“反相比例运算”电路，如图 2.3.10 所示。

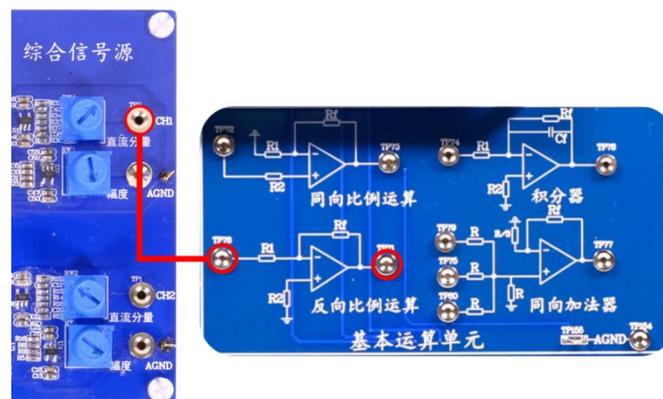


图 2.3.10 反相标量乘法器实验接线

5. 积分器实验

(1) 将信号源的 CH1 输出端口与积分器的输入端口 S-IN 用实验导线连接，如图 2.3.11 所示。

(2) 设定多功能综合信号源单元，使 CH1 输出一路频率为 1KHz、峰峰值 1V 且占空比为 50%的方波，如图 2.3.9 所示。

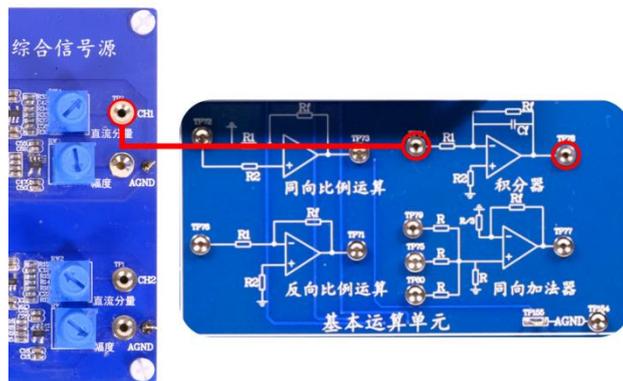


图 2.3.11 积分运算电路接线

(3) 使用示波器 CH2 通道观测基本运算单元的积分器输出端 (S-OUT) 信号, 记录波形。

2.3.5 实验结果

1. 加法器实验

选用一路频率为 300Hz、VPP 为 1V 的正弦波信号, 一路频率为 50Hz、VPP 为 2.5V、占空比为 50% 的方波信号进行实验。示波器软件的运算结果 (红色) 和加法器电路输出 (CH3 紫色) 的结果如图 2.3.12 所示。

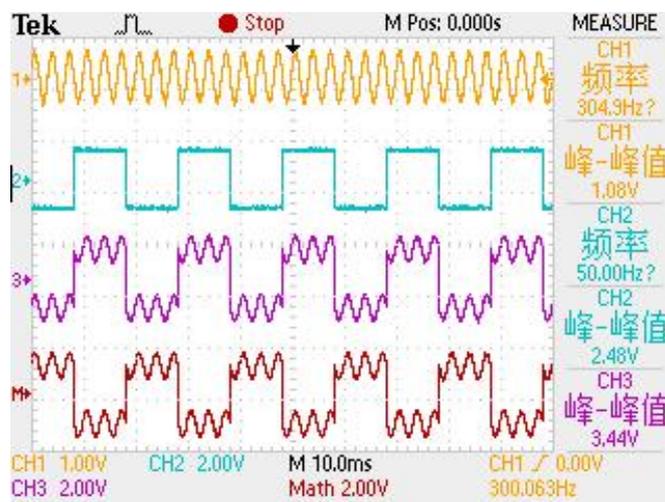


图 2.3.12 示波器观测加法器输出端信号

2. 同相标量乘法器实验

选用一路频率为 1KHz、幅值为 1V、占空比为 50% 的方波信号进行实验。使用示波器通道 1 观测多功能综合信号源单元 CH1 的输出信号, 示波器通道 2 观测同相比例放大器的输出信号, 实验结果如图 2.3.13 所示。

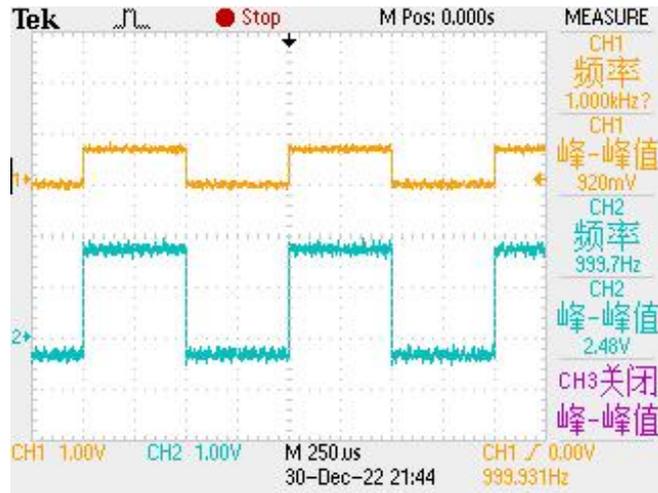


图 2.3.13 示波器观测信号

3. 反相标量乘法器实验

选用一路频率为 1KHz、幅值为 1V、占空比为 50%的方波信号进行实验。使用示波器通道 1 观测综合信号 CH1 的输出信号，示波器通道 2 观测反向比例放大器的输出信号。实验结果如图 2.3.14 所示：

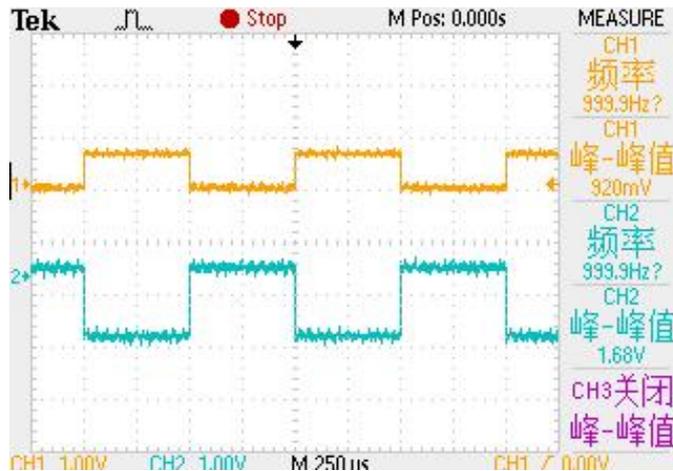


图 2.3.14 示波器观测信号

4. 积分器实验

选用一路频率为 1KHz、幅值为 2V、占空比为 50%的方波信号进行实验。使用示波器通道 1 观测多功能综合信号源单元 CH1 的输出信号，示波器通道 2 观测积分器的输出信号 (S-OUT)。实验结果如图 2.3.15 所示：

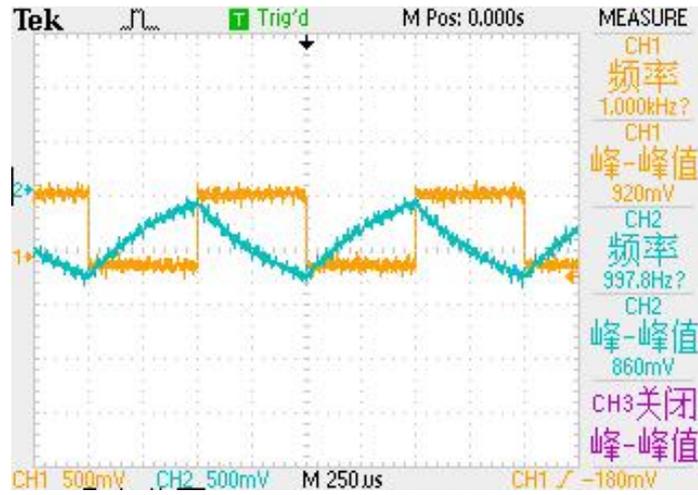


图 2.3.15 示波器观测信号



2.4 滤波器基本实验

2.4.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 了解无源RC滤波器和有源RC滤波器的种类、基本结构、工作原理;
- (2) 了解扫频信号的特征;
- (3) 学会使用扫频信号对滤波器的幅频特性进行分析;
- (4) 掌握无源RC滤波器和有源RC滤波器的滤波特性。

2. 实验任务

使用信号源单元产生扫频信号并输出给滤波器,观察实验现象,进行各滤波器输入输出的信号进行分析。

2.4.2 实验原理

1. 滤波器的种类

按照滤波电路的工作频带为其命名,分为低通滤波器(LPF)、高通滤波器(HPF)、带通滤波器(BPF)、带阻滤波器(BEF)和全通滤波器(APF)。

(1) 低通滤波器与高通滤波器

设截止频率为 f_p ,频率低于 f_p 的信号能通过,高于 f_p 的信号被衰减的滤波电路称为低通滤波器;反之,频率高于 f_p 的信号能通过,而低于 f_p 的信号被衰减的滤波电路称为高通滤波器。前者可以作为直流电源整流后的滤波电路,以便得到平滑的直流电压;后者可以作为交流放大电路的耦合电路,隔离直流成分,只放大频率高于 f_p 的信号。

(2) 带通滤波器和带阻滤波器

设低频段的截止频率为 f_{p1} ,高频段的截止频率为 f_{p2} ,频率为 f_{p1} 到 f_{p2} 之间的信号能通过,低于 f_{p1} 和高于 f_{p2} 的信号被衰减的滤波电路称为带通滤波器;反之,低于 f_{p1} 和高于 f_{p2} 的信号能通过,而频率为 f_{p1} 到 f_{p2} 之间的信号被衰减的滤波电路称为带阻滤波器。前者常用于载波通信或弱信号提取等场合,以提高信噪比;后者用于在已知干扰或噪声频率的情况下,阻止其通过。

(3) 全通滤波器

全通滤波器对于频率从零到无穷大的信号具有同样的比例系数,但对于不同频率的信号将产生不同的相移。

2. 滤波器的幅频特性

滤波器的幅频特性分析即对滤波电路的频域分析。同一滤波电路，输入频率不同的激励信号，所产生的响应信号其幅值是不同的。不同滤波电路，输入同一频率的激励信号，所产生的响应信号其幅值也有所不同。

理想滤波电路的幅频特性如图 2.4.1 所示。允许通过的频段称为通带，将信号衰减到零的频段称为阻带。

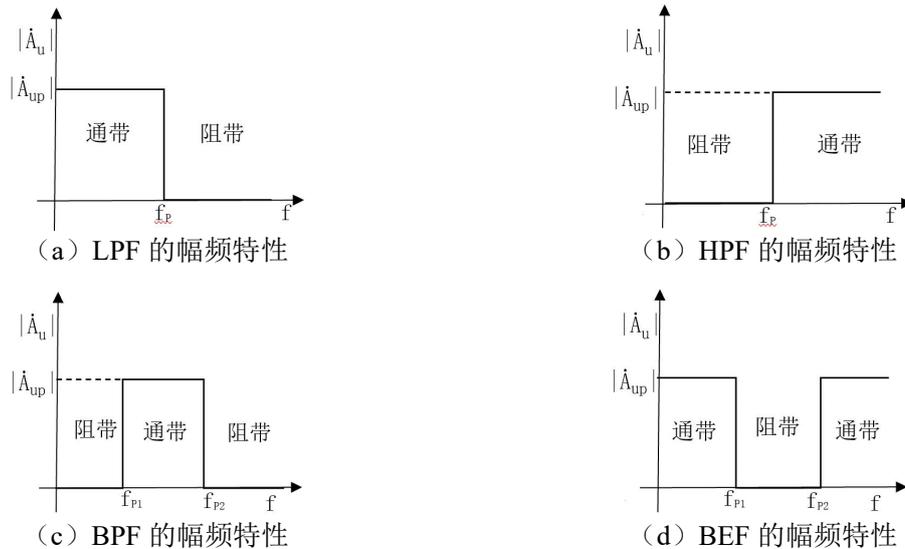


图 2.4.1 理想滤波电路的幅频特性

实际上，任何滤波器都达不到理想的幅频特性的效果，在通带和阻带之间存在着过渡带。

以低通滤波器为例，称通带中的输出电压与输入电压之比 \dot{A}_{up} 为通带放大倍数。当 $|\dot{A}_{up}| \approx 0.707|\dot{A}_{up}|$ 时的频率为通带截止频率 f_p ，从 f_p 到 $|\dot{A}_{up}|$ 接近零的频段称为过渡带，使 $|\dot{A}_{up}|$ 趋近于零的频段称为阻带。过渡带愈窄，电路的选择性愈好，滤波特性愈理想。

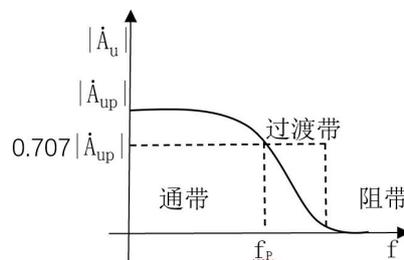


图 2.4.2 低通滤波器的实际幅频特性

3. 无源滤波电路和有源滤波电路

若滤波电路仅由无源元件（电阻、电容、电感）组成，则称为无源滤波电路。若滤波电路由无源元件和有源元件（双极型管、单极型管、集成运放）共同组成，则称为有

源滤波电路。

无源滤波电路的结构简单,易于设计,但其通带放大倍数及其截止频率都随负载而变化,这一缺点常常不符合信号处理要求。因而产生有源滤波电路。

为了使负载不影响滤波特性,可在无源滤波电路和负载之间加一个高输入电阻、低输出电阻的隔离电路,最简单的办法即加一个电压跟随器,这样就构成了有源滤波电路。

有源滤波电路一般由RC网络和集成运放组成,因而必须在合适的直流电源供电的情况下才能使用,同时还可以进行放大。但电路的组成和设计也较复杂。有源滤波电路不适用于高电压大电流的场合,只适用于信号处理。

4. 各滤波器电路原理图及其分析

(1) 低通滤波器

如图 2.4.3 (a) 所示为无源低通滤波器的电路原理图,其中 $R_1 = 1K\Omega$ 、 $R_2 = 1K\Omega$, $C_1 = 0.01\mu F$ 、 $C_2 = 0.01\mu F$ 。如图 2.4.3 (b) 所示为有源低通滤波器的电路原理图,其中 $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 1K\Omega$, $C_1 = 0.01\mu F$, $C_2 = 0.01\mu F$ 。

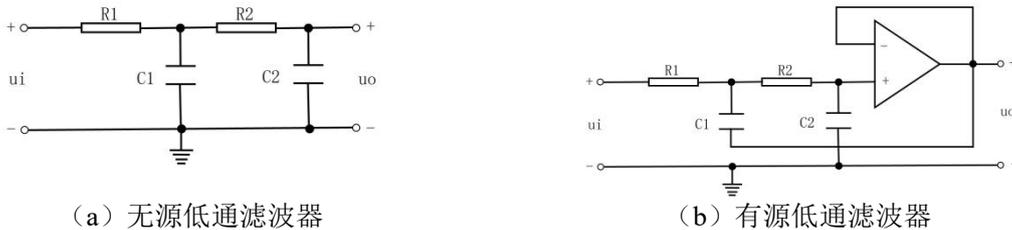


图 2.4.3 低通滤波器

1) 对无源低通滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.3 (a) 可得:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_{R1}}{R_1} = \frac{\dot{U}_i - U_{R1} - \dot{U}_o}{R_2} + \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1}}{X_{C1}} \\ \frac{\dot{U}_i - U_{R1} - \dot{U}_o}{R_2} = \frac{\dot{U}_o}{X_{C2}} \\ X_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} \\ X_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases}$$

化简可得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{(j\omega C_1 R_1) + (j\omega C_2 R_1) + (j\omega C_1 R_2) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

2) 对有源低通滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.3 (b) 可得:

$$\begin{cases} \dot{U}_f = \dot{U}_o \\ \frac{\dot{U}_{R1}}{R_1} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_o}{X_{C1}} + \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_f}{R_2} \\ \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_f}{R_2} = \frac{\dot{U}_f}{X_{C2}} \\ X_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} \\ X_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases}$$

化简得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{(j\omega C_2 R_1) + (j\omega C_2 R_2) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

(2) 高通滤波器

如图 2.4.4 (a) 所示为无源高通滤波器的电路原理图, 其中 $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 1K\Omega$, $C_1 = 0.047\mu F$, $C_2 = 0.047\mu F$ 。如图 2.4.4 (b) 所示为有源高通滤波器的电路原理图, 其中 $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 1K\Omega$, $C_1 = 0.047\mu F$, $C_2 = 0.047\mu F$ 。

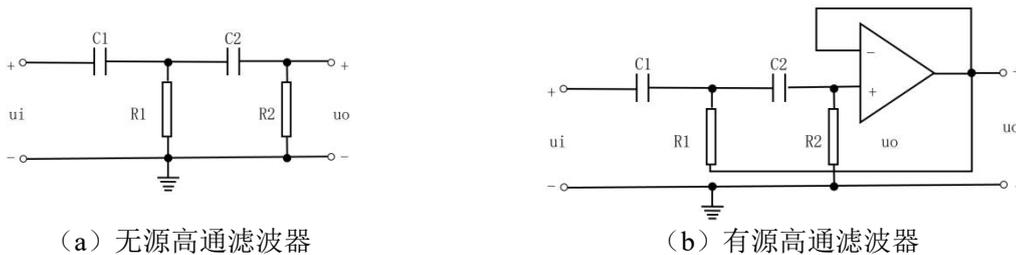


图 2.4.4 高通滤波器

1) 对无源高通滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.4 (a) 可得:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_{C1}}{X_{C1}} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_o}{X_{C1}} - \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1}}{R_1} \\ \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_o}{X_{C1}} = \frac{\dot{U}_o}{R_2} \\ X_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} \\ X_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases}$$

化简得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{(j\omega C_1 R_1) + (j\omega C_2 R_1) + (j\omega C_2 R_2) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

2) 对有源高通滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.4 (b) 可得:

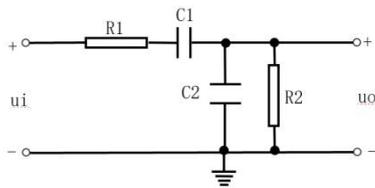
$$\begin{cases} \dot{U}_f = \dot{U}_o \\ \frac{\dot{U}_{C1}}{X_{C1}} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_o}{R_1} - \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_f}{X_{C2}} \\ \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_f}{X_{C2}} = \frac{\dot{U}_f}{R_2} \\ X_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} \\ X_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases}$$

化简得:

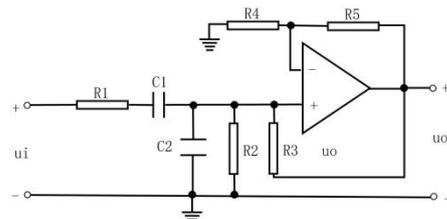
$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{(j\omega C_1 R_1) + (j\omega C_2 R_1) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

(3) 带通滤波器

如图 2.4.5 (a) 所示为无源带通滤波器的电路原理图, 其中 $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 1K\Omega$, $C_1 = 0.022\mu F$, $C_2 = 0.022\mu F$ 。如图 2.4.5 (b) 所示为有源带通滤波器的电路原理图, 其中 $R_1 = 1K\Omega$, $R_2 = 1K\Omega$, $R_3 = 2K\Omega$, $R_4 = 10K\Omega$, $R_5 = 12.4K\Omega$, $C_1 = 0.022\mu F$, $C_2 = 0.022\mu F$ 。



(a) 无源带通滤波器



(b) 有源带通滤波器

图 2.4.5 带通滤波器

1) 对无源带通滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.5 (a) 可得:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{R_1 + X_{C1}} = \frac{\dot{U}_o}{X_{C2}} + \frac{\dot{U}_o}{R_2} \\ X_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} \\ X_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases}$$

化简得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega C_1 R_2}{j\omega C_1 R_1 + j\omega C_1 R_2 + j\omega C_2 R_2 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + 1}$$

2) 对有源带通滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.5 (b) 可得:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_f}{R_1 + X_{C1}} = \frac{\dot{U}_f}{X_{C2}} + \frac{\dot{U}_f}{R_2} + \frac{\dot{U}_o}{R_3} \\ \frac{\dot{U}_o}{R_4 + R_5} = \frac{\dot{U}_f}{R_4} \\ X_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} \\ X_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \end{cases}$$

化简得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega C_1 R_2 R_3 (R_4 + R_5)}{R_3 R_4 - R_2 R_5 - j\omega C_1 R_1 R_2 R_5 + j\omega C_1 R_1 R_3 R_4 + j\omega C_1 R_2 R_3 R_4 + j\omega C_2 R_2 R_3 R_4 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 R_3 R_4}$$

(4) 带阻滤波器

如图 2.4.6(a)所示为无源带阻滤波器的电路原理图,其中 $R_1 = 1.5K\Omega$, $R_2 = 1.5K\Omega$, $R_3 = 510\Omega$, $C_1 = 0.01\mu F$, $C_2 = 0.01\mu F$, $C_3 = 0.022\mu F$ 。如图 2.4.6 (b) 所示为有源带阻滤波器的电路原理图,其中 $R_1 = 1.5K\Omega$, $R_2 = 1.5K\Omega$, $R_3 = 510\Omega$, $C_1 = 0.01\mu F$, $C_2 = 0.01\mu F$, $C_3 = 0.022\mu F$ 。

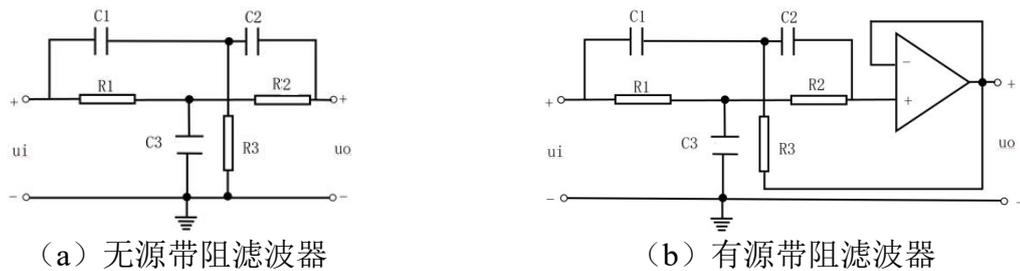


图 2.4.6 带阻滤波器

1) 对无源带阻滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.6 (a) 可得:

$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_{R1}}{R_1} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1}}{X_{C3}} + \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_o}{R_2} \\ \frac{\dot{U}_{C1}}{X_{C1}} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1}}{R_3} + \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_o}{X_{C2}} \\ \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_o}{R_2} = -\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_o}{X_{C2}} \end{cases}$$

令

$$\begin{cases} Z_1 = C_1 R_3 \\ Z_2 = C_2 R_1 \\ Z_3 = C_2 R_2 \\ Z_4 = C_2 R_3 \\ Z_5 = C_3 R_1 \end{cases}$$

故化简得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\omega(Z_1 + Z_4) + j\omega^2(Z_1Z_4 + Z_1Z_3) - \omega^3Z_1Z_3Z_5 - j}{\omega(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) + j\omega^2(Z_1Z_4 + Z_1Z_3 + Z_1Z_5 + Z_3Z_5 + Z_4Z_5) - \omega^3Z_1Z_3Z_5 - j}$$

2) 对有源带阻滤波器进行频域分析求系统的幅频特性曲线

分析图 2.4.6 (b) 可得:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_f = \dot{U}_o \\ \frac{\dot{U}_{R1}}{R_1} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1}}{X_{C3}} + \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_f}{R_2} \\ \frac{\dot{U}_{C1}}{X_{C1}} = \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_o}{R_3} + \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_f}{X_{C2}} \\ \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{R1} - \dot{U}_f}{R_2} = -\frac{\dot{U}_i - \dot{U}_{C1} - \dot{U}_f}{X_{C2}} \\ X_{C1} = \frac{1}{j\omega C_1} \\ X_{C2} = \frac{1}{j\omega C_2} \\ X_{C3} = \frac{1}{j\omega C_3} \end{array} \right.$$

令

$$\left\{ \begin{array}{l} Z_1 = C_1 R_3 \\ Z_2 = C_2 R_1 \\ Z_3 = C_2 R_2 \\ Z_4 = C_2 R_3 \\ Z_5 = C_3 R_1 \end{array} \right.$$

故化简得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\omega(Z_1 + Z_4) + j\omega^2(Z_1Z_2 + Z_1Z_3) - \omega^3Z_1Z_3Z_5 - j}{\omega(Z_1 + Z_4 + Z_5) + j\omega^2(Z_1Z_2 + Z_1Z_3 + Z_1Z_5 + Z_4Z_5) - \omega^3Z_1Z_3Z_5 - j}$$

2.4.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台 (含信号源单元、有源/无源滤波器) 1 台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器 1 台。

2.4.4 实验步骤

1. 示波器、实验平台等仪器仪表设备检测。
2. 将多功能综合信号源单元 CH2 通道设定为扫频信号输出模式, 其频率为 10KHz, 幅值 3.5V。

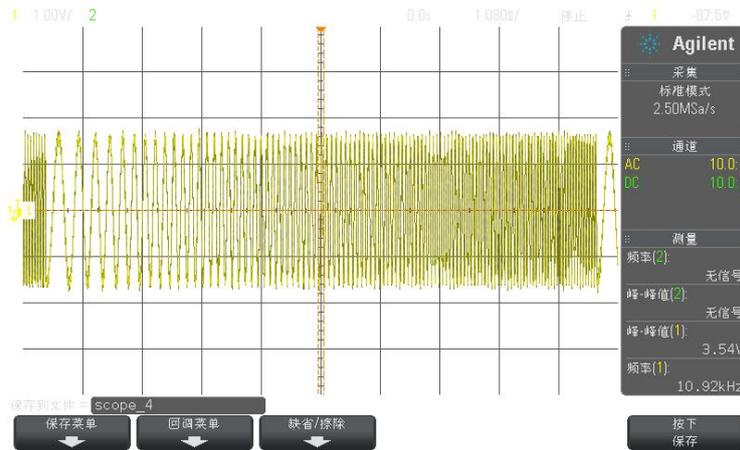


图 2.4.7 扫频信号

3. 无源低通滤波器实验

(1) 将多功能综合信号源单元的 CH2 输出端口与无源低通滤波器 (LPF) 的输入端口 (S-IN) 用实验导线连接, S-OUT 连接至示波器 CH2 通道观察实验结果。

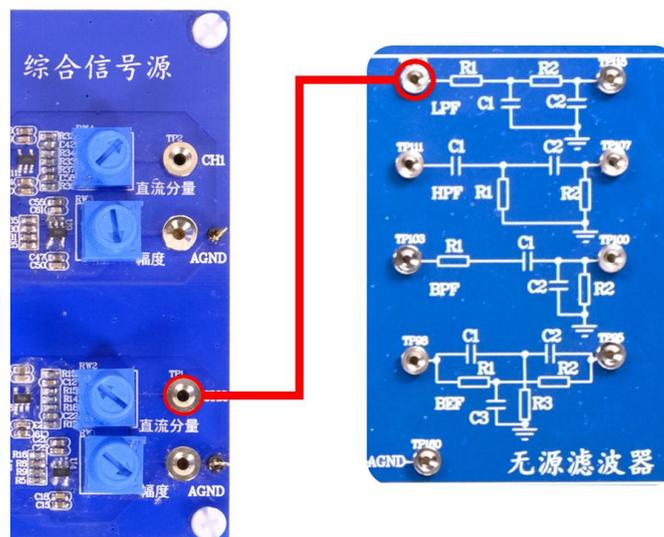


图 2.4.8 低通滤波器实验接线

(2) 使用数字示波器的通道 2 观测无源低通滤波器输出 (S-OUT) 的信号, 记录波形并分析。

4. 其他无源滤波器实验与有源低通滤波器实验步骤相同, 均采用数字示波器观测扫频信号和滤波后的信号即可, 需注意实验接线。

2.4.5 实验结果

1. 实验中使用的扫频信号频率为 0~20KHz, 幅值为 3.5V。

2. 低通滤波器实验

(1) 无源低通滤波器

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH1 端，通道 2 接无源低通滤波器 (LPF) 的输出端 (S-OUT)。

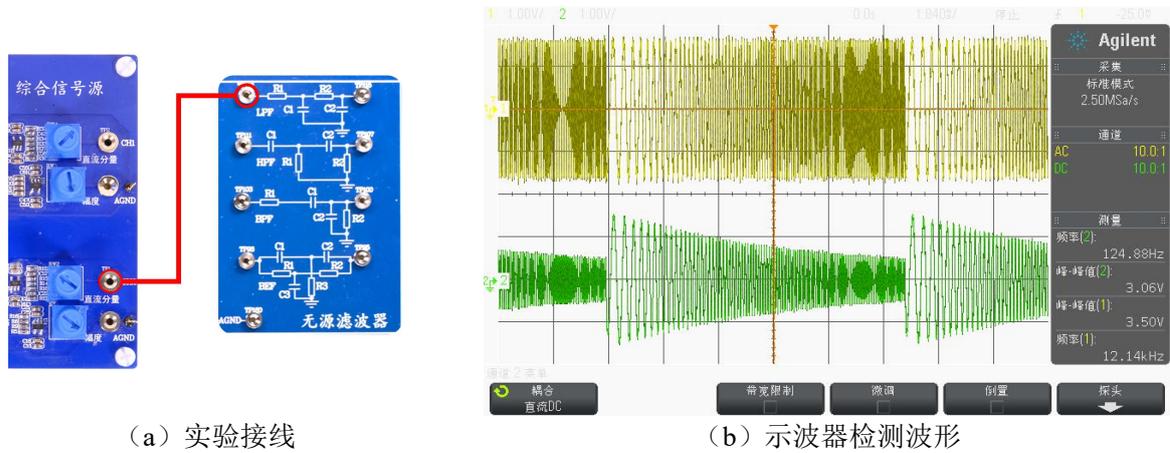


图 2.4.9 无源低通滤波器实验接线与结果

从图 2.4.9 (b) 中可以观测到，输入的扫频信号中，高频信号存在明显的衰减效果，说明设计的无源低通滤波器满足设定要求。

(2) 有源低通滤波器实验

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH2 端，通道 2 接有源低通滤波器的输出端 (S-OUT)。

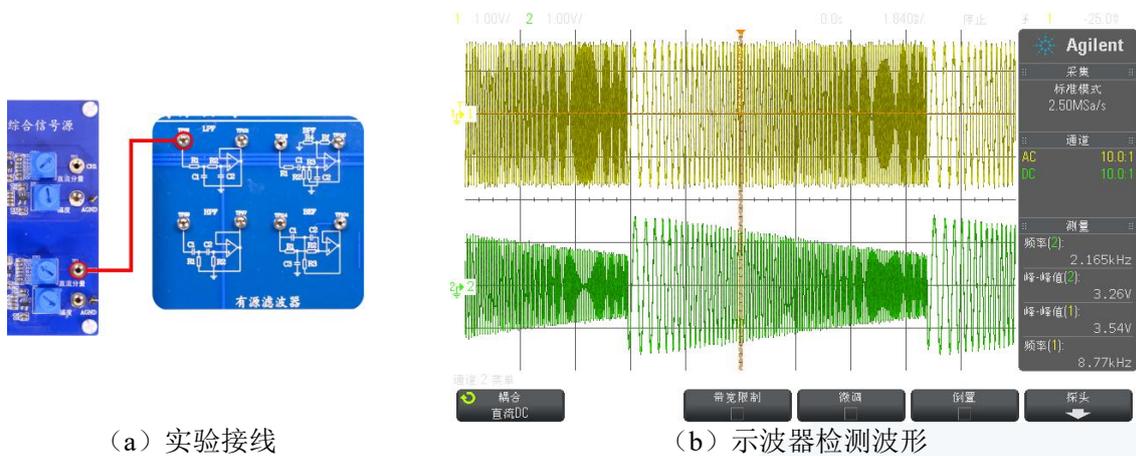


图 2.4.10 有源低通滤波器实验接线与结果

从图 2.4.10 (b) 中能明显地观察到，高频信号存在明显衰减，则说明设计的有源低通滤波器满足需求。

2. 高通滤波器实验

(1) 无源高通滤波器实验

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH2 端，通道 2 接无源高通滤波

器的输出端 (S-OUT)。

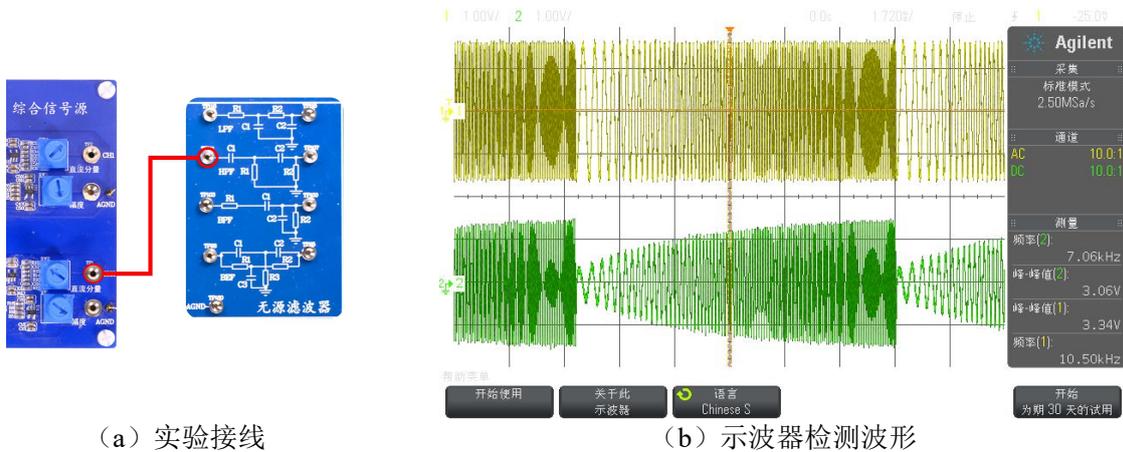


图 2.4.11 无源高通滤波器实验接线与结果

从图 2.4.11 (b) 中可以观察到, 低频信号存在着明显的衰减, 实验证明设计的无源高通滤波器满足要求。

(2) 有源高通滤波器实验

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH1 端, 通道 2 接有源高通滤波器 (HPF) 的输出端 (S-OUT)。

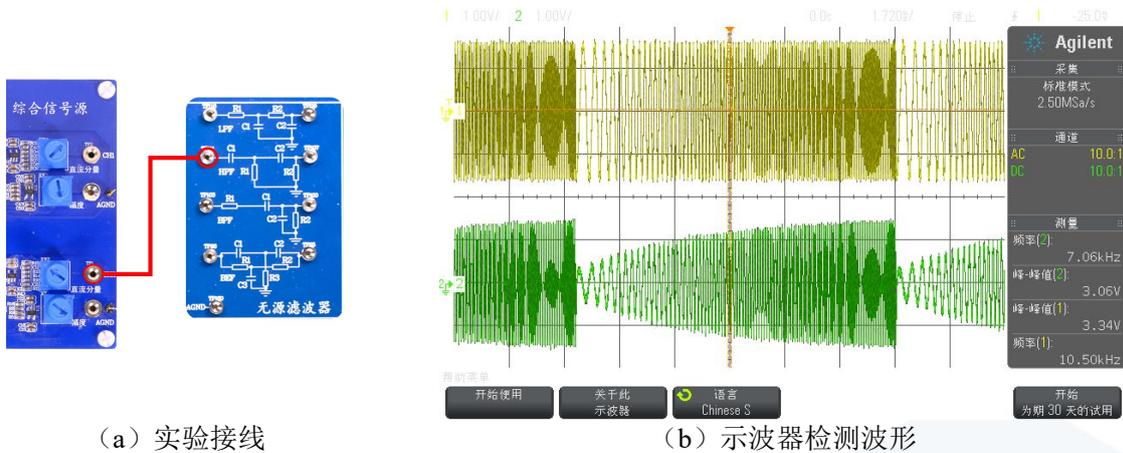


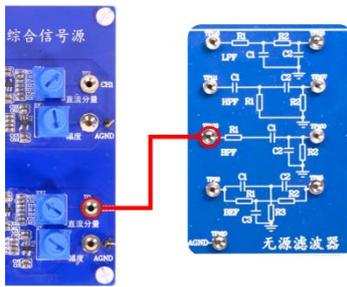
图 2.4.12 有源高通滤波器实验接线与结果

从图 2.4.12 (b) 中可以观察到, 其低频信号存在明显的衰减, 实验证明设计的有源高通滤波器满足要求。

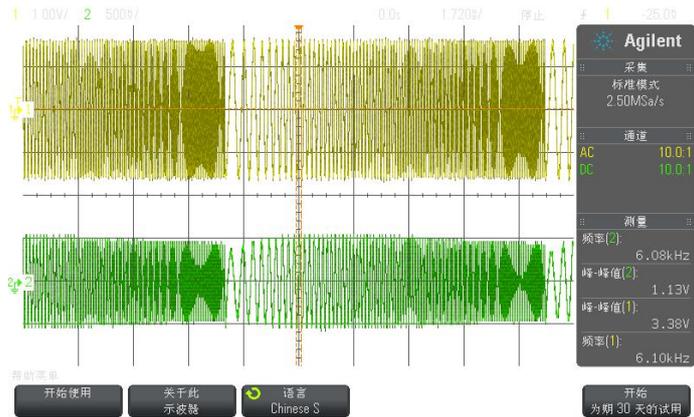
3. 带通滤波器实验

(1) 无源带通滤波器实验

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH2 端, 通道 2 接无源带通滤波器 (BPF) 的输出端 (S-OUT)。



(a) 实验接线



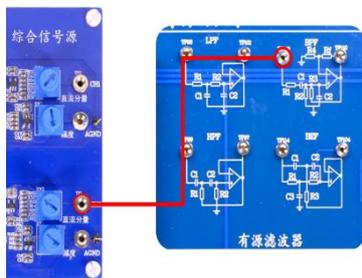
(b) 示波器检测波形

图 2.4.13 无源带通滤波器实验接线与结果

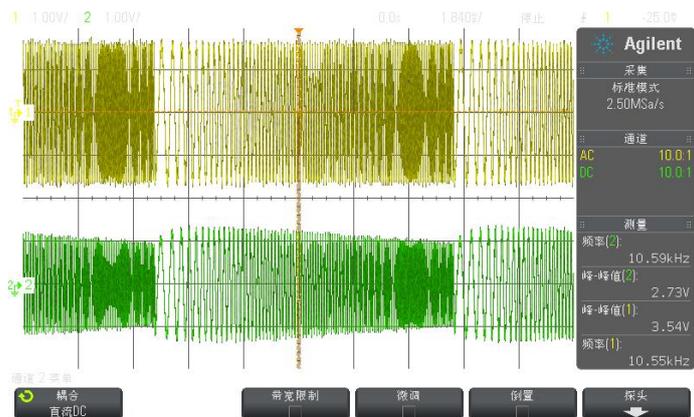
图 2.4.13 (b) 中观察可以得出, 其低频和高频信号存在着明显的衰减情况, 实验证明设计的带通滤波器满足要求。

(2) 有源带通滤波器实验

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH1 端, 通道 2 接有源带通滤波器 (BPF) 的输出端 (S-OUT)。



(a) 实验接线



(b) 示波器检测波形

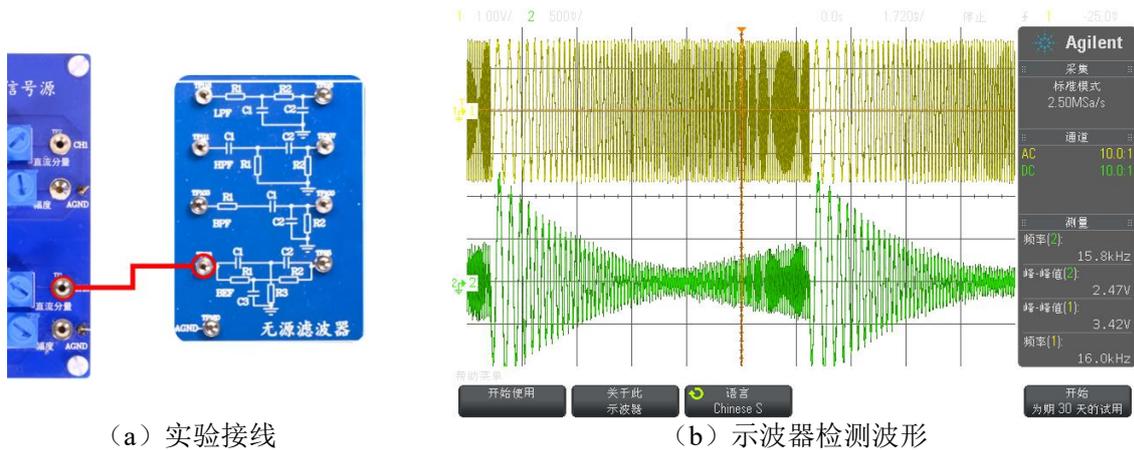
图 2.4.14 有源带通滤波器实验接线与结果

图 2.4.14 (b) 中可以观察得出, 其低频和高频信号存在明显的衰减, 实验证明设计的有源带通滤波器满足要求。

4. 带阻滤波器实验

(1) 无源带阻滤波器实验

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH1 端, 通道 2 接无源带阻滤波器 (BEF) 的输出端 (S-OUT)。



(a) 实验接线

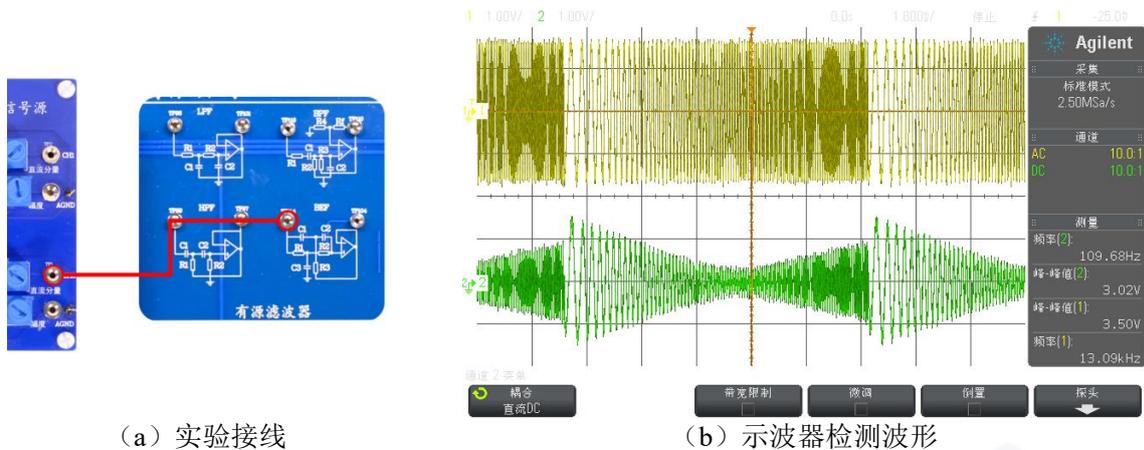
(b) 示波器检测波形

图 2.4.15 有源带通滤波器实验接线与结果

图 2.4.15 (b) 中观察可以得出, 其中频信号存在着明显的衰减情况, 实验证明设计的无源带阻滤波器满足要求。

(2) 有源带阻滤波器实验

数字示波器的通道 1 接多功能综合信号源单元的 CH1 端, 通道 2 接有源带阻滤波器 (BEF) 的输出端 (S-OUT)。



(a) 实验接线

(b) 示波器检测波形

图 2.4.16 有源带通滤波器实验接线与结果

图 2.4.16 (b) 中观察可以得出, 其中频信号存在着明显的衰减情况, 实验证明设计的有源带阻滤波器满足要求。

到这里我们就完成了滤波器的相关实验, 关于更多关于滤波器的内容可以在课后进行巩固提升。

2.5 滤波器综合实验

2.5.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握无源RC滤波器和有源RC滤波器的种类、基本结构、工作原理;
- (2) 学会滤波器的传输函数的求解并使用传递函数进行滤波器的幅频特性分析;
- (3) 掌握滤波器的滤波特性(即幅频特性)曲线的实际测量方法,并由此掌握系统传输函数幅频特性的测量方法,为以后的学习做铺垫。

2. 实验任务

由于扫频信号频带宽度有限导致所得到的频幅特性的结果范围与准确性有限,必须引入频率范围更宽的信号作为信源信号。因而在此使用信号源单元输出不同频率的正弦波信号,信号源单元输出信号接到滤波器的输入端,使用示波器观测信号,记录不同频率时的幅值。

2.5.2 实验原理

1. 滤波器的幅频特性

滤波电路实际的幅频特性如图 2.5.1 所示。

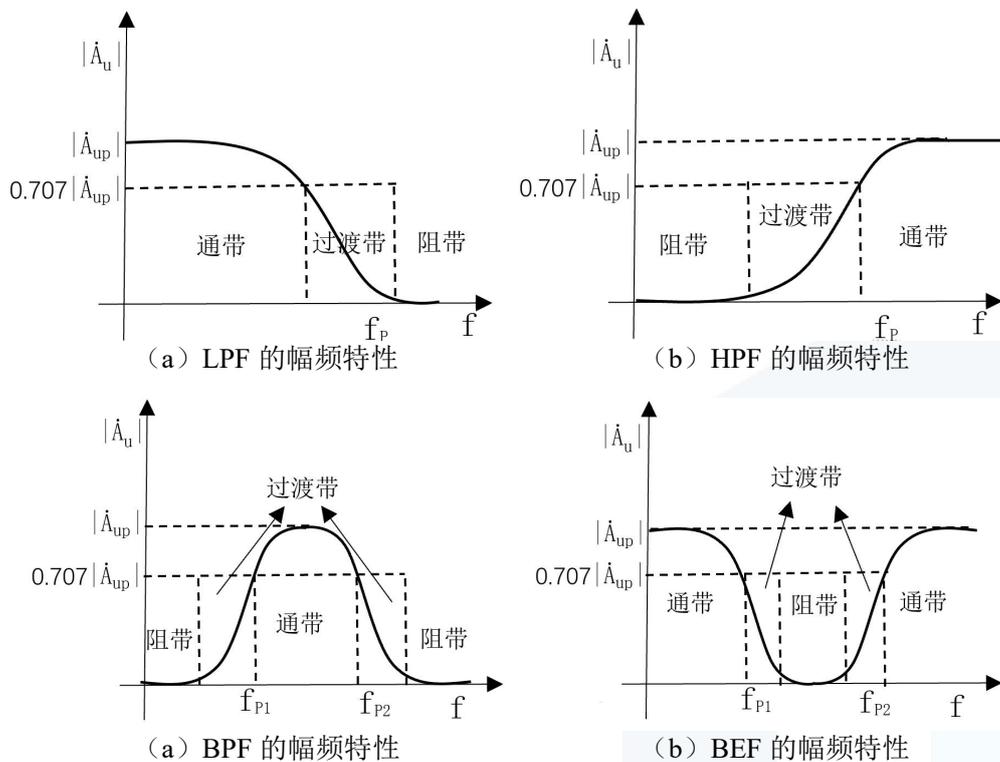


图 2.5.1 滤波电路实际幅频特性

分析滤波电路即求解电路的频率特性。对于 LPF、HPF、BPF、BEF，即求解出 \dot{A}_{up} 、 f_p 和过渡带的斜率。

2. 系统传递函数

对于线性时不变系统而言，系统的频域分析时，传递函数为：

$$\dot{H}(j\omega) = \frac{\dot{U}_o(j\omega)}{\dot{U}_i(j\omega)}$$

式中， $\dot{U}_o(j\omega)$ 为系统输出的响应信号， $\dot{U}_i(j\omega)$ 为系统输入的激励信号。测量滤波器的幅频响应，即测量不同频率下的 $|\dot{H}(j\omega)|$ ，将频率与测得 $|\dot{H}(j\omega)|$ 一起绘制出的曲线即滤波器的幅频特性曲线。

在时域分析时，通常通过拉普拉斯变换，将电压与电流变成“象函数”形式的 $U(s)$ 和 $I(s)$ ，则此时的系统传递函数为：

$$\dot{H}(s) = \frac{\dot{U}_o(s)}{\dot{U}_i(s)}$$

式中 s 换成 $j\omega$ ，即系统放大倍数。

传递函数中分母 s 的最高指数称为滤波器的阶数。对于 RC 滤波电路来说，电路中方中的 RC 环节愈多，阶数愈高，过渡带愈窄。

在 s 域中，电阻的 $R(s) = R$ ，电容 $Z_C(s) = \frac{1}{sC}$ ，电感 $Z_L(s) = sL$ ；在频域中，电阻的 $R(j\omega) = R$ ，电容 $Z_C(j\omega) = 1/j\omega C$ ，电感 $Z_L(j\omega) = j\omega L$ ， $\omega = 2\pi f$ 。

根据基尔霍夫电压定理和基尔霍夫电流定理，可推导出系统的传递函数。

(1) 无源低通滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知，无源低通滤波器系统的频域分析结果为：

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{(j\omega C_1 R_1) + (j\omega C_2 R_1) + (j\omega C_1 R_2) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

令 $j\omega = s$ 得：

$$\dot{H}(s) = \frac{1}{(s^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + (s C_1 R_1) + (s C_2 R_1) + (s C_1 R_2) + 1}$$

(2) 有源低通滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知，有源低通滤波器系统的频域分析结果为：

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{(j\omega C_2 R_1) + (j\omega C_2 R_2) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

令 $j\omega = s$ 得:

$$\dot{H}(s) = \frac{1}{(sC_2R_1) + (sC_2R_2) + (s^2C_1C_2R_1R_2) + 1}$$

(3) 无源高通滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知, 无源高通滤波器系统的频域分析结果为:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{(j\omega C_1 R_1) + (j\omega C_2 R_1) + (j\omega C_2 R_2) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

令 $j\omega = s$ 得:

$$\dot{H}(s) = \frac{s^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{(sC_1R_1) + (sC_2R_1) + (sC_2R_2) + (s^2C_1C_2R_1R_2) + 1}$$

(4) 有源高通滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知, 有源高通滤波器系统的频域分析结果为:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{(j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{(j\omega C_1 R_1) + (j\omega C_2 R_1) + ((j\omega)^2 C_1 C_2 R_1 R_2) + 1}$$

令 $j\omega = s$ 得:

$$\dot{H}(s) = \frac{s^2 C_1 C_2 R_1 R_2}{(sC_1R_1) + (sC_2R_1) + (s^2C_1C_2R_1R_2) + 1}$$

(5) 无源带通滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知, 无源带通滤波器系统的频域分析结果为:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega C_1 R_2}{j\omega C_1 R_1 + j\omega C_1 R_2 + j\omega C_2 R_2 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 + 1}$$

令 $j\omega = s$ 得:

$$\dot{H}(s) = \frac{sC_1R_2}{sC_1R_1 + sC_1R_2 + sC_2R_2 + s^2C_1C_2R_1R_2 + 1}$$

(6) 有源带通滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知, 有源带通滤波器系统的频域分析结果为:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega C_1 R_2 R_3 (R_4 + R_5)}{R_3 R_4 - R_2 R_5 - j\omega C_1 R_1 R_2 R_5 + j\omega C_1 R_1 R_3 R_4 + j\omega C_1 R_2 R_3 R_4 + j\omega C_2 R_2 R_3 R_4 - \omega^2 C_1 C_2 R_1 R_2 R_3 R_4}$$

令 $j\omega = s$ 得:

$$\dot{H}(s) = \frac{sC_1R_2R_3(R_4 + R_5)}{R_3R_4 - R_2R_5 - sC_1R_1R_2R_5 + sC_1R_1R_3R_4 + sC_1R_2R_3R_4 + sC_2R_2R_3R_4 + s^2C_1C_2R_1R_2R_3R_4}$$

(7) 无源带阻滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知, 无源带阻滤波器系统的频域分析结果为:

$$\begin{cases} Z_1 = C_1 R_3 \\ Z_2 = C_2 R_1 \\ Z_3 = C_2 R_2 \\ Z_4 = C_2 R_3 \\ Z_5 = C_3 R_1 \end{cases}$$

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\omega(Z_1 + Z_4) + j\omega^2(Z_1 Z_4 + Z_1 Z_3) - \omega^3 Z_1 Z_3 Z_5 - j}{\omega(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) + j\omega^2(Z_1 Z_4 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_5 + Z_3 Z_5 + Z_4 Z_5) - \omega^3 Z_1 Z_3 Z_5 - j}$$

令 $j\omega = s$ 得:

$$\dot{H}(s) = \frac{s(Z_1 + Z_4) - s^2(Z_1 Z_4 + Z_1 Z_3) + s Z_1 Z_3 Z_5 + 1}{s(Z_1 + Z_2 + Z_3 + Z_4 + Z_5) - s^2(Z_1 Z_4 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_5 + Z_3 Z_5 + Z_4 Z_5) + s^3 Z_1 Z_3 Z_5 + 1}$$

(8) 有源带阻滤波器的系统传递函数

由实验 2.4 可知, 无源带阻滤波器系统的频域分析结果为:

$$\begin{cases} Z_1 = C_1 R_3 \\ Z_2 = C_2 R_1 \\ Z_3 = C_2 R_2 \\ Z_4 = C_2 R_3 \\ Z_5 = C_3 R_1 \end{cases}$$

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{\omega(Z_1 + Z_4) + j\omega^2(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3) - \omega^3 Z_1 Z_3 Z_5 - j}{\omega(Z_1 + Z_4 + Z_5) + j\omega^2(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_5 + Z_4 Z_5) - \omega^3 Z_1 Z_3 Z_5 - j}$$

令 $j\omega = s$ 得:

$$\dot{H}(s) = \frac{s(Z_1 + Z_4) - s^2(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3) + s^3 Z_1 Z_3 Z_5 + 1}{s(Z_1 + Z_4 + Z_5) - s^2(Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_1 Z_5 + Z_4 Z_5) + s^3 Z_1 Z_3 Z_5 + 1}$$

2.5.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台(含信号源单元、有源/无源滤波器)1台。
2. 实验导线若干。
3. 数字示波器1台。

2.5.4 实验步骤

1. 示波器、实验平台等仪器仪表设备检测。
2. 将多功能综合信号源单元 CH1 通道设定为正弦信号输出模式, 使其输出幅度稳定在 1V (U1), 并将信号输入滤波器的输入端。
3. 在保持正弦信号输出幅度不变的情况下, 从小至大逐渐改变其频率, 用交流电压表或示波器测量滤波器输出端电压 U_o 的幅度。

4. 每当改变信号源频率时, 都必须观测一下 U_1 是否保持 1V, 幅度如有改变应及时调整, 并将测量的 U_o 数据记录至下表。

2.5.5 实验结果

保证信号源单元输出的正弦信号幅值不变, 信号经过各滤波器后幅值与信号的频率记录如下。

1. 低通滤波器实验

(1) 无源低通滤波器实验

表 2.5.1 无源低通滤波器滤波后的幅值

F(Hz)	100	300	500	1000	1300	1500	3000	5000	10000	13000	15000	20000
$U_o(V)$	5	5	5	5	4.9	4.8	4.4	3.83	2.6	2.2	1.7	1.4

(2) 有源低通滤波器实验

表 2.5.2 有源低通滤波器滤波后的幅值

F(Hz)	100	500	1000	1300	1500	3000	5000	10000	13000	15000	20000	25000
$U_o(V)$	5	5	5	4.9	4.8	4.6	4.3	3.4	2.75	2.6	1.9	1.5

2. 高通滤波器实验

(1) 无源高通滤波器实验

表 2.5.3 无源高通滤波器滤波后的幅值

F(KHz)	1	3	5	8	10	12	15	20	30	40	50	55
$U_o(V)$	0.4	1.4	2.2	3.2	3.5	3.8	4.1	4.4	4.6	4.8	5	5

(2) 有源高通滤波器实验

表 2.5.4 有源高通滤波器滤波后的幅值

F(KHz)	1	3	5	8	10	12	15	20	30	40	50	55
$U_o(V)$	0.4	2.1	3.3	4.0	4.3	4.5	4.6	4.7	4.8	4.9	5	5

3. 带通滤波器实验

(1) 无源带通滤波器实验

表 2.5.5 无源带通滤波器滤波后的幅值

F(KHz)	0.5	1	1.5	2	3	5	7	8	10	15	20	25
$U_o(V)$	0.4	0.7	1	1.1	1.4	1.6	1.7	1.7	1.5	1.4	1.2	1.1

(2) 有源带通滤波器实验

表 2.5.6 有源带通滤波器滤波后的幅值

F(KHz)	0.5	1	1.5	2	3	5	7	8	10	15	20	25
U _o (V)	1.2	2.2	2.9	3.3	3.6	3.8	3.7	3.6	3.5	3.1	2.7	2.4

4.带通滤波器实验

(1) 无源带阻滤波器实验

表 2.5.7 无源带阻滤波器滤波后的幅值

F(KHz)	0.5	1	3	5	8	10	12	15	30	50	70	100
U _o (V)	5	4.7	3.2	2	1	0.6	0.4	0.6	2.1	3.2	3.7	4.3

(2) 有源带阻滤波器实验

表 2.5.8 有源带阻滤波器滤波后的幅值

F(KHz)	0.5	1	3	5	8	10	12	15	30	50	70	100
U _o (V)	5	4.9	4.1	3.1	1.7	0.9	0.5	1.4	4.0	4.5	4.7	4.8



2.6 一阶电路时域特征实验

2.6.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 学会测定RC一阶电路的积分和微分电路的方法;
- (2) 掌握有关积分电路和微分电路的概念;
- (3) 了解时间常数对响应波形的影响;
- (4) 学会一阶电路的时域分析。

2. 实验任务

搭建一阶RC串联电路,输入激励信号为方波信号,用示波器观察一阶RC串联电路的响应信号,并记录其响应信号。

2.6.2 实验原理

1. 一阶RC积分电路

图 2.6.1 为RC串联组成的一阶RC积分电路。其中, u_i 为输入电压, u_o 为输出电压。

当 $R \gg 1/\omega C$ 时:

$$u_i(t) \approx u_c(t)$$

即:

$$u_o(t) = \frac{1}{C} \int i(t) dt \approx \frac{1}{C} \int \frac{u_i(t)}{R} dt \approx \frac{1}{RC} \int u_i(t) dt$$

由上式可见,输出电压是输入电压的积分。

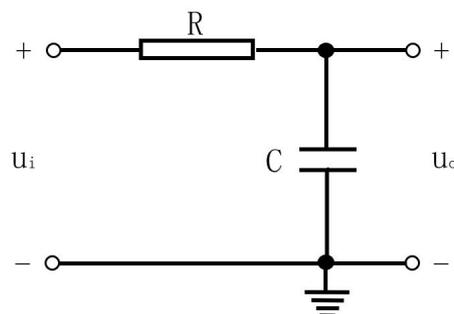


图 2.6.1 一阶RC积分电路

设 u_i 为方波信号,当时间常数 τ 较大时,即 $\tau \gg T$ (一般为 $\tau \geq 10T$) 时,在方波的激励下,电容的充放电时间较慢,产生的响应波形如图 2.6.2 所示。

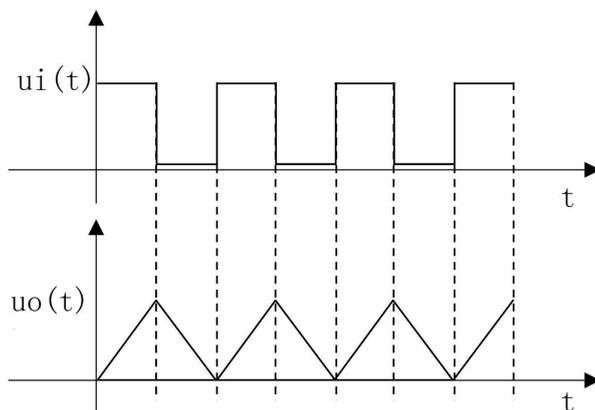


图 2.6.2 积分电路波形

经分析可得以下结论:

- (1) 积分电路可以使方波转换成三角波;
- (2) RC 串联积分电路中,电阻在主电路中,电容在干路中;
- (3) 积分电路的时间常数 τ 要大于等于 10 倍的输入脉冲宽度;
- (4) 积分电路输入和输出呈积分关系。

对图 2.6.1 做频域分析可得:
$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{R} = \frac{\dot{U}_o}{X_c} \\ X_c = \frac{1}{j\omega C} \end{cases}$$

化简得:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{1 + j\omega CR}$$

令 $j\omega = s$, 系统传递函数为:

$$\dot{H}(s) = \frac{1}{1 + sCR}$$

2. 一阶 RC 微分电路

图 2.6.1 为 RC 串联组成的一阶 RC 积分电路。其中, u_i 为输入电压, u_o 为输出电压, 当 $R \ll 1/\omega C$ 时:

$$u_i(t) \approx u_R(t)$$

即

$$u_o(t) = i \times R \approx C \frac{du_c(t)}{dt} \times R \approx RC \frac{du_i(t)}{dt}$$

由上式可见, 输出电压是输入电压的微分。

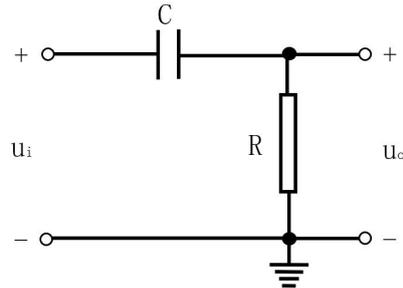


图 2.6.3 一阶RC串联微分电路

设 u_i 为方波信号, 当时间常数 τ 较大时, 即 $\tau \ll T$ (一般为 $\tau \leq 0.1T$) 时, 在方波的激励下, 电容的充放电时间较快, 产生的响应波形如图 2.6.4 所示。

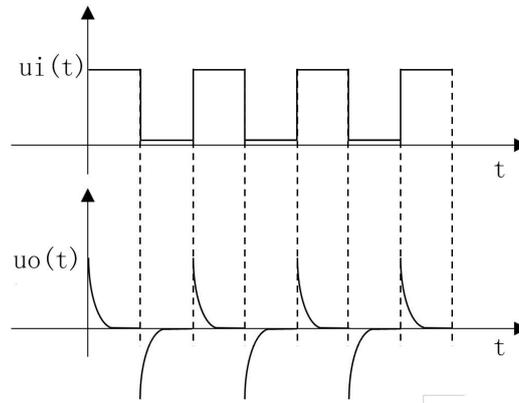


图 2.6.4 微分电路波形

经分析可得以下结论:

- (1) 微分电路可以使方波转换成尖脉冲;
- (2) RC串联微分电路中, 电容在主电路中, 电阻在干路中;
- (3) 微分电路的时间常数 τ 要小于等于 10 倍的输入脉冲宽度;
- (4) 微分电路输入和输出呈微分关系。

对图 2.6.4 做频域分析可得:
$$\begin{cases} \frac{\dot{U}_i - \dot{U}_o}{X_c} = \frac{\dot{U}_o}{R} \\ X_c = \frac{1}{j\omega C} \end{cases}$$

化简得: $(c * r * w0) / (c * r * w0 - 1i)$

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega CR}{j\omega CR - 1}$$

令 $j\omega = s$, 系统传递函数为:

$$\dot{H}(s) = \frac{sCR}{sCR - 1}$$

2.6.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台 (含信号源单元、扩展单元) 1 台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器 1 台。

2.6.4 实验步骤

1. 使用实验平台上的扩展单元 (图 2.6.5), 选择相应的器件搭建一阶RC串联电路, 输入激励信号, 观察并记录响应信号。



图 2.6.5 一阶电路时域分析实验操作区

(1) 积分电路的时域分析

1) 按照下图所示电路搭建RC串联电路构建积分电路, 其中电路器件参数的取值为: $R = 510\Omega$ 、 $1K\Omega$ 、 $10K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 、 $1\mu F$, 计算相对应的时间常数 τ , 并记录在表 2.6.1 中。

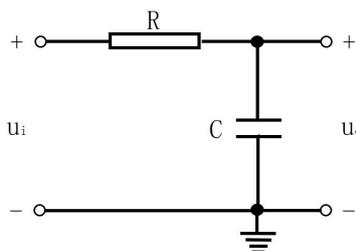


图 2.6.6 积分电路图

2) 使用多功能综合信号源单元 CH1 通道输出一路占空比为 50%、频率为 1KHz 的方波信号, 将其接至积分电路的输入端 (即 u_i 端)。

3) 将示波器的通道 1 接至积分电路的输入端 (即 u_i 端), 通道 2 接至积分电路的输出端 (即 u_o 端)。

4) 观察输入信号与输出信号, 并记录其波形。

(2) 微分电路时域分析

1) 按照下图所示电路搭建RC串联电路构建微分电路,其中电路器件参数的取值为:
 $R = 100\Omega$ 、 510Ω 、 $1K\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 、 $0.1\mu F$, 计算相对应的时间常数 τ , 并记录在表 2.6.2 中。

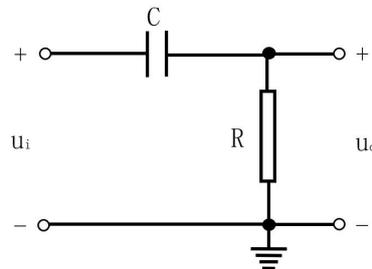


图 2.6.7 微分电路图

2) 使用多功能综合信号源单元 CH1 通道输出一路占空比为 50%、频率为 1KHz 的方波信号, 将其接至微分电路的输入端 (即 u_i 端)。

3) 将示波器的通道 1 接至微分电路的输入端 (即 u_i 端), 通道 2 接至微分电路的输出端 (即 u_o 端)。

5) 观察输入信号与输出信号, 并记录其波形。

改变元器件参数, 重复以上实验, 选出积分和微分效果最理想的电路, 然后将输入端信号改为三角波信号、正弦波信号, 观察并记录对应的输出信号波形。

2.6.5 实验结果

1. 搭建一阶RC串联电路, 计算元件参数不同时时间常数 τ 。

(1) RC串联电路构建积分电路, 其元件参数不同时对应的时间常数值如表 2.6.1 所示。

表 2.6.1 积分电路元件参数与时间常数对应表

电容 \ 电阻	$0.1\mu F$	$1\mu F$
510Ω	5.1×10^{-5}	5.1×10^{-4}
$1K\Omega$	1×10^{-4}	1×10^{-3}
$10K\Omega$	1×10^{-3}	0.01

(2) 元件参数不同时积分效果。

当 $R = 510\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.8 所示。

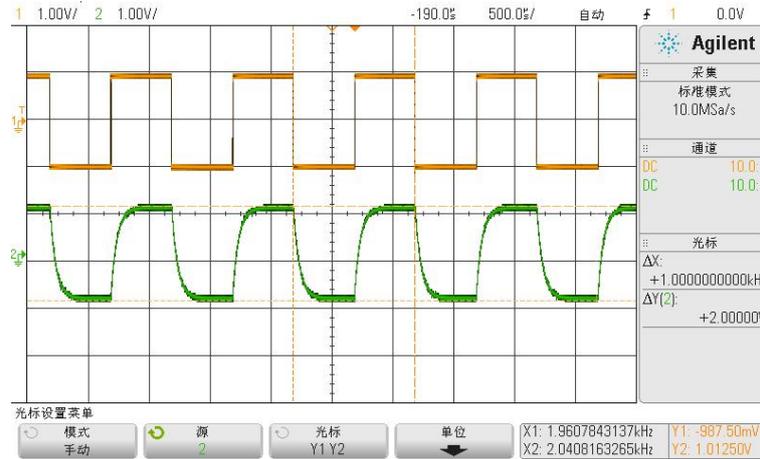


图 2.6.8 $R = 510\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 1K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.9 所示。

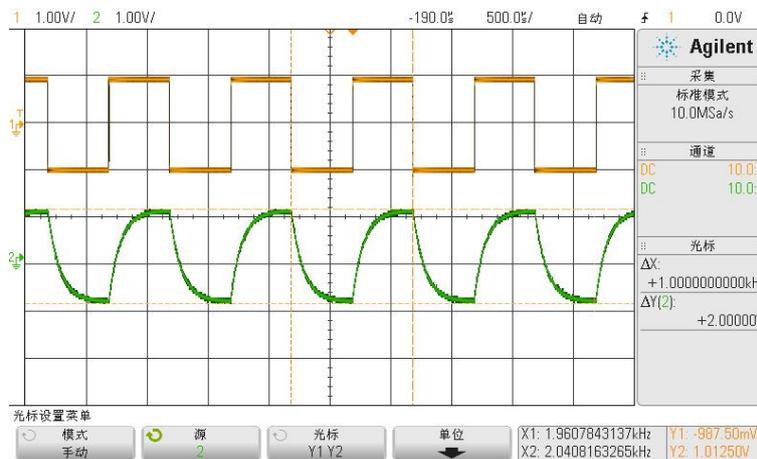


图 2.6.9 $R = 1K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 10K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.10 所示。

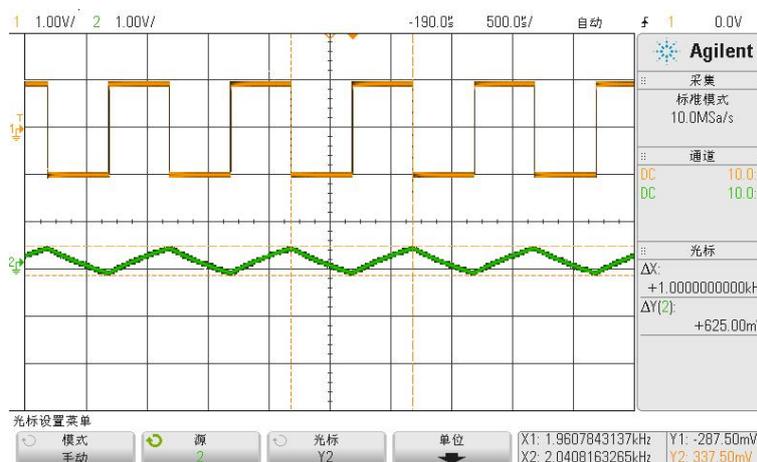


图 2.6.10 $R = 10K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 510\Omega$, $C = 1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.11 所示。

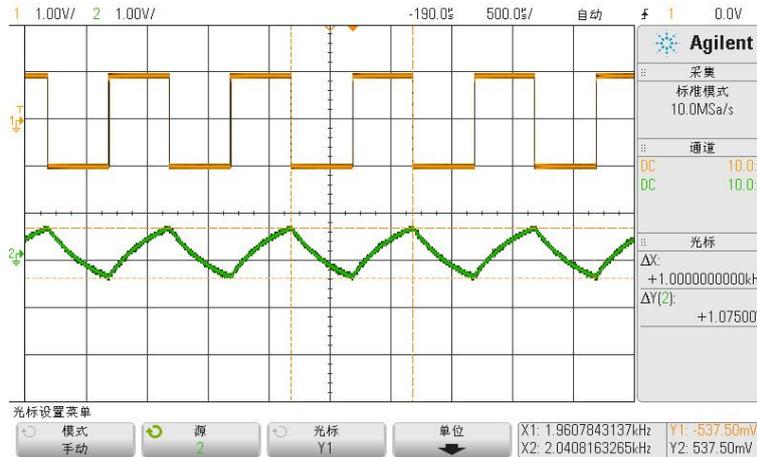


图 2.6.11 $R = 510\Omega$, $C = 1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 1K\Omega$, $C = 1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.12 所示。

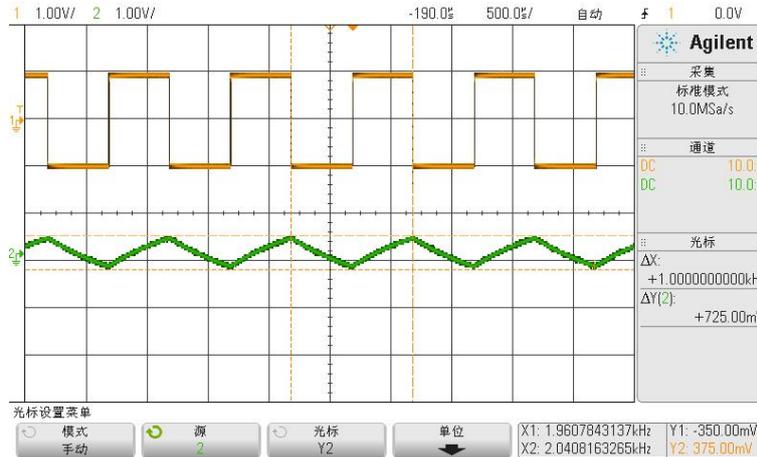


图 2.6.12 $R = 1K\Omega$, $C = 1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 10K\Omega$, $C = 1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.13 所示。



图 2.6.13 $R = 10K\Omega$, $C = 1\mu F$ 时的积分效果

(3) RC串联电路构建微分电路, 其元件参数不同时对应的时间常数值如表 2.6.2 所示。

表 2.6.2 微分电路元件参数与时间常数对应表

电阻 \ 电容	0.01 μF	0.1 μF
100 Ω	1×10^{-6}	1×10^{-5}
510 Ω	5.1×10^{-6}	1×10^{-5}
1K Ω	1×10^{-5}	1×10^{-4}

(4) 元件参数不同时的微分效果。

当 $R = 100\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.14 所示。

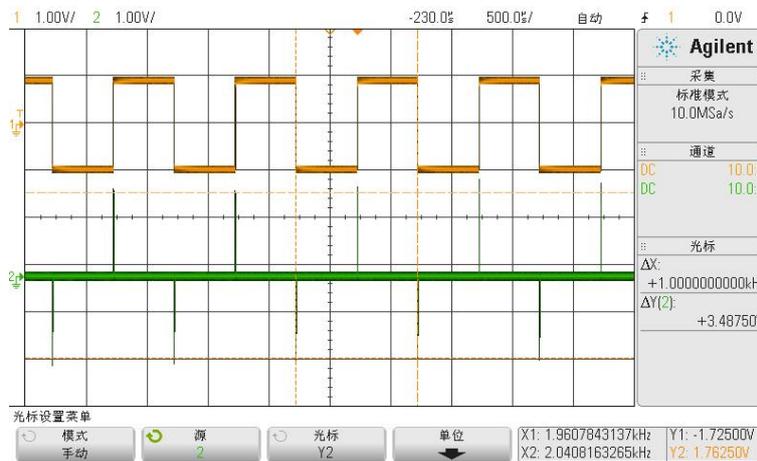


图 2.6.14 $R = 100\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 时的微分效果

当 $R = 510\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.15 所示。

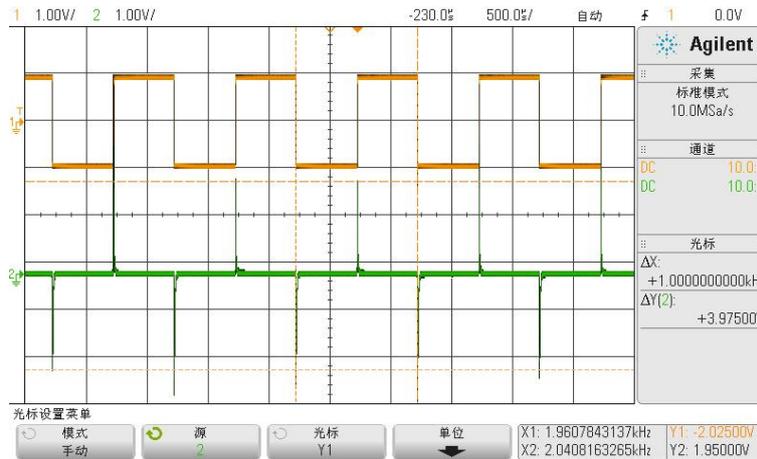


图 2.6.15 $R = 510\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 时的微分效果

当 $R = 1K\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.16 所示。

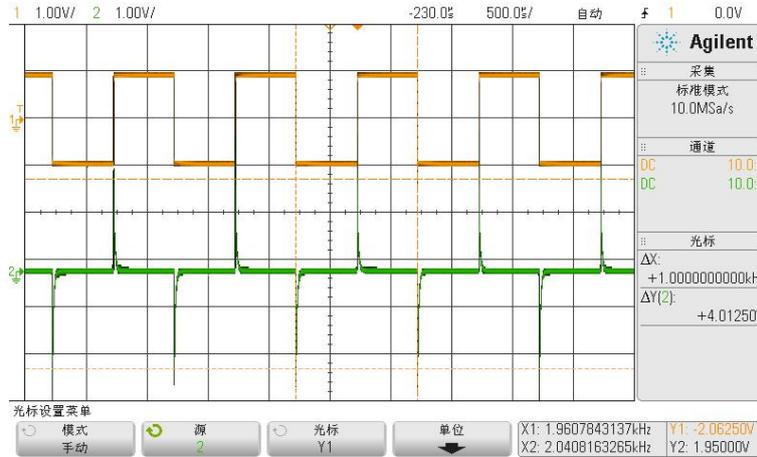


图 2.6.16 $R = 1K\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 时的微分效果

当 $R = 100\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.17 所示。

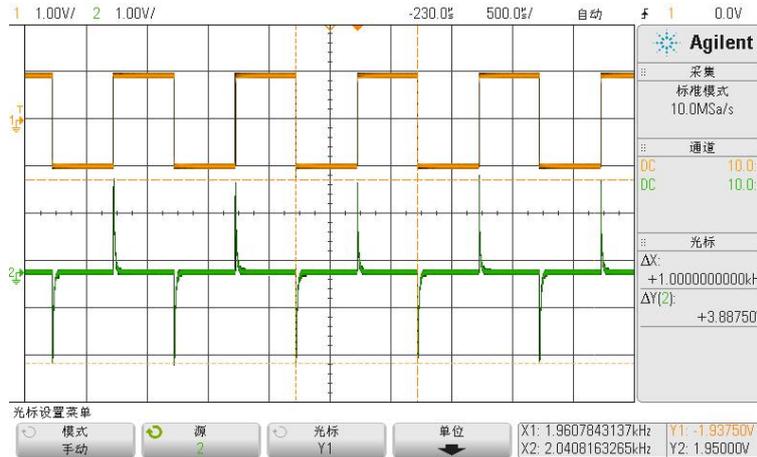


图 2.6.17 $R = 100\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时的微分效果

当 $R = 510\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.18 所示。



图 2.6.18 $R = 510\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时的微分效果

当 $R = 1K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 2.6.19 所示。

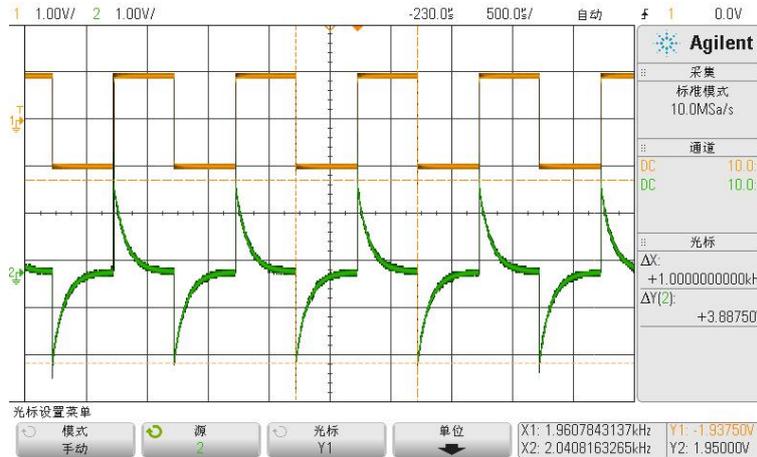


图 2.6.19 $R = 1K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时的微分效果

(5) 根据以上实验得出当 $R = 10K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时积分效果较为理想; $R = 1K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时微分效果较为理想。这两个电路分别将输入信号改为三角波信号和正弦波信号。

图 2.6.20 和图 2.6.21 所示为当积分电路的 $R = 10K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时输入三角波及正弦波以及其对应的输出信号。

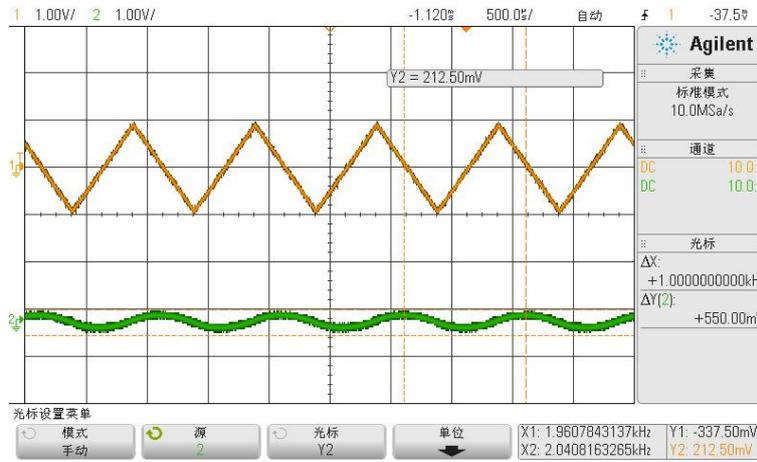


图 2.6.20 理想积分状态下, 输入三角波及其输出信号

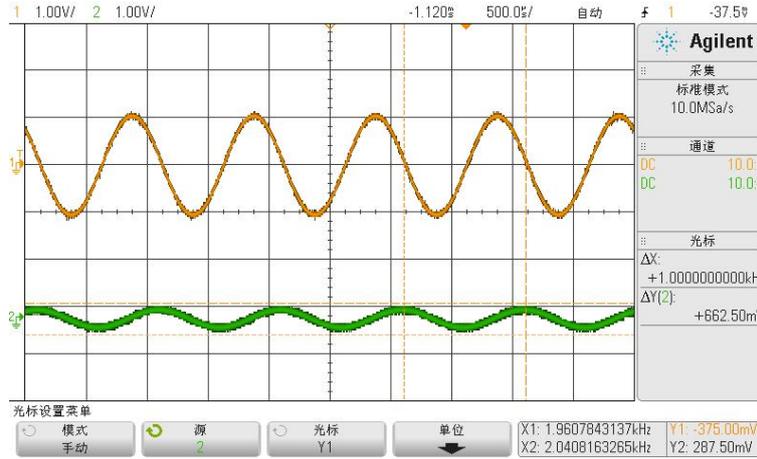


图 2.6.21 理想积分状态下，输入正弦波及其输出信号

图 2.6.22 图 2.6.23 所示为当微分电路的 $R = 1K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 时输入三角波及正弦波以及其对应的输出信号。

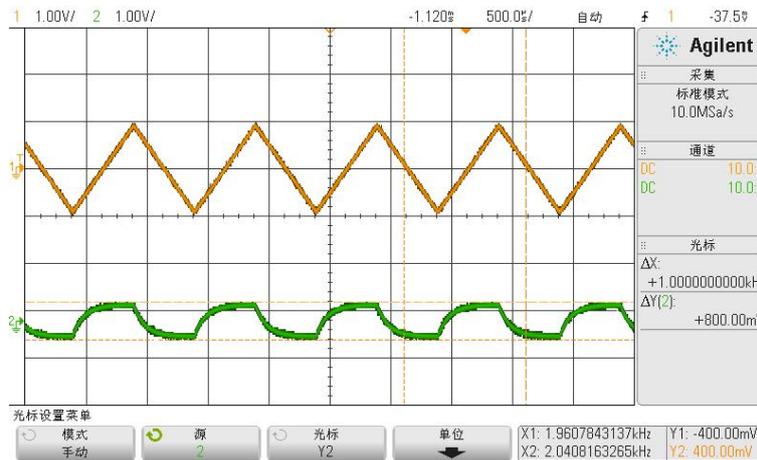


图 2.6.22 理想微分状态下，输入三角波及其输出信号

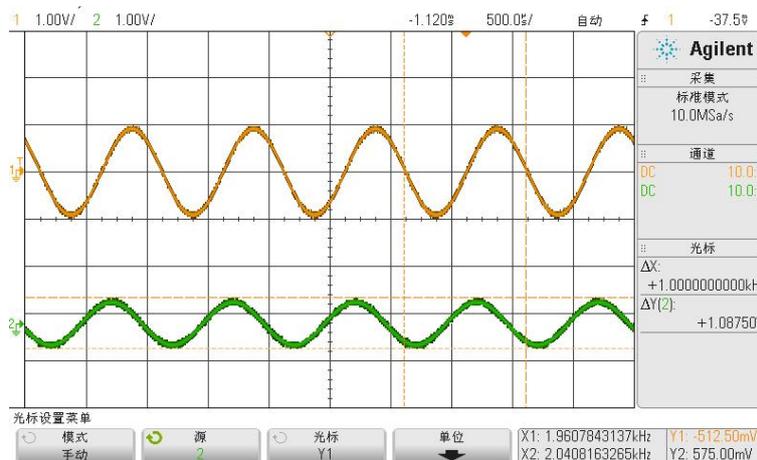


图 2.6.23 理想微分状态下，输入正弦波及其输出信号

2.7 一阶电路频域分析实验

2.7.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 学会一阶电路的频域分析;
- (2) 掌握一阶电路的频域特性;
- (3) 了解不同电阻、电容对电路频域特性的影响;
- (4) 掌握一阶电路的时域分析与频域分析的分析过程与结果的区别;
- (5) 学会一阶电路的频域分析。

2. 实验任务

(1) 使用扩展单元搭建一阶RC串联电路,输入激励信号为扫频信号,用示波器观察其响应信号,绘制输出信号大致形状,分析一阶电路的频率特性。

(2) 将扫频信号改为频率不同的正弦波信号,输入搭建的电路中,使用示波器观察其响应信号,记录不同频率时的响应信号的幅值,根据频率与幅值关系,绘制幅频特性曲线。

2.7.2 实验原理

1. 一阶 RC 低通滤波电路

图 2.7.1 为一阶RC串联组成的低通滤波电路。在频域分析过程中,电阻的阻抗 $R(j\omega) = R$, 电容的阻抗 $Z_C(j\omega) = \frac{1}{j\omega C}$, 电感的阻抗 $Z_L(j\omega) = j\omega L$, $\omega = 2\pi f$ 。

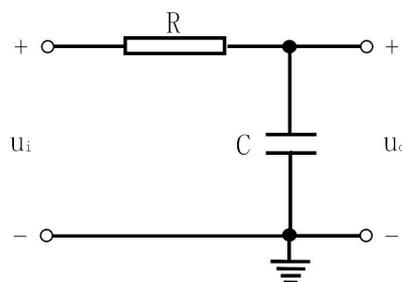


图 2.7.1 一阶RC低通滤波电路

系统的放大倍数为:

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

当输入信号 u_i 的幅值不变,频率越高, $\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i}$ 的值越小,即 u_o 的幅值越小, u_o 的幅值随着频率的变化规律符合低通滤波电路的幅频特性曲线,故一阶RC串联电路为低通滤波

电路。

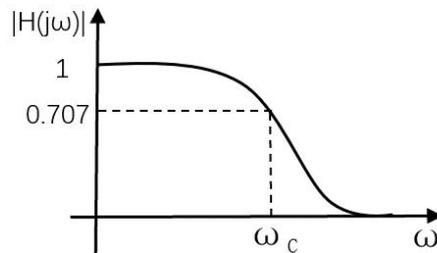


图 2.7.2 一阶RC积分电路幅频特性曲线

积分电路和低通滤波电路这两个概念从本质上来说具有一致性。从信号处理的角度解释此一致性，如图 2.7.3 所示，持续时间较长的矩形脉冲为要传输的信号，而后一个持续时间很短的脉冲是在传输过程中混入的毛刺或是干扰。从时域角度分析，由于毛刺持续时间很短，因此通过一个时间常数较大的积分电路后，得到的积分量很小，在输出信号中的毛刺得到了抑制；从频域分析角度分析，持续时间很短的毛刺信号的高频分量较多，在经过低通滤波电路时，根据滤波电路的幅频特性，低频输出幅值大，高频输出幅值小，因此选择适当的截止频率的低通滤波电路，即可使有效信号成分几乎无畸变地通过，而毛刺得到有效抑制。

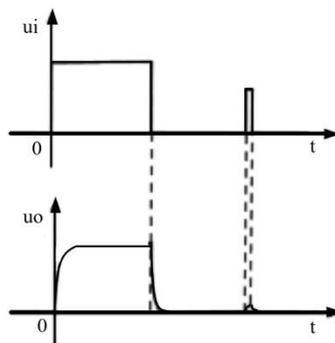


图 2.7.3 积分电路去除毛刺

2. 一阶高通滤波电路

图 2.6.1 为一阶RC串联电路组成的高通滤波电路。系统的放大倍数为：

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}$$

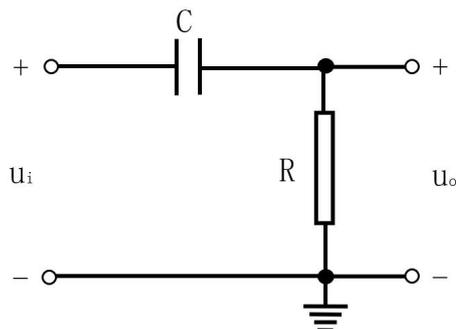


图 2.7.4 一阶RC高通滤波电路

当输入信号 u_i 的幅值不变，频率越高， $\frac{U_o}{U_i}$ 的值越大，即 u_o 的幅值越大， u_o 的幅值随着频率的变化规律符合高通滤波点库的幅频特性曲线，故一阶RC串联电路为高通滤波电路。

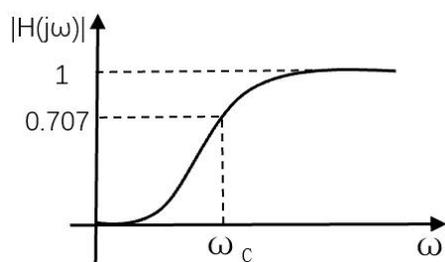


图 2.7.5 一阶RC高通滤波电路的幅频特性曲线

从时域分析，微分电路只有在输入发生变化时，才有输出，在输入稳定时，输出为零。在信号处理领域中，利用微分运算可以提取出信号中发生突变的部分。从频域角度分析，平稳信号中的突变部分相对而言为高频部分，根据高通滤波电路的幅频特性，高频成分输出幅度大，低频部分输出幅值小，因此信号中的突变部分可以被提取出来，这与微分电路的提取突变成分的特性一致。因此，对于一阶RC微分电路从时域和频域两方面分析出的电路本质是一致的。

2.7.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台（含信号源单元、扩展单元）1台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器 1台。

2.7.4 实验步骤

1. 使用实验平台扩展单元（图 2.6.5）搭建一阶电路，输入激励信号，观察其输出响应信号，并分析其频域特性。

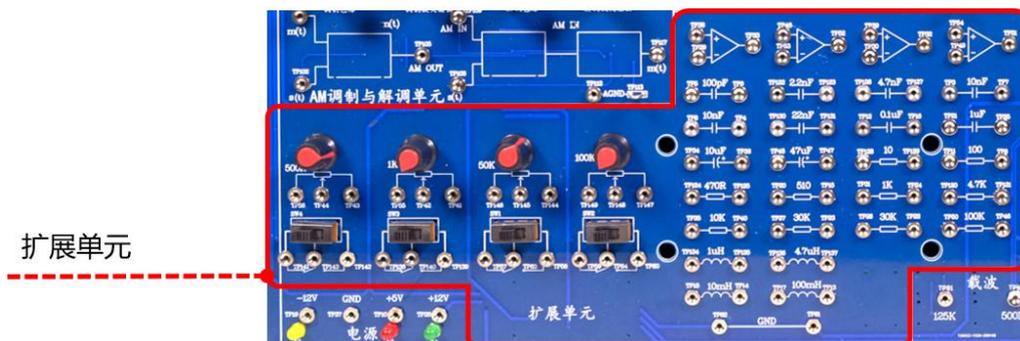


图 2.7.6 一阶电路频域分析实验操作区

(1) 低通滤波器频域分析

1) 按照下图所示电路搭建一阶RC串联电路, 构建低通滤波电路, 其电路元件参数为: $R = 510\Omega$ 、 $1K\Omega$ 、 $10K\Omega$, $C = 0.1\mu F$ 、 $1\mu F$ 。

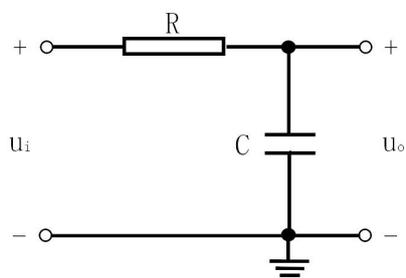


图 2.7.7 低通滤波器电路

2) 使用多功能综合信号源单元 CH2 通道输出扫频信号, 将其接至电路的输入端 (即 u_i 端)。

3) 将示波器的通道 1 接至低通滤波电路的输入端 (即 u_i 端), 通道 2 接至低通滤波电路的输出端 (即 u_o 端), 观察输入信号与输出信号。

4) 在使用多功能综合信号源单元 CH1 通道输出幅值为 1V 的正弦波信号, 在保证幅值不变的情况下, 逐渐改变其频率, 用示波器观察记录其输出信号的幅值变化, 并记录其频率 (F) 与幅值 (u_o) 的变化, 绘制幅频特性曲线。

(2) 高通滤波器频域分析

1) 按照下图所示电路搭建一阶RC串联电路, 构建高通滤波电路, 其电路元件参数为: $R = 100\Omega$ 、 510Ω 、 $1K\Omega$, $C = 0.01\mu F$ 、 $0.1\mu F$ 。

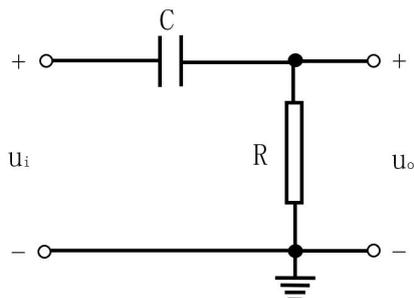


图 2.7.8 高通滤波器电路

2) 使用多功能综合信号源单元 CH2 通道输出扫频信号, 将其接至电路的输入端(即 u_i 端)。

3) 将示波器的通道 1 接至高通滤波电路的输入端(即 u_i 端), 通道 2 接至高通滤波电路的输出端(即 u_o 端), 观察输入信号与输出信号, 并绘制输出信号的大致波形。

4) 在使用多功能综合信号源单元 CH1 通道输出幅值为 1V 的正弦波信号, 在保证幅值不变的情况下, 逐渐改变其频率, 用示波器观察记录其输出信号的幅值变化, 并记录其频率 (F) 与幅值 (u_o) 的变化, 绘制幅频特性曲线。

2.7.5 实验结果

1. 搭建一阶 RC 串联电路, 计算元件参数不同时时间常数 τ 。

(1) RC 串联电路构建低通滤波电路, 其元件参数不同时, 输入扫频信号对应的输出信号波形为:

当低通滤波电路的元件参数为: $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, 输入扫频信号与输出波形如图 2.7.9 所示。

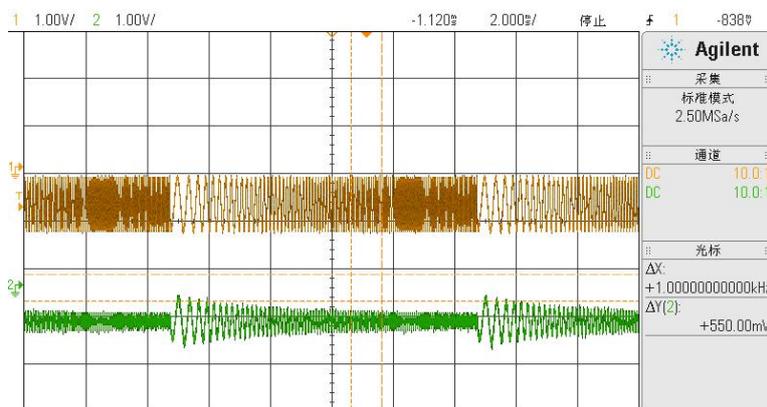


图 2.7.9 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 低通滤波电路效果图

当低通滤波电路的元件参数为： $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.10 所示。

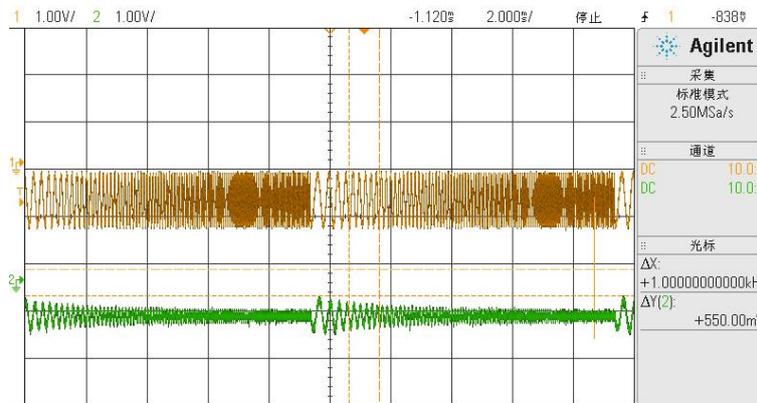


图 2.7.10 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 低通滤波电路效果图

当低通滤波电路的元件参数为： $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.11 所示。

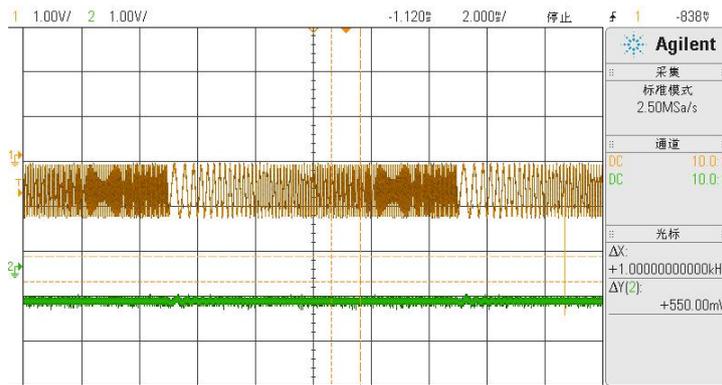


图 2.7.11 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 低通滤波电路效果图

当低通滤波电路的元件参数为： $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.12 所示。

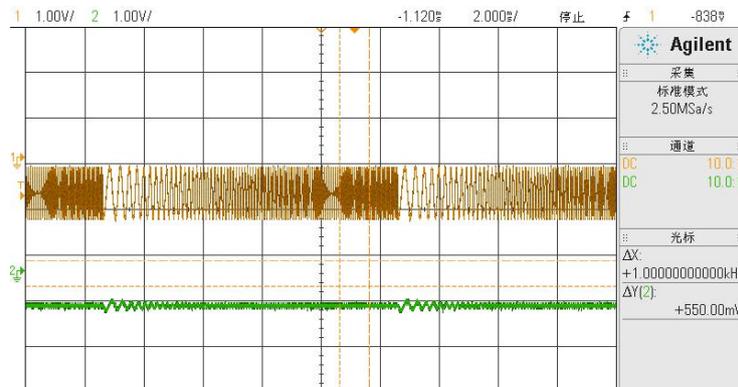


图 2.7.12 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 低通滤波电路效果图

当低通滤波电路的元件参数为： $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.13 所示。

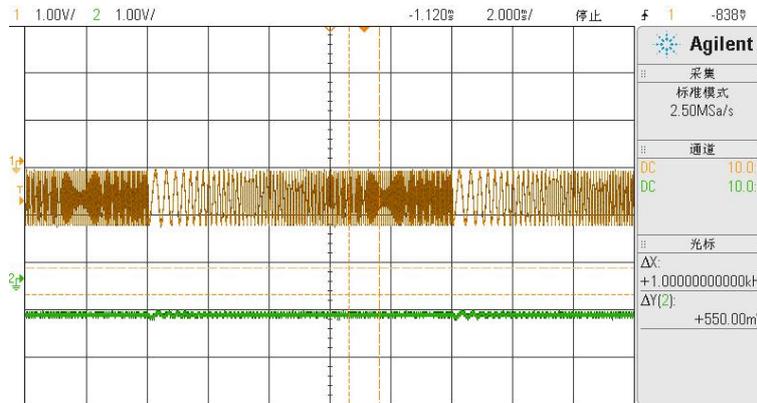


图 2.7.13 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 低通滤波电路效果图

当低通滤波电路的元件参数为： $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.14 所示。

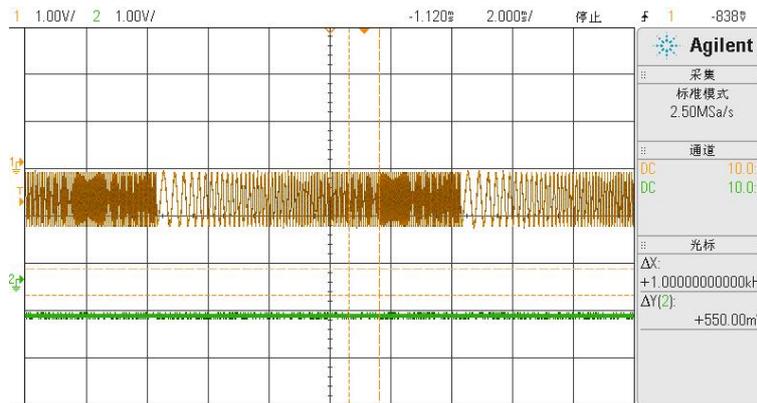


图 2.7.14 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 低通滤波电路效果图

将输入的扫频信号修改成频率不同的正弦波信号时（注意：保证输入的正弦波信号的幅值保持 1V 不变）：

表 2.7.1 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	1	1.5	3	4.5	6	8	10	12	14	18	22	26	30
$u_o(mV)$	1V	893	775	637	537	443	437	356	300	262	237	218	187

表 2.7.2 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	1	1.5	2	2.5	3	3.5	5	6.5	10	15	20	25	30
$u_o(mV)$	1V	900	837	718	656	587	468	381	281	212	175	150	156

表 2.7.3 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

$F(Hz)$	50	100	150	200	250	400	550	700	850	1K	1.3K	1.6K	2K
$u_o(mV)$	1V	1V	881	781	693	518	425	362	318	293	256	231	175

表 2.7.4 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

$F(\text{Hz})$	50	100	200	300	500	700	1K	1.5K	2K	2.5K	3K	3.5K	4K
$u_o(\text{mV})$	1V	925	856	762	631	531	450	343	300	250	237	225	200

 表 2.7.5 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

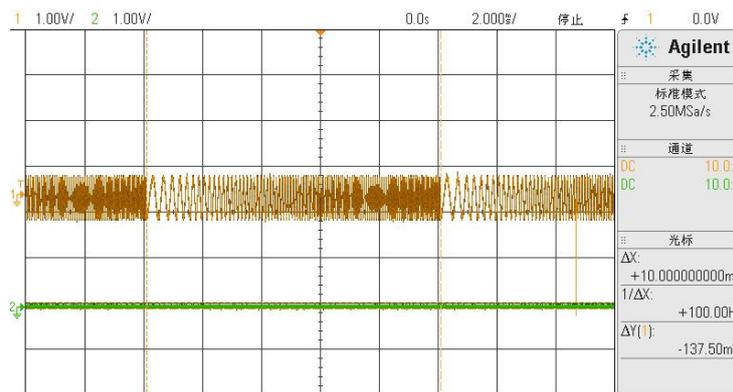
$F(\text{Hz})$	50	100	150	200	300	400	500	700	1K	1.2K	1.5K	1.8K	2K
$u_o(\text{mV})$	1V	950	862	775	656	562	462	400	325	258	231	218	200

 表 2.7.6 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

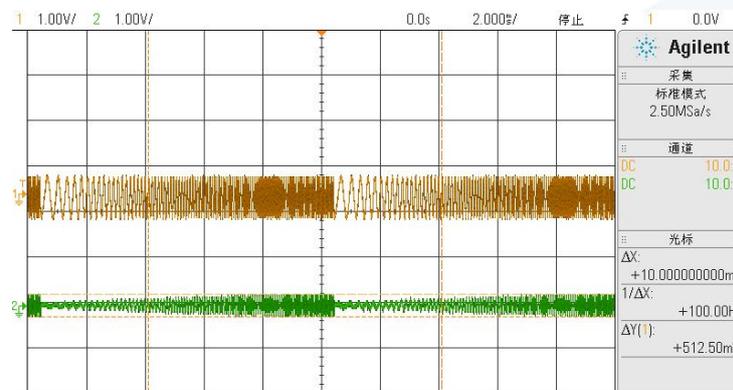
$F(\text{Hz})$	10	15	20	30	40	50	60	80	100	150	180	200	250	300
$u_o(\text{mV})$	1V	843	750	631	543	475	418	343	281	225	200	187	168	155

(2) RC 串联电路构建高通滤波电路, 其元件参数不同时, 输入扫频信号对应的输出信号波形为:

当高通滤波电路的元件参数为: $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时, 输入扫频信号与输出波形如图 2.7.15 所示。


 图 2.7.15 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 高通电路效果图

当高通滤波电路的元件参数为: $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时, 输入扫频信号与输出波形如图 2.7.16 所示。


 图 2.7.16 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 高通电路效果图

当高通滤波电路的元件参数为： $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.17 所示。

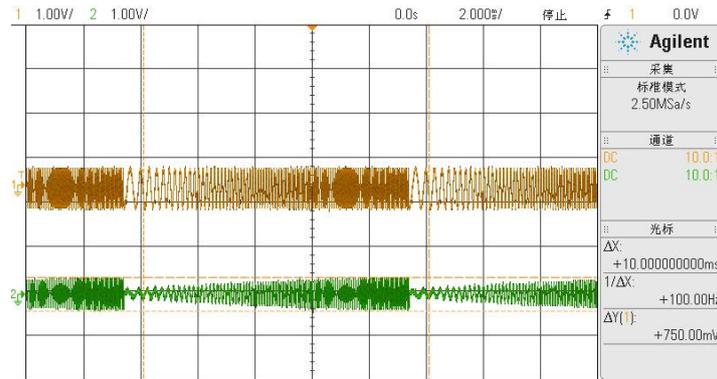


图 2.7.17 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 高通电路效果图

当高通滤波电路的元件参数为： $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.18 所示。

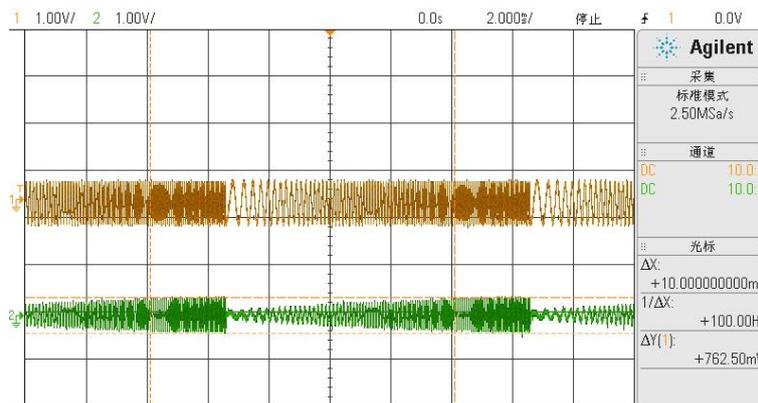


图 2.7.18 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 高通电路效果图

当高通滤波电路的元件参数为： $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.19 所示

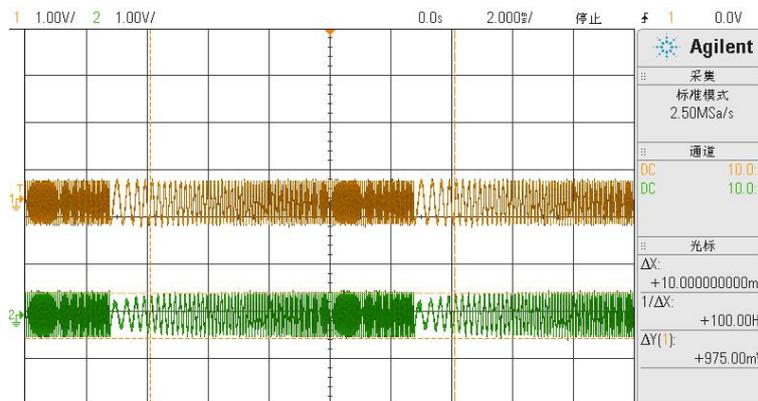


图 2.7.19 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 高通电路效果图

当高通滤波电路的元件参数为： $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 2.7.20 所示。

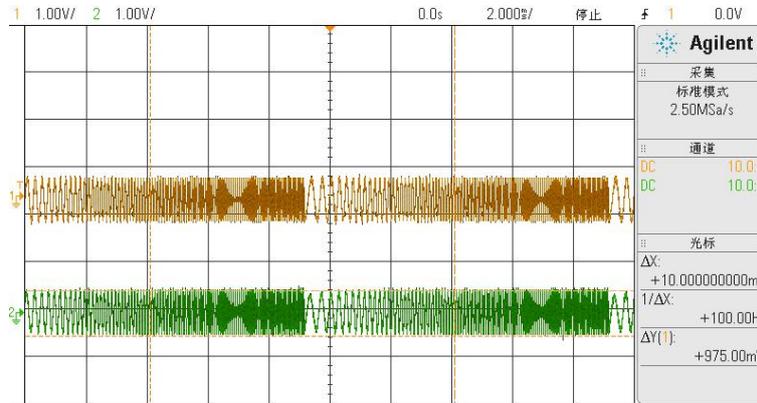


图 2.7.20 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 高通电路效果图

将输入的扫频信号修改成频率不同的正弦波信号时（注意：保证输入的正弦波信号的幅值保持 1V 不变）：

表 2.7.7 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时高通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$u_o(mV)$	0	155	220	262	312	350	368	418	456	487	500	537	575

表 2.7.8 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时高通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
$u_o(mV)$	131	306	437	580	656	744	762	793	806	843	856	880	900

表 2.7.9 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时高通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$u_o(mV)$	160	331	456	575	650	687	768	806	826	856	868	881	900

表 2.7.10 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时高通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	1	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$u_o(mV)$	161	332	455	574	652	686	769	808	823	858	870	880	905

表 2.7.11 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时高通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	0.5	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$u_o(mV)$	225	312	500	637	718	787	812	831	850	881	912	931	960

表 2.7.12 $R = 1K$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时高通滤波电路的频率特性表

$F(KHz)$	0.25	0.5	0.75	1	1.2	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
$u_o(mV)$	200	300	387	487	562	618	687	706	743	750	762	787	806

2.8 一阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验

2.8.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握单位阶跃函数和单位冲激函数的特征并构造单位阶跃信号和单位冲激信号;
- (2) 掌握一阶电路的单位阶跃响应和单位冲激响应分析的方法;
- (3) 了解一阶电路中各参数变化对响应波形的影响;
- (4) 学会对一阶电路进行阶跃响应和冲激响应分析。

2. 实验任务

搭建一阶RC串联电路,并构造单位阶跃信号和单位冲激信号做激励信号,将信号输入一阶RC串联电路,观察记录电路的输出响应信号。

2.8.2 实验原理

1. 阶跃响应

单位阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 是一个在 $t = 0$ 时刻由0跃变到1的函数信号,它是一个没有单位的函数,可以用来表示电压或是电流。

$$\varepsilon(t) = \begin{cases} 0, & (t \leq 0_-) \\ 1, & (t \geq 0_+) \end{cases}$$

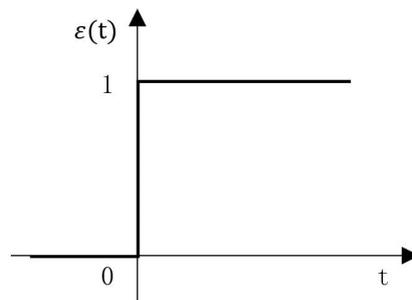


图 2.8.1 单位阶跃函数

若阶跃函数在 $t = t_0$ 时刻发生跃变,相当于阶跃函数 $\varepsilon(t)$ 在时间上延迟了 t_0 ,所以成称为延迟阶跃函数,记作 $\varepsilon(t - t_0)$,即:

$$\varepsilon(t - t_0) = \begin{cases} 0, & (t \leq t_{0-}) \\ 1, & (t \geq t_{0+}) \end{cases}$$

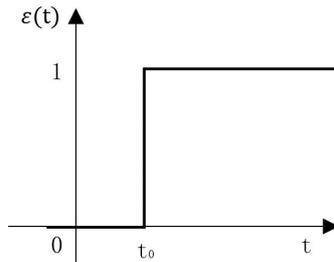


图 2.8.2 延迟阶跃函数

在实际中, 由于理想的单位阶跃函数不好构造, 并且所产生的输出不易观测, 因此使用频率较低的方波信号构造阶跃函数信号。

单位阶跃响应是指系统在单位阶跃信号的作用下所产生的零状态响应。阶跃响应实际上是电容的充电过程。

2. RC串联电路

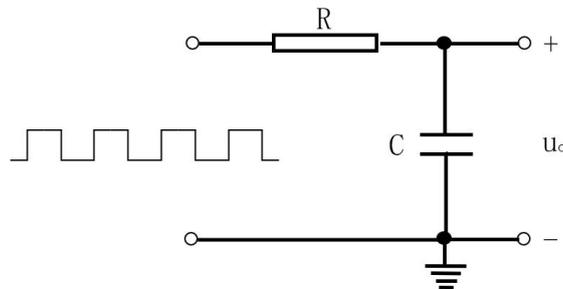


图 2.8.3 一阶RC串联电路

图 2.8.3 为一阶RC串联电路的阶跃响应示意图。

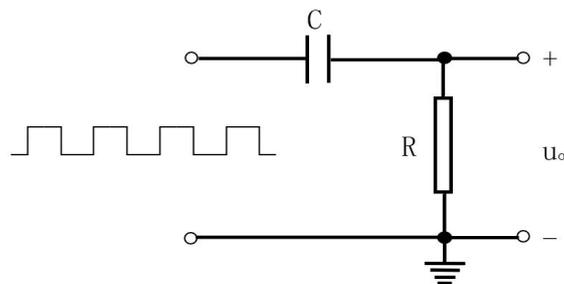


图 2.8.4 一阶CR串联电路

图 2.8.4 为一阶RC串联电路的阶跃响应示意图。

3. 冲激响应

单位冲激函数是一种奇异函数, 通常用符号 $\delta(t)$ 表示, 因此单位冲激函数又被称为 δ 函数。单位冲激函数的定义为

$$\begin{cases} \delta(t) = 0, & t \neq 0 \\ \delta(t) = \infty, & t = 0 \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt = 1 \end{cases}$$

即单位冲激函数为宽度趋于 0、高度趋于 ∞ 、面积为 1 的特殊函数。单位冲激函数可以看作是单位脉冲的一种极限，如图 2.8.5 所示为宽度为 Δt 、高度为 $1/\Delta t$ 的矩形脉冲，其面积 $A = \Delta t \cdot 1/\Delta t = 1$ 。

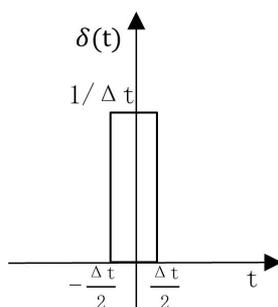


图 2.8.5 单位脉冲

当宽度 Δt 不断减小时，矩形脉冲的高度就不断增大，当脉冲宽度 Δt 趋近于 0 时，其高度趋近于 ∞ ，但其面积不变，仍然为 1，该极限情况即为单位冲激函数。单位冲激函数与 t 轴所包围的面积的大小称为该函数的强度，所以单位冲激函数的强度为 1。单位冲激函数的波形如图 2.8.6 所示，用带箭头的线段表示，箭头旁边标注的是它的强度。

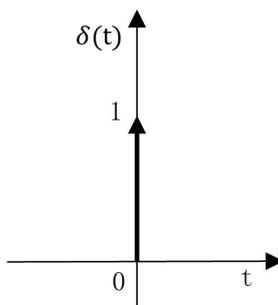


图 2.8.6 单位冲激函数

在实际中，由于理想的单位冲激函数与单位脉冲函数一样不好构造，且所产生的输出不易观测，因此使用频率较低且占空比较小的方波信号构造阶跃函数信号。

电路在单位电压或是单位电流的激励下，产生的零状态响应称为单位阶跃响应，简称阶跃响应。阶跃响应实际上是电容的充电过程。

系统在单位冲激函数激励下引起的零状态响应被称之为该系统的“冲激响应”。

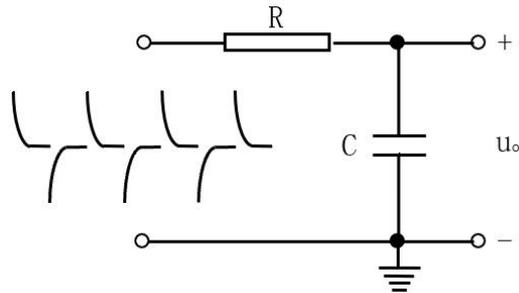


图 2.8.7 一阶RC串联电路

图 2.8.7 为一阶RC串联电路的冲激响应示意图。

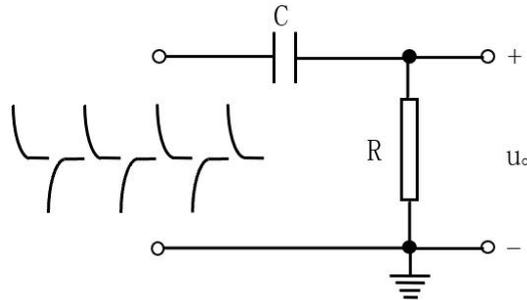


图 2.8.8 一阶CR串联电路

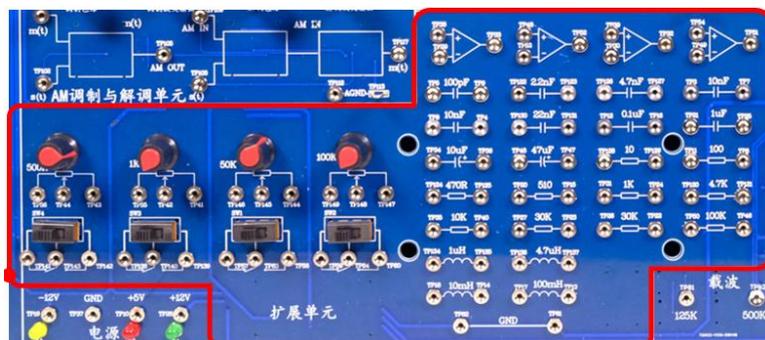
图 2.8.8 为一阶CR串联电路的冲激响应示意图。

2.8.3 实验设备

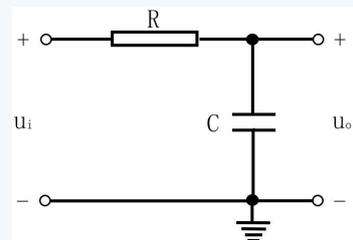
1. 信号与系统实验平台(含信号源单元、扩展单元)1台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器1台。

2.8.4 实验步骤

1. 使用实验箱的扩展单元(图 2.8.9(a))搭建一阶RC串联电路。RC电路的元件参数为： $R = 510\Omega$ 、 $1K\Omega$ 、 $10K\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ 、 $1\mu F$ 。



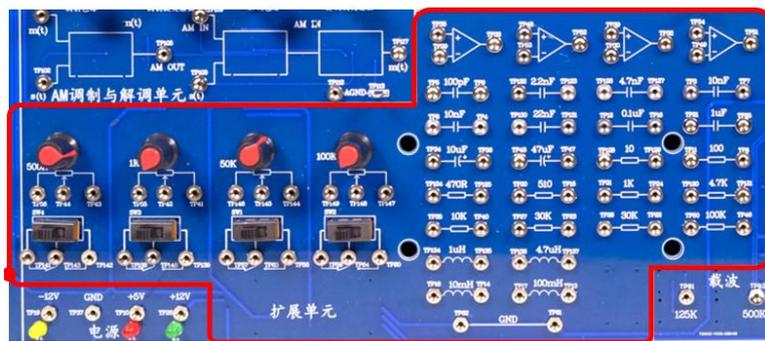
(a) 实验操作区



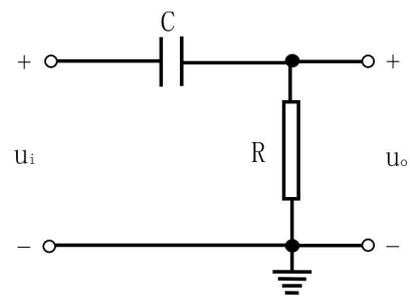
(b) RC 电路图

图 2.8.9 一阶RC电路响应分析实验区

2. 使用多功能综合信号源单元 CH1 端口输出频率为 500Hz 的方波信号近似阶跃信号，输入搭建好的 RC 电路中。
3. 使用示波器的通道 1 接 RC 电路的输入端，通道 2 接电路的 RC 输出端，观察并记录其输入的阶跃信号和输出的响应信号。
4. 构建微分电路（参考 2.6，元件参考参数为： $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ ），输入方波信号，输出近似的冲激信号，将冲激信号接到 RC 电路的输入端。
5. 使用示波器的通道 1 接 RC 电路的输入端，通道 2 接电路的 RC 输出端，观察并记录其输入的冲激信号和输出的响应信号。
6. 改变电路中的元件参数，重复实验步骤 2~ 5。
7. 使用实验箱的扩展单元（图 2.8.10 (a)）搭建一阶 CR 串联电路。CR 电路的元件参数为： $R = 100\Omega$ 、 510Ω 、 $1K\Omega$ ， $C = 0.01\mu F$ 、 $0.1\mu F$ 。



(a) 实验操作区



(b) RC 电路图

图 2.8.10 一阶 RC 电路响应分析实验区

8. 使用 CR 电路（图 2.8.10 (b)），重复实验步骤 2~ 6。

2.8.5 实验结果

1. 阶跃信号作激励信号输入不同元件参数的 RC 电路

(1) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，RC 电路的阶跃响应信号如图 2.8.11 所示。

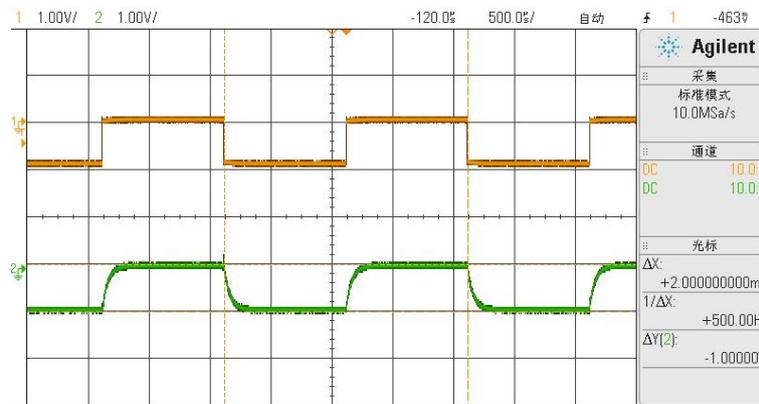


图 2.8.11 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(2) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，RC 电路的阶跃响应信号如图 2.8.12 所示。

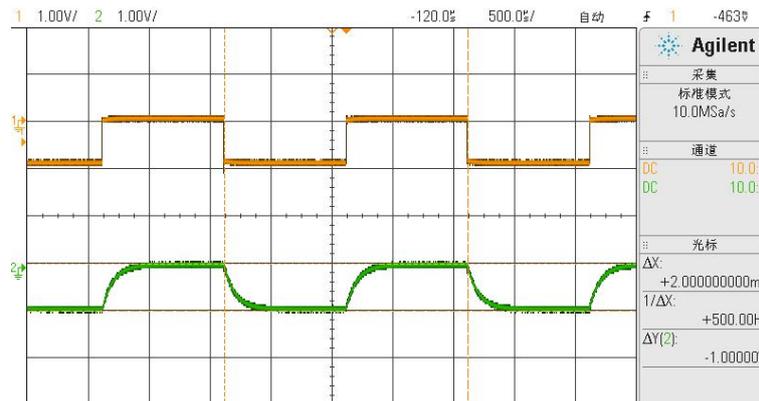


图 2.8.12 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(3) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，RC 电路的阶跃响应信号如图 2.8.13 所示。

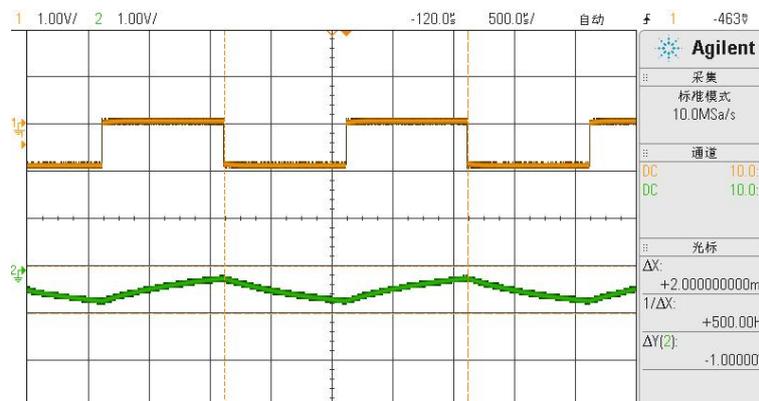


图 2.8.13 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(4) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 2.8.14 所示。

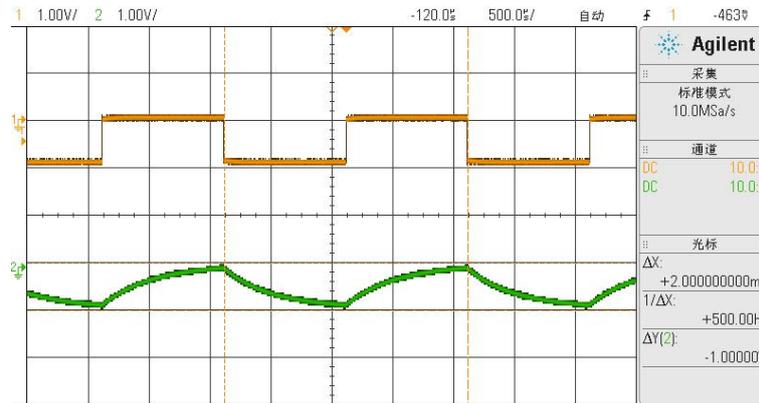


图 2.8.14 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(5) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 2.8.15 所示。

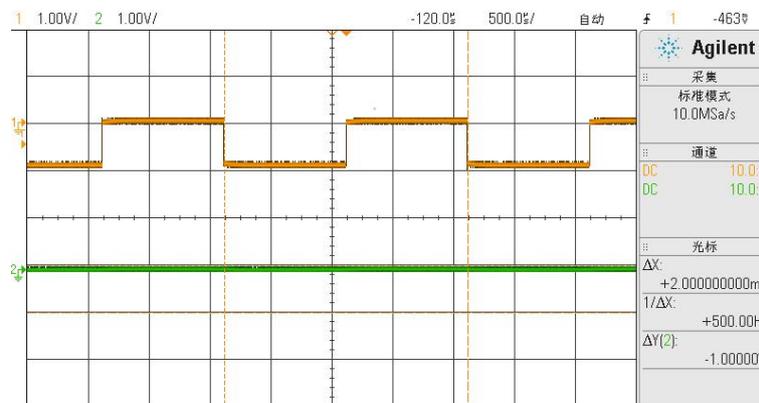


图 2.8.15 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(6) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 2.8.16 所示。

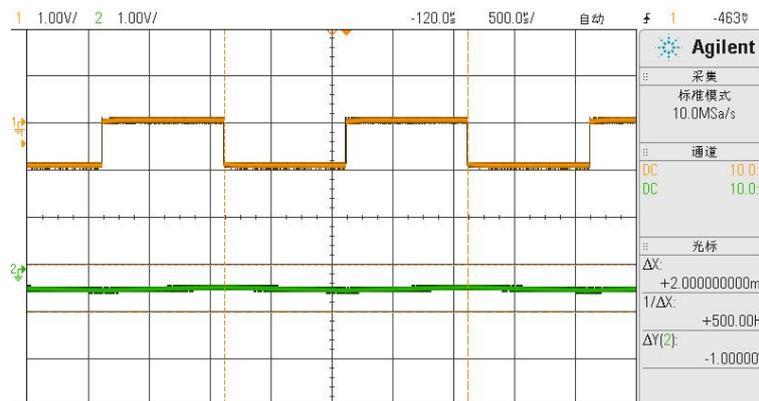


图 2.8.16 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的阶跃响应信号

2. 冲激信号作激励信号输入不同元件参数的 RC 电路

(1) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 2.8.17 图 2.8.11 所示。

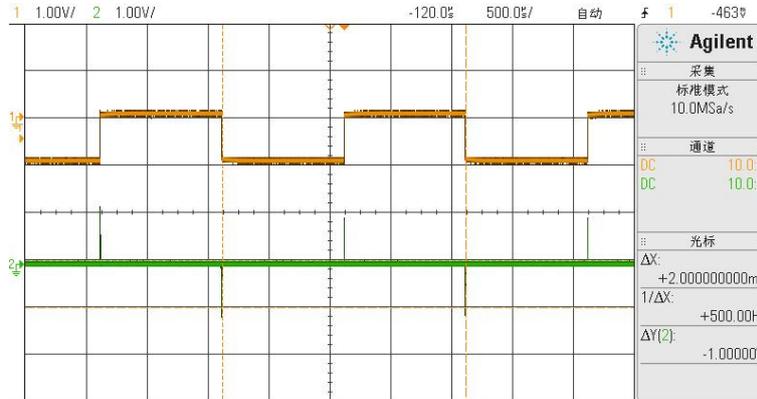


图 2.8.17 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(2) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 2.8.18 所示。

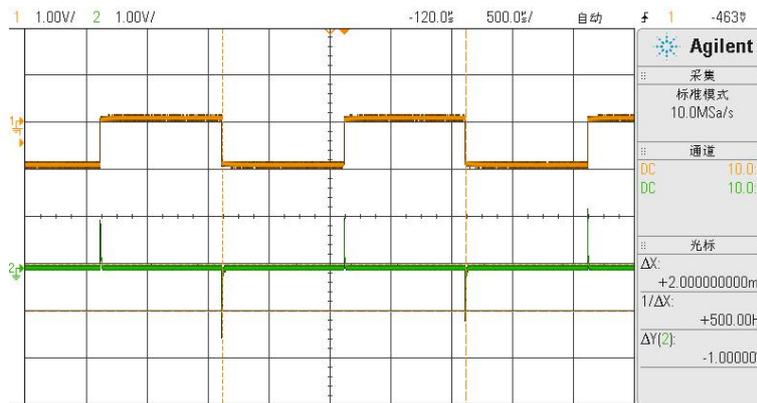


图 2.8.18 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(3) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 2.8.19 所示。

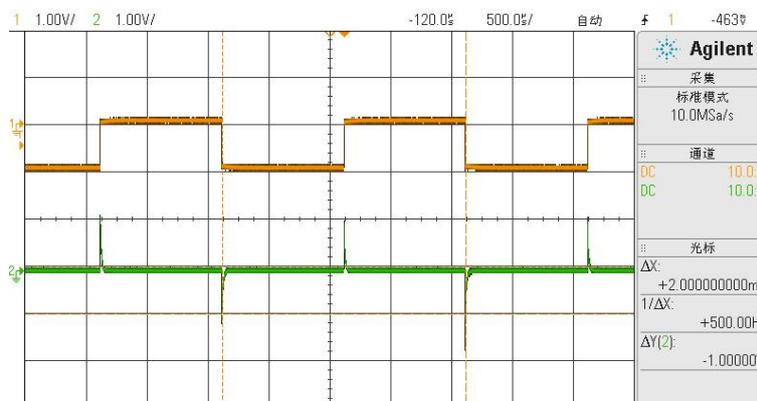


图 2.8.19 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(4) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 2.8.20 所示。

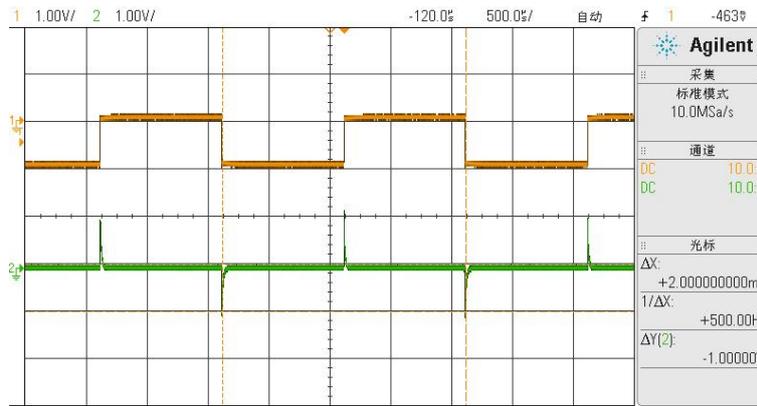


图 2.8.20 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的冲激响应信号

(5) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 2.8.21 所示。

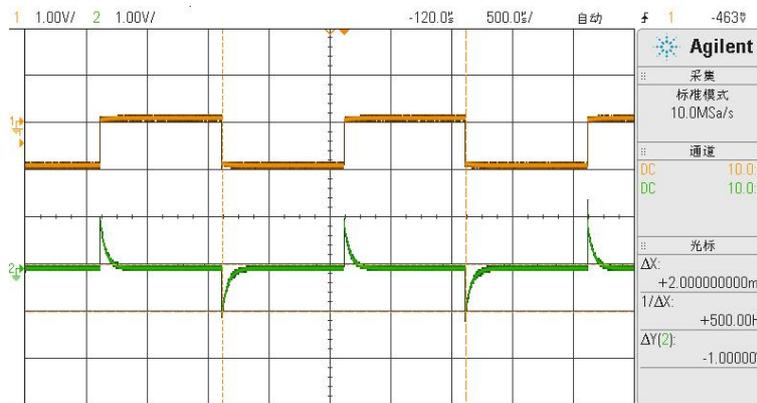


图 2.8.21 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的冲激响应信号

(6) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 2.8.22 所示。

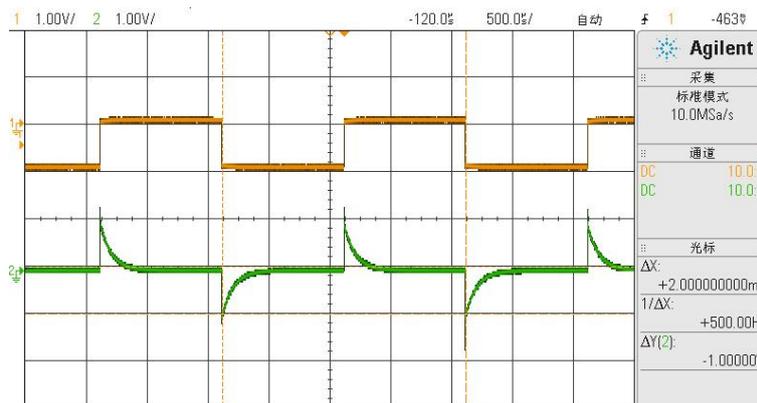


图 2.8.22 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的冲激响应信号

3. 阶跃信号作激励信号输入不同元件参数的 CR 电路

(1) 当 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时, CR 电路的阶跃响应信号如图 2.8.23 所示。

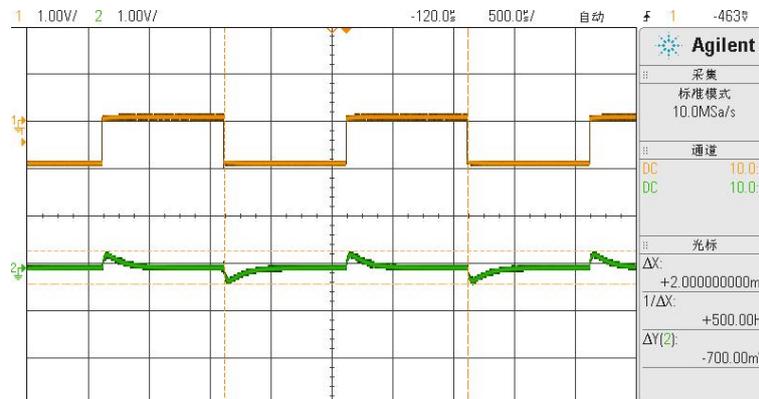


图 2.8.23 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的阶跃响应信号

(2) 当 $R = 510$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时, CR 电路的阶跃响应信号如图 2.8.24 所示。

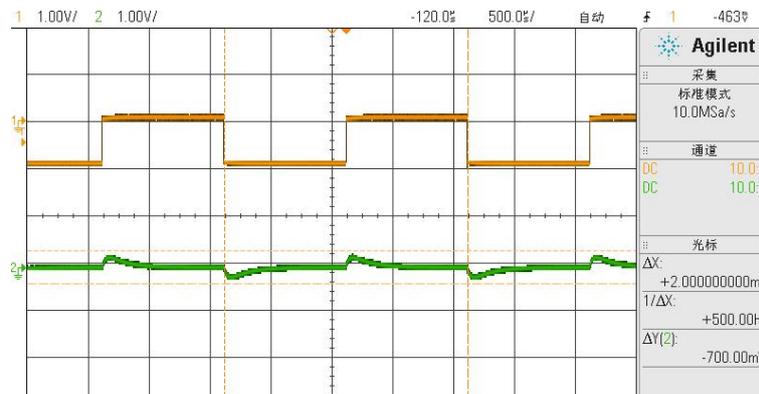


图 2.8.24 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的阶跃响应信号

(3) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时, CR 电路的阶跃响应信号如图 2.8.25 所示。

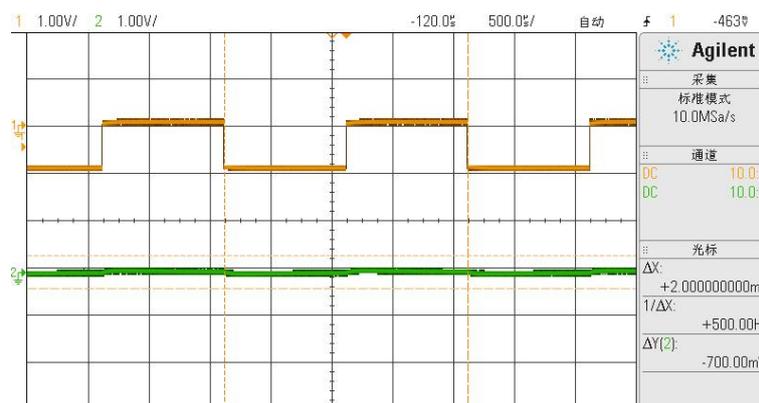


图 2.8.25 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的阶跃响应信号

(4) 当 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的阶跃响应信号如图 2.8.26 所示。

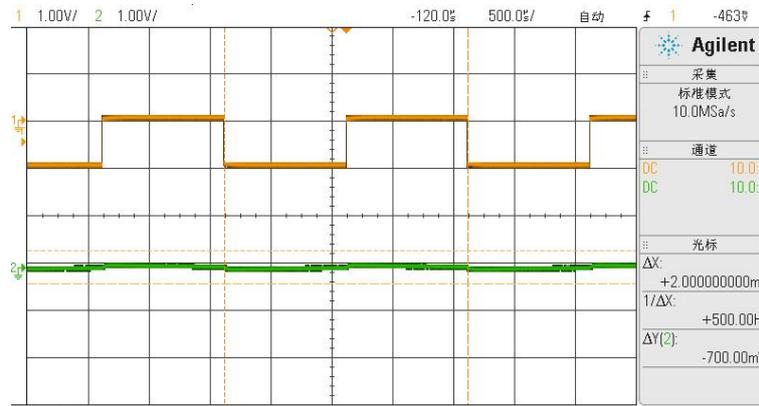


图 2.8.26 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(5) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的阶跃响应信号如图 2.8.27 所示。

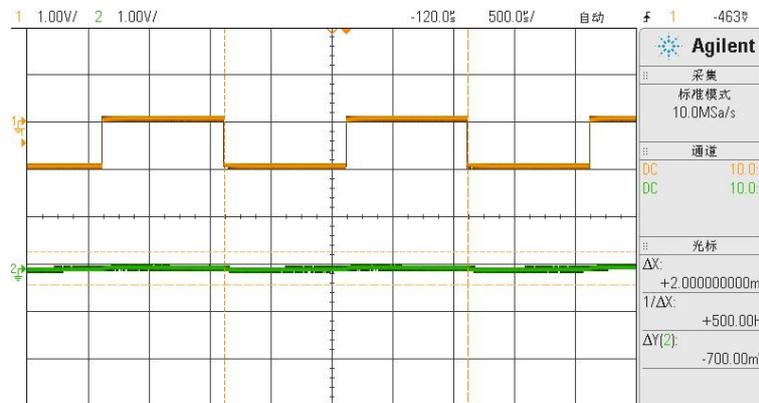


图 2.8.27 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(6) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的阶跃响应信号如图 2.8.28 所示。

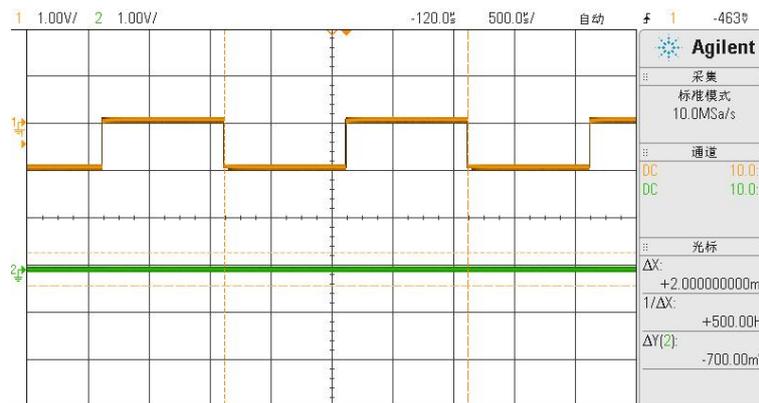


图 2.8.28 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

4. 冲激信号作激励信号输入不同元件参数的 CR 电路。

(1) 当 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 2.8.29 所示。

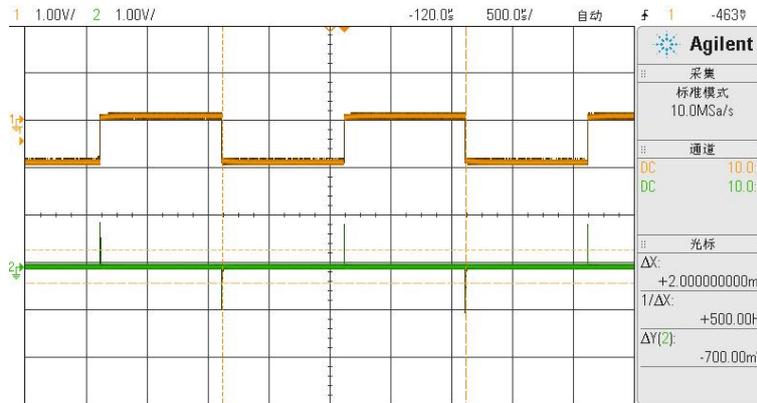


图 2.8.29 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的冲激响应信号

(2) 当 $R = 510$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 2.8.30 所示。

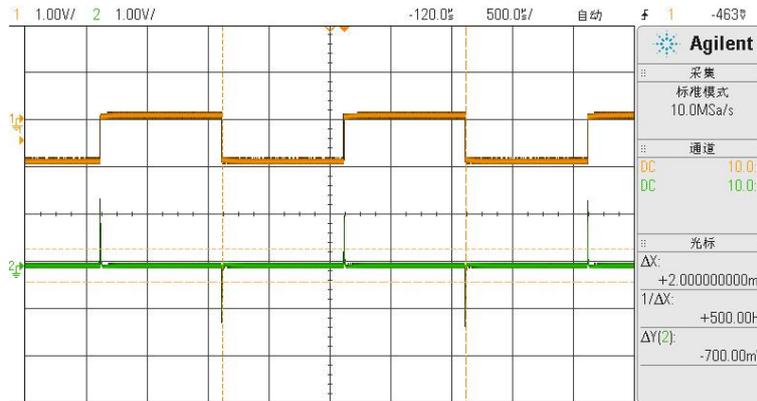


图 2.8.30 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的冲激响应信号

(3) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 2.8.31 所示。

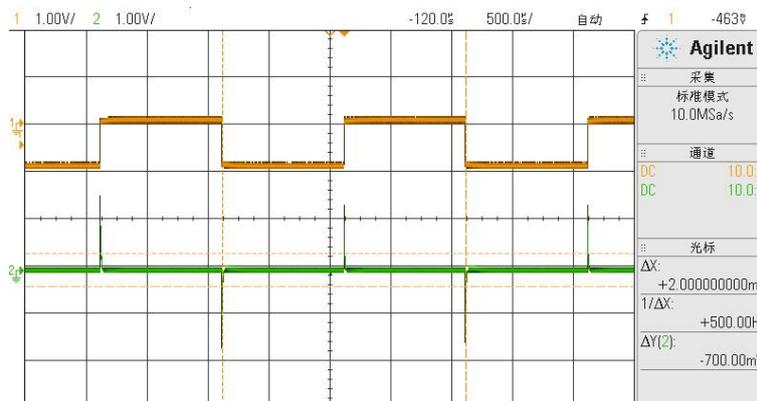


图 2.8.31 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的冲激响应信号

(4) 当 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 2.8.32 所示。

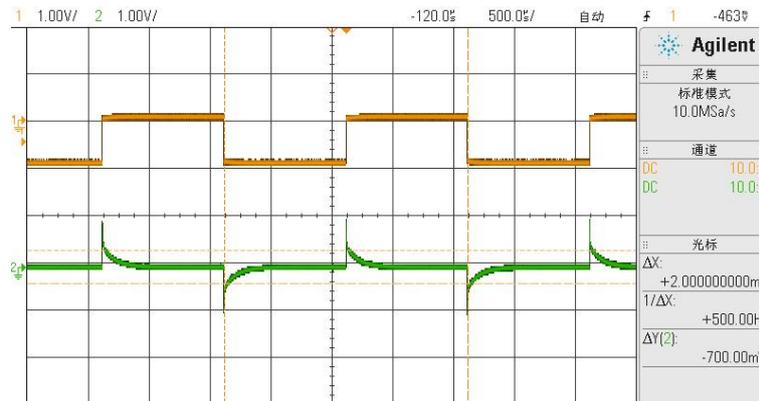


图 2.8.32 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(5) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 2.8.33 所示。

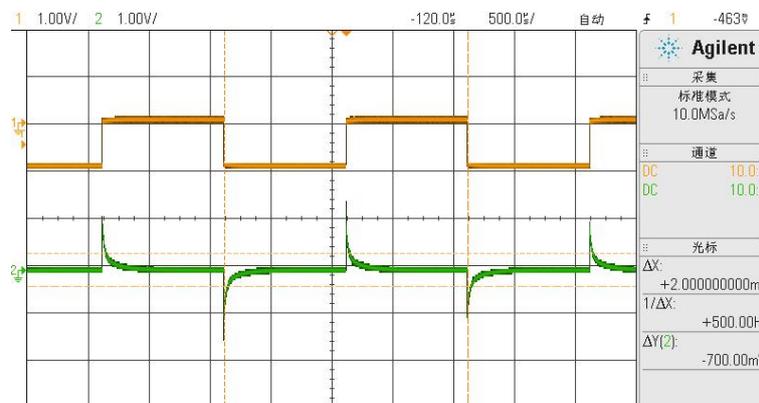


图 2.8.33 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(6) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 2.8.34 所示。

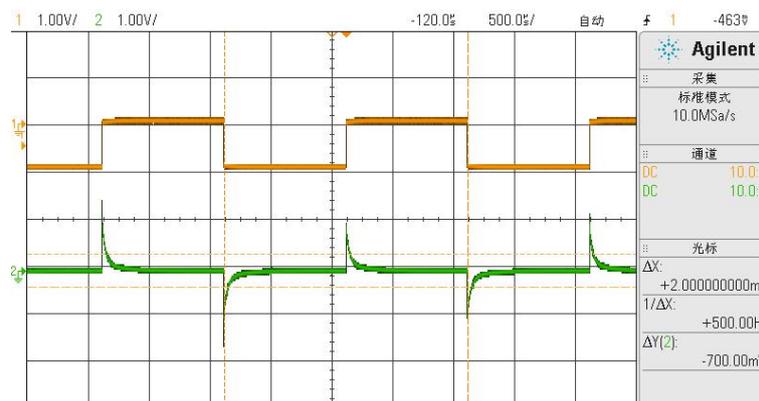


图 2.8.34 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

2.9 一阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验

2.9.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 研究一阶电路的两输入响应、零状态响应的基本规律及其特点;
- (2) 了解各电路参数对响应的影响;
- (3) 学会利用示波器测量一阶电路的时间常数;
- (4) 学会计算一阶电路的零输入响应和零状态响应。

2. 实验任务

使用示波器观察记录一阶零输入响应、零状态响应及全响应的波形。

2.9.2 实验原理

1. 零输入响应

系统的激励为零, 仅由初始状态引起的响应就被称之为该系统的“零输入响应”。响应取决于初始状态和电路特性, 会随着时间按指数规律衰减。例如一个充好电的电容通过电阻放电, 是系统零输入响应。系统的零输入响应完全由系统本身的特性所决定, 与系统的激励无关。当系统是线性的, 它的特性可以用线性微分方程表示时, 零输入响应的形式是若干个指数函数之和。指数函数的个数等于微分方程的阶数, 也就是系统内部所含“独立”储能元件的个数。假定系统的内部不含有电源, 那么这种系统就被称为“无源系统”。实际存在的无源系统的零输入响应随着时间的推移而逐渐地衰减为零。

起始状态是反映一个系统在初始观察时刻的储能状态。以电系统为例在研究 $t = 0$ 以后的响应时, 把 $t = 0_-$ 时的值 $u_c(0_-)$ 和 $i_l(0_-)$ 等称为起始状态, 而把 $t = 0_+$ 时的值 $u_c(0_+)$ 和 $i_l(0_+)$ 以及它们的各阶导数称为初始值或初始条件。

一阶电路零输入响应的特点: 一阶电路仅有一个动态元件即一个电容或一个电感, 如果在换路的瞬间动态元件已经储存有能量, 即使电路中无加激励电源, 换路后, 电路中的动态元件将通过电路放电, 在电路中产生响应, 即零输入响应。

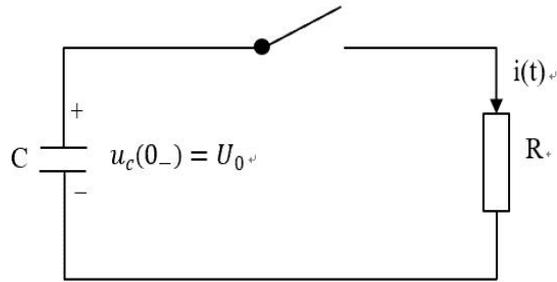


图 2.9.1 一阶 RC 电路的零输入响应示意图

一阶 RC 电路的零输入响应如图 2.9.1 所示, 在开关闭合瞬间, 电容 C 两端的电压 $u_c(0_-) = U_0$, 此时电路电流 $i(0_-) = 0$, 开关闭合后, 电容开始放电, $u_c(0_+) = U_0$ 逐渐减小至 0, $i(0_+) = \frac{U_0}{R}$ 随着时间的推移, 逐渐减小。

开关闭合后, 电路的微分方程如下所示:

$$\begin{cases} RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = 0 \\ u_c(0_+) = u_c(0_-) = U_0 \end{cases}$$

其特性方程为:

$$RCs + 1 = 0$$

特征根为:

$$s = -\frac{1}{RC}$$

通解为:

$$u_c(t) = Ae^{st} = Ae^{-\frac{t}{RC}}$$

初始条件 $A = U_0$, 零输入响应为:

$$\begin{cases} u_c(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} & t \geq 0_+ \\ i(t) = \frac{u_c(t)}{R} = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} & t \geq 0_+ \end{cases}$$

$$i(t) = -C \frac{du_c}{dt} = -\frac{d}{dt} \left(U_0 e^{-\frac{t}{RC}} \right) = \frac{U_0}{R} e^{-\frac{t}{RC}} \quad t \geq 0_+$$

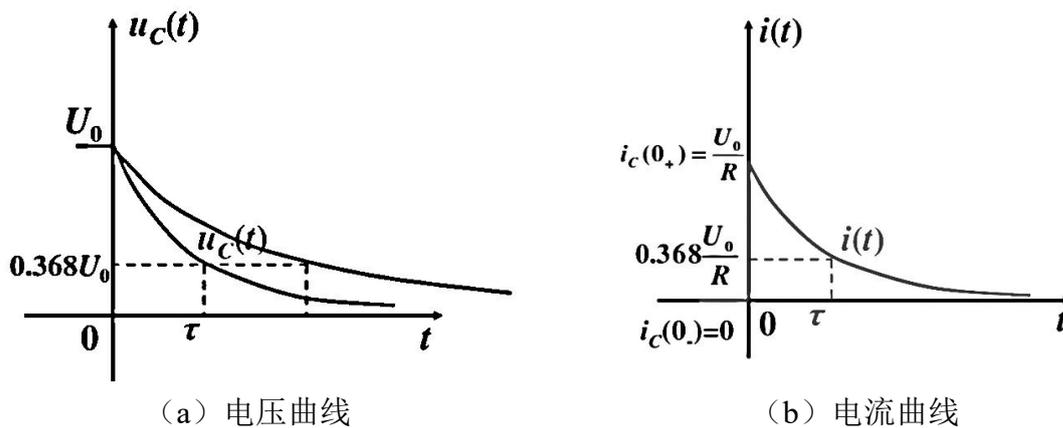


图 2.9.2 零输入响应曲线

2. 零状态响应

零状态响应是电路的储能元器件(电容、电感类元件)无初始储能, 仅由外部激励作用而产生的响应。零状态响应是系统在无初始储能或称为状态为零的情况下, 仅由外加激励源引起的响应。例如一个原来没有充过电的电容器通过电阻与电源接通, 构成充电回路, 那么电容器两端的电压或回路中的电流就是系统零状态响应。

系统的零状态响应一般分为两部分, 它的变化形式分别由系统本身的特性和激励源所决定。当系统是线性的, 它的特性可以用线性微分方程表示时, 零状态响应的形式是若干个指数函数之和再加上与激励源形式相同的项。

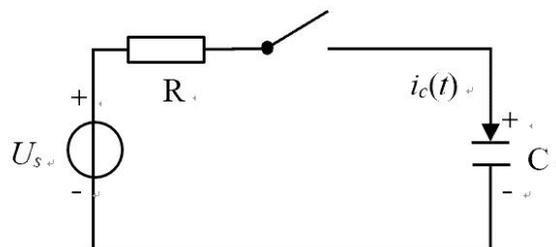


图 2.9.3 一阶 RC 电路的零状态响应示意图

一阶 RC 电路的零状态响应如图 2.9.3 所示。在开关闭合瞬间, 电容 C 两端的电压 $u_c(0_-) = 0$, 此时电路电流 $i(0_-) = 0$, 开关闭合后, 电容开始充电, $u_c(0_+) = 0$ 逐渐增加至 U_s , $i(0_+) = \frac{U_s}{R}$ 随着电容的充电时间的增加, 逐渐减小。

开关闭合后, 电路的微分方程如下所示:

$$\begin{cases} RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = U_s \\ u_c(0_+) = 0 \end{cases}$$

解方程: $u_c = u_{c通} + u_{c特} = Ae^{-\frac{t}{RC}} + u_{c特}$

$u_{c特}$: 令 $u_{c特} = B$, 代入方程式中, $B = U_s = u_c(\infty)$.

$$u_c = Ae^{-\frac{t}{RC}} + U_s$$

由于初始状态 $u_c(0_+) = 0$ 定积分常数 A, 所以 $u_c(0_+) = A + U_s = 0$, $A = -U_s$ 。

解得:

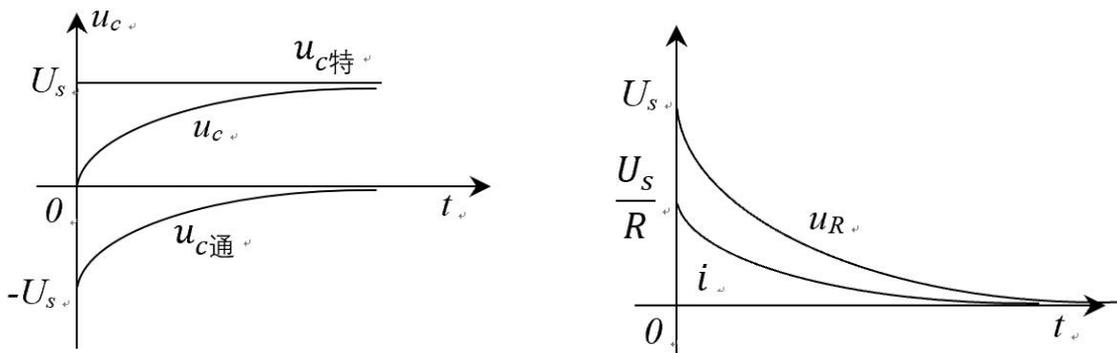
$$u_c = U_s - U_s e^{-\frac{t}{RC}} = U_s \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) = u_c(\infty) \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right) \quad t > 0$$

电流响应:

$$i(t) = C \frac{du_c}{dt} = -CU_s \left(-\frac{1}{RC}\right) e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U_s}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$$

解得:

$$u_R(t) = Ri(t) = U_s e^{-\frac{t}{RC}}$$



(a) 电容电压响应

(b) 电阻电压和电流响应

图 2.9.4 零状态响应曲线

3. 全响应

电路在外加激励和动态元件初始储能共同作用下产生的响应称为全响应。根据叠加定理, 全响应为零输入响应和零状态响应的叠加。

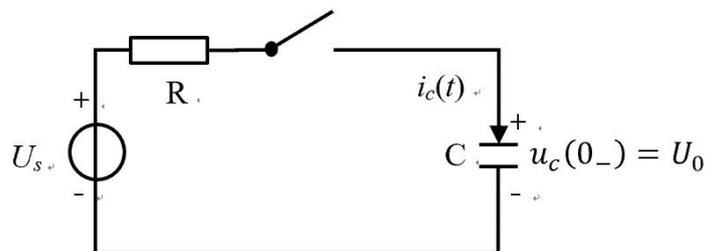


图 2.9.5 一阶 RC 电路的全响应示意图

一阶 RC 电路的零状态响应如图 2.9.5 所示。在开关闭合瞬间, 电容 C 两端的电压 $u_c(0_-) = U_0$, 此时电路电流 $i(0_-) = 0$, 开关闭合后, 电容开始充电, $u_c(0_+) = U_0$ 逐渐变化至 U_s 。

开关闭合后, 电路的微分方程如下所示:

$$\begin{cases} RC \frac{du_c(t)}{dt} + u_c(t) = U_s \\ u_c(0_+) = U_0 \end{cases}$$

解方程:

$$u_c(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}} + U_s$$

由于初始状态 $u_c(0_+) = U_0$, 所以 $A + U_s = U_0$, $A = U_0 - U_s$ 。

解得:

$$u_c = U_s + (U_0 - U_s)e^{-\frac{t}{RC}} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}} + U_s \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$$

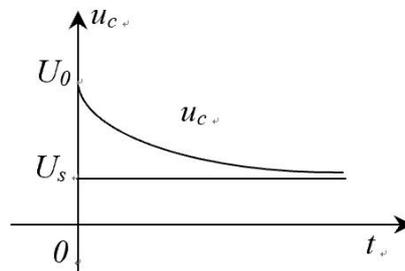


图 2.9.6 全响应曲线

4. 实验电路原理图

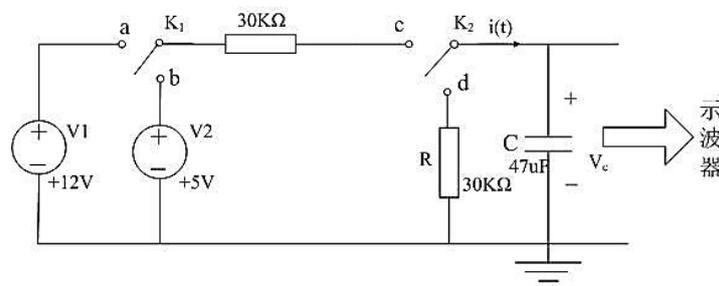


图 2.9.7 一阶RC电路的响应原理图

2.9.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台 (含信号源单元、扩展单元) 1 台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器 1 台。

2.9.4 实验步骤

1. 使用实验箱的扩展单元搭建如图 2.9.7 所示的电路。图 2.9.8 为本实验绘制的连接示意图, 为了确保输入信号便于控制, 这里将 4 个拨码开关都进行了使用。实验接线完成后即可让实验平台上电。

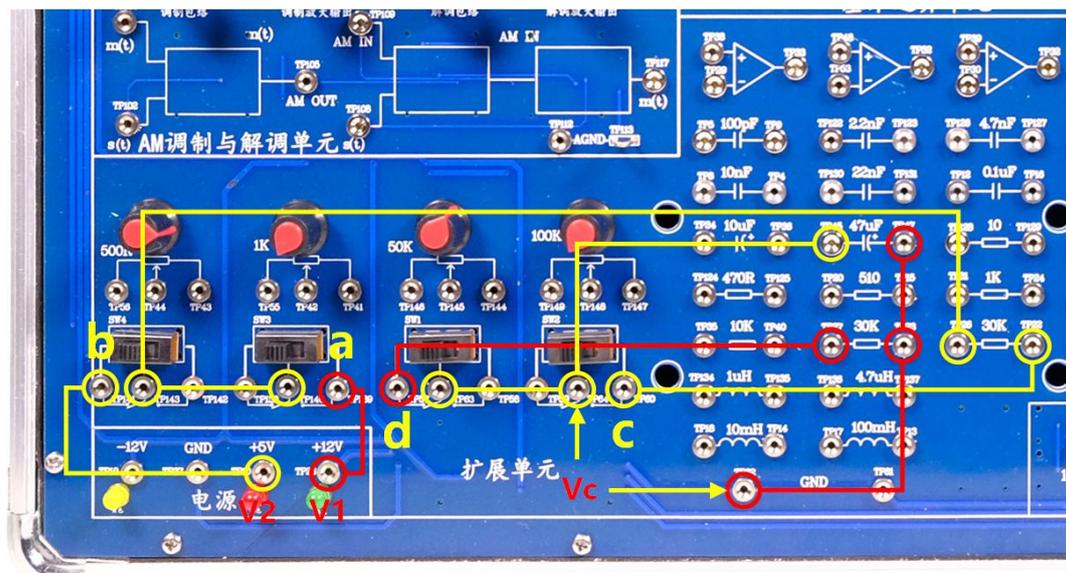


图 2.9.8 实验接线示意图

2. 使用示波器通道 1 (或通道 2) 接电路的输出端 (即图 2.9.7 所示电路中电容 C 的正极), 将示波器的扫描时间调大 (参考时间为: 1.000s/格, 即调节示波器的水平设置旋钮), 并启动单次触发模式。
3. 观察电路的零输入响应。将图 2.9.7 所示电路中的开关 K_1 置于 a 端 (SW3、SW4 水平靠右), 开关 K_2 置于 c 端 (SW1、SW2 水平靠右), 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 K_2 拨至 d 端 (SW3、SW4 水平靠左), 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。
4. 观察电路的零状态响应。将图 2.9.7 所示电路中的开关 K_1 置于 b 端 (SW3、SW4 水平靠左), 开关 K_2 置于 d 端 (SW1、SW2 水平靠左), 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 K_2 拨至 c 端 (SW1、SW2 水平靠右), 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。
5. 观察电路的完全响应。将图 2.9.7 所示电路中的开关 K_1 置于 a 端 (SW3、SW4 水平靠右), 开关 K_2 置于 c 端 (SW1、SW2 水平靠右), 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 K_1 拨至 b 端 (SW3、SW4 水平靠左), 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。
6. 将电路中的 V_1 与 V_2 互换, 此时的 $V_1 = 5V$, $V_2 = 12V$, 重复实验步骤 2~5。
7. 尝试改变元件参数, 重复实验步骤 2~6, 观察记录所测得的波形图。

2.9.5 实验结果

1. 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的零输入响应如图 2.9.9 所示。

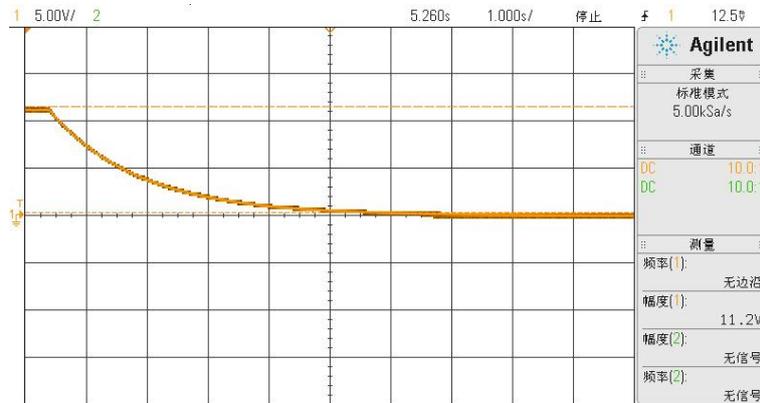


图 2.9.9 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时的零输入响应

2. 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的零状态响应如图 2.9.10 所示。

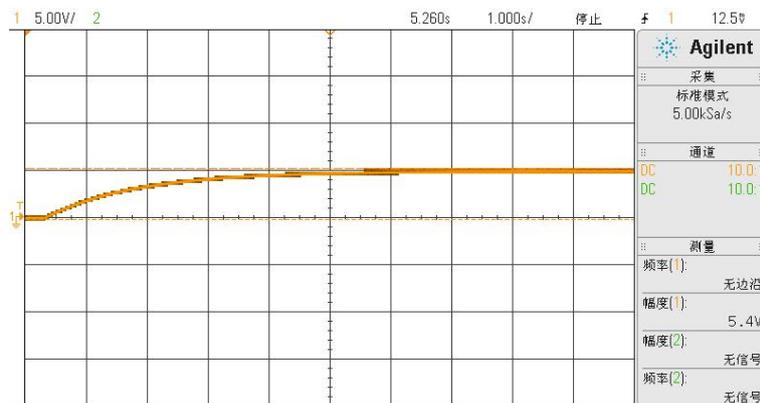


图 2.9.10 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时的零状态响应

3. 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的全响应如图 2.9.11 所示。

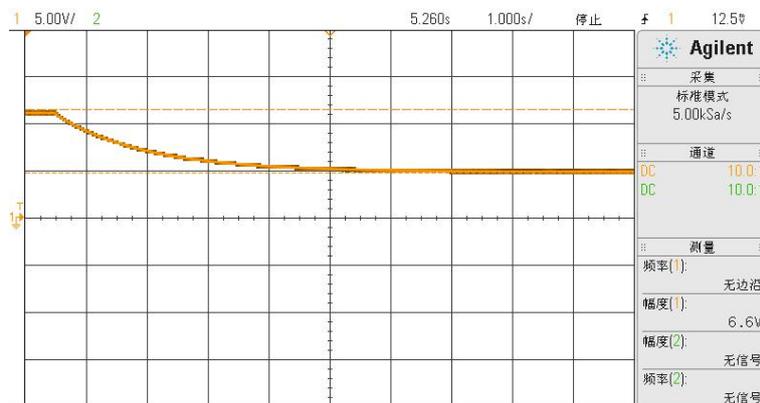


图 2.9.11 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时的全响应

4. 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的零输入响应如图 2.9.12 所示。

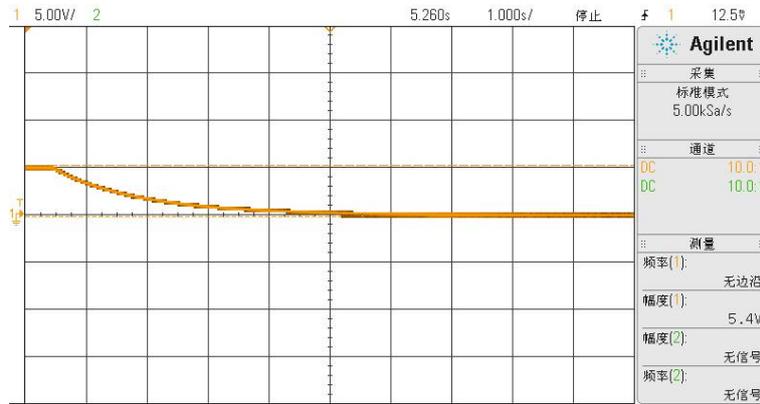


图 2.9.12 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时的零输入响应

5. 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的零状态响应如图 2.9.13 所示。

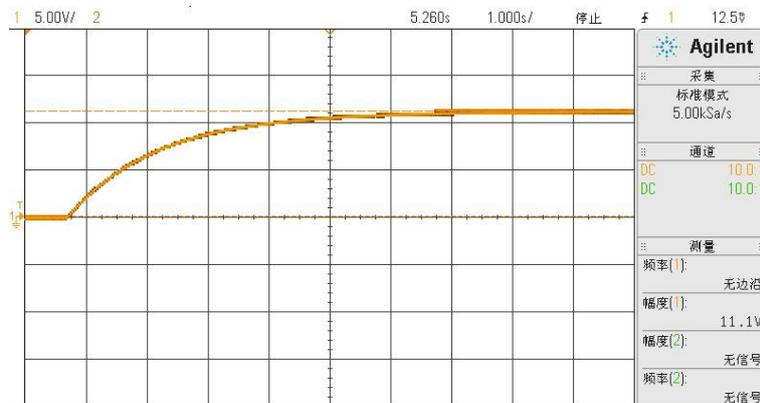


图 2.9.13 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时的零状态输入响应

6. 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的全响应如图 2.9.14 所示。

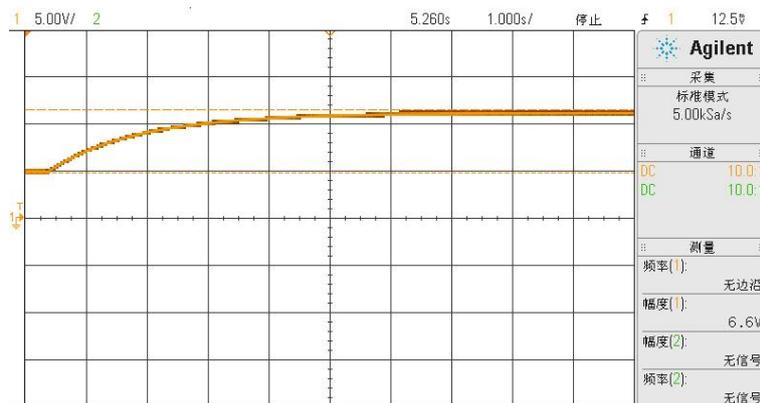


图 2.9.14 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时的全响应

2.10 二阶电路频域分析实验

2.10.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握二阶RLC串联电路的频域分析方法;
- (2) 学会分析二阶RLC串联电路的频域特性;
- (3) 掌握二阶RLC串联电路的幅频特性;
- (4) 学会分析二阶RLC串联电路的频率特性。

2. 实验任务

搭建二阶RLC串联电路或使用二阶电路特性单元完成二阶电路的频域分析。

2.10.2 实验原理

1. 二阶 RLC 串联电路

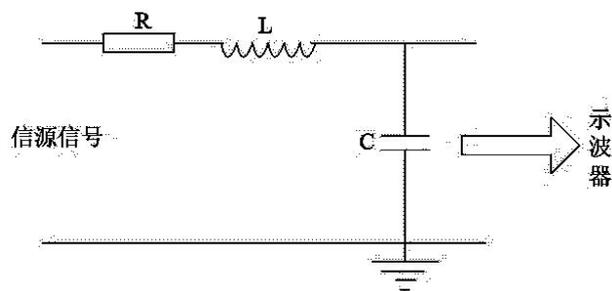


图 2.10.1 RLC串联电路

(1) 频域分析

以电容两端电压作为输出电压，做频域分析：

$$\begin{cases} \dot{U}_i - \dot{U}_o = \frac{\dot{U}_o}{X_C} \\ X_L = j\omega L \\ X_C = \frac{1}{j\omega C} \end{cases}$$

化简得系统放大倍数为：

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{-\omega^2 LC + j\omega RC + 1}$$

(2) 系统传递函数

$$\dot{H}(s) = \frac{1}{s^2 LC + sRC + 1}$$

(3) 串联谐振

对于包含电容和电感及电阻元件的无源一端口网络,其端口可能呈现容性、感性及电阻性,当电路端口的电压 U 和电流 I ,出现同相位,电路呈电阻性时,称之为谐振现象,这样的电路,称之为谐振电路。

谐振电路分为串联谐振电路和并联谐振电路,当容抗 X_C 与感抗 X_L 相等时,即 $X_C = X_L$,电路中的电压 u 与电流 i 的相位相同,电路呈现电阻性,这种现象叫串联谐振,如图 2.10.1 所示的 RLC 串联电路即为串联谐振电路。串联谐振时等效阻抗最小,阻抗为纯电阻。串联电阻的大小虽然不影响串联谐振电路的固有频率,但有控制和调节谐振时电流和电压幅度的作用。

当串联谐振发生时,感抗 X_L 等于容抗 X_C ,其相量关系如图 2.10.2 所示,所以:

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (X_L^2 - X_C^2)} = R$$

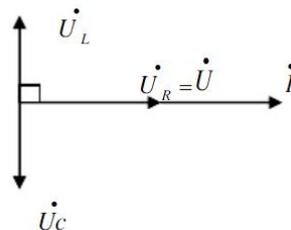


图 2.10.2 串联谐振时的相量图

谐振的角频率 ω_0 为:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

即谐振频率 f_0 为:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

f_0 称作电路的固有谐振频率,它跟电路参数 L 、 C 密切相关,与信号源则没有关系。

谐振时,电感或电容上的电压有效值与电阻电压有效值的比值为品质因数 Q ,即:

$$Q = \frac{V_L}{V_R} = \frac{V_C}{V_R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R\omega_0 C}$$

结合图 2.10.2 分析得,电感两端或电容两端的电压比外加电压大 Q 倍。

(4) 幅频特性曲线与相频特性曲线

串联谐振时,串联电阻的大小有控制和调节谐振时电流和电压幅度的作用。所以当二阶 RLC 串联电路中 L 、 C 不变时,其幅频特性曲线会受到电阻大小的影响。其抚平特性

曲线如所示。

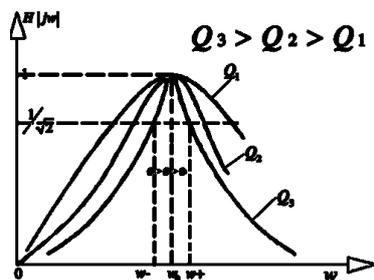


图 2.10.3 RLC串联电路的幅频特性曲线

RLC串联电路的相频特性曲线如图 2.10.4 所示，当频率小于谐振频率时，呈容性，当频率大于谐振频率时，呈感性。

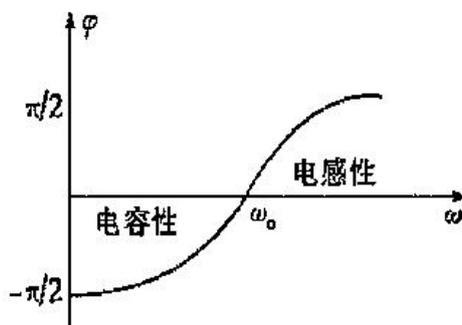


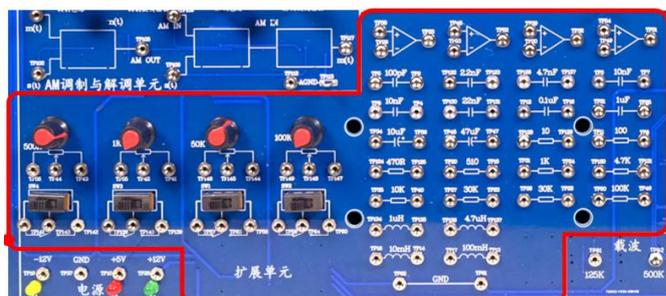
图 2.10.4 RLC串联电路的相频特性曲线

2.10.3 实验设备

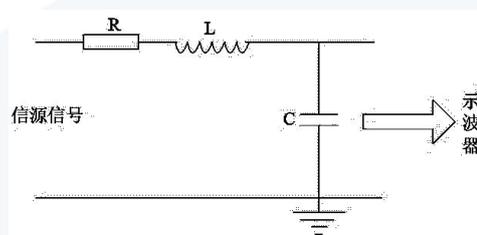
1. 信号与系统实验平台（含信号源单元、扩展单元）1 台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器 1 台。

2.10.4 实验步骤

1.使用实验箱的扩展单元图 2.10.5 (a) 中搭建如图 2.10.5 (b) 所示的二阶 RLC 串联电路，其路元件参数为： $R = 100\Omega$ ， $L = 10mH$ ， $C = 1\mu F$ （元件参数可以自行调整）。



(a) 实验区域



(b) 电路图

图 2.10.5 二阶电路的频域分析

2. 从多功能综合信号源单元 CH2 通道输出一路扫频信号做激励信号, 输入二阶 RLC 串联电路的输入端。

3. 使用示波器的通道 1 接二阶 RLC 串联电路的输入端, 通道 2 接二阶 RLC 串联电路的输出端, 观察并记录其输出响应波形。

4. 调整多功能综合信号源单元 CH2 通道波形, 将激励信号改用幅度为 1V 的正弦波, 在保持正弦波信号幅值不变的情况下, 改变其频率, 使用示波器观察并记录输出端信号幅值, 绘制幅频特性曲线。

2.10.5 实验结果

1. 扫频信号做激励信号输入二阶 RLC 串联电路, 激励信号和响应信号的波形如图 2.10.6 所示。

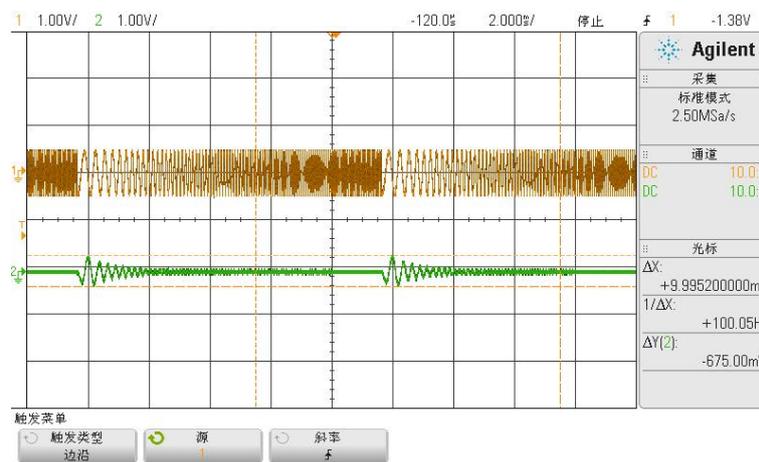


图 2.10.6 扫频信号及其对应的响应信号

2. 幅值为 1V 的正弦波作激励信号时:

(1) 正弦波频率为 500Hz 时, 其对应的响应信号波形如图 2.10.7 所示。

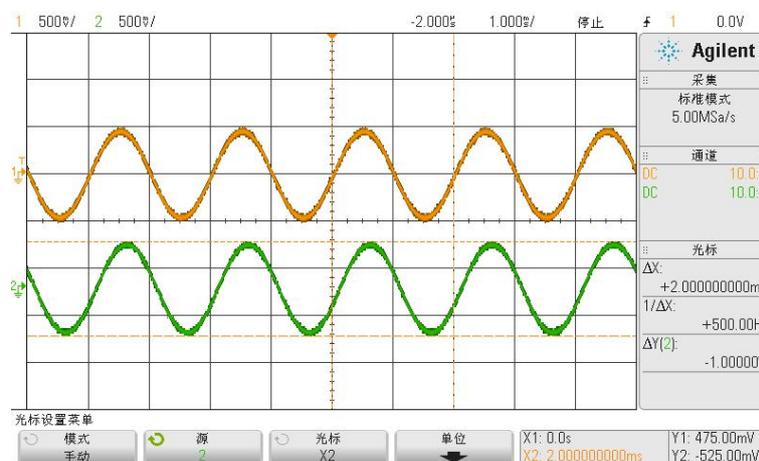


图 2.10.7 500Hz 的正弦波信号及响应信号波形图

(2) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.8 图 2.10.7 所示。

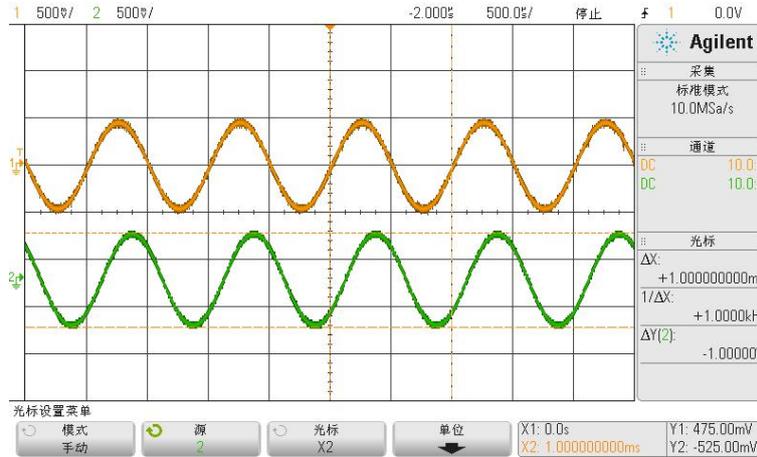


图 2.10.8 1.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(3) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.9 所示。

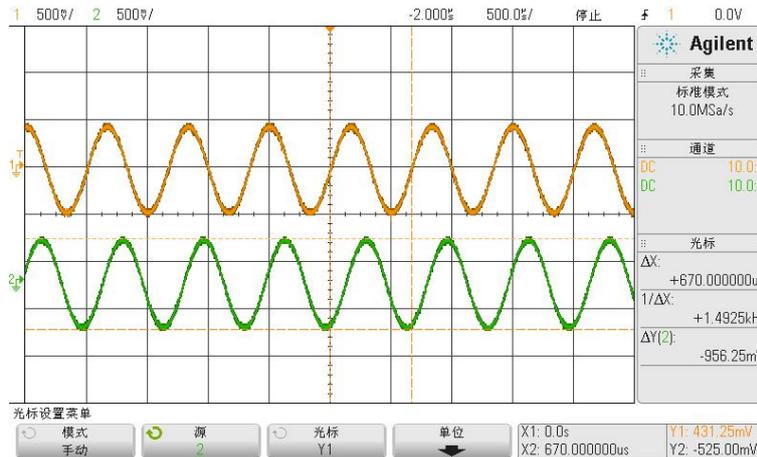


图 2.10.9 1.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(4) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.10 所示。

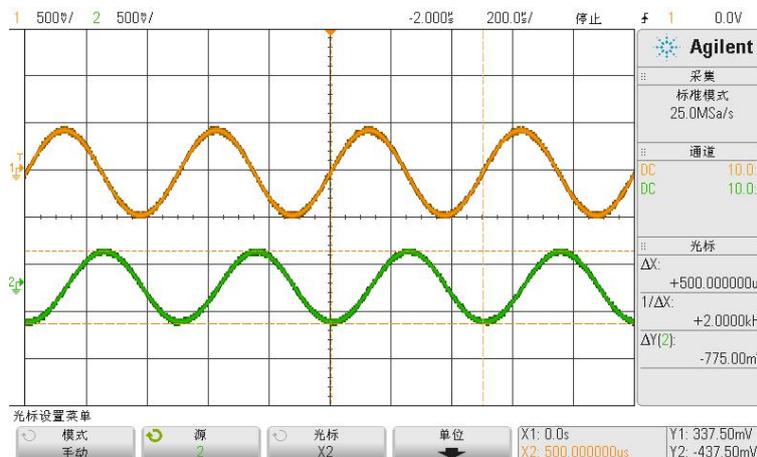


图 2.10.10 2KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(5) 正弦波频率为 2.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.11 所示。

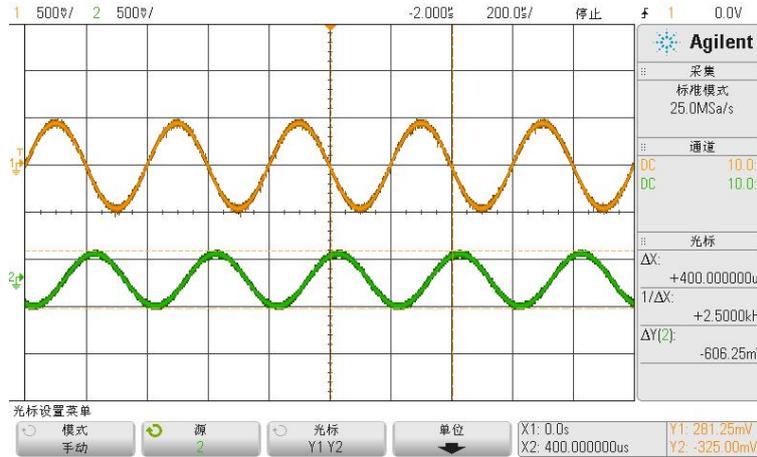


图 2.10.11 2.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(6) 正弦波频率为 3KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.12 所示。

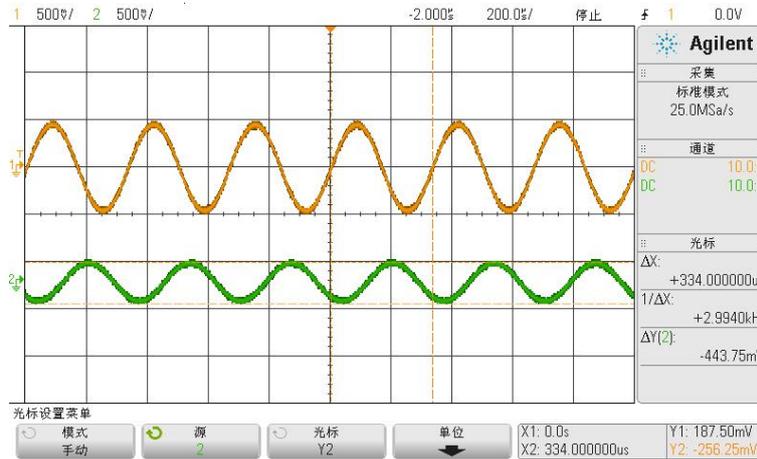


图 2.10.12 3KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(7) 正弦波频率为 3.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.13 所示。

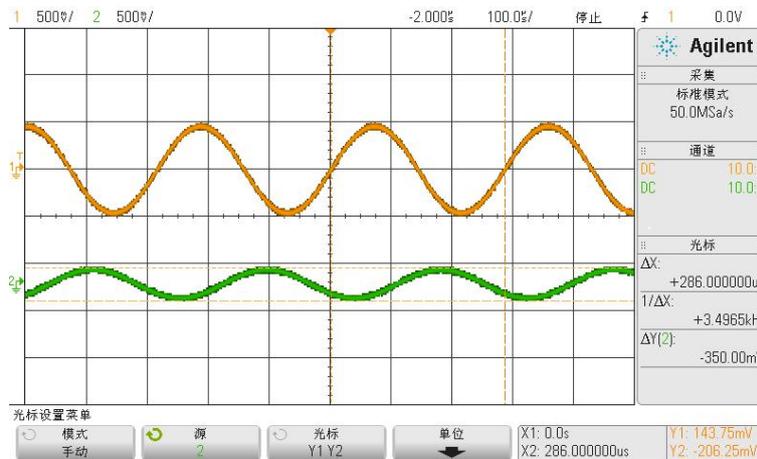


图 2.10.13 3.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(8) 正弦波频率为 4KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.14 所示。

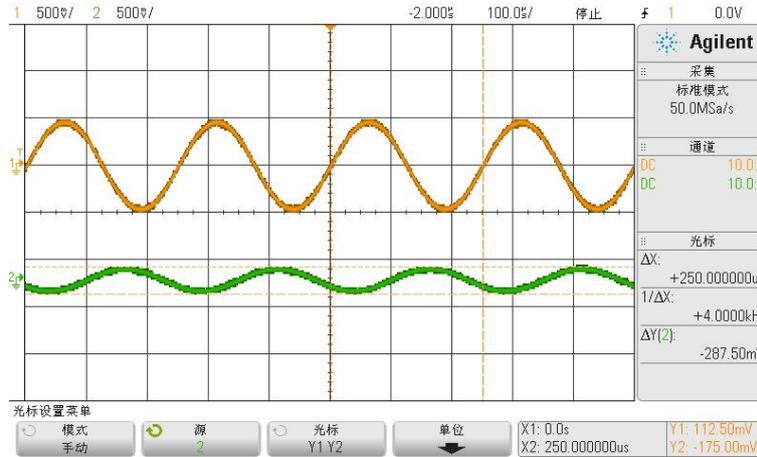


图 2.10.14 4KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(9) 正弦波频率为 4.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.15 所示。

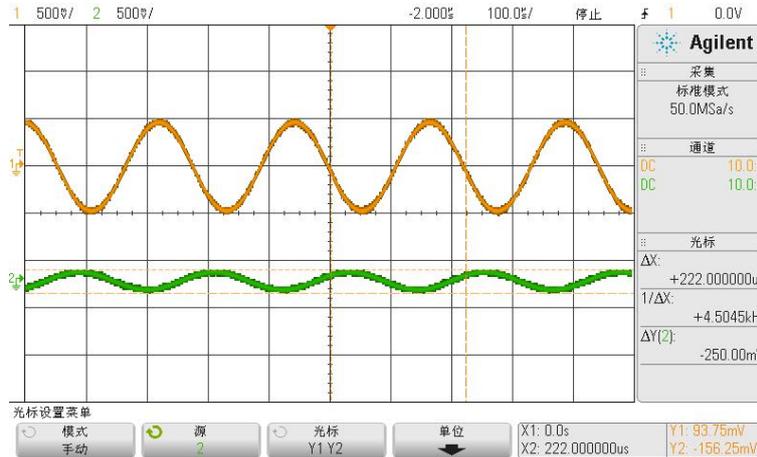


图 2.10.15 4.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(10) 正弦波频率为 5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 2.10.16 所示。



图 2.10.16 5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

2.11 二阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验

2.11.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握二阶电路的单位阶跃响应和单位冲激响应分析的方法;
- (2) 了解二阶电路在过阻尼、临界阻尼和欠阻尼三种情况下的响应波形;
- (3) 学会利用示波器观察二阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应。

2. 实验任务

- (1) 构造单位阶跃信号和单位冲激信号;
- (2) 搭建二阶 RLC 串联电路;
- (3) 观察并记录激励信号为阶跃信号和冲激信号时的响应波形;
- (4) 改变二阶 RLC 串联电路的参数, 观察并记录各参数变化对应的响应波形的影响。

2.11.2 实验原理

1. 二阶 RLC 串联电路

RLC 串联电路是一个典型的二阶电路, 如图 2.11.1 所示。

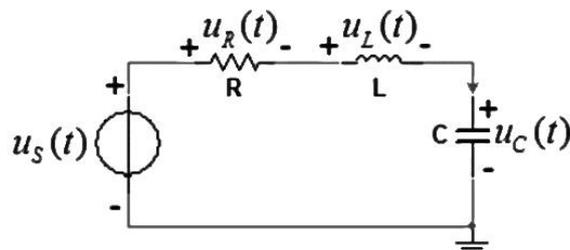


图 2.11.1 二阶 RLC 串联电路

根据基尔霍夫定律, 图 2.11.1 中的 RLC 串联电路可建立方程:

$$\begin{cases} L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) + u_c(t) = u_s(t) \\ i(t) = C \frac{du_c(t)}{dt} \end{cases}$$

整理可得:

$$\frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_c(t) = \frac{1}{LC} u_s(t)$$

2. 阻尼系统

定义衰减系数(阻尼系数) $\alpha = \frac{R}{2L}$, 谐振角频率为 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, 则电路的微分方程式

为:

$$\frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + 2\alpha \frac{du_c(t)}{dt} + \omega_0^2 u_c(t) = \omega_0^2 u_s(t)$$

其特征根方程为:

$$S^2 + 2\alpha S + \omega_0^2 = 0$$

特征根为: $S_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$, $S_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$ 。

由以上公式可知, RLC 串联电路的响应类型与元件参数有关。根据特征根形式的不同, 响应分为欠阻尼、临界阻尼、过阻尼三种情况。

(1) 欠阻尼

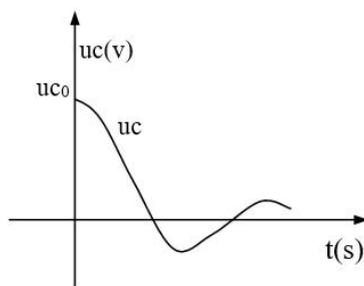
当 $0 < \alpha < 1$ 即 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, S_1 、 S_2 为两个不相等的共轭根, 响应为衰减振荡, 系统称为欠阻尼系统。响应中的电压具有衰减振荡的特点, 在稳定值的上下振荡, 振荡的频率比 ω_0 小, 由于存在振荡, 暂态过程中出现脉冲, 即瞬时值大于稳定值。其电压响应波形如图 2.11.2 (a) 所示。

(2) 过阻尼

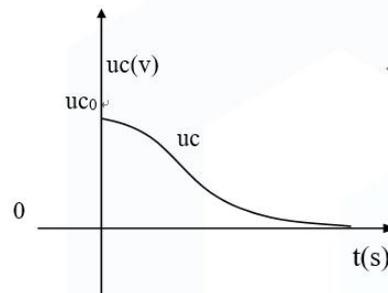
当 $\alpha > 1$ 即 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, S_1 、 S_2 为两个不相等的实根, 响应为单调上升的曲线, 是非振荡型的。这种系统称为过阻尼系统。响应中的电压呈现出非周期性变化的特点。其电压响应波形如图 2.11.2 (b) 所示。由图可见, 电压、振荡不起来。而是逐渐衰减为零。

(3) 临界阻尼

当 $\alpha = 1$ 即 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, S_1 、 S_2 为两个相等的负实根, 响应为以上两者的临界状态, 这种系统称为临界阻尼系统, 系统的响应没有过脉冲现象。



(a)欠阻尼振荡



(b)过阻尼振荡

图 2.11.2 二阶电路电压响应波形

为了便于用示波器观察响应波形，实验中用周期方波代替阶跃信号，而用周期方波通过微分电路后得到的尖顶脉冲代替冲激信号。

2.11.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台（含信号源单元、扩展单元、二阶电路特性单元）1台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器1台。

2.11.4 实验步骤

1. 构造阶跃信号和冲激信号的方法。

由于理想的单位阶跃信号与单位冲激信号不好构造，所以实验中使用频率较低的方波信号代替单位阶跃信号，在本实验中，采用频率为 100Hz 的方波信号代替单位阶跃信号。频率较低的方波信号经过微分系统后所产生的信号作为单位冲激信号。

采用信号源模块产生 100Hz 的方波信号做阶跃信号；并使用扩展单元搭建微分电路，使用方波信号经过微分电路（电路器件参数选择 $R = 510\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ （可选用一阶电路特性单元电路）。也可自己选择电路器件参数），产生冲激信号。

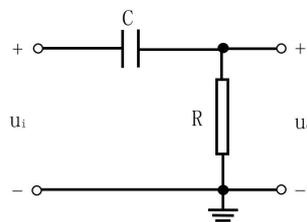
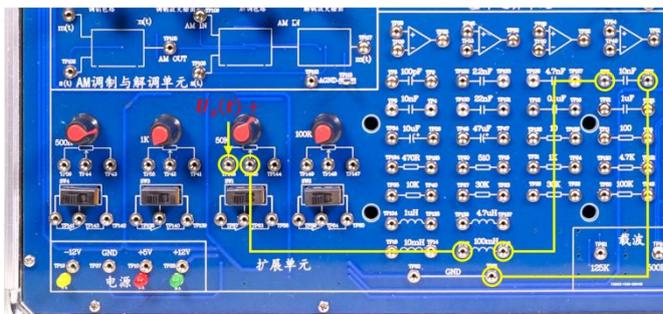
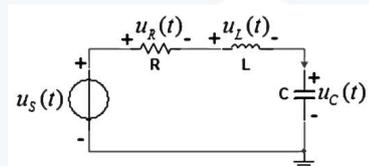


图 2.11.3 微分电路

2. 使用实验箱的扩展模块按照下图所示电路搭建二阶 RLC 串联电路，电路元件参数为： $L = 100mH$ ， $C = 0.01\mu F$ ，电阻 R 为 $50K\Omega$ 可调电阻。（也可以使用二阶电路特性单元电路）。



(a) 实验接线示意图



(b) 实验电路图

图 2.11.4 二阶 RLC 串联电路

3. RLC 串联电路输入方波信号近似的阶跃信号，示波器通道 1 接电路的输入端，通道 2 接电路的输出端，观察并记录信号波形，调节电阻大小，观察输出信号的波形变化。
4. 将阶跃信号换成冲激信号，重复步骤实验 3。
5. 计算理论上临界阻尼时的 R 值，观察记录在临界阻尼状态下的输出波形，并测此时的电阻 R 的值（若是使用的二阶电路特性单元的课程，测量电阻的阻值可以测量带电阻和电感的串联电阻，测量时不接信号源，电感的阻值可以忽略）。

2.11.5 实验结果

1. 构造阶跃信号和冲激信号。

(1) 近似阶跃信号的波形与近似冲激信号的波形如图 2.11.5 所示。

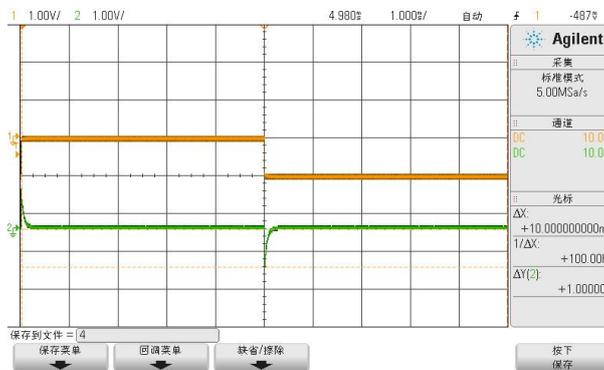


图 2.11.5 近似阶跃信号和近似冲激信号

其中，通道 1 信号为近似的阶跃信号波形，通道 2 显示的是近似冲激信号波形。

2. 方波信号近似的阶跃信号作激励信号输入 RLC 串联电路，调节电阻的电阻值，其输出响应信号的波形变化。

(1) 当输出信号为过阻尼状态时，如图 2.11.6 所示，测得此时的电阻为 $1K\Omega$ 。



图 2.11.6 电路过阻尼时响应波形

(2)当输出信号为临界阻尼状态时,如图 2.11.7 所示,测得此时的电阻为 $5.498K\Omega$ 。

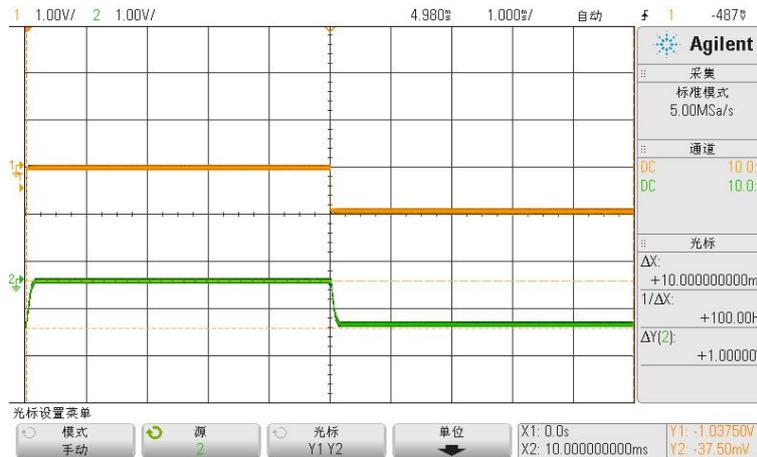


图 2.11.7 电路临界阻尼时响应波形

(3)当输出信号为欠阻尼状态时,如图 2.11.8 所示,测得此时的电阻为 $9.356K\Omega$ 。

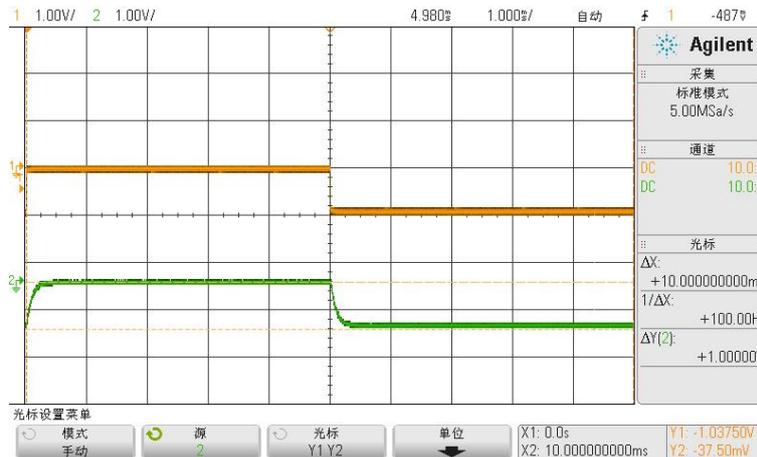


图 2.11.8 电路欠阻尼时响应信号波形

3. 方波信号通过微分电路构建的近似冲激信号作激励信号输入 RLC 串联电路, 调节电阻的电阻值, 其输出响应信号的波形变化。

(1)当输出信号为过阻尼状态时,如图 2.11.9 所示,测得此时的电阻为 $1K\Omega$ 。

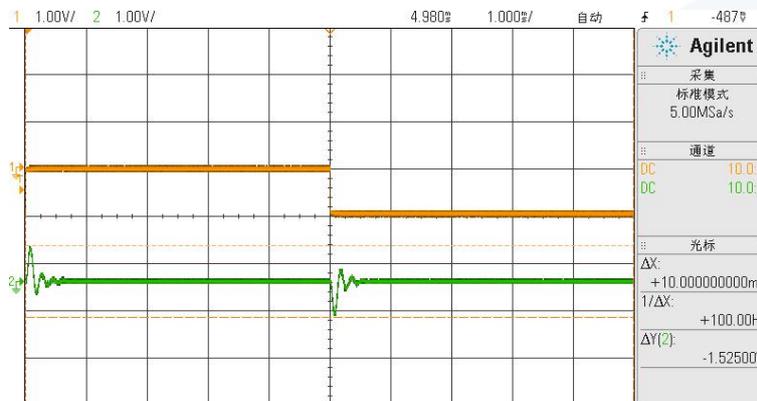


图 2.11.9 电路过阻尼时响应信号波形

(2)当输出信号为临界阻尼状态时,如图 2.11.10 所示,测得此时的电阻为 $3.126K\Omega$ 。

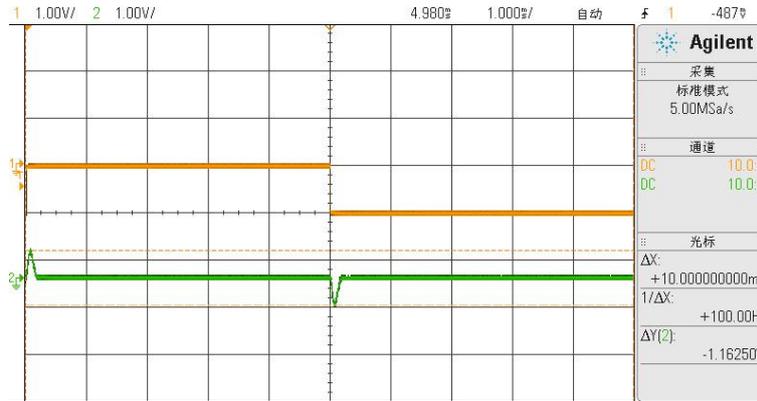


图 2.11.10 电路临界阻尼时响应信号波形

(3)当输出信号为欠阻尼状态时,如图 2.11.11 所示,测得此时的电阻为 $9.356K\Omega$ 。

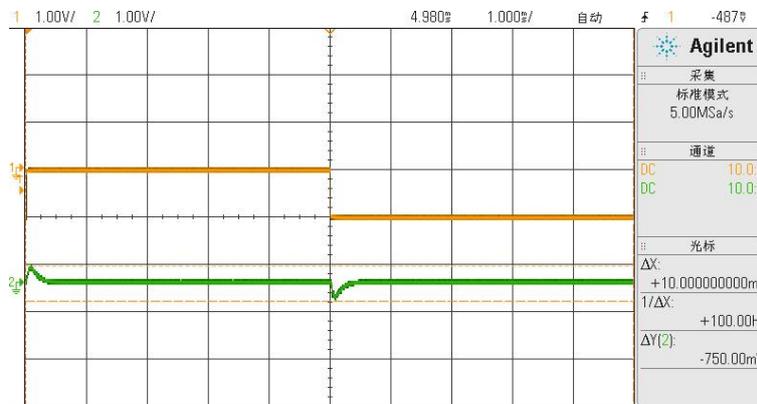


图 2.11.11 电路欠阻尼时响应信号波形

4. 理论阻尼状态时 R 值:

$$R = 2 \sqrt{\frac{L}{C}} \approx 6.32K\Omega$$

理论临界阻尼状态下的输出波形如图 2.11.12 和图 2.11.13 所示。

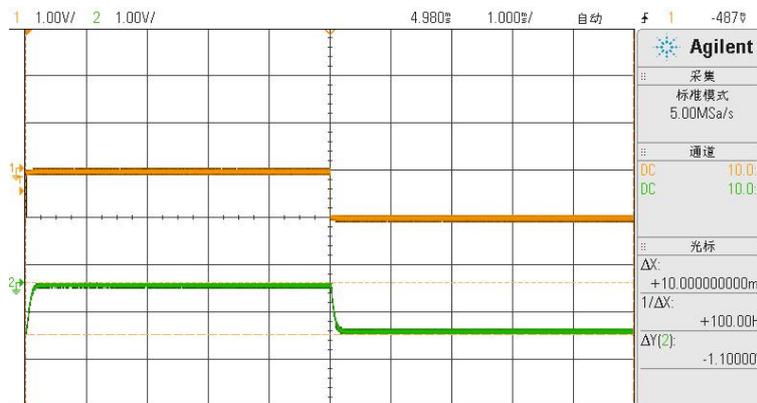


图 2.11.12 激励信号为阶跃信号时理论临界阻尼状态的响应波形

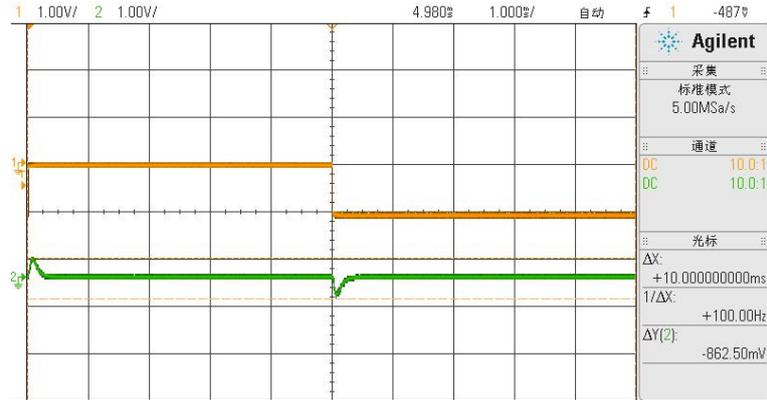


图 2.11.13 激励信号为阶跃信号时理论临界阻尼状态的响应波形

输入阶跃信号时，实际临界阻尼时阻值为： $R = 5.498K\Omega$ 。输入冲激信号时，实际临界阻尼时阻值为： $R = 5.498K\Omega$ 。

2.12 二阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验

2.12.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握二阶电路的零输入响应、零状态响应的规律和特点;
- (2) 理解和掌握零输入响应、零状态响应及完全响应;
- (3) 理解欠阻尼、临界阻尼、过阻尼的意义;
- (4) 了解电路元件参数对二阶电路零输入响应、零状态响应的影响。

2. 实验任务

- (1) 搭建二阶 RLC 零输入响应、零状态响应电路;
- (2) 观察并记录电路的零输入响应、零状态响应及全响应波形;
- (3) 改变二阶 RLC 串联电路的参数, 观察并记录各参数变化对应的响应波形的影响。

2.12.2 实验原理

1. 二阶电路

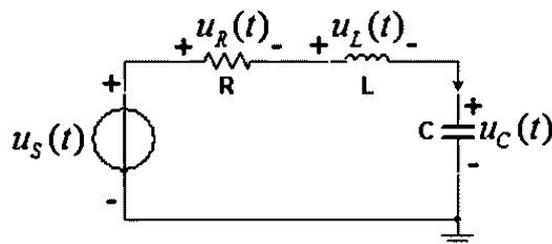


图 2.12.1 二阶 RLC 串联电路

用微分方程表示二阶 RLC 串联电路:

$$\frac{d^2 u_C(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_C(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_C(t) = 0$$

定义衰减系数(阻尼系数) $\alpha = \frac{R}{2L}$, 谐振角频率为 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。

其特征根方程为:

$$S^2 + 2\alpha S + \omega_0^2 = 0$$

特征根为: $S_1 = -\alpha + \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$, $S_2 = -\alpha - \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$ 。

2. 零输入响应

动态电路在没有外施激励时, 由动态元件的初始储能引起的响应, 称为零输入响应。

(1) 当 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 方程有两个互异负实根, 响应是非振荡性的, 称为过阻尼情况。此时:

$$u_c(t) = A_1 e^{S_1 t} + A_2 e^{S_2 t}$$

代入初值: $u_c(0_+) = U_0, \frac{du_c(t)}{dt}|_{t=0_+} = 0$, 得:

$$\begin{cases} A_1 + A_2 = U_0 \\ S_1 A_1 + S_2 A_2 = 0 \end{cases}$$

联立阶得:

$$\begin{cases} A_1 = \frac{S_2 U_0}{S_2 - S_1} \\ A_2 = \frac{S_1 U_0}{S_2 - S_1} \end{cases}$$

$$\therefore u_c(t) = \frac{U_0}{S_2 - S_1} (S_2 e^{S_1 t} - S_1 e^{S_2 t})$$

此时, 电容两端的电压 u_c 响应曲线如图 2.12.2 所示。

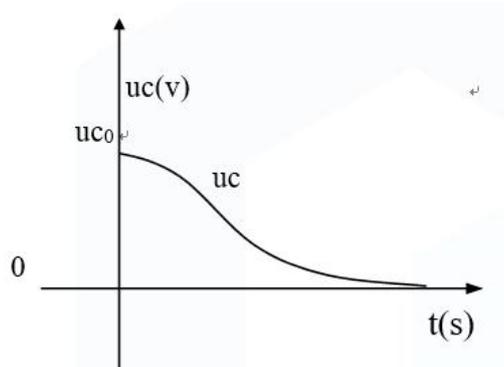


图 2.12.2 非振荡放电(过阻尼)

(2) 当 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 方程有两个相等负实根, 响应是临界振荡, 称为临界阻尼情况。此时:

$$\begin{cases} S_1 = S_2 = -\alpha = -\frac{R}{2L} \\ u_c(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\alpha t} \end{cases}$$

代入初值, 解得:

$$\begin{cases} A_1 = U_0 \\ A_2 = \alpha U_0 \end{cases}$$

$$u_c(t) = U_0(1 + \alpha t) e^{-\alpha t}$$

此时, 电容两端的电压 u_c 响应曲线与过阻尼情况类似, 如图 2.12.3 所示。

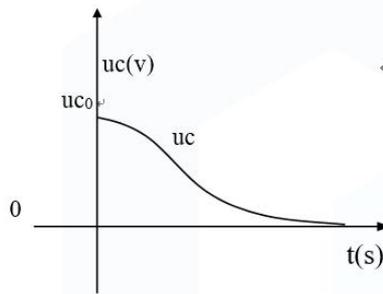


图 2.12.3 非振荡放电(临界阻尼)

(3) 当 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时, 方程有两个共轭负根, 响应式振荡性的, 称为欠阻尼情况。

此时:

$$S_{1, 2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

电路固有振荡频率为 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$, 其中衰减系数(阻尼系数) $\alpha = \frac{R}{2L}$, 谐振角频率为 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。三者之间的关系为:

$$\begin{cases} \omega = \omega_0 \sin \beta \\ \alpha = \omega_0 \cos \beta \end{cases}$$

此时:

$$\begin{cases} S_1 = -\alpha + j\omega = -\omega_0 \cos \beta + j\omega_0 \sin \beta = -\omega_0 e^{-j\beta} \\ S_2 = -\alpha - j\omega = -\omega_0 \cos \beta - j\omega_0 \sin \beta = -\omega_0 e^{j\beta} \end{cases}$$

所以:

$$\begin{aligned} u_c(t) &= \frac{U_0}{S_2 - S_1} (S_2 e^{S_1 t} - S_1 e^{S_2 t}) \\ &= \frac{U_0}{-j2\omega} [-\omega_0 e^{j\beta} e^{(-\alpha + j\omega)t} + \omega_0 e^{-j\beta} e^{(-\alpha - j\omega)t}] \\ &= \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\alpha t} \left[\frac{e^{j(\omega t + \beta)} - e^{-j(\omega t + \beta)}}{j2} \right] \\ &= \frac{U_0 \omega_0}{\omega} e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \beta) \end{aligned}$$

此时, 电容两端的电压 u_c 响应曲线如图 2.12.4 所示。

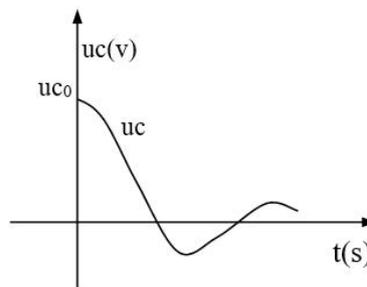


图 2.12.4 衰减振荡放电(欠阻尼)

3. 零状态响应

动态电路动态元件的初始无储能时, 由外施激励引起的响应, 称为零状态响应。

电路的微分方程为:

$$\frac{d^2 u_c(t)}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_c(t)}{dt} + \frac{1}{LC} u_c(t) = \frac{1}{LC} U_s$$

其特征根方程为:

$$S^2 + 2\alpha S + \omega_0^2 = 0$$

特解:

$$u_c'(t) = U_s$$

$u_c(t)$ 解答形式为:

$$\begin{cases} u_c(t) = U_s + A_1 e^{S_1 t} + A_2 e^{S_2 t}, & (S_1 \neq S_2) \\ u_c(t) = U_s + (A_1 + A_2 t) e^{-\alpha t}, & (S_1 = S_2 = -\alpha) \\ u_c(t) = U_s + A e^{-\alpha t} \sin(\omega t + \beta), & (S_{1,2} = -\alpha \pm j\omega) \end{cases}$$

由初值 $u_c(0_+) = 0$, $\frac{du_c(0_+)}{dt} = U_s$ 确定两个常数。

4. 实验所用二阶电路图

本实验所使用的二阶电路如图 2.12.5 所示, 其中 $R_1 = R_2 = 30K\Omega$, $L = 100mH$, $C = 47\mu F$ 。

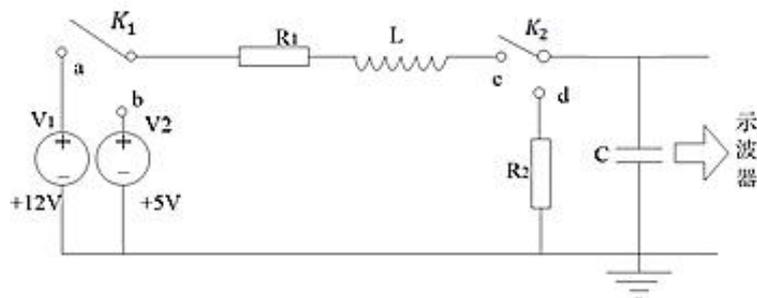


图 2.12.5 二阶电路实验图

2.12.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台 (含信号源单元、扩展单元) 1 台。
2. 实验导线。
3. 数字示波器 1 台。

2.12.4 实验步骤

1. 使用实验箱的扩展模块搭建如图 2.12.5 所示的电路。图 2.12.6 为本实验绘制的连接示意图，为了确保输入信号便于控制，这里将 4 个拨码开关都进行了使用。实验接线完成后即可让实验平台上电。

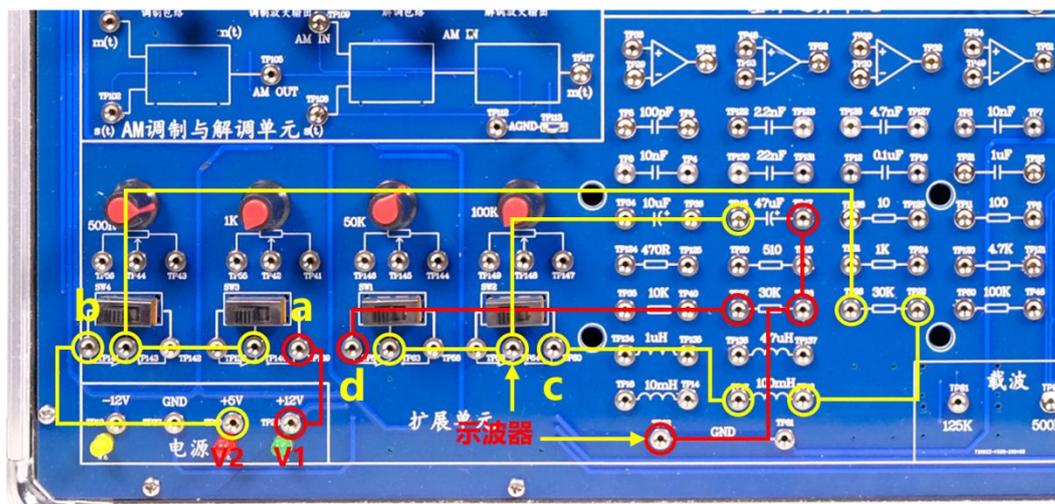


图 2.12.6 实验接线示意图

2. 使用示波器通道 1 (或通道 2) 接电路的输出端 (即图 2.9.7 所示电路中电容 C 的正极), 将示波器的扫描时间调大 (参考时间为: 1.000s/格, 即调节示波器的水平设置旋钮)。

3. 观察电路的零输入响应。将图 2.12.5 所示电路中的开关 K_1 置于 a 端 (SW3、SW4 置于水平右侧), 开关 K_2 置于 c 端 (SW1、SW2 置于水平右侧), 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 K_2 拨至 d 端 (SW1、SW2 置于水平左侧), 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。

4. 观察电路的零状态响应。将图 2.12.5 所示电路中的开关 K_1 置于 b 端 (SW3、SW4 置于水平左侧), 开关 K_2 置于 d 端 (SW1、SW2 置于水平左侧), 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 K_2 拨至 c 端 (SW1、SW2 置于水平右侧), 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。

5. 观察电路的完全响应。将图 2.12.5 所示电路中的开关 K_1 置于 a 端 (SW3、SW4 置于水平右侧), 开关 K_2 置于 c 端 (SW1、SW2 置于水平右侧), 待示波器的光点回到起始位置后, 将开关 K_1 拨至 b 端 (SW3、SW4 置于水平左侧), 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。

6. 将 V_1 与 V_2 互换即取 $V_1 = 5V$, $V_2 = 12V$, 重复步骤 2~5。

7. 尝试改变元件参数, 重复实验步骤 2~6, 观察记录所测得的波形图。
8. 将交流电源作为信源信号, 重做该实验。

2.12.5 实验结果

搭建二阶响应电路, 观察响应输出。

(1) 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的零输入响应如图 2.12.7 所示。

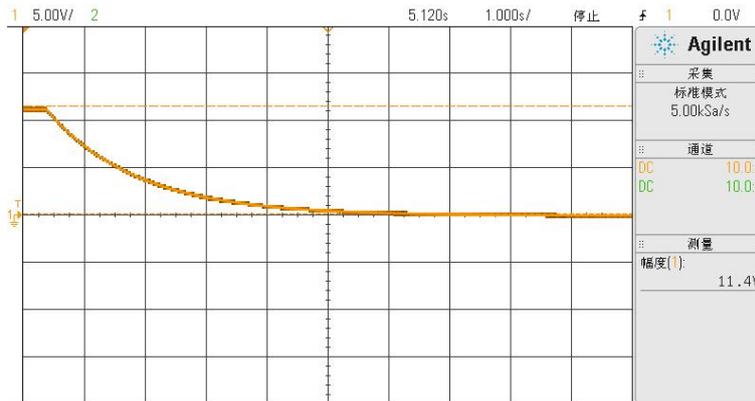


图 2.12.7 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 零输入响应波形图

(2) 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的零状态响应如图 2.12.8 所示。

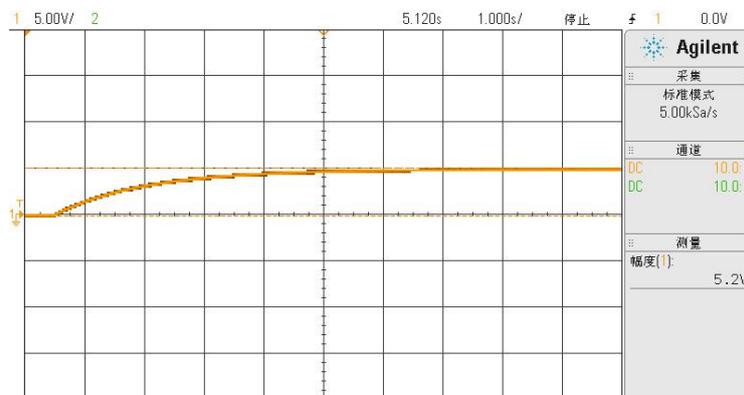


图 2.12.8 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 零状态响应波形图

(3) 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的全响应如图 2.12.9 所示。

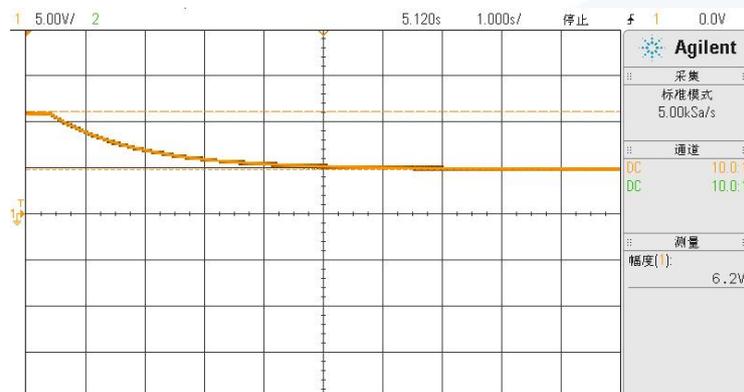


图 2.12.9 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 全响应波形图

(4) 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的零输入响应如图 2.12.10 所示。

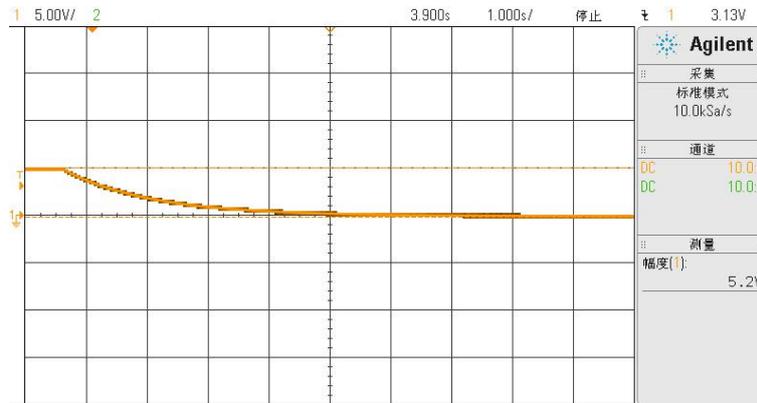


图 2.12.10 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 零输入响应波形图

(5) 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的零状态响应如图 2.12.11 所示。

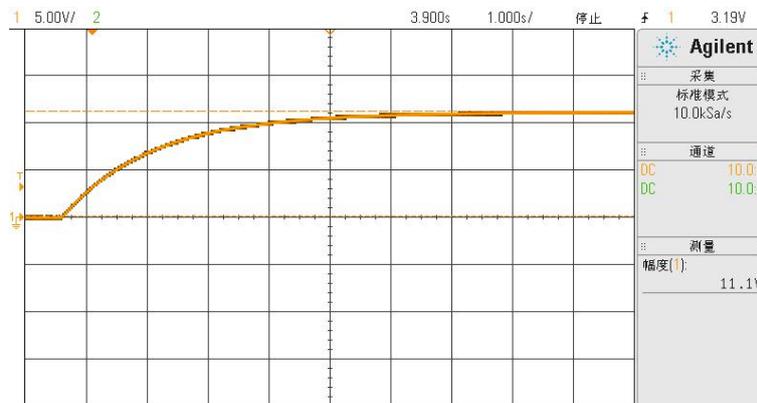


图 2.12.11 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 零状态响应波形图

(6) 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的全响应如图 2.12.12 所示。

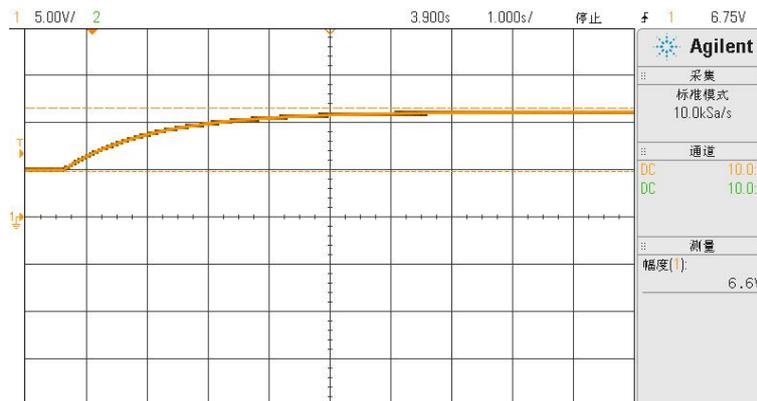


图 2.12.12 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 全响应波形图

2.13 二阶网络函数的模拟幅度调制与解调实验

2.13.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握幅度调制以及对应解调的原理及方法;
- (2) 了解信号调制与解调过程中波形和频谱的变化。

2. 实验任务

- (1) 学习 AM 调制以及对应解调的原理;
- (2) 使用示波器观察并记录调制与解调过程中的波形和频谱的变化;
- (3) 掌握幅度调制与解调的过程。

2.13.2 实验原理

1. 幅度调制

所谓调制,就是将要传送信号装载到某一高频信号上的过程,高频信号就是携带信号的运载工具,也叫载波。载波仅是用来搭载原始信号的高频信号,本身不含任何有用信息。经过调制后的高频信号为一条信号。

根据载波受调制参量的不同,调制可分为三种基本方式:振幅调制 AM(调幅)、频率调制 FM(调频)、相位调制 PM(调相)。

所谓的振幅调制(AM),就是用调制信号控制高频载波信号的振幅,使载波信号的振幅按照调制信号的规律变化,但是频率保持不变,即已调制信号变化的周期与调制信号的周期一致且幅度的变化与调制信号的振幅成正比。

根据 AM 信号的原理,调制器的一般模型如图 2.13.1 所示。

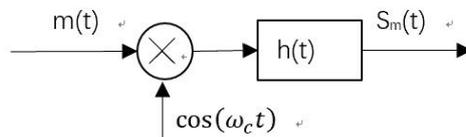


图 2.13.1 幅度调制器的一般模型

图中, $m(t)$ 为调制信号, $S_m(t)$ 为已调信号, $h(t)$ 为滤波器的冲激响应,则已调信号的时域和频域的一般表达式为:

$$\begin{cases} S_m(t) = [m(t) \cos(\omega_c t)] * h(t) \\ S_m(\omega) = \frac{1}{2} [M(\omega + \omega_c) + M(\omega - \omega_c)] H(\omega) \end{cases}$$

式中, $M(\omega)$ 为调制信号 $m(t)$ 的频谱, $H(\omega)$ 对应 $h(t)$, ω_c 为载波角频率。

由以上表达式可见,对于幅度调制信号,在波形上,它的幅度随基带信号规律而变化;在频谱结构上,它的频谱完全是基带信号频谱在频域内的简单搬移。

如图 2.13.1 所示的一般模型中,适当选择滤波器的特性,便可得到各种幅度调制信号,例如:常规双边带调幅(AM)、抑制载波双边带调幅(DSB-SC)、单边带调制(SSB)和残留边带调制(VSB)信号等

幅度调制的一般波形如图 2.13.2 所示,图中 $S_m(t)$ 最大值连成的光滑曲线(图中的所示的虚线)称为上包络,将 $S_m(t)$ 最小值连成的光滑曲线称为下包络,由图中 AM 调制过程波形可得,其振幅(包络)变化规律与调制信号波形一致,且其调幅度 m 反映了载波振幅受控制的强弱程度。 m 是调幅波的主要参数之一,它表示载波电压振幅受调制信号控制后改变的程度。

$$m = K_a \frac{V_m}{V_c}$$

式中, K_a 为由调制电路决定的比例常数, V_m 为调制信号的振幅, V_c 为载波信号的振幅。当 $m = 0$ 时,表示未调幅;当 $m = 1$ 时,调幅达到最大(百分百调幅); $m > 1$ 时,为调幅,包络失真。

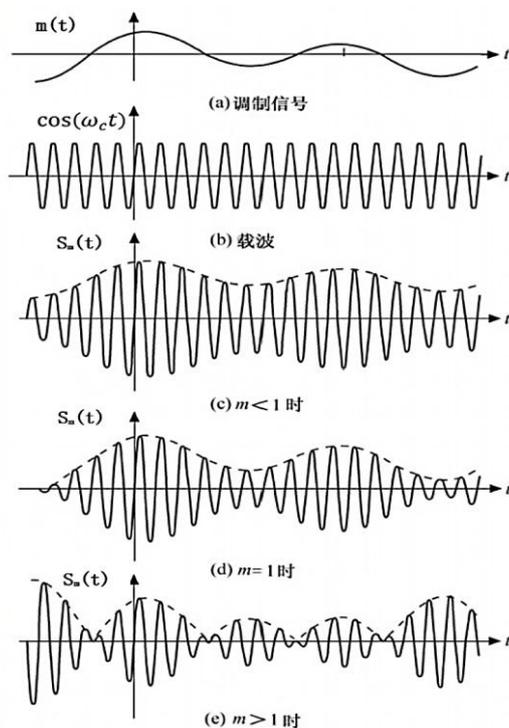


图 2.13.2 AM 调制过程波形图

在实验中,为方便观察实验现象,通常做全载波调幅,即能观察到已调信号的上下包络,通常调制信号 $m(t)$ 需要加上一个直流分量 A_0 。其调制波形图和频谱图如图 2.13.3

所示。此时已调信号为:

$$S_m(t) = [A_0 + m(t) \cos(\omega_c t)] * h(t)$$

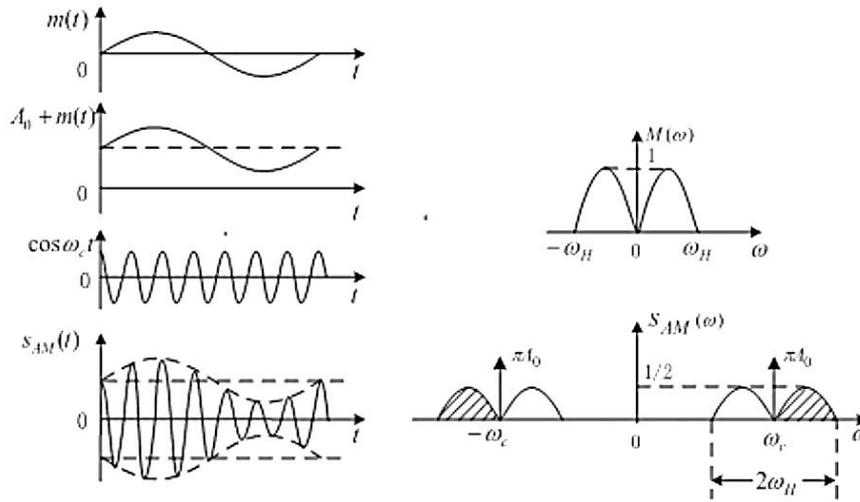


图 2.13.3 AM 调制过程波形图及频谱图

2. 解调

解调过程实际上就是调制过程的反过程。振幅调制的解调被称为检波，其作用是从调幅波中不失真地检出调制信号。解调方法可以分为相干解调和非相干解调。常用的非相干解调方法为包络检波法。

(1) 包络检波：利用普通调幅信号的包络反映调制信号波形变化这一特点，如能将包络提取出来，就可以恢复原来的调制信号。

包络检波的原理是采用二极管进行单向过滤后再进行低通滤波。没有二极管而直接进行低通滤波的话，会使正、负包络线抵消，从而检不出低频信号。除了包络检波，还有频偏（调频）检波，相移（或相位）检波等等。

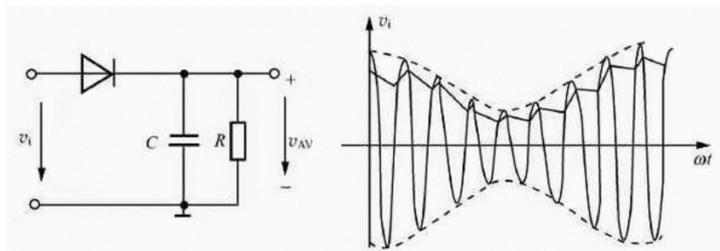


图 2.13.4 包络检波原理

(2) 相干解调

也叫同步检波，它适用于所有线性调制信号的解调。实现相干解调的关键是接收端要恢复出一个与调制载波严格同步的相干载波。

所谓相干，泛泛地说就是相互干扰。相干解调是指利用乘法器，载波信号与已调信

号相乘,再经过低通滤波器将调制信号恢复出来。

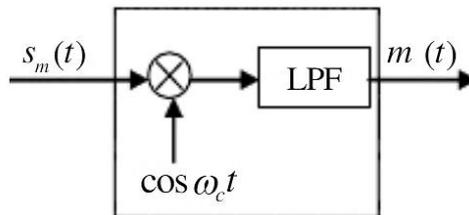


图 2.13.5 相干解调原理

调幅信号为:

$$S_m(t) = [A_0 + m(t) \cos(\omega_c t)] * h(t)$$

解调后信号为:

$$m(t) = \frac{1}{2} [A_0 + m(t) \cos(2\omega_c t)]$$

本实验采用的是相干解调法。

2.13.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台(含信号源单元、AM调制与解调单元)1台。
2. 实验导线若根。
3. 数字示波器1台。

2.13.4 实验步骤

1. 使用多功能综合信号源单元CH1通道输出一路10KHz的正弦波作调制信号,CH2通道输出一路100KHz的正弦波作载波信号,分别接至AM调制与解调单元的 $m(t)$ 和 $s(t)$ 端。

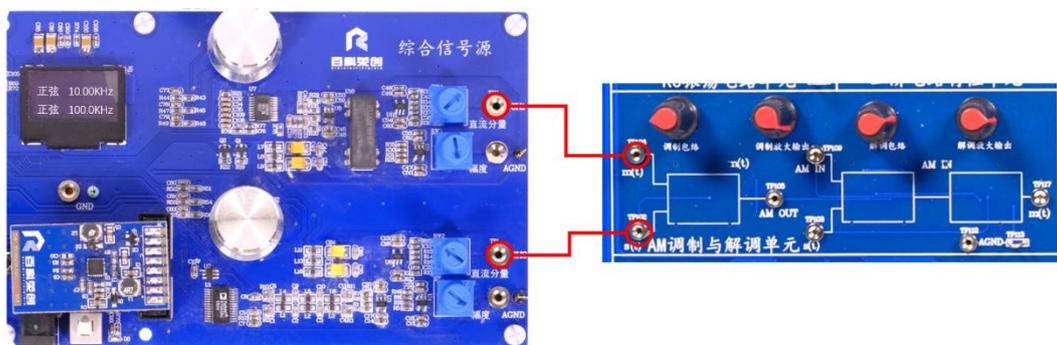


图 2.13.6 输入信号接线

2. 使用示波器的通道1接调制信号(即 $m(t)$ 端),通道2接调制输出端(即已调信号AM_OUT端)。
3. 调节调制包络旋钮,可以调节已调信号的包络,观察记录其波形。调节调制放大

输出旋钮可以调节已调信号的幅度大小。

4. 将已调信号 AM_OUT 连接至解调的输入端(即 AM_IN 端), 载波信号连接至解调的 $s(t)$ 端。

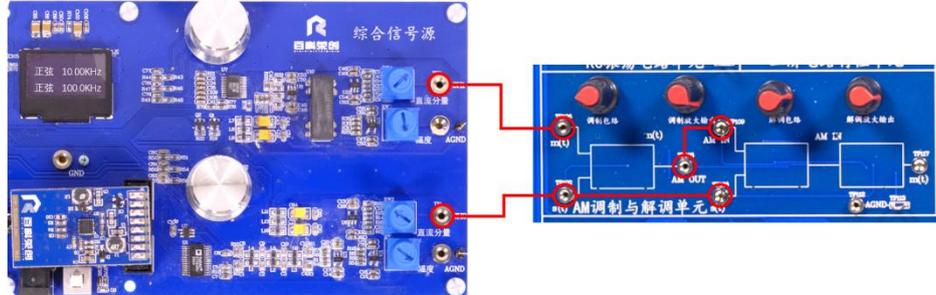


图 2.13.7 调制信号进行解调

5. 使用示波器的通道 1 接 AM_IN 端, 通道 2 接调制输出端解调信号的 $m(t)$ 端, 观察记包络不同状态时的解调信号波形, 调节解调包络旋钮可以调节解调信号的失真度, 调节放大输出的旋钮可以调节解调信号的幅值。

2.13.5 实验结果

1. 频率为 10KHz 的调制信号和 100KH 载波信号, 其幅值均为 2.5V, 如图 2.13.8 所示。

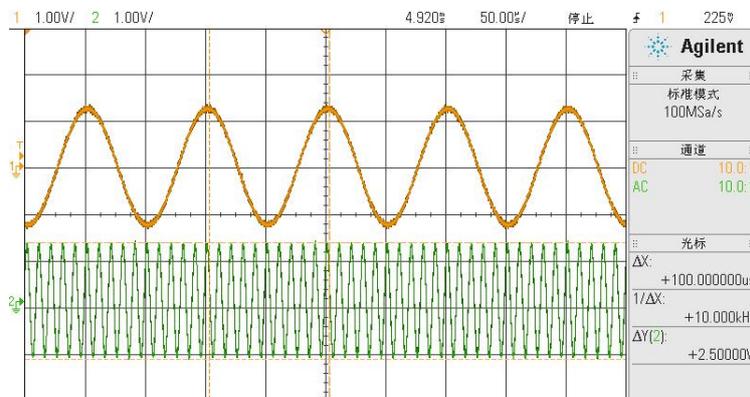


图 2.13.8 10KHz 的调制信号和 100KH 载波信号

2. 不同包络状态的调制信号。

(1) $0 < m < 1$ 时, 调制信号如图 2.13.9 所示。

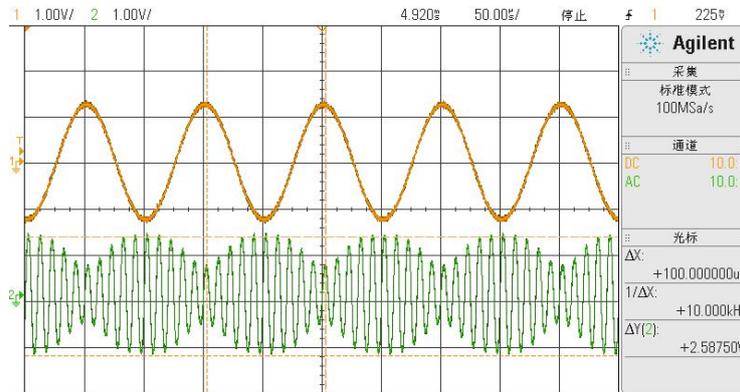


图 2.13.9 $0 < m < 1$

(2) $m = 1$ 时, 调制信号如图 2.13.10 所示。

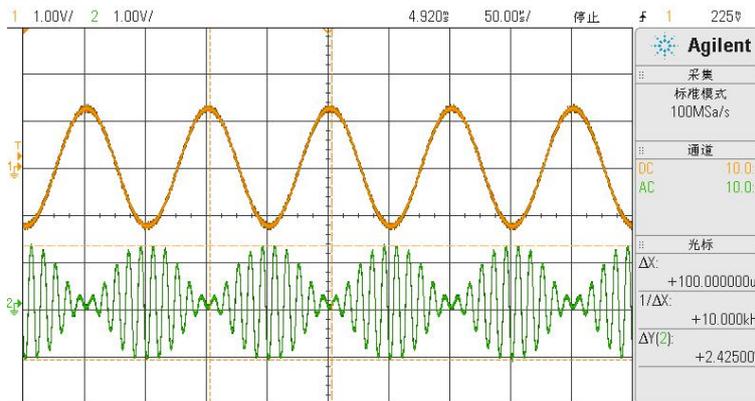


图 2.13.10 $m = 1$

(3) $m > 1$ 时, 调制信号如图 2.13.11 所示。

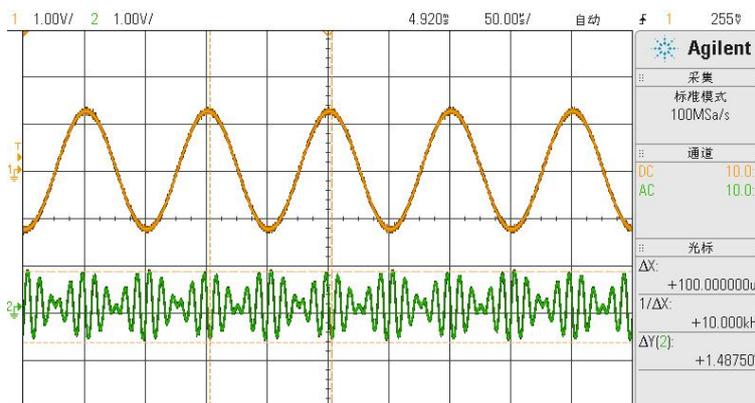


图 2.13.11 $m > 1$

3. 调制信号的包络在不同状态时的解调信号。

(1) $0 < m < 1$ 时，解调信号如图 2.13.12 所示。

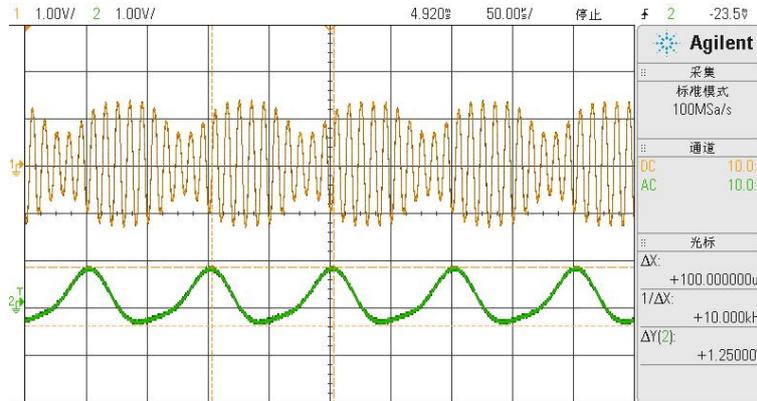


图 2.13.12 $0 < m < 1$

(2) $m = 1$ 时，解调信号如图 2.13.13 所示。

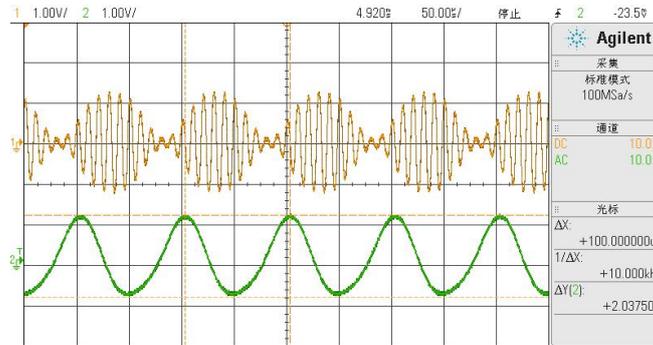


图 2.13.13 $m = 1$

(3) $m > 1$ 时，解调信号如图 2.13.14 所示。

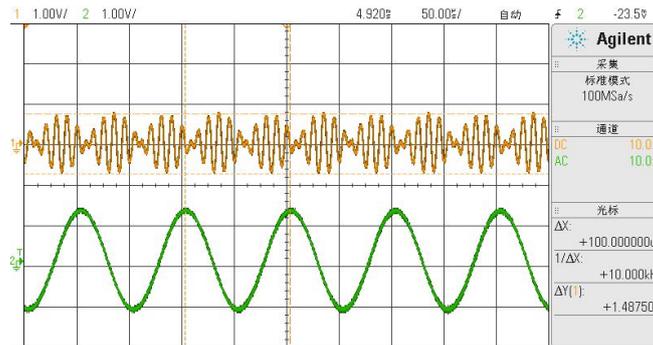


图 2.13.14 $m > 1$

2.14 抽样定理与信号恢复实验

2.14.1 实验分析

1.实验目的

- (1) 了解电信号的采样方法与过程以及信号的恢复的方法;
- (2) 验证抽样定理;
- (3) 学会使用示波器观察信号采样过程。

2.实验任务

使用示波器观察并记录信号采集的过程波形。

2.14.2 实验原理

采样是将一个信号(即时间或空间上的连续函数)转换成一个数值序列(即时间或空间上的离散函数)。采样得到的离散信号经保持器后,得到的是阶梯信号,即具有零阶保持器的特性。如果信号是带限的,并且采样频率高于信号最高频率的一倍,那么,原来的连续信号可以从采样样本中完全重建出来。带限信号变换的快慢受到它的最高频率分量的限制,也就是说它的离散时刻采样表现信号细节的能力是非常有限的。采样定理是指,如果信号带宽小于奈奎斯特频率(即采样频率的二分之一),那么此时这些离散的采样点能够完全表示原信号。高于或处于奈奎斯特频率的频率分量会导致混叠现象。大多数应用都要求避免混叠,混叠问题的严重程度与这些混叠频率分量的相对强度有关。

采样过程所应遵循的规律,又称取样定理、抽样定理。采样定理说明采样频率与信号频谱之间的关系,是连续信号离散化的基本依据。

离散时间信号可以从离散信号源获得,也可以从连续时间信号经抽样而获得。抽样信号 $f_s(t)$ 可以看成连续信号 $f(t)$ 和一组开关函数 $s(t)$ 的乘积。即:

$$f_s(t) = f(t) \times s(t)$$

图 2.14.1 所示为对连续时间信号进行抽样过程,其中 $s(t)$ 为开关函数, T_s 为采样周期,其倒数 $f_s = 1/T_s$ 称为抽样频率。

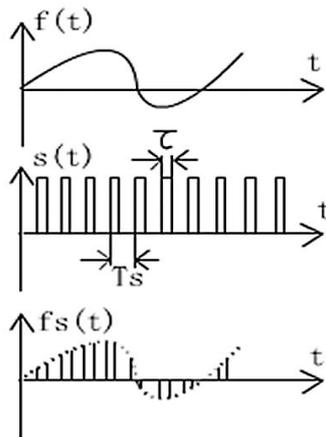
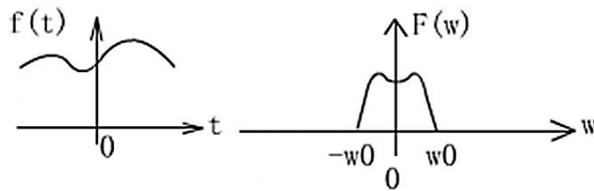


图 2.14.1 对连续时间信号进行抽样

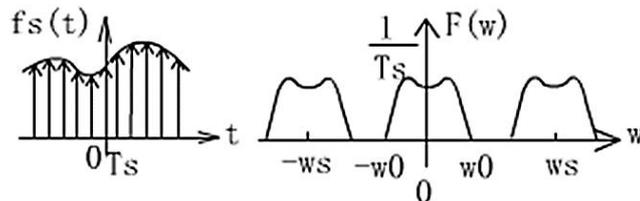
对抽样信号进行傅里叶分析可知，抽样信号的频谱包含了原连续信号以及无限多个经过平移的原信号频谱。平移后的频率等于抽样频率 f_s 及其各次谐波频率 $2f_s, 3f_s, 4f_s, 5f_s, \dots$ 。

当抽样信号是周期性窄脉冲时，平移后的频谱幅度按 $\frac{\sin x}{x}$ 规律衰减。抽样信号的频谱是原信号频谱周期性的延拓，它占有的频带要比原信号频谱宽得多。

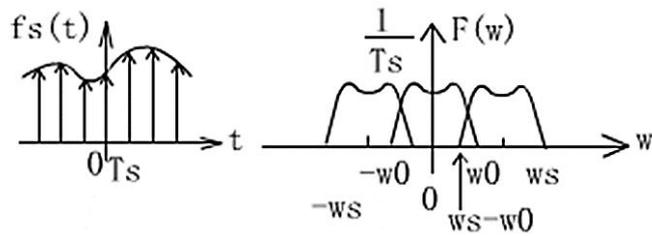
正如测到了足够的实验数据以后，我们可以在坐标纸上把一系列数据点连接起来，得到一条光滑的曲线一样，抽样信号在一定条件下也可以恢复到原信号。只要用一截止频率等于原信号频谱中最高频率 f_{max} 的低通滤波器，滤除高频分量，经滤波后得到的信号包含了原信号频谱的全部内容，故在低通滤波器的输出可以得到恢复后的原信号。



(a)连续信号的频谱



(b)高抽样频率时的抽样信号及频谱（不混叠）



(c)低频抽样频率时的抽样信号及频谱(混叠)

图 2.14.2 冲激抽样信号的频谱图

信号得以恢复的条件是 $f_s > 2B$ ，其中 f_s 为抽样频率， B 为原信号占有的频带宽度。而 $f_{min} = 2B$ 为最低的抽样频率，又称为“奈奎斯特抽样率”。当 $f_s < 2B$ 时，抽样信号的频谱会发生混叠，从发生混叠后的频谱中，我们无法用低通滤波器获得原信号频谱的全部内容。在实际使用中，仅包含有限频谱的信号是极少的，因此即使 $f_s = 2B$ ，恢复后的信号失真还是难免的。

实验中选用 $f_s < 2B$ 、 $f_s = 2B$ 、 $f_s > 2B$ 三种情况抽样频率对连续信号进行抽样，以验证抽样定理——要使信号采样后能不失真地还原，抽样频率 f_s 必须大于信号频率中最高频率的两倍即 $f_s > 2f_{min}$ 。

为了实现对连续信号的抽样和抽样信号的复原，可用如图 2.14.3 所示的实验原理框图方案。除选用足够高的抽样频率外，常采用前置低通滤波器来防止原信号频谱过宽而造成抽样后信号频谱的混叠。但这也会造成失真。如实验选用的信号频带较窄，则可不设置低通滤波器。本实验就是如此。

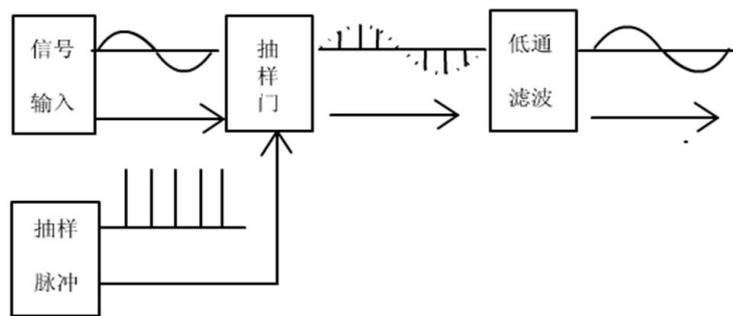


图 2.14.3 抽样定理实验方框图

2.14.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台(含信号源单元、抽样定理单元) 1 台。
2. 实验导线若干。
3. 数字示波器 1 台。

2.14.4 实验步骤

1. 多功能综合信号源单元 CH1 通道产生一路频率为 100Hz、峰峰值为 3.5V 的正弦波信号做被抽样信号。CH2 通道输出频率为 1KHz、峰峰值为 5V 的方波信号做抽样脉冲信号（方波信号的最小值为 0，最大值为 5V）。

2. 示波器通道 1 观察被抽样信号，示波器通道 2 观察抽样信号，并记录其波形。

3. 先将抽样信号输入低通滤波器，滤除其中存在的高频信号。

4. 将低通滤波器的输出输入值抽样定理单元被抽样信号中，最后在调制后的信号输入置解调电路中，如图 2.14.4 所示。

5. 示波器通道 1 观察抽样信号，示波器通道 2 观察还原信号，调节通带调节旋钮可以调节低通滤波器的通频带，调节输出幅度调节旋钮可以调节还原信号的幅值。

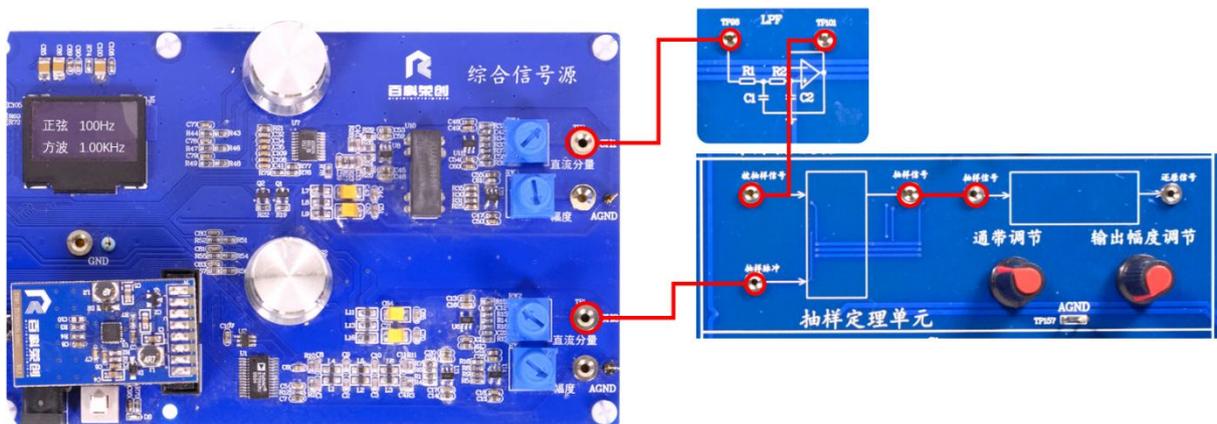


图 2.14.4 实验接线示意图

6. 改变抽样脉冲的频率为 10KHz，重复以上步骤。

2.14.5 实验结果

1. 被抽样信号为频率 100Hz、峰峰值为 3.5V 的正弦波信号，抽样脉冲为频率 1KHz、峰峰值为 5V 的方波信号。

(1) 被抽样信号与抽样脉冲。

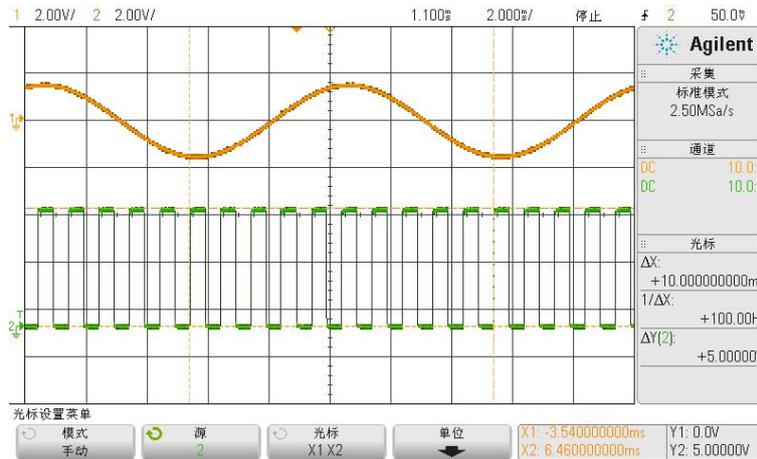


图 2.14.5 被抽样信号与抽样脉冲

(2) 被抽样信号与抽样信号

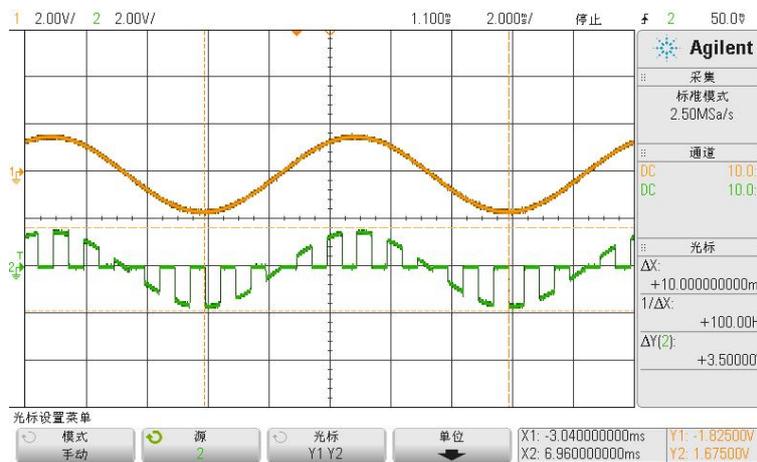


图 2.14.6 被抽样信号与抽样信号

(3) 抽样信号与还原信号

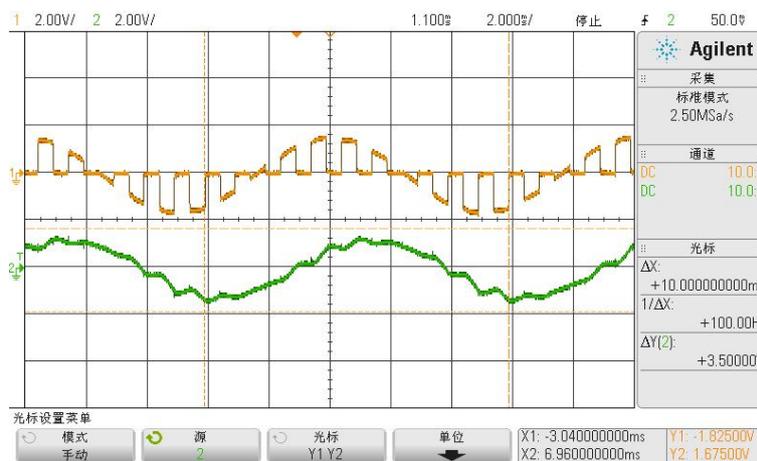


图 2.14.7 抽样信号与还原信号

还原信号与被抽样信号的误差，是因为低通滤波器没有将 1KHz 的抽样脉冲信号没有滤干净导致的。

2. 抽样脉冲频率改为 10KHz。

(1) 被抽样信号与抽样脉冲

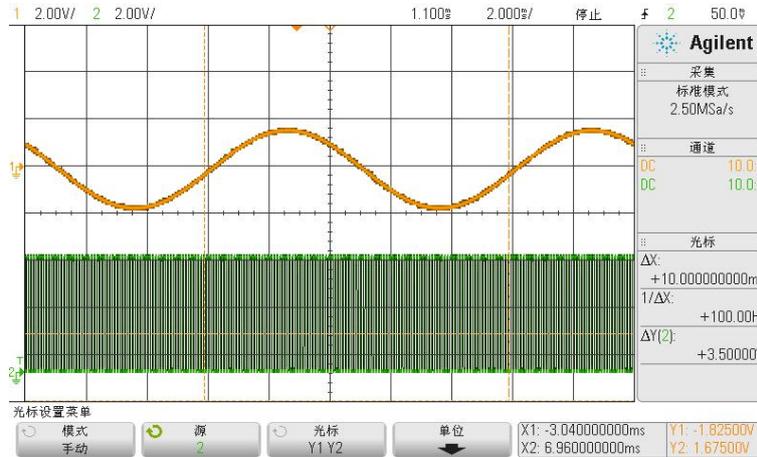


图 2.14.8 被抽样信号与抽样脉冲

(2) 被抽样信号与抽样信号

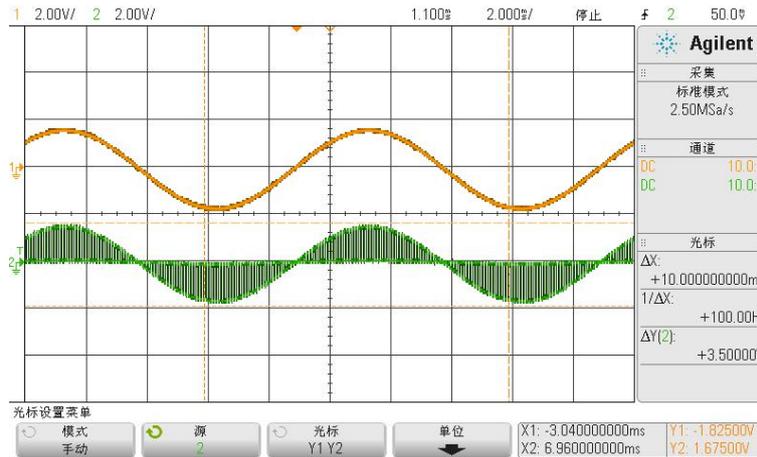


图 2.14.9 被抽样信号与抽样信号

(3) 抽样信号与还原信号

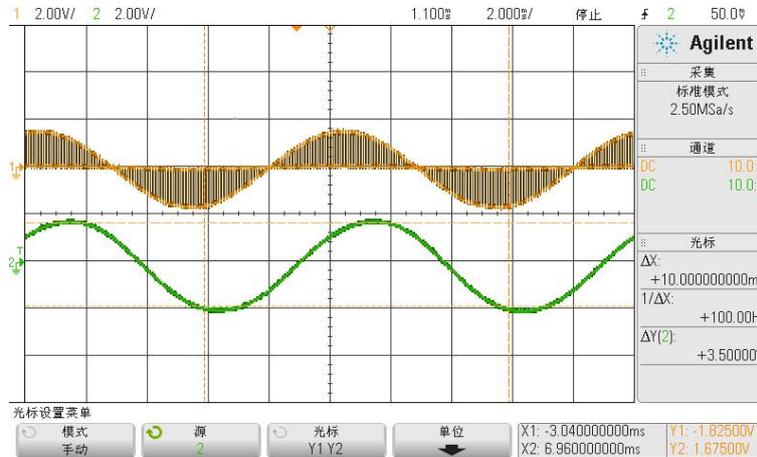


图 2.14.10 抽样信号与还原信号

2.15 RC 振荡器特性测量实验

2.15.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握桥式 RC 正弦波振荡器的电路构成及工作原理;
- (2) 熟悉正弦波振荡器的调整、测试方法;
- (3) 观察 RC 参数对振荡频率的影响, 学习振荡频率的测定方法。

2. 实验任务

- (1) 根据实验电路, 计算 RC 振荡电路的振荡频率;
- (2) 使用示波器观测 RC 振荡电路的振荡频率, 与理论值作比较;
- (3) 调节电路参数, 观察并记录电路振荡现象。

2.15.2 实验原理

1. 正弦振荡电路

正弦振荡电路是在没有外加信号的情况下, 依靠电路自激振荡而产生一定频率和幅值的正弦波输出电压的电路。它的频率范围很广, 可以从一赫以下到几百兆以上, 输出功率可以从几毫瓦到几十千瓦, 被广泛地应用于测量、遥控、通讯、自动控制、热处理和超声波电焊等加工设备之中, 也作为模拟电子电路的测试信号。

正弦振荡电路的组成:

- (1) 放大电路: 保证电路能够有从起振到动态平衡的过程, 使电路获得一定幅值的输出量;
- (2) 反馈网络: 正反馈网络, 使放大电路的输入信号等于反馈信号;
- (3) 选频网络: 确定电路的振荡频率, 使电路产生单一频率的振荡, 即保证电路产生正弦波振荡;
- (4) 稳幅环节: 使电路能从 $|A_u F| > 1$, 过渡到 $|A_u F| = 1$, 从而达到稳幅振荡。

正弦振荡电路常用选频网络所用的元件来命名, 分为 LC 振荡电路、RC 振荡电路和石英晶体正弦振荡电路三种类型。LC 振荡电路的输出功率大、频率高, 振荡频率多在 1MHz 以上; RC 振荡电路的输出功率小、频率低, 一般振荡频率在 1MHz 以下; 石英晶体正弦振荡电路也可等效于 LC 正弦振荡电路, 其特点是振荡频率非常稳定。

2. 自激振荡

自激振荡即放大电路在无输入信号的情况下,就能输出一定频率和幅值的交流信号。

图 2.15.1 为一放大电路的示意图,图中开关合在“1”处时,该电路为无反馈放大电路。此时, $\dot{U}_o = A_u \dot{U}_i$ 。当开关合在“2”处时,该电路为有反馈放大电路,此时, $\dot{U}_o = A_u \dot{U}_f$, 且任有稳定输出,则表示该电路处于自激振荡状态。

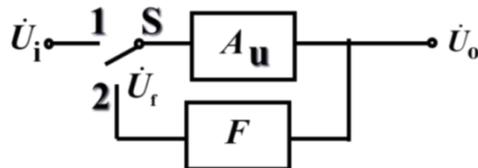


图 2.15.1 放大电路

当开关合在“2”处,电路处于自激振荡状态时:

$$\begin{cases} \dot{U}_o = A_u \dot{U}_f \\ \dot{U}_f = F \dot{U}_o \\ \dot{U}_o = A_u F \dot{U}_o \end{cases}$$

由以上公式可得自激振荡的条件为 $A_u F = 1$, 即 $|A_u| \angle \varphi_A \cdot |F| \angle \varphi_F = 1$, 因此得出以下两个条件。

(1) 幅度条件: $|A_u F| = 1$ 。表明反馈放大器要产生自激振荡,还必须有足够的反馈量(可以通过调整放大倍数 A 或反馈系数 F 达到);

(2) 相位条件: $\angle \varphi_A + \angle \varphi_F = \pm 2n\pi$, n 为整数。意味着振荡电路必须是正反馈。

为了使输出量在合闸后能有一个从小到大直至平衡在一定幅度的过程,电路的起振条件为 $|A_u F| > 1$ 。电路从 $|A_u F| > 1$ 过渡到 $|A_u F| = 1$ 过程,即自激振荡建立的过程。

设: U_o 是振荡电路输出电压的幅度, B 是要求达到的输出电压幅度。起振时 $U_o = 0$, 达到稳定振荡时 $U_o = B$ 。

起振过程中: $U_o < B$, 要求 $|A_u F| > 1$, 可使输出电压的幅度不断增大。

稳定振荡时: $U_o = B$, 要求 $|A_u F| = 1$, 使输出电压的幅度得以稳定。

起始信号的产生: 在电源接通时,会在电路中激起一个微小的扰动信号,它是个非正弦信号,含有一系列频率不同的正弦分量。

3. RC桥式振荡电路

RC振荡电路多种多样,其中最具典型性的RC振荡电路为RC桥式振荡电路,也称文氏桥振荡电路。它具有较好的正弦波振荡波形,输出信号幅度稳定,非线性失真小,频率调节范围宽等优点,因此在低频振荡器中获得广泛应用。

RC桥式振荡电路如图 2.15.2 所示, 由一个具有选频作用的RC串联选频网络和一个同相比例放大运算电路组成。负反馈网络的 R_1 、 R_f 以及正反馈网络串联的RC、并联的RC各为一臂构成桥路, 故此得名。

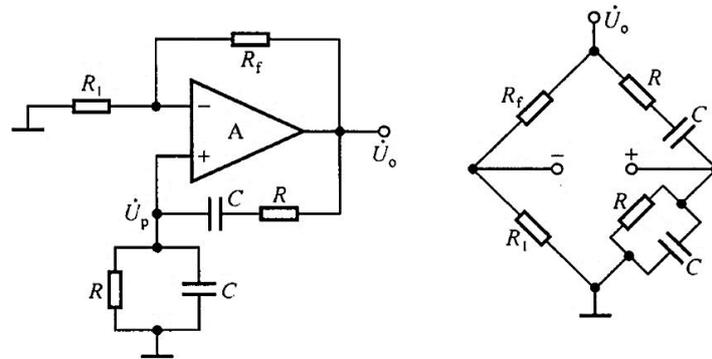


图 2.15.2 RC桥式振荡电路

正反馈网络的反馈电压 \dot{U}_f 是同相比例运算电路的输入电压, 因而要把同相比例运算电路作为整体看成电压放大电路, 它的比例系数是电压放大倍数, 根据起振条件和幅值平衡条件, 电压放大倍数为:

$$\dot{A}_u = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_p} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \geq 3$$

根据上式可知, R_f 的取值要略大于 $2R_1$ 。由于 U_o 与 U_f 具有良好的线性关系, 所以为了稳定输出电压的幅值, 一般应在电路中加入非线性环节。例如, 可选用 R_1 为正温度系数的热敏电阻, 当 U_o 因某种原因而增大时, 流过 R_f 和 R_1 上的电流增大, R_1 上的功耗随之增大, 导致温度升高, 因而 R_1 的阻值增大, 从而使 \dot{A}_u 数值减小, U_o 也就随之减小; 相反 U_o 因某种原因而减小时, R_1 的阻值减小, \dot{A}_u 数值增大, U_o 值增大, 从而使输出的电压稳定。

除此之外, 常用的方法还有在 R_f 回路串联两个并联的二极管, 如图 2.15.3 所示。利用电流增大时二极管动态电阻减小, 电流减小时二极管动态电阻增大的特点, 加入非线性环节, 从而使输出电压稳定。此时比例系数为:

$$\dot{A}_u = 1 + \frac{R_f + r_d}{R_1}$$

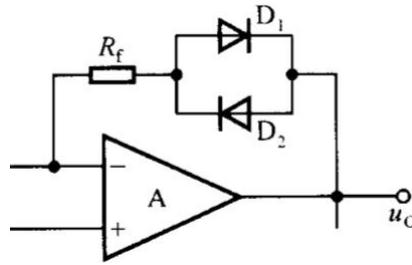


图 2.15.3 利用二极管作为非线性环节

RC桥式振荡电路利用 RC 串并联构成选频网络，其传输系数为：

$$F = \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + \left(R // \frac{1}{j\omega C}\right)}$$

$$= \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)}$$

式中， $\omega_0 = \frac{1}{RC}$ 。分析可知，仅当 $\omega = \omega_0$ 时， $\frac{U_2}{U_1} = \frac{1}{3}$ 达到最大值，且 u_2 与 u_1 同相，即网络具有选频特性，振荡频率 f_0 决定于RC。

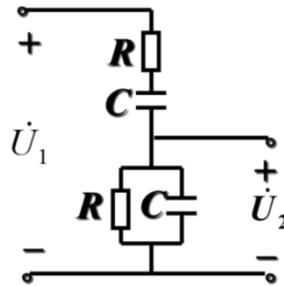


图 2.15.4 RC 串并联选频网络

该选频网络的幅频特性与相频特性如图 2.15.5 所示。

其模 $|\dot{F}|$ 为：

$$|\dot{F}| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

相移为：

$$\varphi_F = \tan^{-1} \left[-\frac{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}}{3} \right]$$

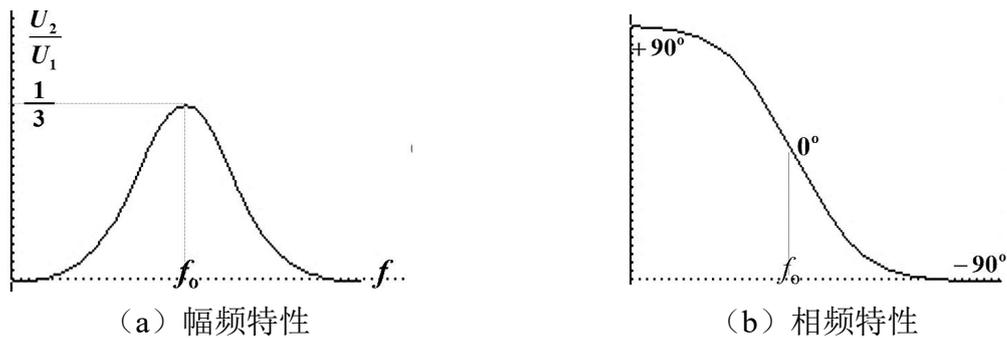


图 2.15.5 幅频特性与相频特性

电路振荡过程中 u_2 与 u_1 波形如图 2.15.6 所示, 稳定振荡后 u_2 与 u_1 波形如图 2.15.7 所示。

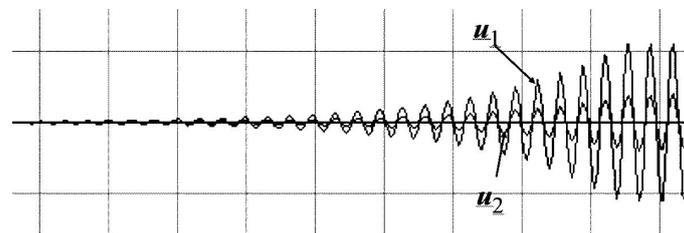


图 2.15.6 起振过程 u_2 与 u_1 波形

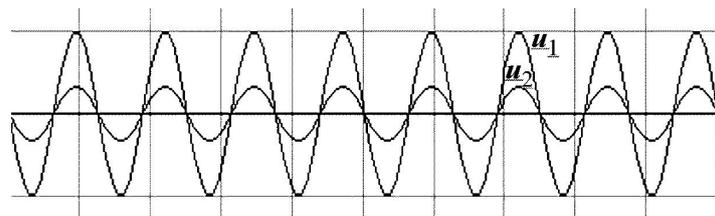


图 2.15.7 振荡稳定后 u_2 与 u_1 波形

2.15.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台(含信号源单元、RC 振荡电路单元) 1 台。
2. 实验导线若干。
3. 数字示波器 1 台。

2.15.4 实验步骤

1. 使用示波器通道接 RC 振荡电路单元的 TP1 处, 示波器通道 2 接 RC 振荡电路单元的 TP2 处。
2. 观察两个通道的波形, 记录波形频率及幅值, 计算电阻值。
3. 旋转双联电位器, 改变振荡频率, 记录波形频率及幅值, 计算对应的电阻值。
4. 使用示波器观察振荡电路输出的信号, 计算其频率。

2.16 频分复用 (FDM) 实验

2.16.1 实验分析

1. 实验目的

- (1) 掌握 AM 调制与解调的工作原理;
- (2) 掌握频分复用的基本原理及实现方法;
- (3) 学会使用示波器观察频分复用信号的波形。

2. 实验任务

- (1) 复习幅度调制解调过程;
- (2) 使用示波器观察并记录频分复用过程的波形。

2.16.2 实验原理

1. 频分复用

频分复用 (简称: FDM) 就是将用于传输信道的总带宽划分成若干个子频带 (或称子信道), 每一个子信道传输 1 路信号, 即多路信号同时在一个信道内传输。所谓频分复用是指按照频率的不同来复用多路信号的方法。在频分复用中, 信道的带宽被分为若干个相互不重叠的频段, 每路信号占用其中一个频段, 因而在接收端可以采用适当的带通滤波器将多路信号分开, 从而恢复出所需要的信号。

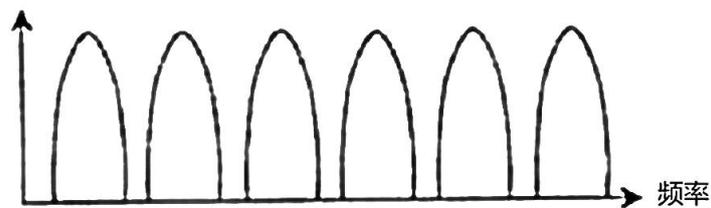


图 2.16.1 频分复用信道划分示意图

根据频分复用的定义可得出以下几个特点:

- (1) 考虑到频分复用的总带宽, 要传送的信号带宽为有限的。
- (2) 频分复用的总带宽要远远大于要传输的信号带宽, 保证能容纳多路频率不同的信号。
- (3) 多路信号采用不同的频率进行调制, 使调制后的各路信号在频率位置上错开, 以达到多路信号同时在一个信道内传输的目的。
- (4) 各路信号是在时间上重叠而在频谱上不重叠的信号。

(5) 所有子信道传输的信号以并行的方式工作。

频分复用系统的原理示意图如图 2.16.2 和图 2.16.3 所示, 图中设有, 各路基带信号需要先通过低通滤波器(LPF)限制基带信号的宽度, 避免频谱出现相互混叠的现象。其次, 各路信号分别对各自的载波进行调制、合成后送入信道传输。在接收端, 分别采用不同中心频率的带通滤波器分离出各路已调信号, 解调后恢复出基带信号。

调制的作用是将各路信号搬移到不同的频率范围。

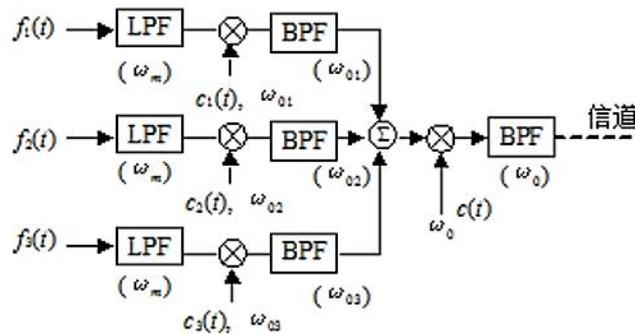


图 2.16.2 频分复用发射端原理示意图

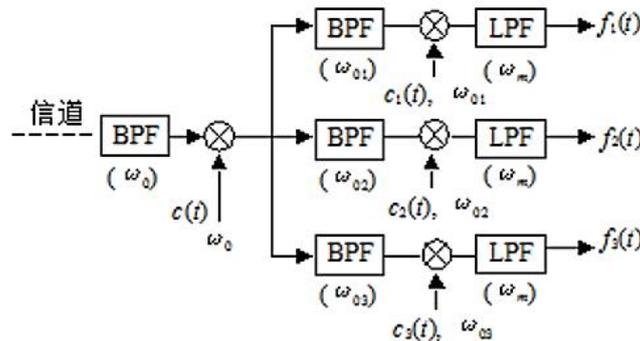


图 2.16.3 频分复用接收端原理示意图

频分复用系统的最大优点是信道复用率高, 允许复用的路数多, 同时它的分路也很方便。因此, 它是模拟通信中最主要的一种复用方式, 例如, 在电话系统中, 传输的语音信号的频谱一般在 300—3400Hz 内。为了使若干个这种信号能在同一信道上传输, 可以使它们的频谱调制到不同的频段, 合并在一起而不至于相互影响, 在接收端彼此分离开来, 并通过解调还原出各路信号。

在本实验中, 复用的信号共有 2 路, 共使用 2 路 AM 调制与解调。两路的电路是一样的, 其中载波频率不同, 第一路调制与解调电路中使用频率 125KHz 的载波信号, 第二路使用频率为 500KHz 的载波。实验所用频分复用系统组成框图如图 2.16.4 所示。

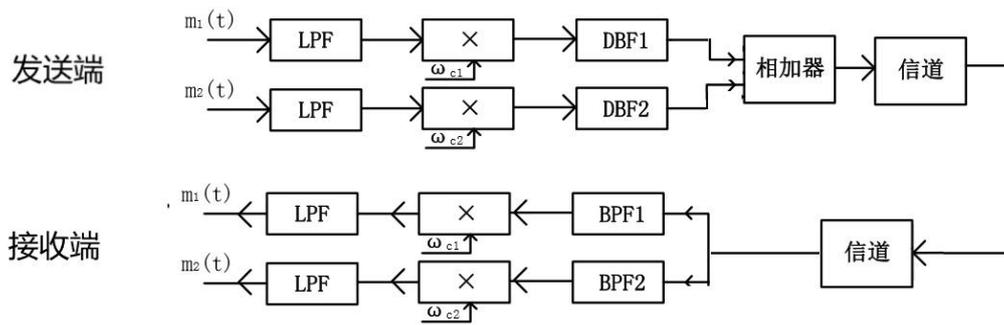


图 2.16.4 频分复用系统组成框图

2.16.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台（含信号源单元、频分复用单元（FDM））1台。
2. 实验导线若干根。
3. 数字示波器1台。

2.16.4 实验步骤

1. 使用频分复用单元（FDM）实现信号的频分复用传输，并还原信号。

(1) 使用信号源产生频率为 1KHz、 V_{pp} 为 1.2V 的正弦波信号和频率为 2KHz、 V_{pp} 为 2.5V 的正弦波信号。

(2) 将频率为 1KHz、 V_{pp} 为 1.2V 的正弦波信号连接至频分复用单元（FDM）的 S-IN1，频率为 2KHz、 V_{pp} 为 2.5V 的正弦波信号连接至频分复用单元（FDM）的 S-IN2 接口。

(3) 将信号与系统实验平台的频率为 125KHz 的载波信号连接至频分复用单元（FDM）的 W1 接口，频率为 500KHz 的载波信号连接至频分复用单元（FDM）的 W2 接口。

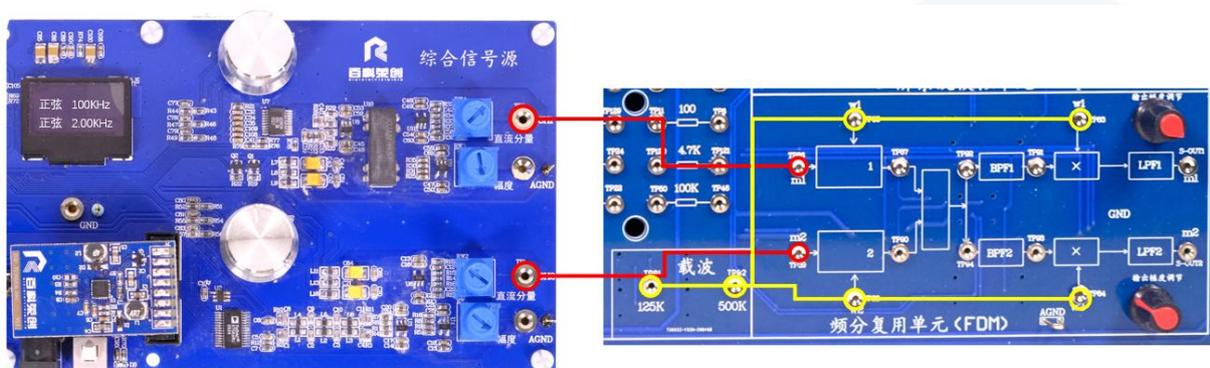


图 2.16.5 调制信号与载波信号接线图

- (4) 使用数字示波器观察频分复用单元（FDM）的第一路调制电路的输出（即乘

法器 1 的输出接口, AM1 接口), 记录调制后信号。

(5) 使用数字示波器观察频分复用单元(FDM)的第二路调制信号的输出(即乘法器 2 的输出接口, AM2 接口), 记录调制后信号。

(6) 使用数字示波器观察频分复用单元(FDM)的加法器的输出(即 ADD 接口), 观察并记录频率复用后信号。

(7) 使用数字示波器的通道 1 观察频分复用单元(FDM)的 AM1 接口, 通道 2 观察频分复用单元(FDM)的 B_OUT1 接口, 观察并记录其波形。

(8) 使用数字示波器的通道 1 观察频分复用单元(FDM)的 AM2 接口, 通道 2 观察频分复用单元(FDM)的 B_OUT2 接口, 观察并记录其波形。

(9) 使用数字示波器的通道 1 观察频分复用单元(FDM)的 S-IN1 接口, 通道 2 观察频分复用单元(FDM)的 S-OUT1 接口, 观察并记录其波形, S-OUT1 接口上的输出幅度调节旋钮可以调节还原输出信号的幅度。

(10) 使用数字示波器的通道 1 观察频分复用单元(FDM)的 S-IN2 接口, 通道 2 观察频分复用单元(FDM)的 S-OUT2 接口, 观察并记录其波形, S-OUT2 接口下的输出幅度调节旋钮可以调节还原输出信号的幅度。

2.16.5 实验结果

1. 使用频分复用单元(FDM)实现信号的频分复用传输, 并还原信号。

(1) 乘法器 1 输出信号(AM1 接口处信号)。

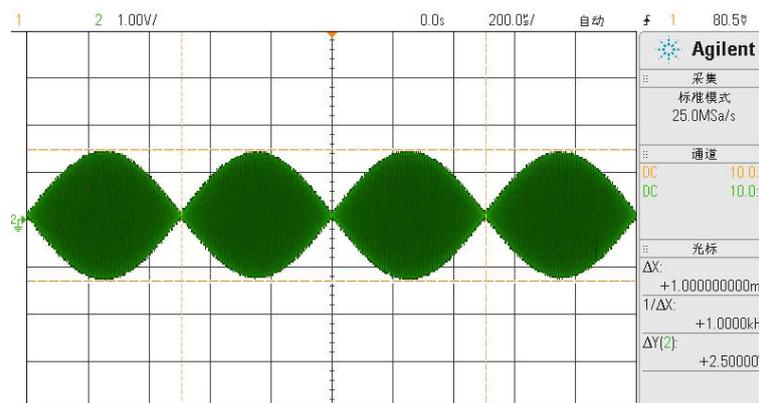


图 2.16.6 AM1 信号

(2) 乘法器 2 输出信号 (AM2 接口处信号)。

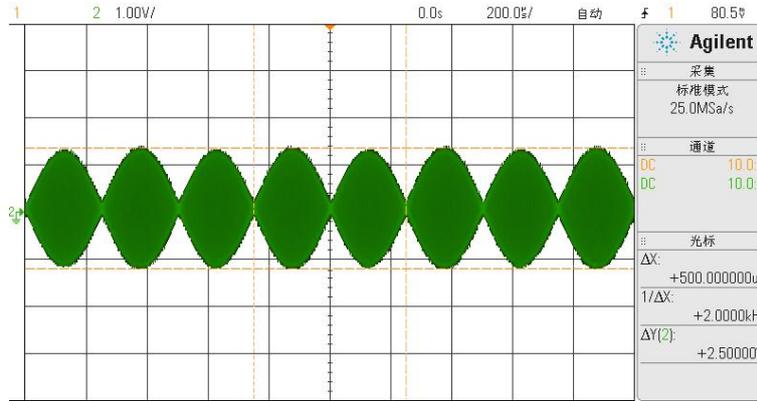


图 2.16.7 AM2 信号

(3) 加法器输出信号 (ADD 接口处信号)。

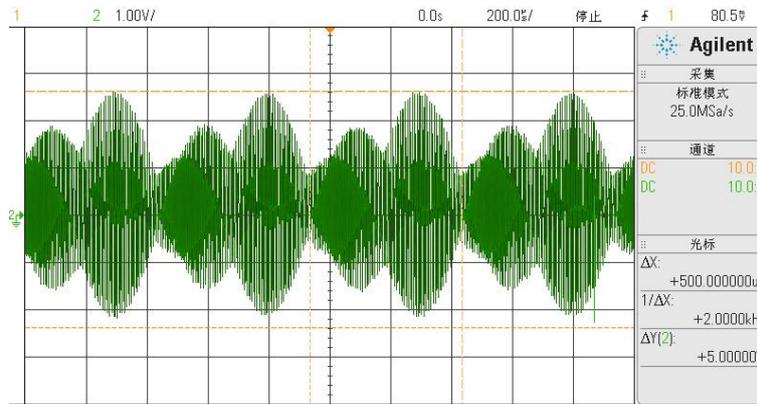


图 2.16.8 频率复用信号

(4) AM1 信号与中心频率为 125Khz 的带通滤波器输出信号 (B_OUT1 接口处信号) 对比。

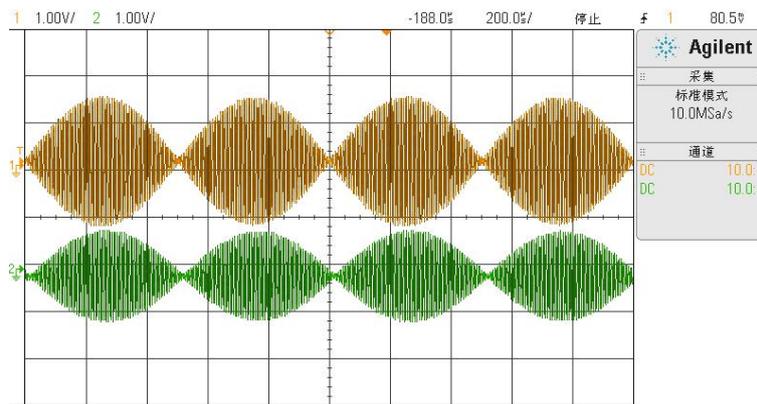


图 2.16.9 AM1 信号与 B_OUT1 信号

(5) AM2 信号与中心频率为 500Khz 的带通滤波器输出信号 (B_OUT2 接口处信号) 对比。

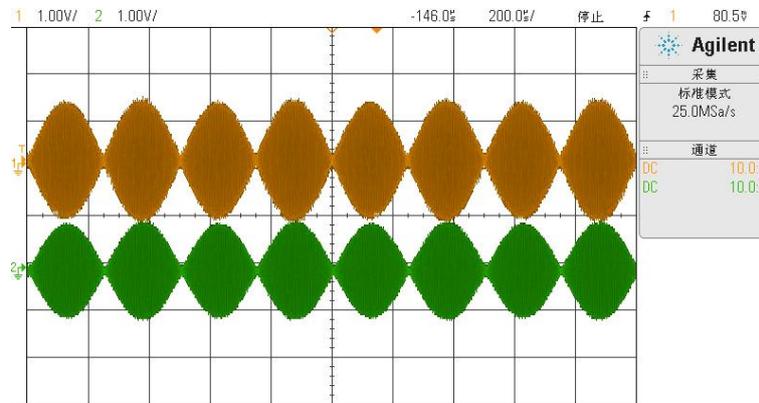


图 2.16.10 AM2 信号与 B_OUT2 信号

(6) 信号输入信号 (S-IN1 接口处信号) 与还原信号 (S-OUT1 接口处信号) 对比。

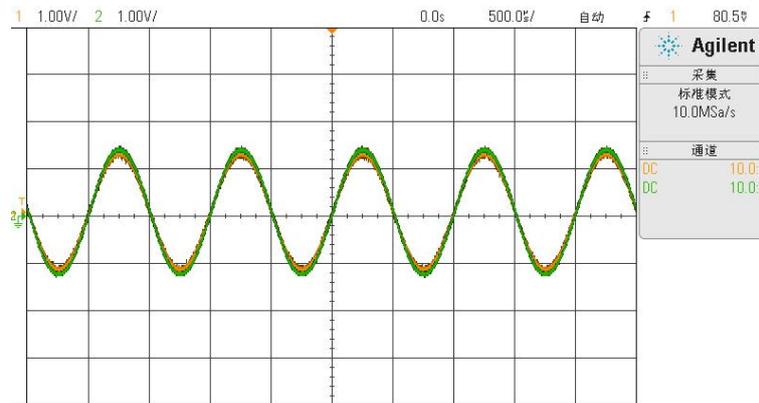


图 2.16.11 S-IN1 信号与 S-OUT1 信号

(7) 信号输入信号 (S-IN2 接口处信号) 与还原信号 (S-OUT2 接口处信号) 对比。

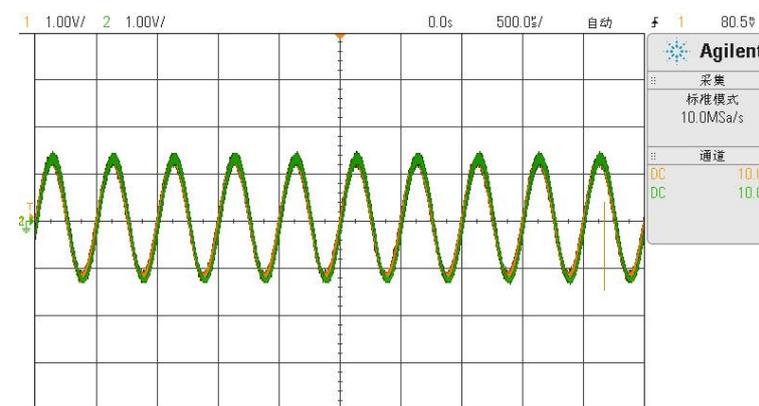


图 2.16.12 S-IN2 信号与 S-OUT2 信号

附录

附录 I 常用测量仪器仪表简介

注：仪器仪表种类样式繁多，应用范围广泛。

本实验指导书中仅以实验室中的常见设备及基础使用方法讲解为主

仪器使用注意事项

每一台电子仪器都有规定的操作规程的使用方法，使用者必须严格遵守。用前后及使用过程中，都应注意以下几个方面：

(一) 仪器开机前注意事项

- 1.在开机通电前，应检查仪器设备的工作电压与电源电压是否相符。
- 2.在开机通电前，应检查仪器面板上各开关、旋钮、接线柱、插孔等是否松动或滑位，如发生这些现象，应加以紧固或整位，以防止因此而牵断仪器内部连线，造成断开、短路以及接触不良等人为故障。
3. 在开机通电时，应检查电子仪器的接“地”情况是否良好。

(二) 仪器开机时注意事项

- 1.在仪器开机通电时，应使仪器预热 5-10 分钟，待仪器稳定后再行使用；
- 2.在开机通电时，应注意检查仪器的工作情况，即眼看、耳听、鼻闻以及检查有无不正常现象。如发现仪器内部有响声、有臭味、冒烟等异常现象，应立即切断电源，在尚未查明原因之前，应禁止再次通电，以免扩大故障。
- 3.在开机通电时，如发现仪器的保险丝烧断，应更换相同容量的保险管。如第二次开机通电，又烧断保险管，应立即检查，不应第三次调换保险管通电，更不应该随便加大保险管容量，否则导致仪器内部故障扩大，造成严重损坏。

(三) 仪器使用过程中注意事项

- 1.仪器使用过程中，对于面板上各种旋钮、开关的作用及正确使用方法，必须予以了解。对旋钮、开关的扳动和调节，应缓慢稳妥，不可猛扳猛转，以免造成松动、滑位、断裂等人为故障。对于输出、输入电缆的插接，应握住套管操作，不应直接用力拉扯电缆线，以免拉断内部导线。
- 2.信号发生器输出端不应直接连到直流电压电路上，以免损坏仪器。对于功率较大的电子仪器，二次开机时间间隔要长，不应关机后马上二次开机，否则会烧断保险丝。
- 3.使用仪器测试时，应先连接“低电位”端(地线)，然后连接“高电位”端。反之，

测试完毕应先拆除“高电位”端，后拆除“低电位”端。否则，会导致仪器过负荷，甚至损坏仪表。

(四) 仪器使用后注意事项

1. 仪器使用完毕，应切断仪器电源开关。
2. 仪器使用完毕，应整理好仪器零件，以免散失或错配而影响以后使用。
3. 仪器使用完毕，应盖好仪器罩布，以免沾积灰尘。

一、数字万用表

(一) 了解数字万用表的组成及原理。

常用万用表的结构和外形见附录 I 图 1。



附录 I 图 1 数字万用表实物图

数字万用表是在直流数字电压表的基础上扩展而成的。在直流电压表的基础上，测电流时，先经过 I-V 转换器（分流电阻）将电流转换为电压（交流电流还要经 AC-DC 转换成直流电压）。测电阻时，经串联 I-V 转换器（基准电阻 R_0 和被测电阻 R_X ）后，

由内部电池提供的电流通过其中产生电压 U_{R_0} 和 U_{R_X} ，则有 $\frac{U_{R_X}}{U_{R_0}} = \frac{R_X}{R_0}$ ，显示值与此电

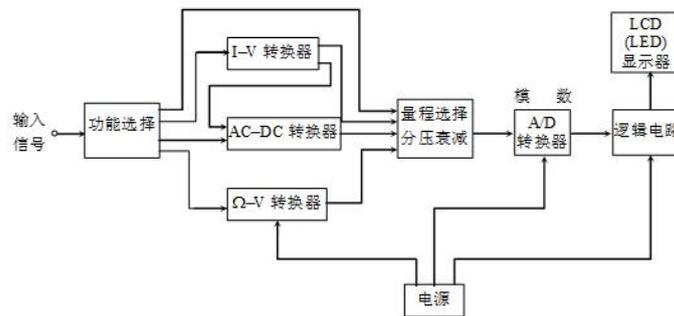
压比有关，也即和被测电阻 R_X 与基准电阻 R_0 之比有关。于是可得：

$$\text{显示值} = \frac{U_{R_X}}{U_{R_0}} \times 1000 = \frac{R_X}{R_0} \times 1000 \quad (1000 \text{ 是 } R_X = R_0 \text{ 时表的显示值, } R_X = 2R_0 \text{ 时满量})$$

程)。

通过以上几种电路得到的直流电压,还要经过量程选择环节(即电阻分压器),将其转变为 0~200mV 的直流电压,再送入 A/D 转换器,将模拟量变为数字量,再经过逻辑电路的处理,经译码后,在屏上显示出十进制表示的被测量数值。

常见数字万用表多为 3 位半或 4 位半的,所谓 3 位半,即后 3 位可显示 0~9,第 1 位只能显示 0 或 1,故满码为 1999,4 位半与此类似,只是满码为 19999。显示器均为七段 LCD 或 LED 显示器。

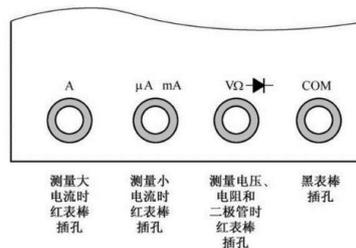


附录 I 图 2 数字万用表原理框图

(一) 表面

万用表表面印有多种符号和数值(如附录 I 图 1)。符号 A-V-Ω-F 表示这只电表是可以测量电流、电压、电阻和电容的万用表。符号"一"或"DC"表示直流,"~"或"AC"表示交流,"≈"表示交流和直流共用的刻度线。刻度线下的数字是与选择开关的不同档位相对应的刻度值。

(二) 表笔和表笔插孔



附录 I 图 3 数字万用表表笔插孔图示

表笔分为红、黑二只。红表笔插入不同表笔插孔测量不同数据;黑表笔只插在 COM 孔。红表笔为正,黑表笔为负。测量时应将红色表笔插入标有"+"号的插孔,黑色表笔插入标有"-"号的插孔。

(二) 万用表的使用方法

1.测量电阻:将旋转开关转至 Ω 挡位。将黑色测试笔接入 COM 输入端,红色测试

笔接入 Ω 对应输入端。使用红色和黑色测试笔的另两端测量待测电路的电阻值，读取显示值。按 Range 键可进入并切换手动量程。

2.测量 DC 或 AC 电压：将旋转开关转至电压挡位。按 Select 键可切换交直流电压测量模式，屏幕显示"DC"直流或"AC"表示交流。将黑色测试笔插入 COM 输入端，红色测试笔插入 V 输入端。将红色和黑色测试笔另一端分别连接到被测点，读取显示值。按 Range 键可进入并切换手动量程。

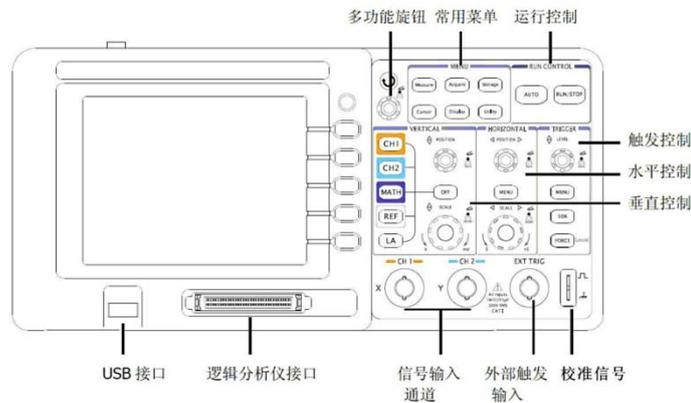
3.测试二极管：(注意：为了避免损坏万用表或被测设备，在测试二极管之前，应断开被测电路的电源，并对所有高压电容器放电)

将旋转开关转至二极管测量档位。按 Select 键一次，切换至二极管测量状态。将黑色测试笔接入 COM 输入端，红色测试笔接入二极管测量输入端。将红色测试笔另一端连接到被测二极管的正极，将黑色测试笔另一端连接到二极管负极。读取被测二极管的正向偏压值。如果测试笔极性接反，显示屏将显示“OL”。

二、示波器

(一)示波器组成及原理

示波器的功能区分布如附录 I 图 4 所示。



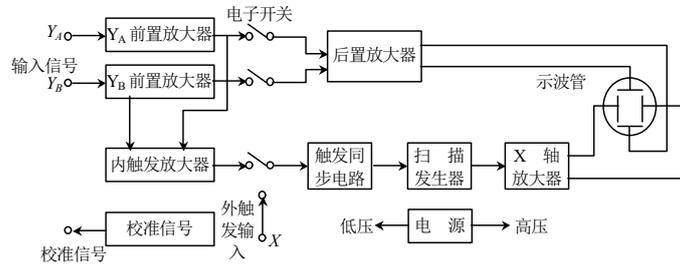
附录 I 图 4 示波器功能区分布

1. Y 轴系统和 X 轴系统

Y 轴系统有两个独立的前置放大器，其工作状态由电子开关控制。输入信号经衰减器（未画出）输入前置放大器，其输出端与示波管 Y(垂直)偏转板连接。YA、YB 前置放大器将被测信号的一部分送至内触发放大器，经放大后，作为“YA”或“YB”触发形式的触发信号源。外触发信号由外触发插座送入。触发信号送至触发同步电路，经整形、微分后，取其负向脉冲信号触发启动扫描发生器，以产生锯齿波。锯齿波信号经 X

轴放大器放大后，送至示波器 X（水平）偏转板。

2. 示波管

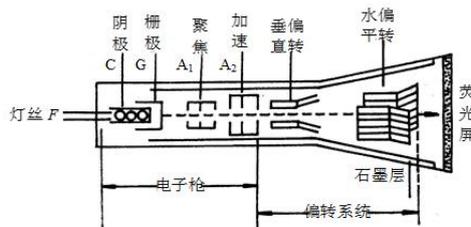


附录 I 图 5 双踪示波器原理框图

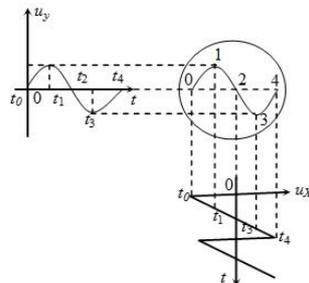
示波管是示波器的核心，由电子枪、偏转系统和荧光屏等三部分组成，其结构如附录 I 图 6 所示。电子枪包括：灯丝、阴极、栅极、聚焦、阳极和加速阳极等。其结构如附录 I 图 6 所示。当接通电源后，灯丝加热阴极，使阴极发射出一束电子束，电子束通过第一阳极与第二阳极时，受到静电场的聚焦作用，就会在荧光屏上显示出可见光点。改变栅极电压，可调节光点亮度。加速阳极是为避免调聚焦（改变 A1 电位）时，改变电子束密度从而影响亮度变化。

3. 偏转系统

由一对水平(X)偏转板和一对垂直(Y)偏转板组成。当电子束穿过偏转系统时，将同时受到 X、Y 偏转板电场的作用，按照加于偏转板上的电压信号作出相应的偏转，就能在荧光屏上绘出被测信号的波形。



附录 I 图 6 示波管结构图



附录 I 图 7 波形形成原理

在正常情况下，荧光屏上光点的相对移位是和输入到示波器 X 偏转板或 Y 偏转板上的电压成正比的。例如，若单独将一正弦信号电压 $u_y = U_m \sin t$ 送至 Y 偏转板，则在

荧光屏上出现一根垂直线，若单独在 X 偏转板上加锯齿波电压 u_x ，则屏上出现一条水平线。若同时将 u_y 加在 Y 轴偏转板上，锯齿波 u_x 加在水平偏转板上，并使 u_x 与 u_y 频率相等，那么在荧光屏上就出现一个展开的正弦波。

(二)示波器使用方法

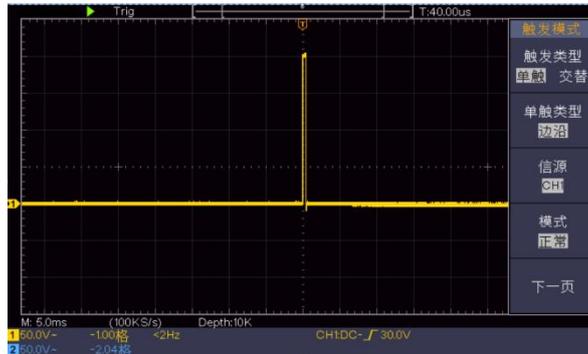
1) 示波器初始设置

1. 按下示波器电源开关。如示波器界面文字不是中文，按下 UTILITY（功能）键，在显示菜单中调整 Language 项为中文（简）。
2. 将示波器 CH1 通道探头上的衰减开关拨到 x1 位置。
3. 将 CH1 通道探头连接到示波器右下角的校准信号（5V—1KHz）端子。
4. 校准完成后，将通道 1 的探头连接到电路被测点。
5. 根据光迹指示找出水平扫描基线，调节辉度、聚焦。转动聚焦旋钮，使水平扫描基线清晰且亮度适中。
6. 触发方式开关置 AC 位。调节“Y 轴灵敏度”旋钮(v/div)和“扫描时间”旋钮(t/div)，测量信号的幅度和周期。

2) 捕捉单次信号

1. 将探头菜单衰减系数设定为 10X，并将探头上的开关设定为 10X。
2. 调整垂直挡位和水平挡位旋钮，为观察的信号建立合适的垂直与水平范围。
3. 按采样按键，右侧显示采样菜单。
4. 在右侧菜单中，选择采集模式为峰值检测。
5. 按触发菜单按键，右侧显示触发菜单。
6. 在右侧菜单中，选择触发类型为单触、单触类型为边沿、信源为 CH1。
7. 在右侧菜单中按下一页，选择耦合为直流。
8. 在右侧菜单中，选择斜率为 （上升）。
9. 旋转触发电平旋钮，调整触发电平到被测信号的中值。
10. 若屏幕上方触发状态指示没有显示 Ready，则按下 Run/Stop（运行/停止）按键，启动获取。等待符合触发条件的信号出现。如果有某一信号达到设定的触发电平，即采样一次，显示在屏幕上。利用此功能可以轻易捕捉到偶然发生的事件，例如幅度较大的突发性毛刺：将触发电平设置到刚刚高于正常信号电平，按 Run/Stop（运行/停止）按键开始等待，则当毛刺出现时，机器自动触发并把触发前后一段时间的波形记录下来。

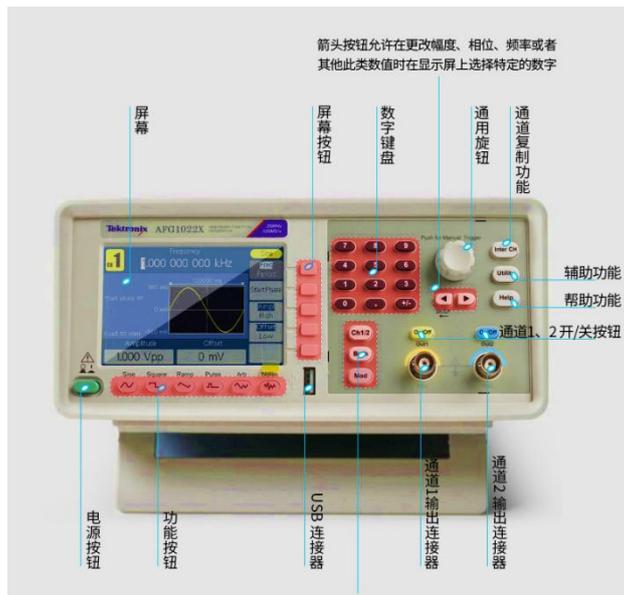
通过旋转面板上水平控制区域的水平位移旋钮，改变触发位置的水平位移可以得到不同长度的负延迟触发，便于观察毛刺发生之前的波形。



附录 I 图 8 捕捉单次信号

三、函数信号发生器

常用函数信号发生器的结构和外形如附录 I 图 9。



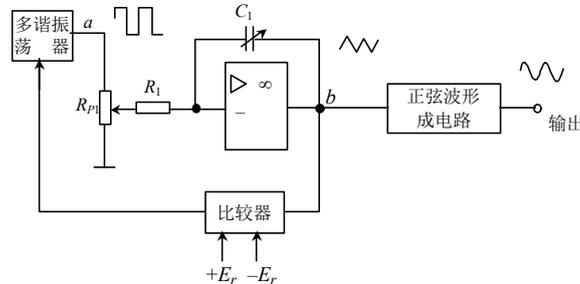
附录 I 图 9 函数信号发生器实物图

(一)函数信号发生器组成及原理

1. 函数信号发生器可以产生幅值、频率均可变的方波、三角波、正弦波等多种函数信号。

2. 函数信号发生器的基本原理框图如附录 I 图 10 所示。当该仪器电源刚合上时，设积分电容 C_1 上的电荷为零，而多谐振荡器的“a”点电位为 $-E$ 伏。积分器输出端“b”点电位向正值方向增加，当“b”点电位增加到参考电压 $+E_r$ 伏时，电压比较器工作产生一个触发信号使多谐振荡器翻转。同时“a”点电位变为 $+E$ 伏，因而积分器输出端“b”点电位开始下降，当电位下降到参考电压 $-E_r$ 时，电压比较器工作，又产生一个触发信号，

使多谐振荡器回到初始状态。周而复始，电路如此产生振荡。振荡器振荡频率由“a”点电位、积分电阻 R_1 、积分电容 C_1 和电压比较器的参考电压来决定。 R_1 和 C_1 用来确定频率范围，调节 R_{P1} 可实现频率的连续可调，电压比较器电压 $\pm E_r$ 固定不变。



附录 I 图 10 函数信号发生器基本原理框图

(二)函数信号发生器的按键功能

1. “触发源方式”开关 (SOURCE MODE): 通常为内触发。
2. “内触发源方式”开关 (INTTRIG): 通常置于所用通道位置。当用于双路显示时, 为比较两个波形的相对位置, 可将其置于交替 (VERTMODE) 位置。
3. (扫描) 触发方式: 通常置于自动位置。
4. 显示方式: 根据需要可置于 CH1、CH2、ALT (交替显示两路高频信号) CHOP (断续显示两路低频信号)、ADD (显示两路信号之和)。
5. 扫描灵敏度开关: 表示横轴方向一个大格的时间。根据被测信号周期确定。
6. 幅度灵敏度开关: 表示纵轴方向一个大格的电压。根据被测信号幅度确定。
7. 在测量波形的周期和幅值时, 应注意将扫描微调旋钮和垂直 (Y 轴) 微调旋钮置于校准位置。
8. 当输入波形左右移动、不稳定时, 可调节触发电平旋钮使波形稳定。

(三)信号发生器的使用方法

1. 打开电源开关, 指示灯亮, 数码管显示频率大小。
2. 根据使用频率范围, 调节“频率调节”旋, 调至所需的频率, 此时数码管显示频率大小, 指示灯指示输出频率的单位。
3. 输出电压调节: 输出电压 1--5V 时, 只需将“输出衰减”置 0dB 位, 可以直接从电压表上读出输出电压大小, 为精确读数, 一般用示波器或交流毫伏表测量输出电压。当输出电压小于 1V 时, 先选择适当的电压衰减, 再调节“输出幅度”, 直接外接示波器或交流毫伏表测量。直到达到所需要的信号电压值。

注意: 函数信号发生器作为信号源, 它的输出端不允许短路。