



**百科荣创**  
B I E K E S I T I R O N G C H A O

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

——信号分析与处理硬件单元

## 前 言

信号与系统实验平台主要针对《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。

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。

通过本指导书基于信号分析与处理硬件单元进行学习,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。

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 .....	5
第2章 信号分析与处理硬件单元实验项目 .....	6
1.1 常用信号的分类和观察实验 .....	6
1.2 可调信号的分类与观察实验 .....	17
1.3 信号的基本运算实验 .....	26
1.4 滤波器基本实验 .....	41
1.5 滤波器综合实验 .....	72
1.6 一阶电路的时域特征实验 .....	88
1.7 一阶电路的频域分析实验 .....	104
1.8 一阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验 .....	119
1.9 一阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验 .....	134
1.10 二阶电路的频域分析实验 .....	146
1.11 二阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验 .....	161
1.12 二阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验 .....	174
1.13 二阶系统的模拟实验 .....	183
1.14 幅度调制与解调实验 .....	202
1.15 抽样定理与信号恢复实验 .....	210
1.16 周期方波信号的合成与分解实验 .....	218
1.17 周期信号的合成与分解综合实验 .....	232
1.18 RC 振荡器特性测量实验 .....	236
1.19 频分复用(FDM)实验 .....	241
1.20 线性时不变系统的特性研究实验 .....	250
1.21 信号卷积积分运算实验 .....	257

# 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、处理和控制等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的学习该课程，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

信号系统与信号处理平台，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，让学者轻快的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。

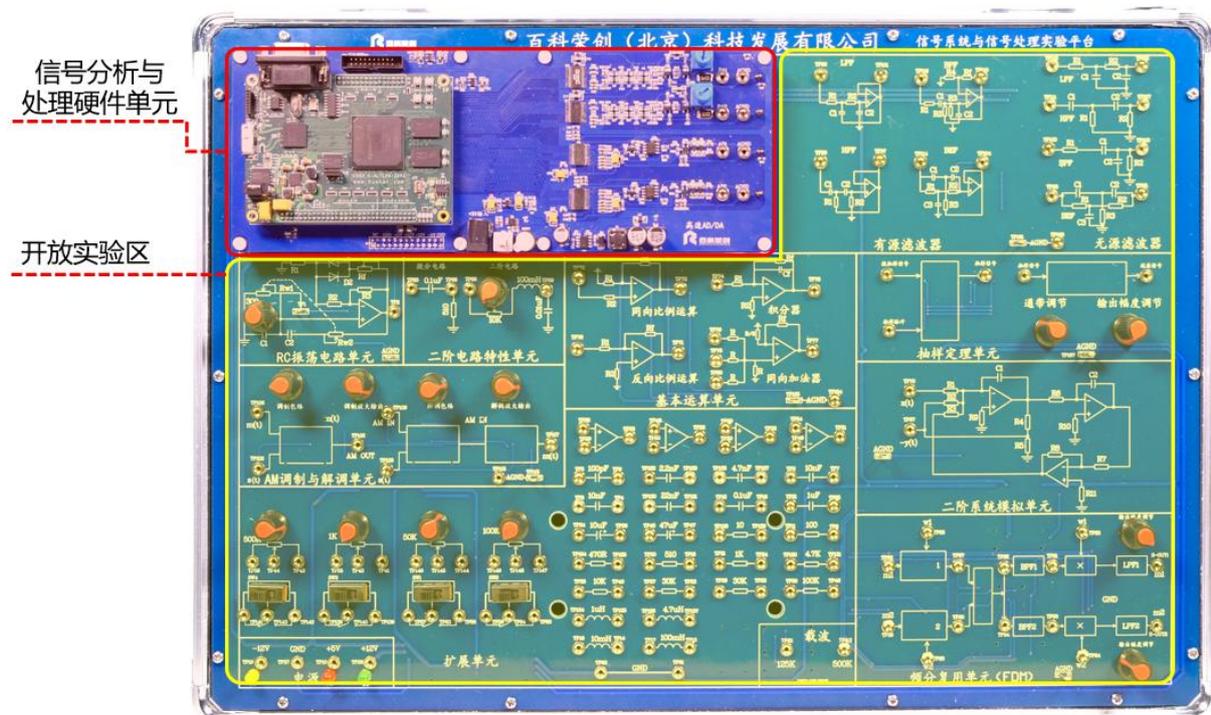


图 1.2.1 设备区间划分

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. 信号分析与处理硬件单元

图 1.2.2 为信号分析与处理硬件单元实物图，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。

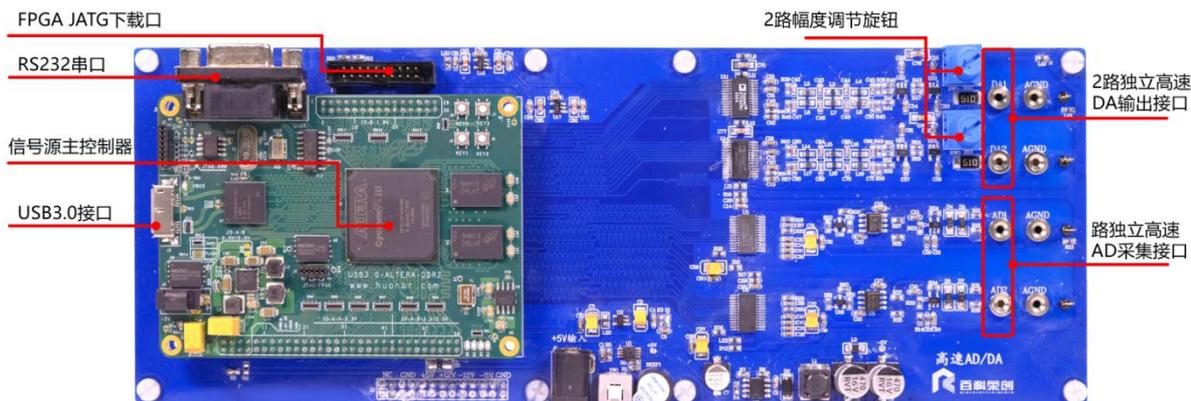


图 1.2.2 信号分析与处理硬件单元面板

信号分析与处理硬件单元如图 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，基于 USB3.0 接口并实时更新传输至上位机中，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，在通过后级信号调制电路，实现幅值的调控，最终通过两路端口输出指定频率、幅值的波形。

信号分析与处理硬件单元除了能进行模拟信号输出控制外，还能通过 AD 采集接口实时检测输出信号的实际情况，行程闭环的信号检测系统。可通过 AD 采集接口实时观察实验电路处理后的信号，并进行分析优化相关电路参数，能更好的实际电路优化。

## 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。

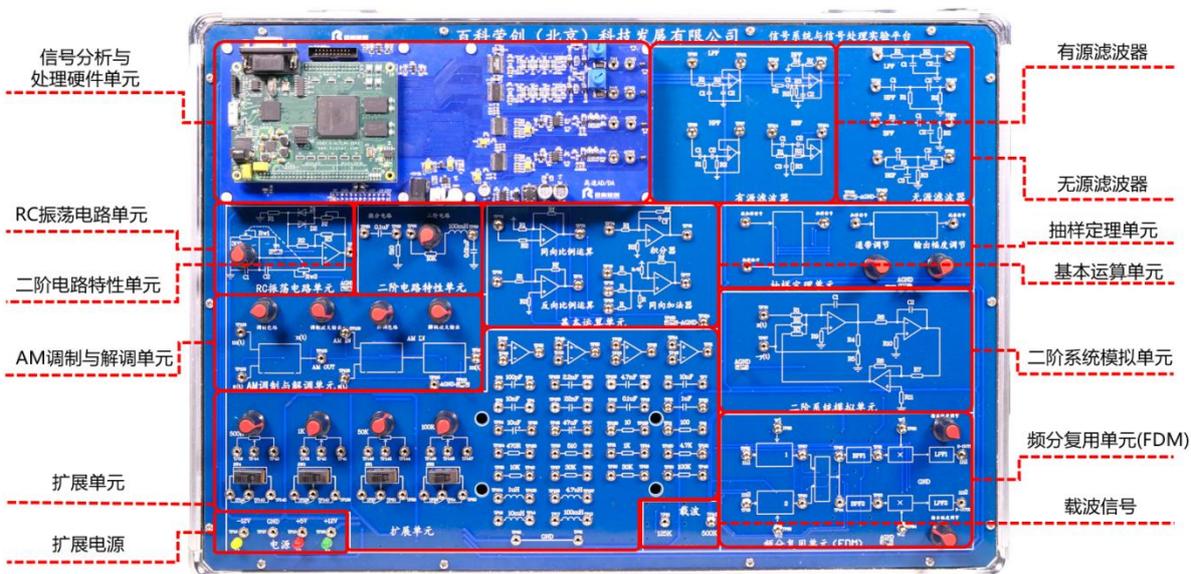


图 1.2.3 开放实验区组成说明图

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) 立体声单元

立体声单元提供 2 路音频采集电路、2 路扬声器输出电路和 1 路立体声耳机输出电路。可实现音频采集和音频回放实验。实物如下图所示：



图 1.2.4 立体声单元

立体声单元，需要通过电源接口独立供±5V 电才能正常工作，因此在进行相关实验时需要提前进行供电连接。

#### (2) 周期信号合成与分解单元

该单元含有周期方波信号的分解电路和合成电路。可实现方波信号的分解，可分解出周期方波信号的基波及三、五、七次谐波，并可调节谐波信号的相位以及幅度，可实现方波信号的合成。实物如下图所示：

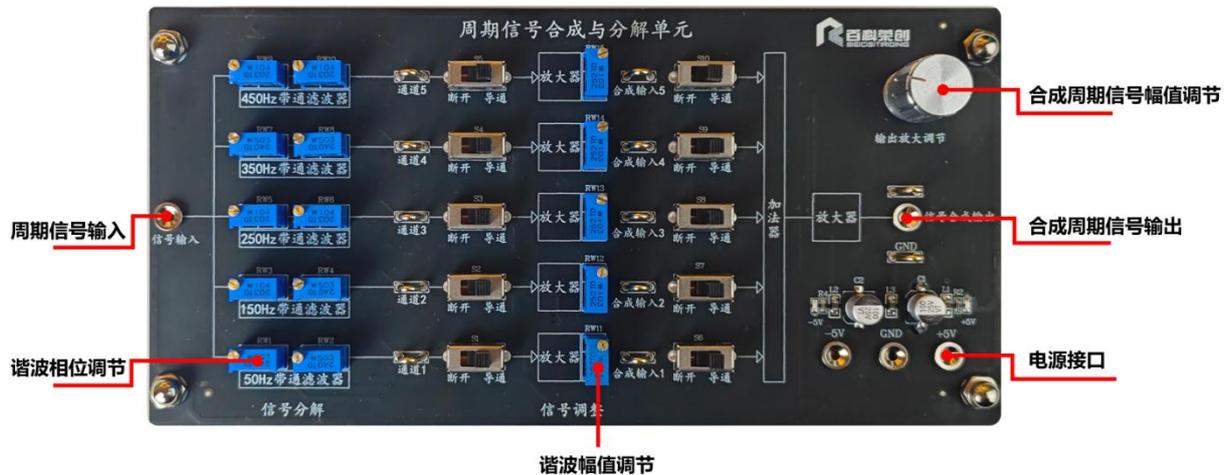


图 1.2.5 周期信号合成与分解单元

周期信号合成与分解单元，需要通过电源接口独立供±5V电才能正常工作，因此在进行相关实验时需要提前进行供电连接。

### 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 信号分析与处理硬件单元实验项目

### 1.1 常用信号的分类和观察实验

#### 1.1.1 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) 熟悉 MATLAB 软件;
- (4) 学会使用双踪示波器。

##### 2.实验任务

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。

学习使用 MATLAB 软件产生常用信号,通过 USB3.0 和 FPGA 传输至高速 DA 转换输出,使用示波器采集观察信号波形,以及使用高速 AD 采集 DA 输出的信号,采集的数据传输至 MATLAB 软件,使用 MATLAB 软件的绘图函数,将采集的数据进行打印,观察波形。

#### 1.1.2 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 中: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 $\tau$ 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任然是指数形式。

2) 正弦信号： $f(t) = K \sin(\omega t + \theta)$ 。(式中， $K$ 为振幅， $\omega$ 为角频率， $\theta$ 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。

抽样函数的性质：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 $\pi$ 。

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 $sa$ ，函数式中的参数 $\tau$ 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.MATLAB 软件介绍

MATLAB 是一个基于向量运算的计算机语言，MATLAB 为信号处理控制、通信和许多

其他相关领域的数值以及符号计算提供了方便的环境。MATLAB 具有以下五个优点：

- (1) 强大科学计算功能。
- (2) 简单易用。
- (3) 具备先进的可视化工具。
- (4) 图像处理功能强大。
- (5) 具有众多方面领域应用的工具箱和模块集。

#### MATLAB 的工作环境

启动 MATLAB 软件后，其主界面如图 1.1.1 所示。其中主要包括工具栏选型、当前工作路径、命令行窗口和工作区窗口。

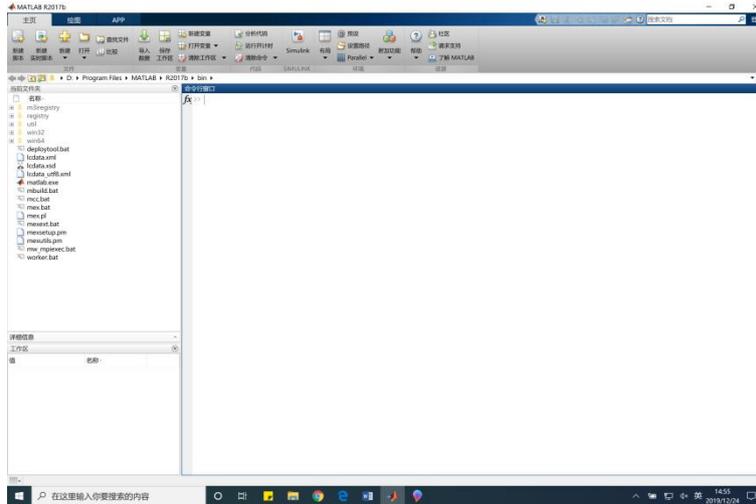


图 1.1.1 MATLAB 主界面

**命令行窗口：**MATLAB 的主要工作界面，可输入各种 MATLAB 指令，操作和运算结果也会显示在此窗口。在 MATLAB 运行时，命令行窗口会出现命令行提示符“>”。如果命令后带有分号，则 MATLAB 执行命令后，结果不显示。点击命令行窗口右上角的 ，将会出现如图 1.1.2 所示的命令行窗口操作菜单。



图 1.1.2 命令行窗口操作菜单

**工作区：**工作区为 MATLAB 用来存储各种变量和结果的空间，可工作区观察、编辑和提取这些变量。点击命令行窗口右上角的 ，将会出现如图 1.1.3 所示的工作区操作菜单。



图 1.1.3 工作区操作菜单

当前工作路径: MATLAB 借用了 Windows 资源管理器管理磁盘的思路, 设计了当前路径的窗口, 利用该窗口, 可进行新建或是删除一个文件或是打开文件夹。

工具栏选项: 工具栏选项提供了以下快捷的工具, 方便使用。

文本编辑器窗口: MATLAB 在编写和修改.m 这一类文件时要用到文本编辑器窗口。在打开某个文件或是新建脚本文件时, 该窗口才被打开, 点击工具栏选项中的“新建脚本”选项, 可以一个空白的文本编辑器窗口, 如图 1.1.4 所示。在工具栏选项中出现“编辑器”的工具栏, 可对脚本进行一些操作。

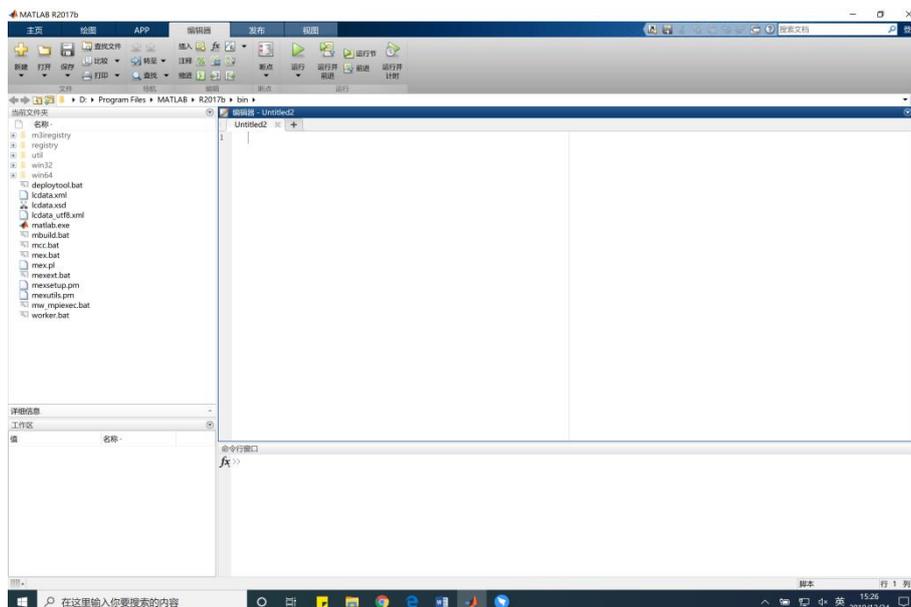


图 1.1.4 文本编辑器窗口

在 MATLAB 里有两种程序: 一种是“脚本 (script)”, 是由一串指令构成的, 这些指令可为 MATLAB 提供的函数或自定义的函数。另一种是“函数 (function)”, 是一种

能被 script 调用的程序，具有某些输入，并提供某些输出。

在创建脚本文件时需要先创建一个工作目录，当前工作路径为该目录路径，并将编写的脚本和函数存放与该目录下，因为 MATLAB 在执行每一个脚本时都将在当前目录下虚拟脚本和函数，若不在当前目录下，MATLAB 将会报错，指示没有找到所想要的脚本文件。

### 1.1.3 实验设备

- 1.信号与系统实验平台（含信号源单元）1 台。
- 2.实验导线 4 根。
- 3.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.1.4 实验步骤

- 1.将信号源的 DA 输出端口与 AD 采集端口用实验导线连接。
- 2.使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。
- 3.下载 FX3 程序。

(1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

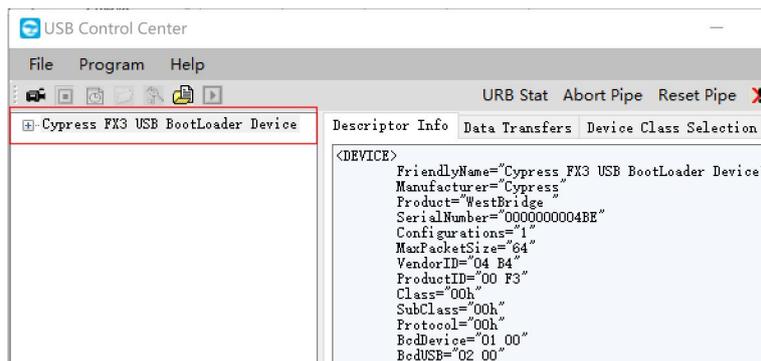


图 1.1.5 选择 FX3 设备

(2) 点击菜单栏的“Program”下的FX3，选择“RAM”。

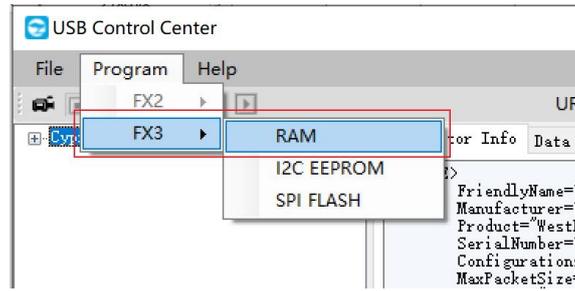


图 1.1.6 选择下载方式

(3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cypress FX3 USB StreamExample Device。

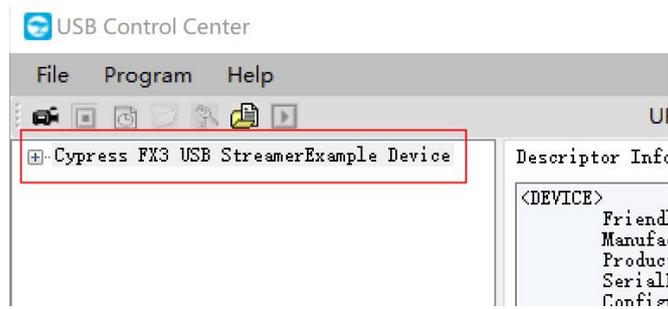


图 1.1.7 FX3 程序下载完成

4.打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

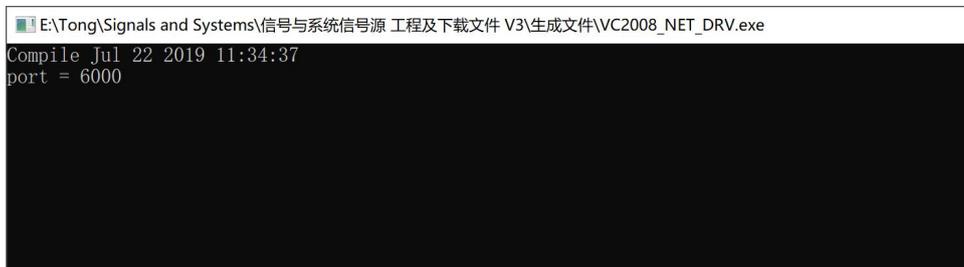


图 1.1.8 打开 VC2008\_NET\_DRV

5.打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

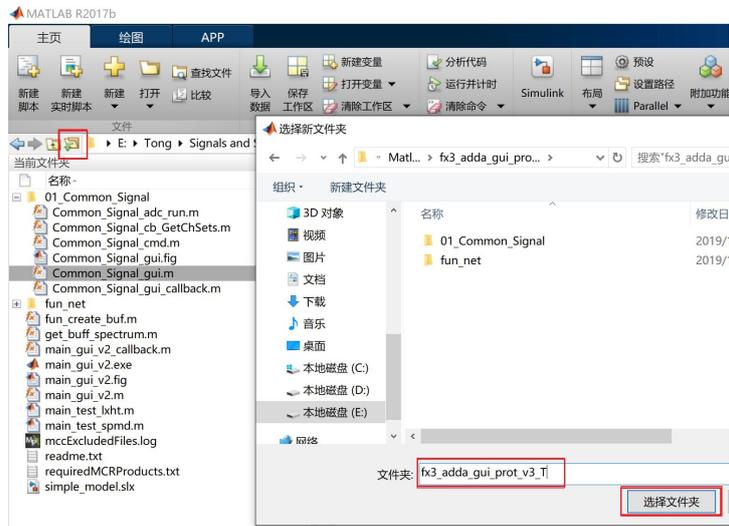


图 1.1.9 打开工程文件夹

6.选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

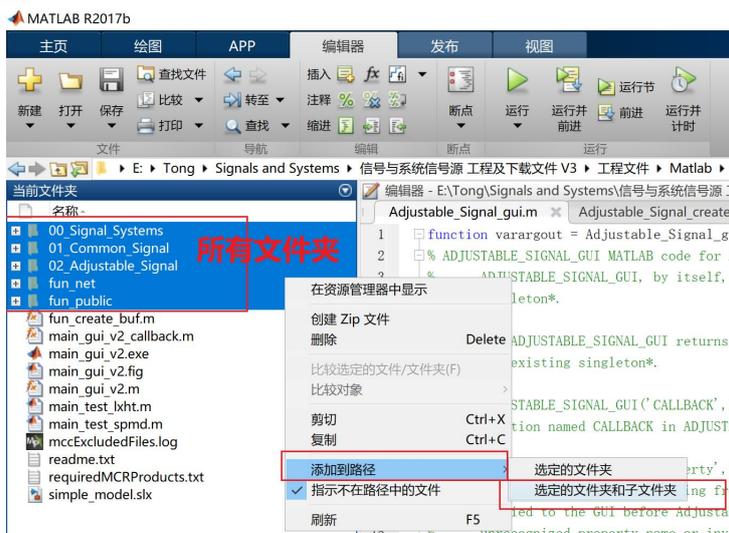


图 1.1.10 添加路径

7.在命令行窗口输入“Common\_Signal\_gui”，按下回车键运行程序。



图 1.1.11 运行程序

8.运行程序后，打开常用信号的分类与观察界面。



图 1.1.12 常用信号的分类与观察界面

9.在 DA1 窗口中，选择信号，点击“DA1 输出”，通道 DA1 输出所选择的信号；DA2 窗口与 DA1 窗口形同；AD1 窗口中，点击“AD1 采集”，通道 AD1 连续采集信号，“AD1 采集”变成“AD1 停止”，点击“AD1 停止”，停止采集信号；AD2 窗口与 AD1 窗口相同。

信号 1 及信号可选择输出信号如图 1.1.13 所示。



图 1.1.13 可选信号

10.使用示波器观察 DA1、DA2 的输出信号，与 MALAB 的 AD 通道 1、AD 通道 2 界面的信号对比分析。将 AD1、AD2 与 DA1、DA2 的接线交换，观察信号。

### 1.1.5 实验结果

1.当信号源的 DA1 接至 AD1、DA2 接至 AD2 时，AD1 采集 DA1 的输出信号，AD 通道 1 界面显示 DA1 输出信号，在 AD1 窗口的幅值和频率显示采集信号的幅值及频率。

AD2 与 AD1 相同。

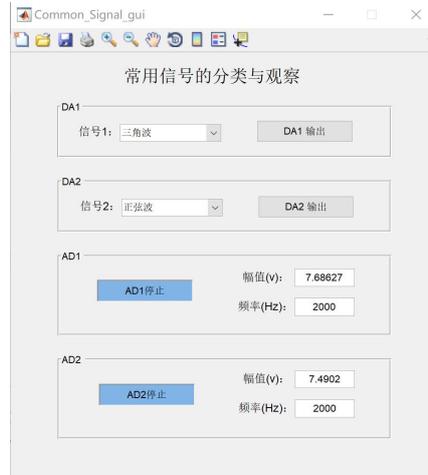


图 1.1.14 AD 开始采集信号

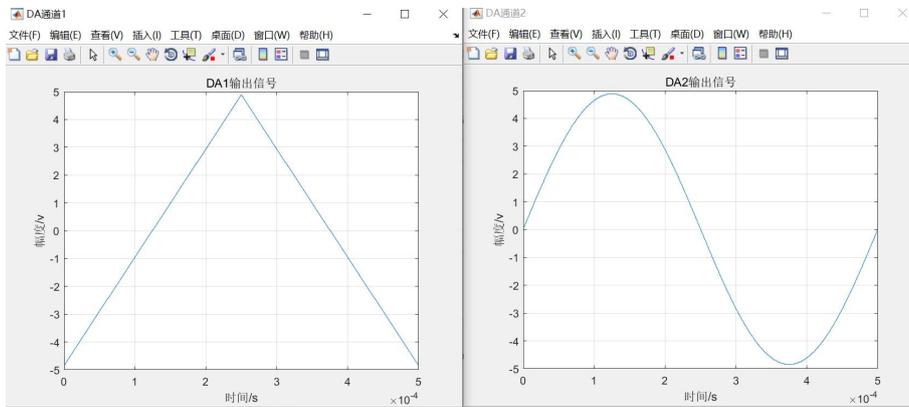


图 1.1.15 DA 输出

示波器通道 1 接 DA1，示波器通道 2 接 DA2。

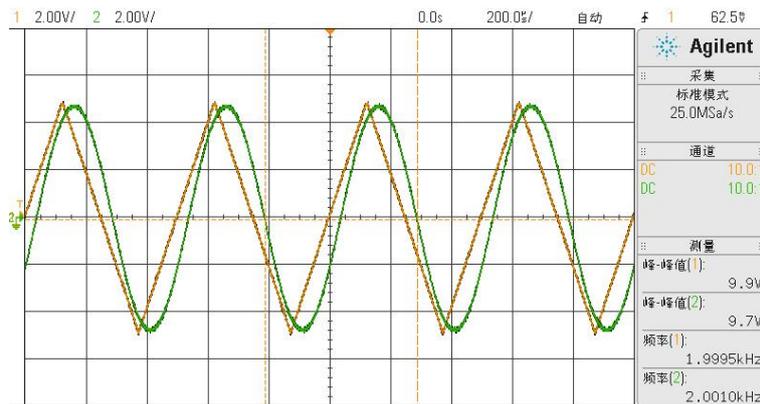


图 1.1.16 示波器观测 DA 输出通道

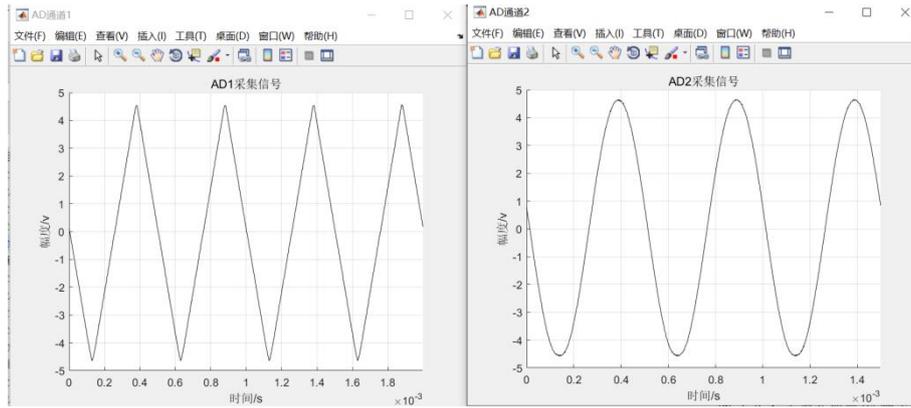


图 1.1.17 AD 采集

2.当信号源的 DA1 接至 AD2、DA2 接至 AD1 时，AD1 采集 DA2 的输出信号，AD2 采集 DA1 输出信号。



图 1.1.18 AD 开始采集信号

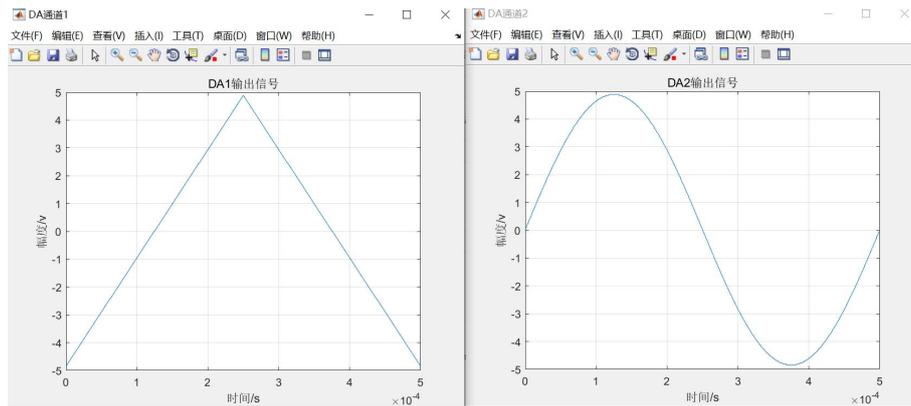


图 1.1.19 DA 输出信号

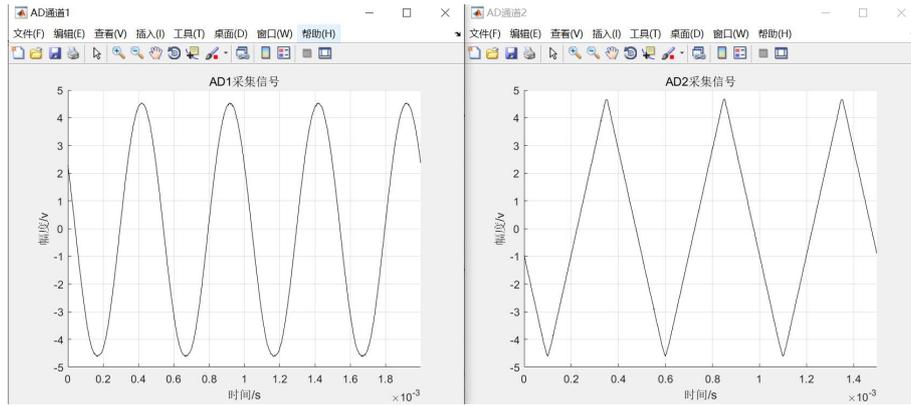


图 1.1.20 AD 采集

示波器通道 1 接 DA1，示波器通道 2 接 DA2。

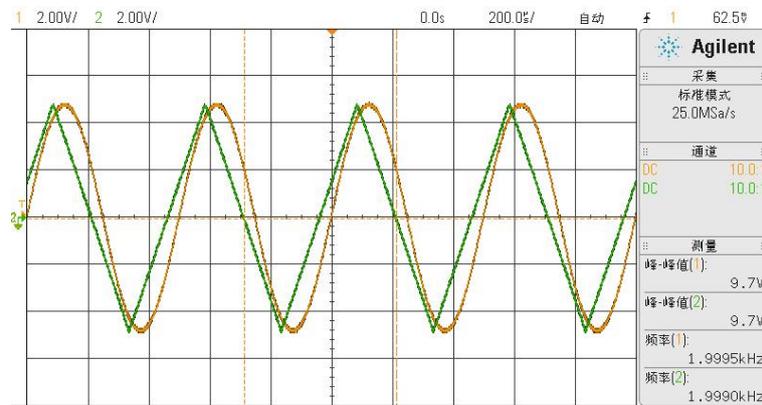


图 1.1.21 示波器观测 DA 输出通道

## 1.2 可调信号的分类与观察实验

### 1.2.1 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 MATLAB 产生以及绘制正弦波、方波和三角波的方法;
- (3) 熟练使用双踪示波器。

#### 2.实验任务

使用 MATLAB 软件生成正弦波、方波与三角波信号,其频率、占空比可调节,并通过高速 ADDA 模块输出信号,幅值通过高速 ADDA 模块的旋钮进行调节,使用示波器观察记录输出信号,分析各参数对波形的影响。

### 1.2.2 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,  $\omega$ 为角频率,  $\theta$ 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 1.2.1 所示。

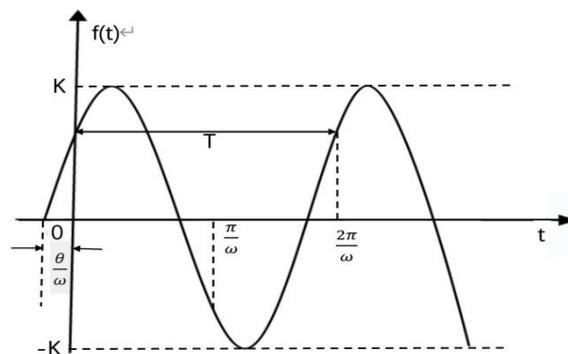


图 1.2.1 正弦波信号

由图 1.2.1 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  $\omega$  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

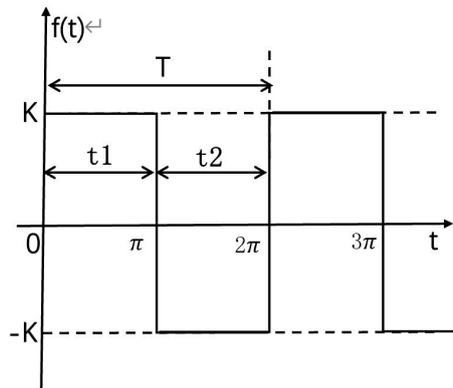


图 1.2.2 方波信号

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

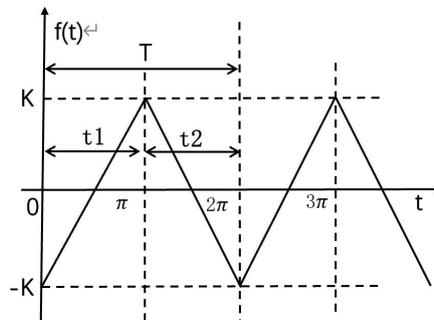


图 1.2.3 三角波信号

如图 1.2.3 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.作为信号发生器的 MATLAB

当用 MATLAB 产生数值型信号时，如果信号是一维的，就创建一个向量，信号是二维的，就创建一个矩阵，信号为三维的时，则创建一个矩阵序列，也就是说，向量对应的是仅依赖时间变量的被抽样信号；矩阵对应的是依赖两个空间变量的被抽样信号，例如图像；像视频信号这种的被抽样信号，就需要随时间变化的矩阵来表示。

MATLAB 内部提供产生一些常见信号的函数，例如正弦信号函数为 `sin`、方波信号函数为 `square`、三角波信号函数为 `sawtooth`。

MATLAB 提供了可以绘制图形的函数 `plot` 和 `stem`。`plot` 绘制的是序列插值后的形

状, 因此看起来是连续的。stem 绘制的是样本序列, 看起来信号是离散的。

### (1) MATLAB 产生正弦信号

假设正弦信号为  $Y = A \sin(\omega_0 t + \varphi)$ , 在 MATLAB 中调用形式为  $Y = A * \sin(\omega_0 * t + \varphi)$ , 具体生成正弦信号如下:

```

1. A = 1;           % 定义变量峰峰值 A, 设峰峰值为 1
2. Fs = 500;       % 定义抽样频率变量 Fs, 设抽样频率为 500Hz
3. t = 0 : 1/Fs : 1; % 定义时间变量 t, 设时间取值范围为 0~1s, Δt 为 1/Fs
4. f = 10;         % 定义频率变量 f, 设频率为 10Hz
5. w0 = 2*pi*f;   % 定义角速度变量 w0, w0=2πf, MATLAB 中π用 pi 表示
6. phi = pi/6;    % 定义初相位变量 phi, 设初相位为π/6
7. Y = A*sin(w0*t+phi); % 定义并生成正弦信号 Y
8. plot(t, Y);    % 使用 plot 函数绘制正弦信号 Y
    
```

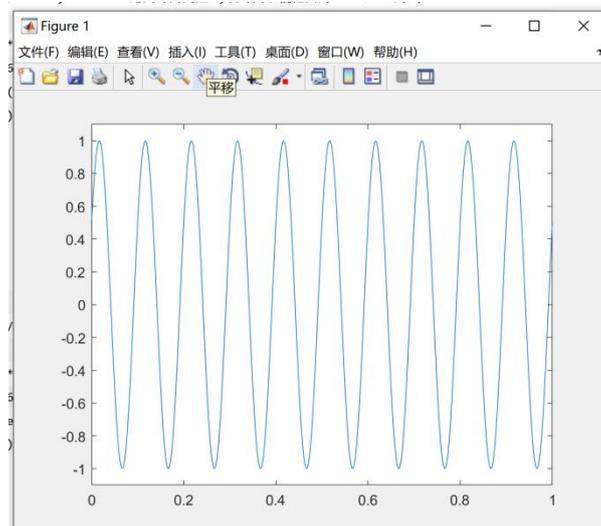


图 1.2.4 MATLAB 生成正弦信号

```

1. A = 1;           % 定义变量峰峰值 A, 设峰峰值为 1
2. Fs = 500;       % 定义抽样频率变量 Fs, 设抽样频率为 500Hz
3. t = 0 : 1/Fs : 1; % 定义时间变量 t, 设时间取值范围为 0~1s, Δt 为 1/Fs
4. f = 10;         % 定义频率变量 f, 设频率为 10Hz
5. w0 = 2*pi*f;   % 定义角速度变量 w0, w0=2πf, MATLAB 中π用 pi 表示
6. phi = pi/6;    % 定义初相位变量 phi, 设初相位为π/6
7. Y = square(w0*t,50); % 定义并生成占空比为 50%的方波
8. plot(t, Y);    % 使用 plot 函数绘制正弦信号 Y
    
```

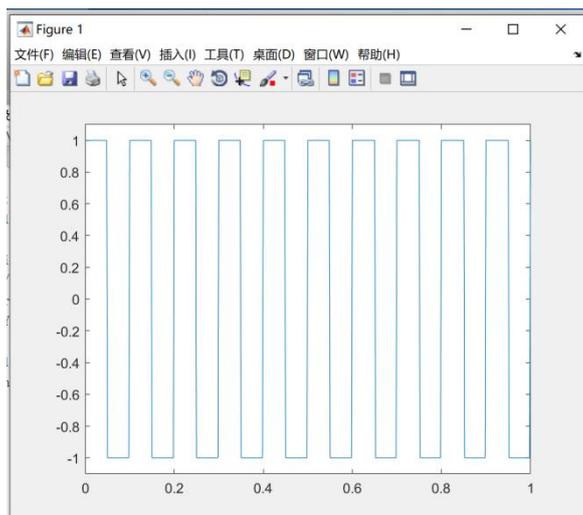


图 1.2.5 MATLAB 生成方波信号

- |    |                                      |  |
|----|--------------------------------------|--|
| 1. | <code>A = 1;</code>                  | % 定义变量峰峰值 A, 设峰峰值为 1                   |
| 2. | <code>Fs = 500;</code>               | % 定义抽样频率变量 Fs, 设抽样频率为 500Hz            |
| 3. | <code>t = 0 : 1/Fs : 1;</code>       | % 定义时间变量 t, 设时间取值范围为 0~1s, Δt 为 1/Fs   |
| 4. | <code>f = 10;</code>                 | % 定义频率变量 f, 设频率为 10Hz                  |
| 5. | <code>w0 = 2*pi*f;</code>            | % 定义角速度变量 w0, w0=2πf, MATLAB 中π用 pi 表示 |
| 6. | <code>phi = pi/6;</code>             | % 定义初相位变量 phi, 设初相位为π/6                |
| 7. | <code>Y = sawtooth(w0*t,0.5);</code> | % 定义并生成三角波信号                           |
| 8. | <code>plot(t, Y);</code>             | % 使用 plot 函数绘制正弦信号 Y                   |

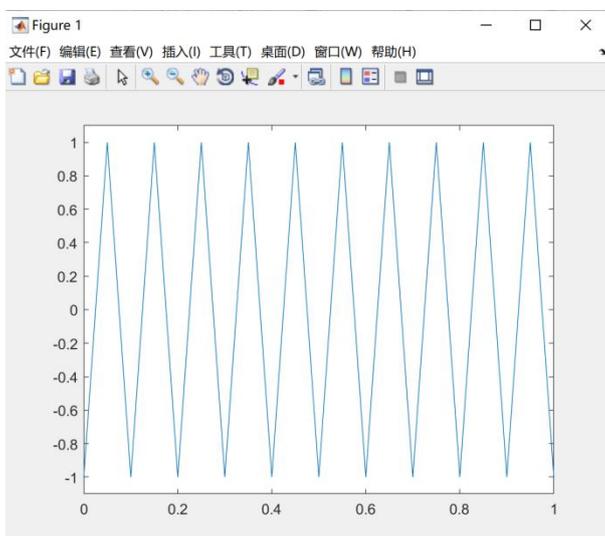


图 1.2.6 MATLAB 生成三角波信号

### 1.2.3 实验设备

- 1.信号与系统实验平台(含信号源单元)1台。
- 2.实验导线4根。
- 3.USB3.0 数据线1根。
- 4.双踪示波器1台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.2.4 实验步骤

- 1.将信号源的 DA1 输出端口与 AD1 采集端口用实验导线连接。
- 2.使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。
- 3.使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

(1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

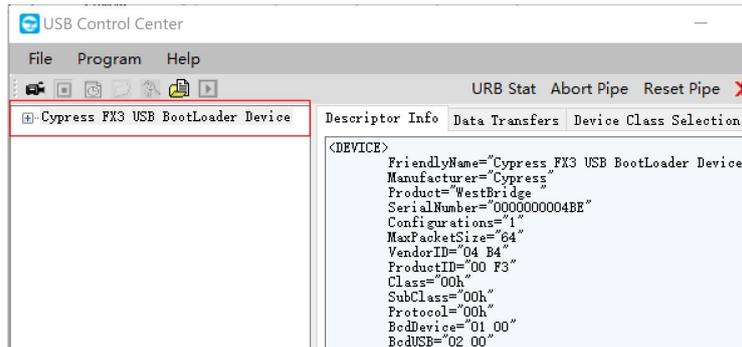


图 1.2.7 选择 FX3 设备

(2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

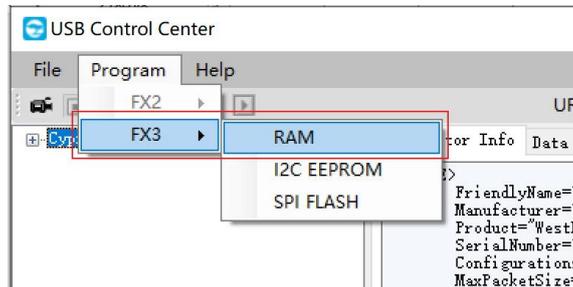


图 1.2.8 选择下载方式

(3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

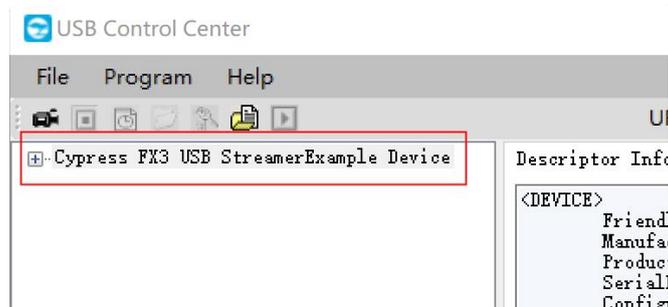


图 1.2.9 FX3 程序下载完成

4.打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

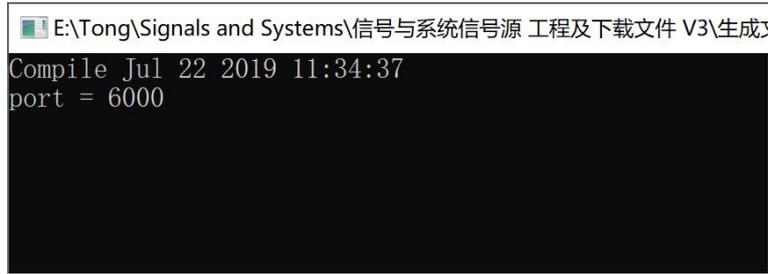


图 1.2.10 打开 VC2008\_NET\_DRV

5.打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

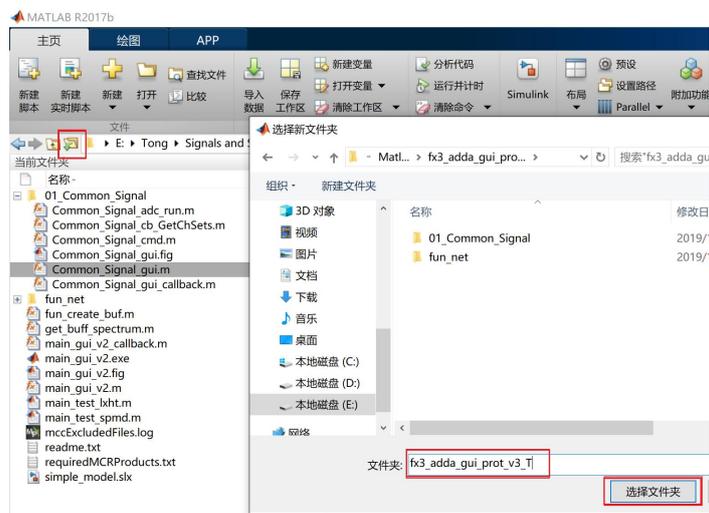


图 1.2.11 打开工程文件夹

6.选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

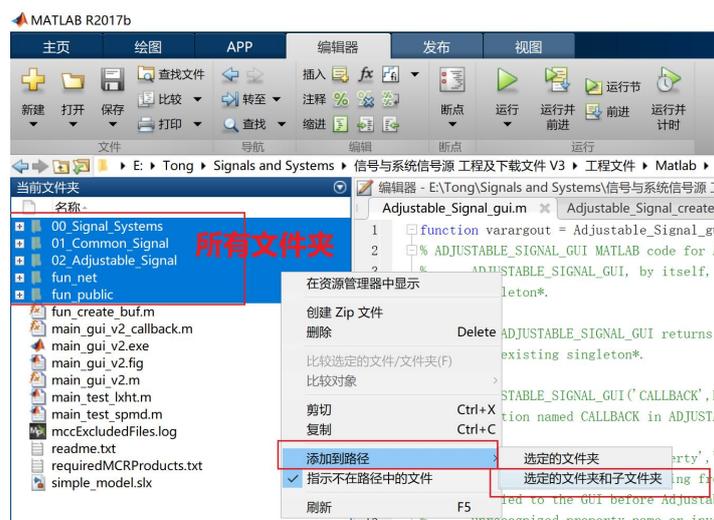


图 1.2.12 添加路径

7.在命令行窗口输入“Adjustable\_Signal\_gui”，按下回车键运行程序。

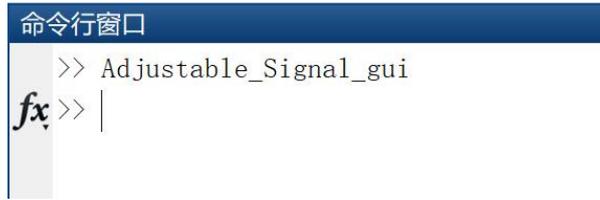


图 1.2.13 运行程序

8.运行程序后，打开常用信号的分类与观察界面。

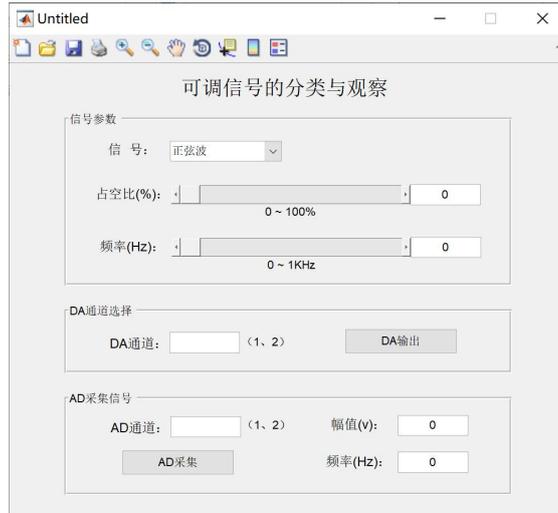


图 1.2.14 可调信号的分类与观察界面

9.在可调信号的分类与观察界面的信号参数处选择正弦波，通过滑动滑动条选择占空比和频率，或是手动输入占空比和频率。

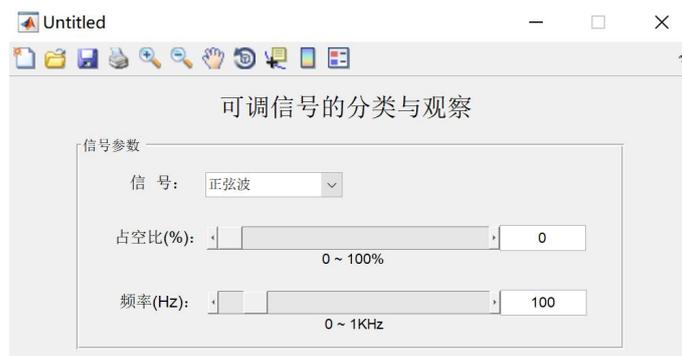


图 1.2.15 选择正弦波信号

10.在 DA 通道选择处输入 1，点击 DA 输出，选择 DA 通道 1 输出信号。



图 1.2.16 选择 DA 通道 1 输出信号

11.在 AD 通道选择出输入 1，点击 AD 采集，选择 AD 通道 1 采集信号。



图 1.2.17 选择 AD 通道 1 采集信号

12.使用示波器观察 DA1 输出信号。

13.改变占空比或是频率，再次点击选择输出信号，旋转信号源模块上的 RW1 改变输出信号的幅度。观察示波器采集信号波形的变化与 MATLAB 软件的 AD 采集信号窗口显示的波形的变化，对比分析三个参数对输出信号的影响。

13.尝试修改 AD、DA 通道，改变通道时，同时改变 AD、DA 的接线。重复以上步骤。

### 1.2.5 实验结果

当信号源的 DA1 接至 AD1 时。AD1 采集 DA1 输出信号，并获取信号的频率与幅值。仅对输出信号修改频率的情况下的对比。

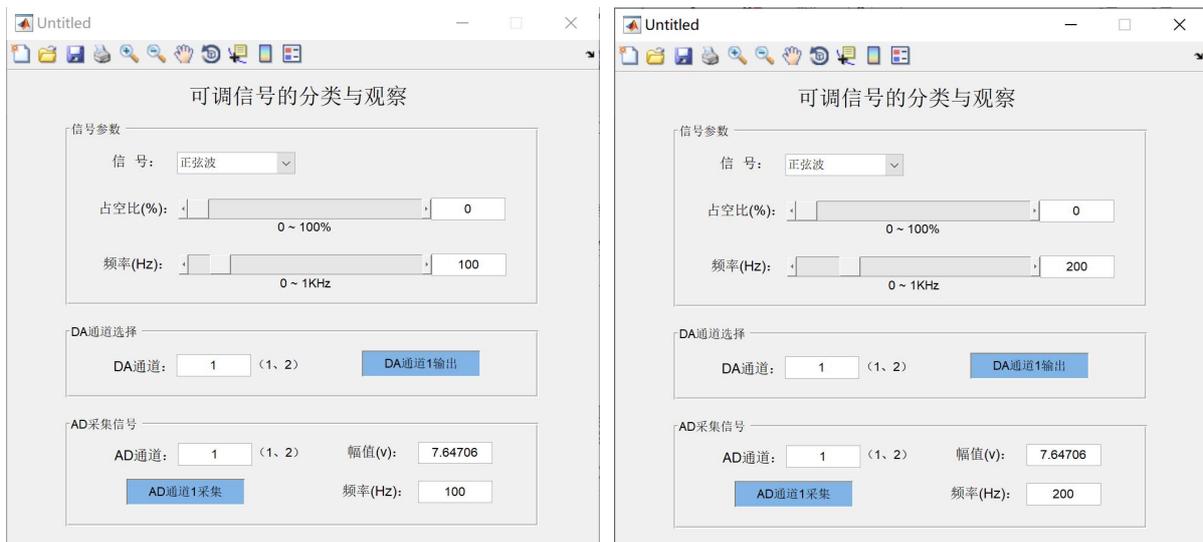


图 1.2.18 AD 采集输出信号的频率及幅值

AD 采集信号窗口显示采集信号波形。

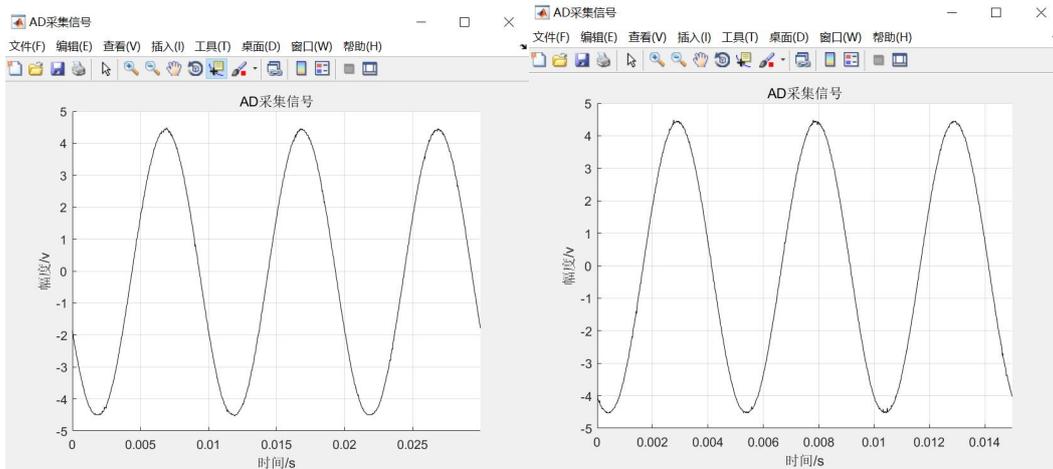


图 1.2.19 AD 采集信号波形图

示波器通道 1 接至 DA1。

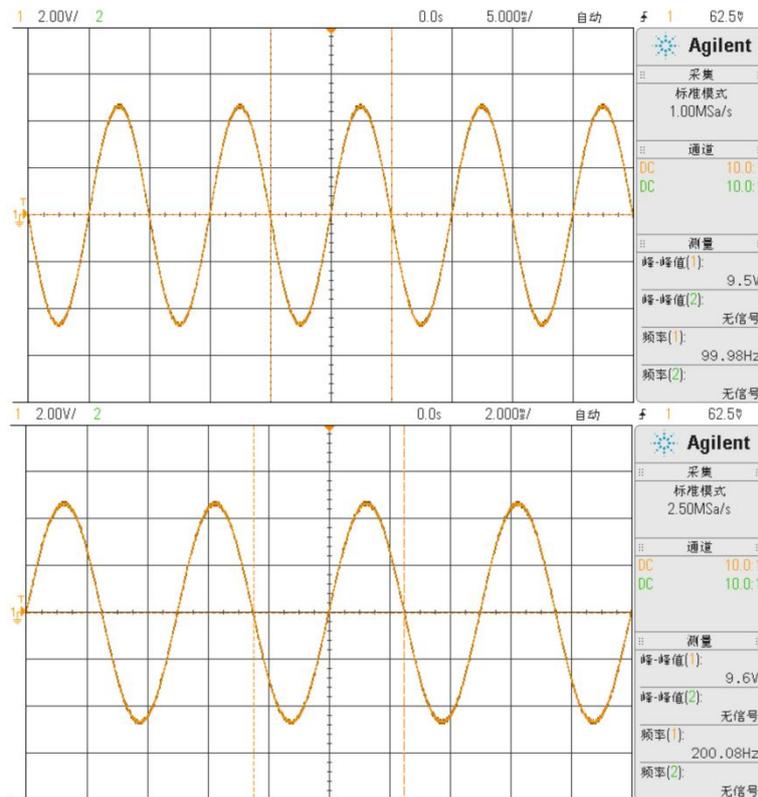


图 1.2.20 示波器观测 DA 输出通道

## 1.3 信号的基本运算实验

### 1.3.1 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, 使用双踪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。
- 3) 使用 MATLAB 软件对信号进行加法运算, 记录波形。使用信号源模块采集加法器输出信号, 记录波形。两组波形对比分析。

##### (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, 使用双踪示波器分别观察方波信号的乘法器输出信号, 对比分析。
- 3) 使用 MATLAB 软件对信号进行乘法运算, 记录波形。使用信号源模块分别采集乘法器输出信号, 记录波形。两组波形对比分析。

##### (2) 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, 使用双踪示波器分别观察方波信号的积分器输出信号, 对比分析。
- 3) 使用 MATLAB 软件对信号进行积分运算, 记录波形。使用信号源模块采集积分器输出信号, 记录波形。两组波形对比分析。

### 1.3.2 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 1.3.1 所示。

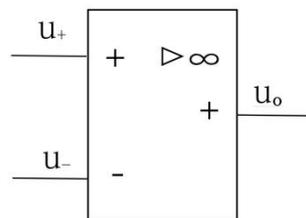


图 1.3.1 运算放大器的电路符号

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 1.3.2 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 $R_F = R$ 。

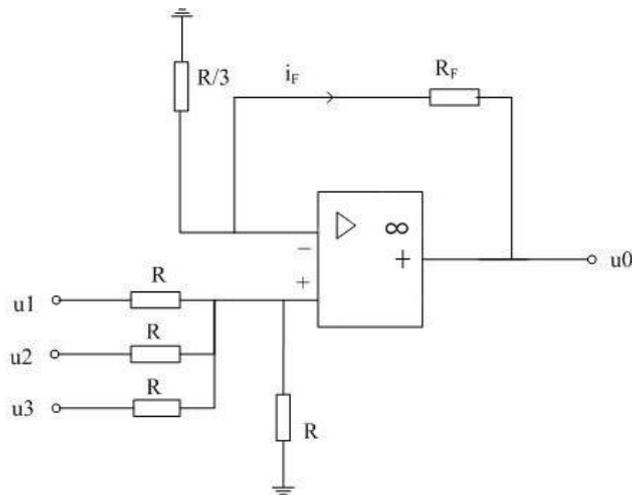


图 1.3.2 加法器原理图

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, 因此在 MATLAB 中表示时将 $u_3$ 值忽略, 具体表示为:

1. tops.cell\_buf(1,1) = {tops.ad1.dbuf};
2. tops.cell\_buf(2,1) = {tops.ad2.dbuf};
3. adder\_buf = sum(cat(3, tops.cell\_buf{1:2}), 3);

## (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 1.3.3、图 1.3.4 所示，其中， $R_F = 20K\Omega$ ， $R_f = 10K\Omega$ 。

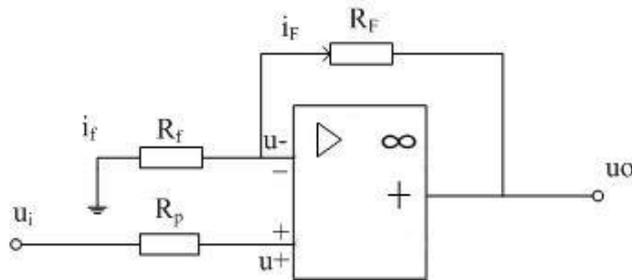


图 1.3.3 同相比例放大器

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

$$3u_i = u_o$$

在 MATLAB 中表示为：

```
mul_buf = tops.adc_dbuf * 3;
```

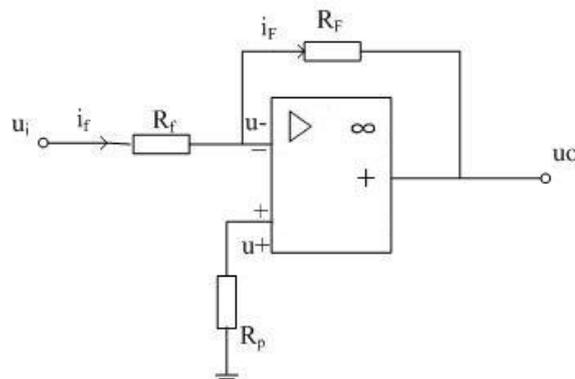


图 1.3.4 反相比例放大器

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 $R_f = R_F = 5.1K\Omega$ ,  $C_F = 47nF$ 。

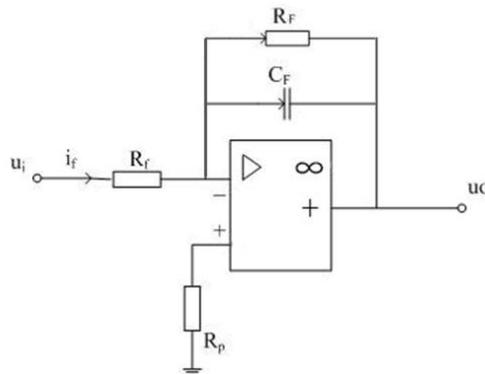


图 1.3.5 积分器

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  $R_f = r_1$ ,  $R_F = r_2$ ,  $C_F = c$  使用 MATLAB 的符号计算功能将上式进行化简:

```

1. syms r1 r2 xc ui uo uf au;
2. syms f c s;
3. eqs = [ui./r1 == uo./r2 + uo./xc, ...
4. xc == 1/(s*c), ...
5. au == uo./ui, ...
6. ];
7. S = solve(eqs,[au,uo,xc]);
8. au = S.au
    
```

程序化简结果为:

```

9. au = r2/(r1 + c*r1*r2*s)
    
```

系统传递函数为:

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

在 MATLAB 中调用系统函数形式为:

```

10. tf_sys = tf([0 r2],[c.*r1.*r2 r1]);
    
```

在 MATLAB 中求系统响应的形式如下:

```

11. int_dbuf = lism(int_sys,int_buf,int_t);
    
```

其中,  $int\_sys$  为积分器的系统传递函数,  $int\_buf$  为系统的输入信号,  $int\_dbuf$  为系统的响应, 时间长度取  $int\_t$ 。

### 1.3.3 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6根。
- 3.USB3.0 数据线1根。
- 4.双踪示波器1台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.3.4 实验步骤

- 1.使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。
- 2.使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

(1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面, 在界面左侧的 Cyperss FX3 USB

BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

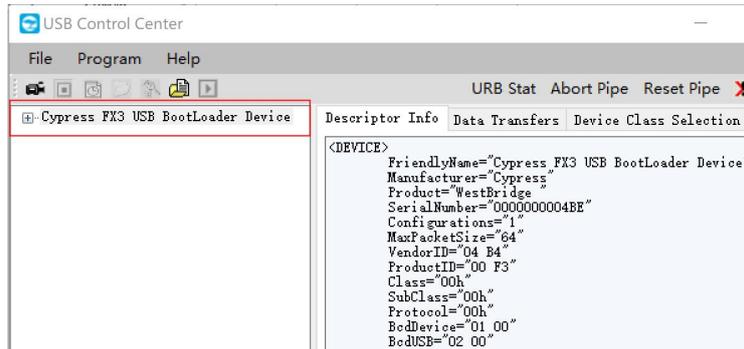


图 1.3.6 选择 FX3 设备

(2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

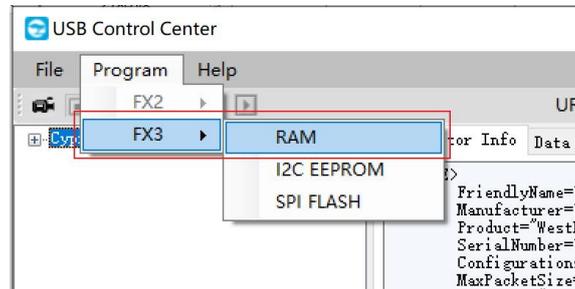


图 1.3.7 选择下载方式

(3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

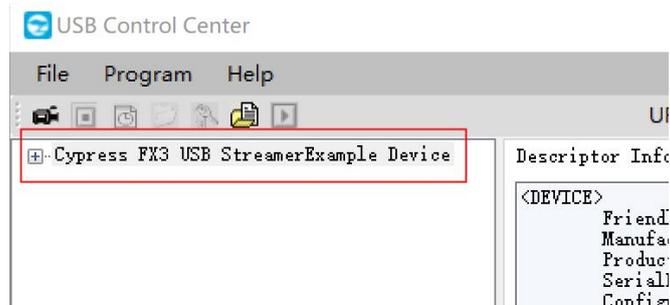


图 1.3.8 FX3 程序下载完成

3.打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

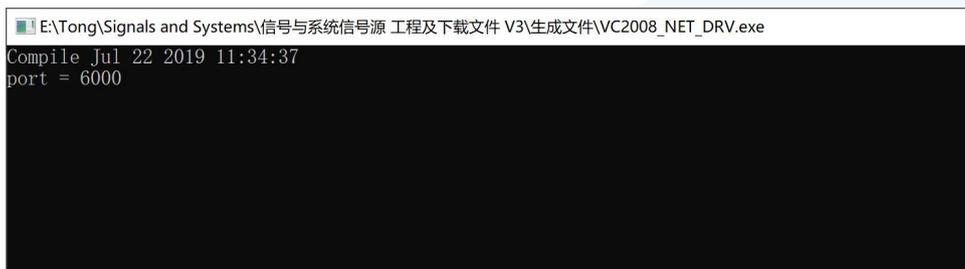


图 1.3.9 打开 VC2008\_NET\_DRV

4. 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

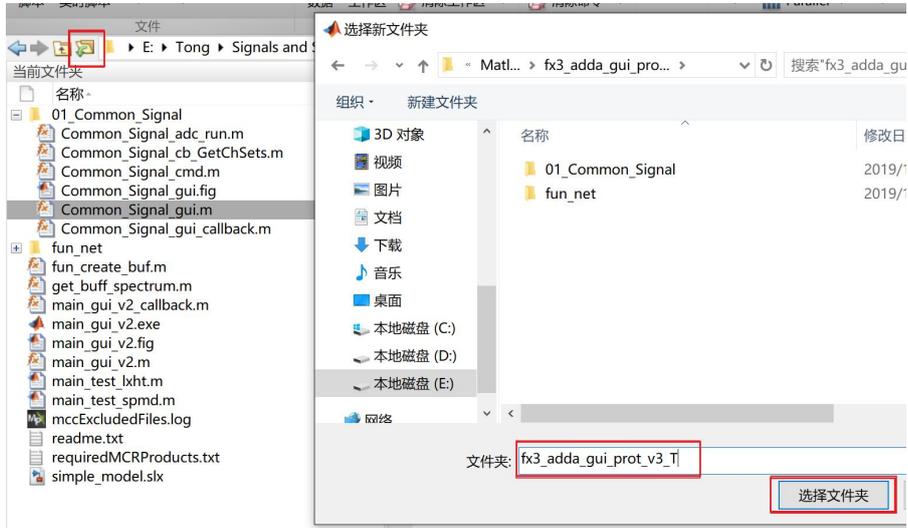


图 1.3.10 打开工程文件夹

5. 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

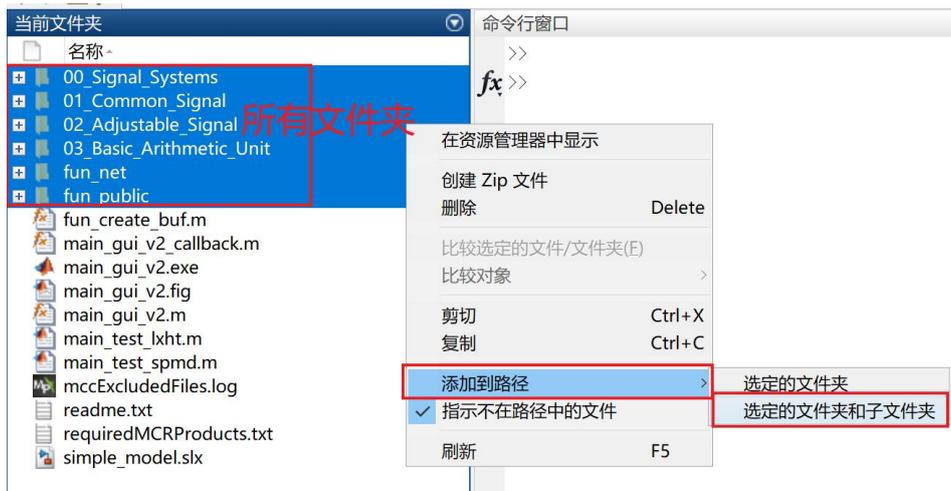


图 1.3.11 添加路径

6. 在命令行窗口输入“Basic\_Arithmetic\_gui”，按下回车键运行程序。

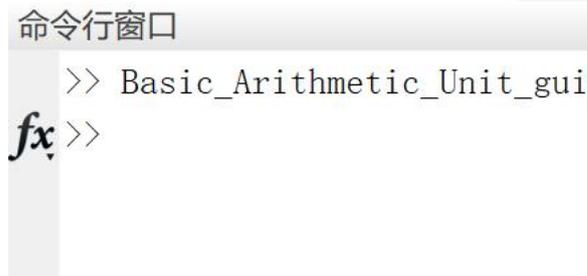


图 1.3.12 运行程序

7.运行程序后，打开基本运算单元界面。



图 1.3.13 基本运算单元界面

### 8.加法器实验

- (1) 将信号源的 DA1、DA2 输出端口与 AD1、AD2 采集端口用实验导线连接。
- (2) 将信号源的 DA1、DA2 输出端口与加法器的 u1、u2 输入端口用实验导线连接，加法器的 u3 与 GND 连接。
- (3) 基本运算单元菜单栏处选择“加法器”。
- (4) 在 DA 输出窗口中选择输出一路频率为 300Hz 的正弦波和一路频率为 50Hz 且占空比为 50%的方波。



图 1.3.14 DA 输出信号

- (5) 点击加法器窗口的 AD 采集按钮，弹出 AD 通道波形显示窗口，调节信号源模块上的 RW1 和 RW2，使正弦波信号的幅值为 1V，方波信号幅值为 2.5V。若是波形显示窗口显示波形刷新过快，点击“停止”，停止 AD 采集信号，滑动“采集信号频率调节”滑动条，再次点击“AD 采集”，直至正常显示。也可使用双踪示波器观察 AD1、

AD2 输出信号进行调节幅值，调节完幅值需点击“AD 采集”。调节完成后，点击“停止”按钮。

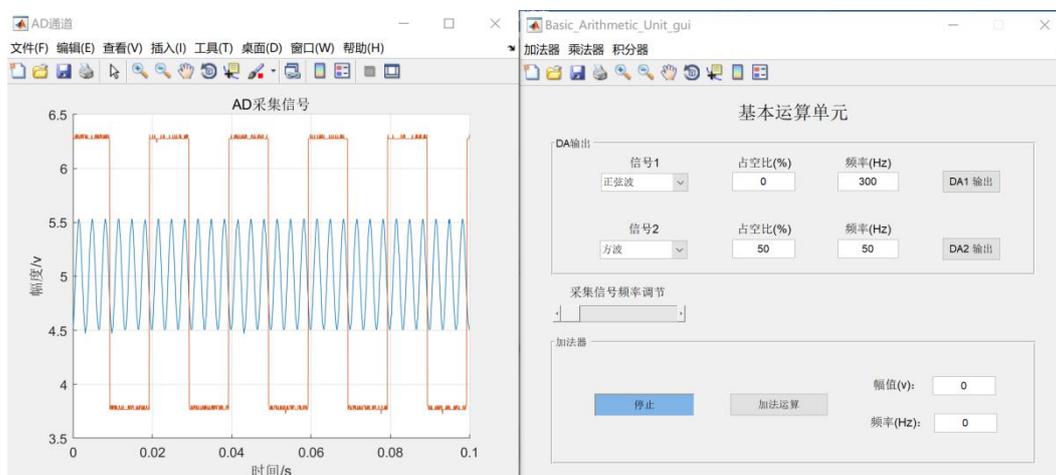


图 1.3.15 调节 DA 输出信号幅值

(6) 点击“加法运算”，弹出“运算结果”窗口，并在加法器窗口中，显示频率和幅值。

(7) 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 MATLAB 软件中运算的结果。

### 9. 同相标量乘法器实验

(1) 将信号源的 DA1 输出端口与 AD1 采集端口用实验导线连接。

(2) 将信号源的 DA1 输出端口与同相标量乘法器的输入端口用实验导线连接。

(3) 基本运算单元菜单栏处选择“加法器”。

(4) 在 DA 输出窗口中信号 1 选择输出频率为 1KHz 且占空比不为 50%的方波，此处使用占空比为 25%为例。



图 1.3.16 DA 输出信号

(5) 乘法器窗口中选规则“同相标量乘法器”，“AD 通道”输入“1”表示选择 AD 通道 1 采集信号，点击“AD 采集”按钮，弹出 AD 通道波形显示窗口，调节信号源模块上的 RW1，使方波信号幅值为 2V。若是波形显示窗口显示波形刷新过快，点击“停

止”，停止 AD 采集信号，滑动“采集信号频率调节”滑动条，再次点击“AD 采集”，直至正常显示。也可使用双踪示波器观察 AD1 输出信号进行调节幅值，调节完幅值需点击“AD 采集”。调节完成后，点击“停止”按钮。

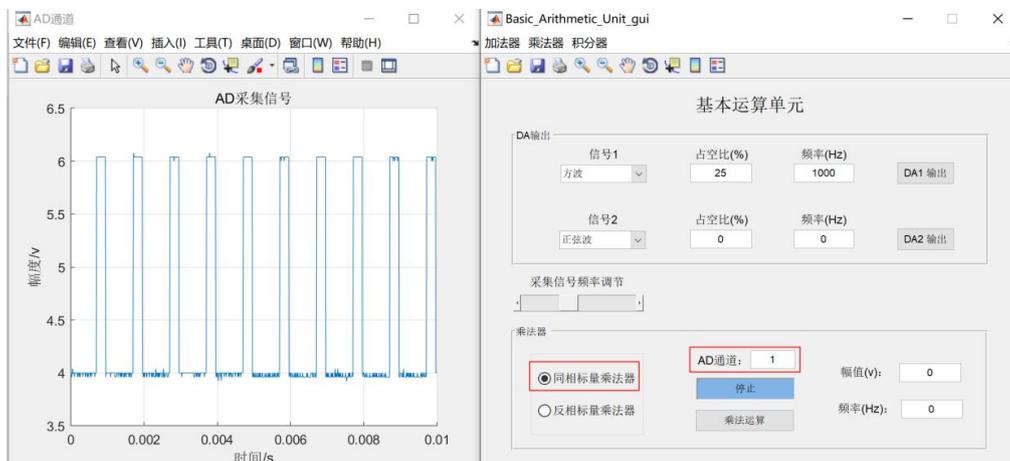


图 1.3.17 调节 DA 输出信号幅值

(6) 点击“乘法运算”，弹出“运算结果”窗口，并在加法器窗口中，显示频率和幅值。

(7) 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，对比分析 MATLAB 软件中运算的结果。

### 10.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“反相标量乘法器”。

### 11.积分器实验

- (1) 将信号源的 DA1 输出端口与 AD1 采集端口用实验导线连接。
- (2) 将信号源的 DA1 输出端口与积分器的输入端口用实验导线连接。
- (3) 基本运算单元菜单栏处选择“积分器”。
- (4) 在 DA 输出窗口中选择输出一路频率为 1KHz 的且占空比为 50%的方波。



图 1.3.18 DA 输出信号

(5) 在积分器窗口中的“AD 通道”输入“1”表示选择 AD 通道 1 采集信号，点击“AD 采集”按钮，弹出 AD 通道波形显示窗口，调节信号源模块上的 RW1，使方波信号幅值为 2V。若是波形显示窗口显示波形刷新过快，点击“停止”，停止 AD 采集信号，滑动“采集信号频率调节”滑动条，再次点击“AD 采集”，直至正常显示。也可使用双踪示波器观察 AD1 输出信号进行调节幅值，调节完幅值需点击“AD 采集”。调节完成后，点击“停止”按钮。

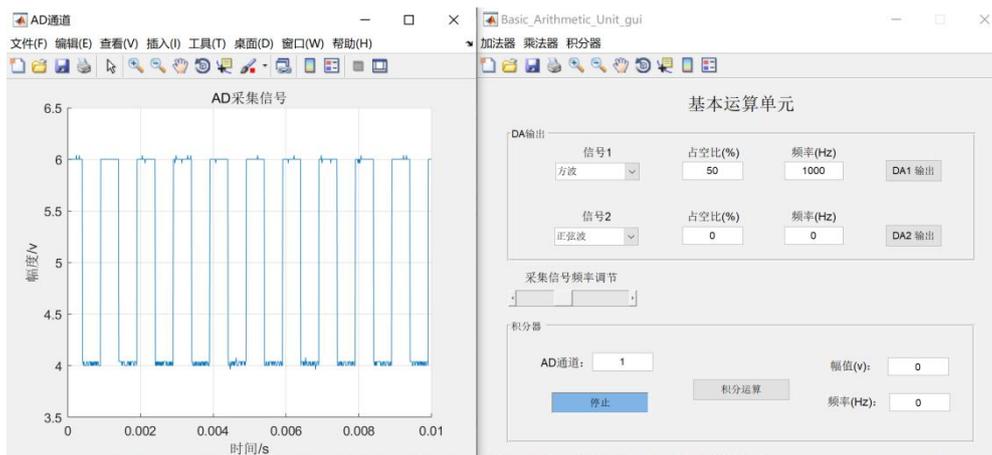


图 1.3.19 调节 DA 输出信号幅值

(6) 点击“积分运算”，弹出“运算结果”窗口，并在加法器窗口中，显示频率和幅值。

(7) 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 MATLAB 软件中运算的结果。

### 1.3.5 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。MATLAB 软件的运算结果和加法器输出的结果如图 1.3.20、图 1.3.21 所示。

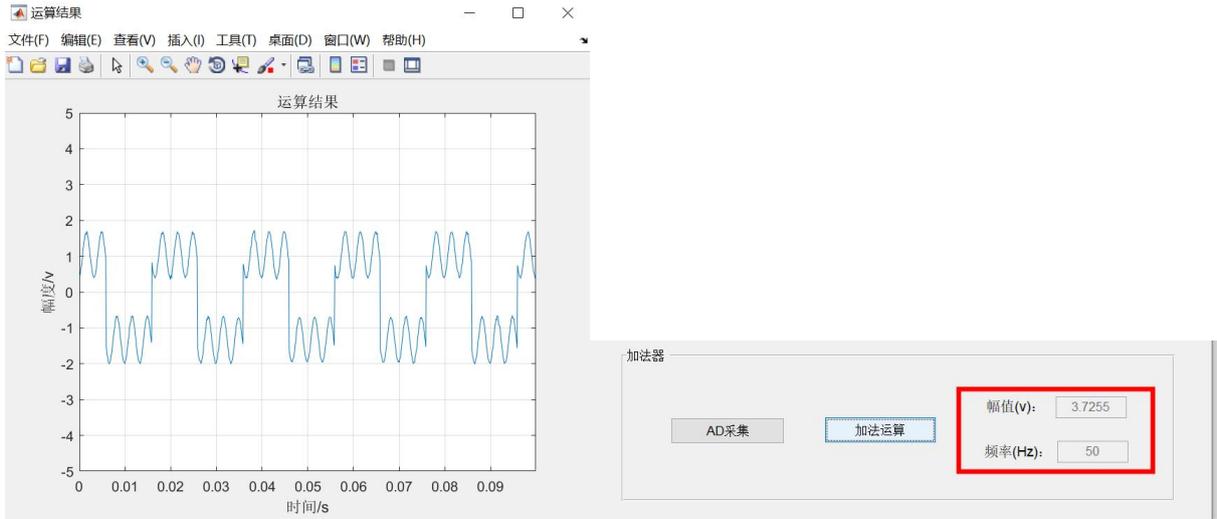


图 1.3.20 加法运算结果

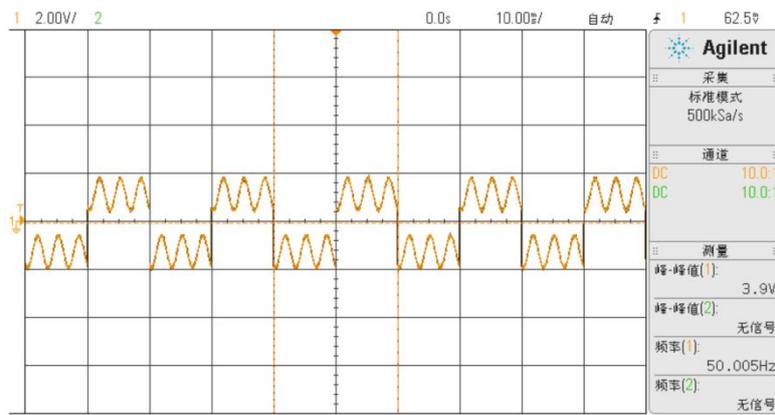


图 1.3.21 示波器观测加法器输出端信号

## 2.同相标量乘法器实验

选用一路频率为 1KHz、幅值为 2V、占空比为 25%的方波信号进行实验。MATLAB 软件的运算结果和同相标量乘法器输出的结果如图 1.3.22、图 1.3.23 所示。

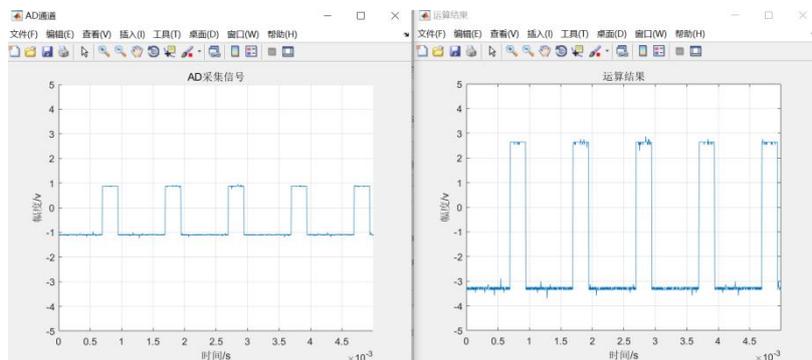


图 1.3.22 同相标量乘法器乘法运算结果

使用示波器通道 1 观测 AD1 的输出信号，示波器通道 2 观测同相标量乘法器的输出信号。

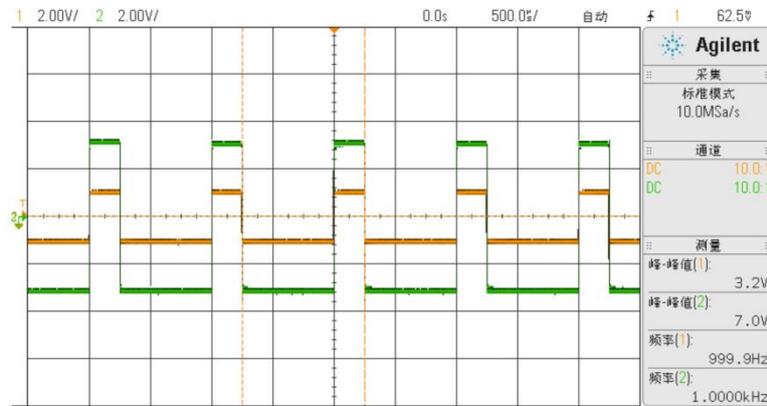


图 1.3.23 示波器观测信号

### 3.反相标量乘法器实验

选用一路频率为 1KHz、幅值为 2V、占空比为 25%的方波信号进行实验。MATLAB 软件的运算结果和反相标量乘法器输出的结果如图 1.3.24、图 1.3.25 所示。

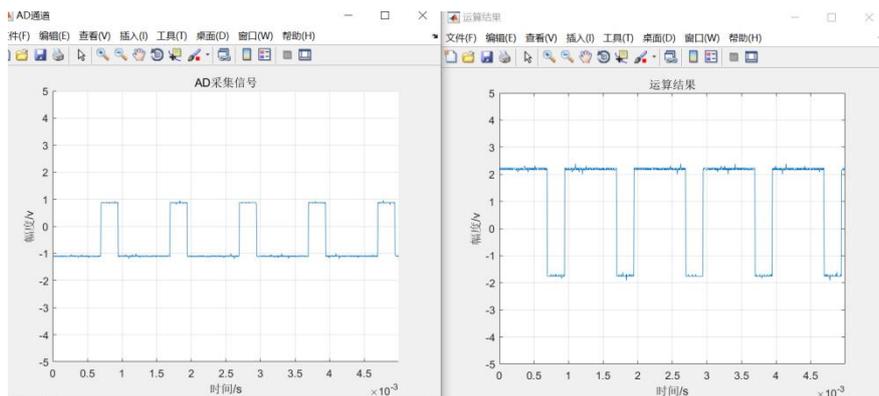


图 1.3.24 反相标量乘法器乘法运算结果

使用示波器通道 1 观测 AD1 的输出信号，示波器通道 2 观测反相标量乘法器的输出信号。

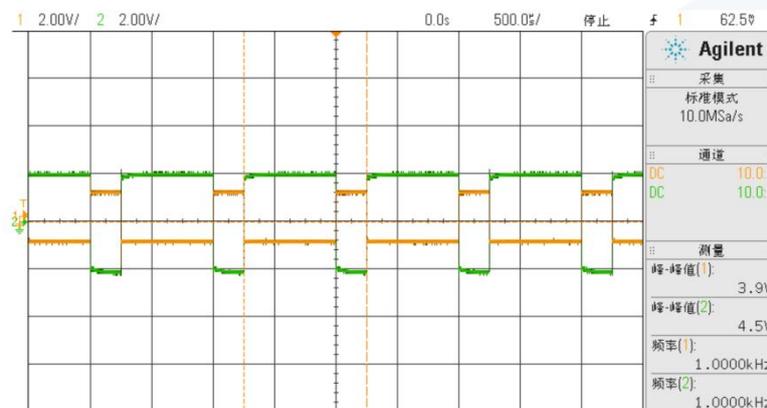


图 1.3.25 示波器观测信号

#### 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。MATLAB 软件的运算结果和同相标量乘法器输出的结果如所示。

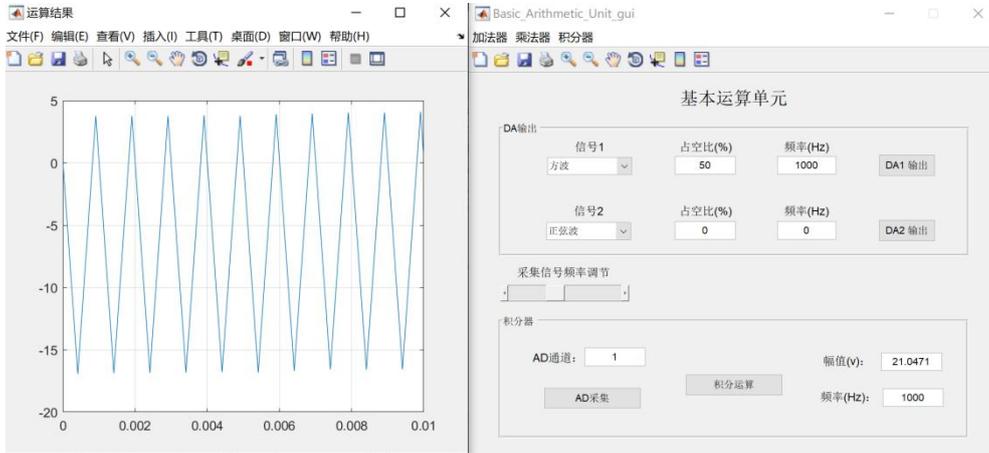


图 1.3.26 积分运算结果

使用示波器通道 1 观测 AD1 的输出信号，示波器通道 2 观测积分器的输出信号。

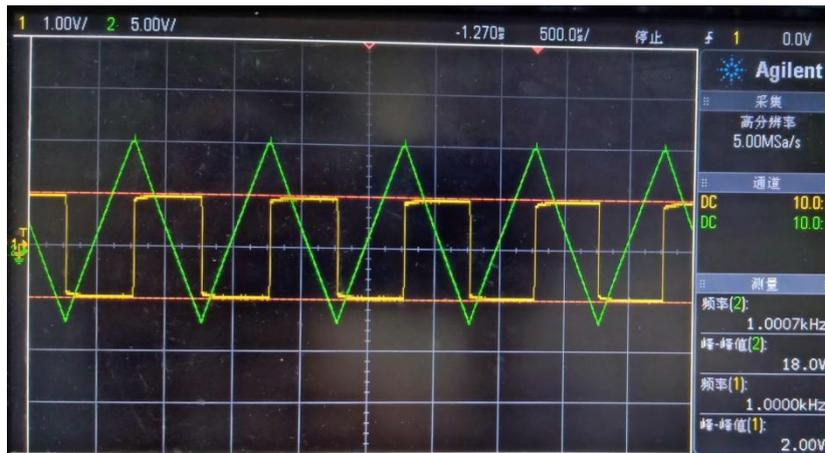


图 1.3.27 示波器观测信号

## 1.4 滤波器基本实验

### 1.4.1 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 MATLAB 软件分析滤波器的幅频特性, 使用信号源单元产生扫频信号并输出给滤波器, 使用示波器观察滤波器的输出信号; 同时通过信号源单元 AD 通道采集输出扫频信号, MATLAB 进行滤波操作, 观察实验现象, 与滤波器采集的信号进行对比分析。

### 1.4.2 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) 带通滤波器和阻带滤波器

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。前者常用于载波通讯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 1.4.1 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。

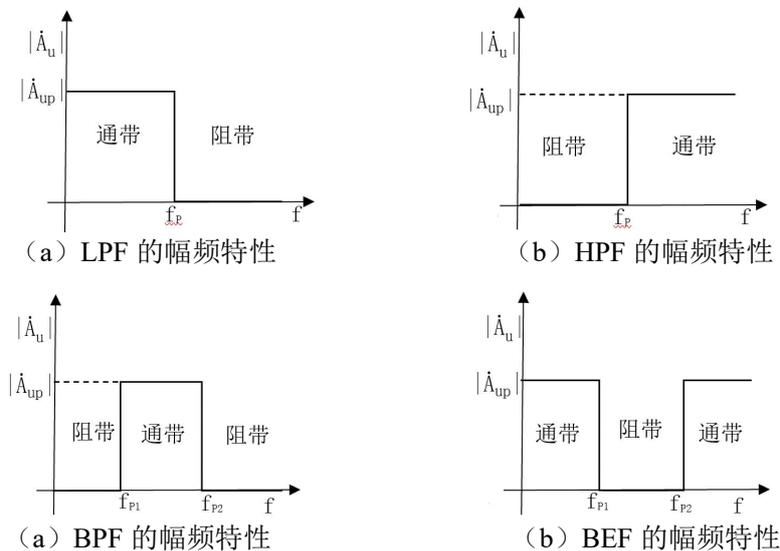


图 1.4.1 理想滤波电路的幅频特性

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。

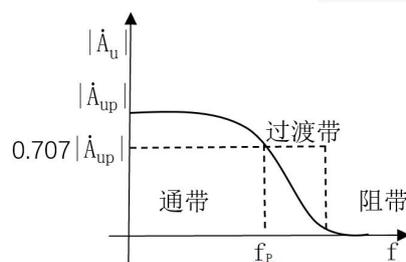


图 1.4.2 低通滤波器的实际幅频特性

### 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 1.4.3 (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 1.4.3 (b) 所示为有源低通滤波器的电路原理图,其中  $R_1 = 1K\Omega$ 、 $R_2 = 1K\Omega$ ,  $C_1 = 0.01\mu F$ 、 $C_2 = 0.01\mu F$ 。

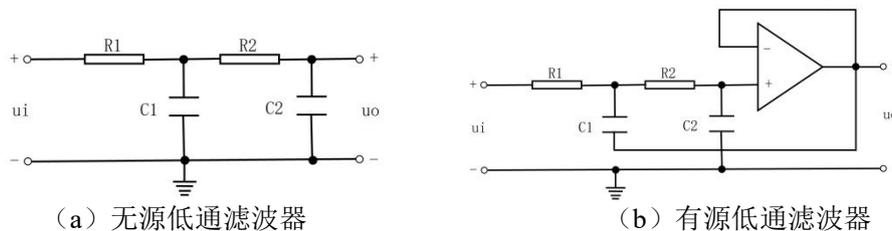


图 1.4.3 低通滤波器

#### 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 1.4.3 (a) 可得:

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

化简可得:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

1. `filt_au_z = 1 / (filt.c1*pi*f*filt.r1*2i + filt.c2*pi*f*filt.r1*2i + ...`
2. `filt.c2*pi*f*filt.r2*2i - 4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2 + 1);`

在 MATLAB 中调用以下代码, 输入滤波电路器件参数值, 可得出其幅频特性曲线。

1. % f 为输入激励信号频率变化范围
2. % f\_a 为幅频特性幅值变化存放数组
3. % filt 为滤波器电路器件参数
- 4.
5. `dt = 0 : 0.001 : 6;`
6. `f = power(10, dt); % 频率范围, 0~10^6Hz`
7. `f_a = size(dt, 2); % 配置幅频特性幅值数组大小`
- 8.
9. `for c = 1:size(dt,2)`
10. `filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`
11. `f_a(c) = abs(filt_au_z); % 幅频`
12. `end`
13. `figure('Name', '幅频特性', 'NumberTitle', 'off');`
14. `semilogx(f,f_a); % 绘制幅频特性曲线`

函数 “`filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`” 如下代码所示:

1. `function filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f)`
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % `filt_ch` 表示选择滤波器。0: 无源低通
4. `switch(filt_ch)`
5. `case 0`
6. `filt_au_z = 1 / (filt.c1*pi*f*filt.r1*2i + filt.c2*pi*f*filt.r1*2i + ...`
7. `filt.c2*pi*f*filt.r2*2i - 4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2 + 1);`
8. `.....`
9. `end`

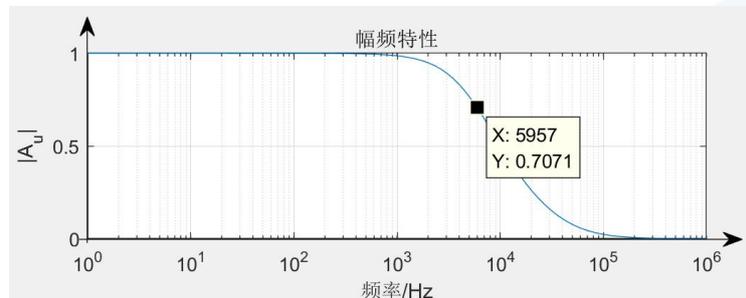


图 1.4.4 无源低通滤波器幅频特性曲线

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 1.4.3 (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:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

1. filt\_au\_z = 1 / (filt.c2\*pi\*f\*filt.r1\*2i + filt.c2\*pi\*f\*filt.r2\*2i -...
2. 4\*filt.c1\*filt.c2\*pi^2\*f^2\*filt.r1\*filt.r2 + 1);

在 MATLAB 中求其幅频特性曲线与求无源低通滤波器得幅频特性曲线基本一致。

与无源低通滤波器得幅频特性曲线不同得地方如下:

函数 “filt\_au\_z = Filter\_Analysis\_filt\_auz(filt\_ch, filt, f(c));” 如下代码所示:

1. function filt\_au\_z = Filter\_Analysis\_filt\_auz(filt\_ch, filt, f)
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % filt\_ch 表示选择滤波器。1: 有源低通
4. switch(filt\_ch)
5. ....
6. case 1
7.     filt\_au\_z = 1 / (filt.c2\*pi\*f\*filt.r1\*2i + filt.c2\*pi\*f\*filt.r2\*2i -...
8.     4\*filt.c1\*filt.c2\*pi^2\*f^2\*filt.r1\*filt.r2 + 1);
9. ....
10. end

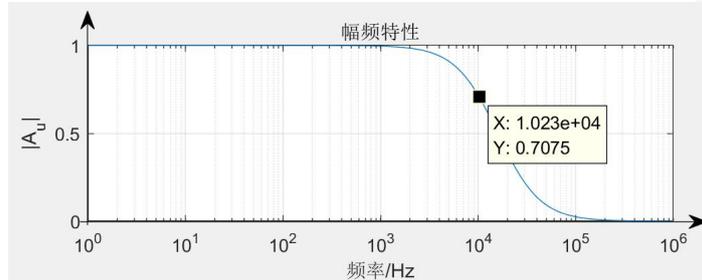


图 1.4.5 有源低通滤波器幅频特性曲线

## (2) 高通滤波器

如图 1.4.6 (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 1.4.6 (b) 所示为有源高通滤波器的电路原

理图, 其中  $R1 = 1K\Omega$ ,  $R2 = 1K\Omega$ ,  $C1 = 0.047\mu F$ ,  $C2 = 0.047\mu F$ 。

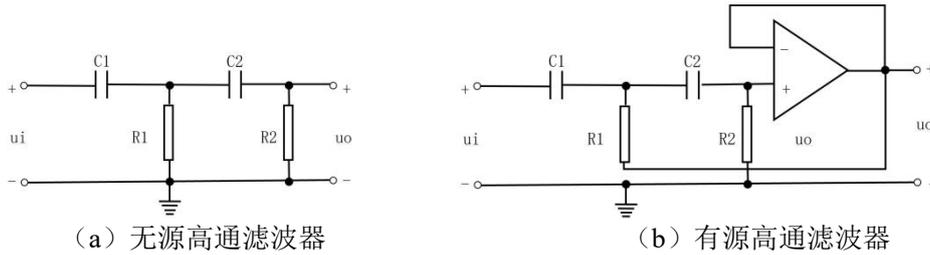


图 1.4.6 高通滤波器

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 1.4.6 (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:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

```
1. filt_au_z = -(4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2) / ...
2. (filt.c1*pi*f*filt.r1*2i + filt.c2*pi*f*filt.r1*2i + ...
3. filt.c2*pi*f*filt.r2*2i - 4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2 + 1);
```

在 MATLAB 中求其幅频特性曲线与求无源低通滤波器得幅频特性曲线基本一致。

与无源低通滤波器得幅频特性曲线不同得地方如下:

函数 “`filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`” 如下代码所示:

```
1. function filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f)
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % filt_ch 表示选择滤波器。2: 无源高通
4. switch(filt_ch)
5. ....
6. case 2
7.     filt_au_z = -(4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2) / ...
8.     (filt.c1*pi*f*filt.r1*2i + filt.c2*pi*f*filt.r1*2i + ...
9.     filt.c2*pi*f*filt.r2*2i - 4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2 + 1);
10. ....
11. end
```

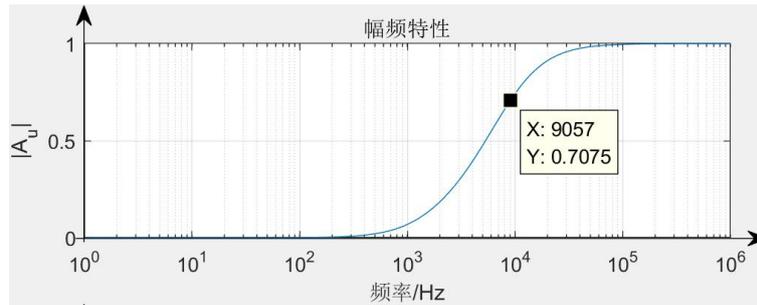


图 1.4.7 无源高通滤波器幅频特性

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 1.4.6 (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:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

```
1. filt_au_z = -(4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2) / ...
2. (filt.c1*pi*f*filt.r1*2i + filt.c2*pi*f*filt.r1*2i - ...
3. 4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2 + 1);
```

在 MATLAB 中求其幅频特性曲线与求无源低通滤波器得幅频特性曲线基本一致。

与无源低通滤波器得幅频特性曲线不同得地方如下:

函数 “`filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`” 如下代码所示:

```
1. function filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f)
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % filt_ch 表示选择滤波器。3: 有源高通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 3
7.         filt_au_z = -(4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2) / ...
8.             (filt.c1*pi*f*filt.r1*2i + filt.c2*pi*f*filt.r1*2i - ...
9.             4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2 + 1);
10.     .....
11. end
```

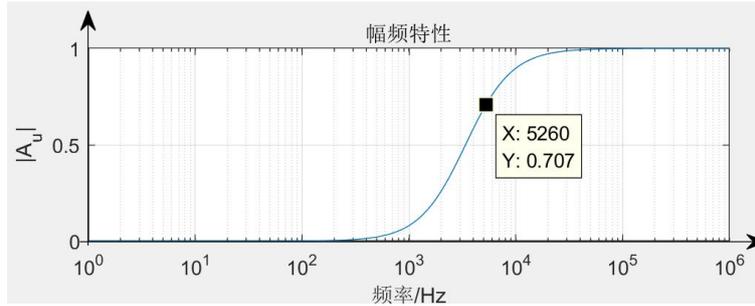


图 1.4.8 有源高通滤波器幅频特性曲线

### (3) 带通滤波器

如图 1.4.9 (a) 所示为无源带通滤波器的电路原理图, 其中  $R1 = 1K\Omega$ ,  $R2 = 1K\Omega$ ,  $C1 = 0.022\mu F$ ,  $C2 = 0.022\mu F$ 。如图 1.4.9 (b) 所示为有源带通滤波器的电路原理图, 其中  $R1 = 1K\Omega$ ,  $R2 = 1K\Omega$ ,  $R3 = 2K\Omega$ ,  $R4 = 10K\Omega$ ,  $R5 = 12.4K\Omega$ ,  $C1 = 0.022\mu F$ ,  $C2 = 0.022\mu F$ 。

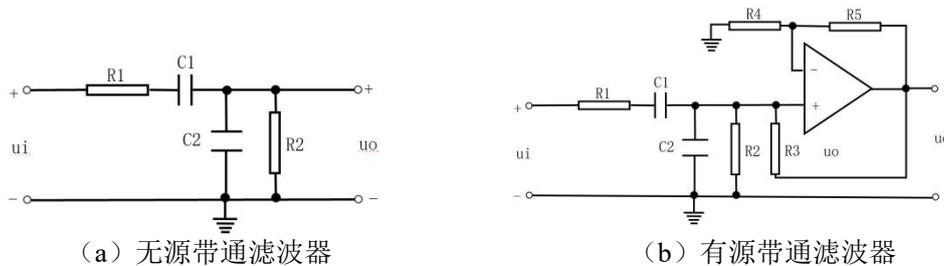


图 1.4.9 带通滤波器

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 1.4.9 (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:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

```
1. filt_au_z = (filt.c1*pi*f*filt.r2*2i)/(filt.c1*pi*f*filt.r1*2i+...
2.   filt.c1*pi*f*filt.r2*2i+filt.c2*pi*f*filt.r2*2i-...
3.   4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2+1);
```

在 MATLAB 中求其幅频特性曲线与求无源低通滤波器得幅频特性曲线基本一致。

与无源低通滤波器得幅频特性曲线不同得地方如下:

函数“`filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`”如下代码所示:

```

1. function filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f)
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % filt_ch 表示选择滤波器。4: 无源带通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 4
7.         filt_au_z = (filt.c1*pi*f*filt.r2*2i)/(filt.c1*pi*f*filt.r1*2i+...
8.             filt.c1*pi*f*filt.r2*2i+filt.c2*pi*f*filt.r2*2i-...
9.             4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2 + 1); % 无源带通滤波器
10.     .....
11. end
    
```

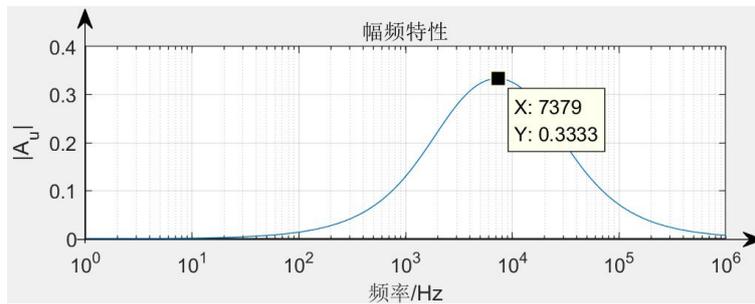


图 1.4.10 无源带通滤波器幅频特性

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 1.4.9 (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:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

```

1. filt_au_z = (filt.c1*pi*f*filt.r2*filt.r3*(filt.r4 + filt.r5)*2i) / ...
2. (filt.r3*filt.r4 - filt.r2*filt.r5 - filt.c1*pi*f*filt.r1*filt.r2*filt.r5*2i+...
3. filt.c1*pi*f*filt.r1*filt.r3*filt.r4*2i+...
4. filt.c1*pi*f*filt.r2*filt.r3*filt.r4*2i + ...
5. filt.c2*pi*f*filt.r2*filt.r3*filt.r4*2i-...
6. 4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2*filt.r3*filt.r4);
    
```

在 MATLAB 中求其幅频特性曲线与求无源低通滤波器得幅频特性曲线基本一致。

与无源低通滤波器得幅频特性曲线不同得地方如下:

函数“`filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`”如下代码所示:

```

1. function filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f)
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % filt_ch 表示选择滤波器。5: 有源带通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 5
7.         filt_au_z = (filt.c1*pi*f*filt.r2*filt.r3*(filt.r4 + filt.r5)*2i) / ...
8.             (filt.r3*filt.r4-filt.r2*filt.r5-filt.c1*pi*f*filt.r1*filt.r2*filt.r5*2i.
..
9.             +filt.c1*pi*f*filt.r1*filt.r3*filt.r4*2i+...
10.            filt.c1*pi*f*filt.r2*filt.r3*filt.r4*2i + ...
11.            filt.c2*pi*f*filt.r2*filt.r3*filt.r4*2i-...
12.            4*filt.c1*filt.c2*pi^2*f^2*filt.r1*filt.r2*filt.r3*filt.r4);
13.     .....
14. end

```

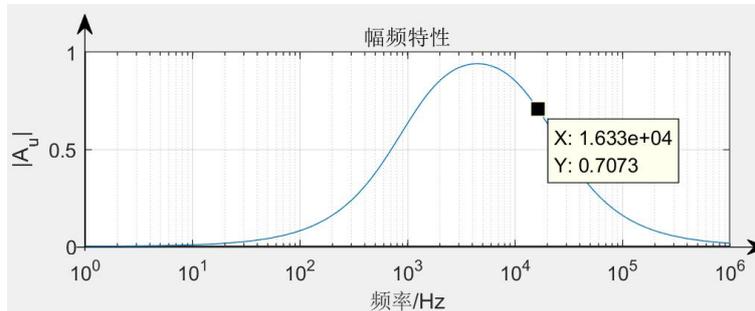


图 1.4.11 有源带通滤波器

#### (4) 带阻滤波器

如图 1.4.12 (a) 所示为无源带阻滤波器的电路原理图, 其中  $R1 = 1.5K\Omega$ ,  $R2 = 1.5K\Omega$ ,  $R3 = 510\Omega$ ,  $C1 = 0.01\mu F$ ,  $C2 = 0.01\mu F$ ,  $C3 = 0.022\mu F$ 。如图 1.4.12 (b) 所示为有源带阻滤波器的电路原理图, 其中  $R1 = 1.5K\Omega$ ,  $R2 = 1.5K\Omega$ ,  $R3 = 510\Omega$ ,  $C1 = 0.01\mu F$ ,  $C2 = 0.01\mu F$ ,  $C3 = 0.022\mu F$ 。

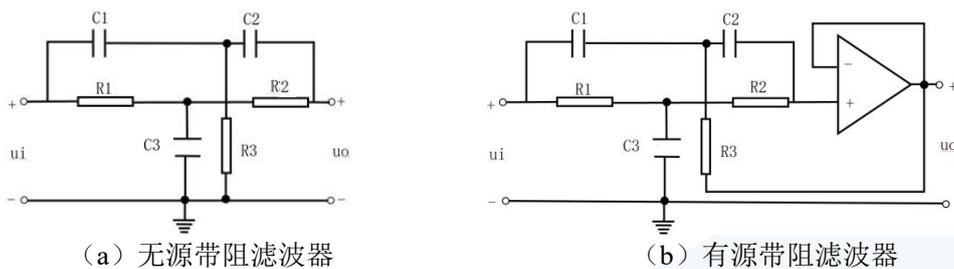


图 1.4.12 带阻滤波器

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 1.4.12 (a) 可得:

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

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:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

```
1. filt_au_z = ((2*pi*f)*(filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r3)+(4i*pi^2*f^2)*...
2. (filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3)-...
3. (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i)/...
4. ((2*pi*f)*(filt.c2*filt.r1+filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r2+filt.c3*filt.r1+...
5. filt.c2*filt.r3)+(4i*pi^2*f^2)*(filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+...
6. filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3+filt.c1*filt.c3*filt.r1*filt.r3+...
7. filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2+filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r3)-...
8. (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i);
```

在 MATLAB 中求其幅频特性曲线与求无源低通滤波器得幅频特性曲线基本一致。

与无源低通滤波器得幅频特性曲线不同得地方如下:

函数 “`filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`” 如下代码所示:

```
1. function filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f)
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % filt_ch 表示选择滤波器。6: 无源带阻
4. switch(filt_ch)
5. ....
6. case 6
7.     filt_au_z = ((2*pi*f)*(filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r3)+(4i*pi^2*f^2)*...
8. (filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3)-...
9. (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i)/...
10. ((2*pi*f)*(filt.c2*filt.r1+filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r2+filt.c3*filt.r1...
11. +filt.c2*filt.r3)+(4i*pi^2*f^2)*(filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+...
12. filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3+filt.c1*filt.c3*filt.r1*filt.r3+...
13. filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2+filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r3)-...
14. (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i);
```

15. ....  
16. end

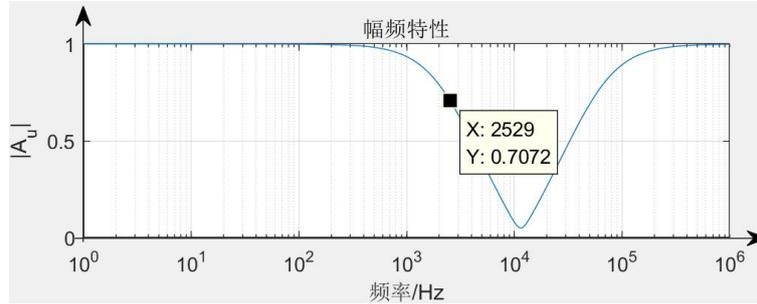


图 1.4.13 无源带阻滤波器幅频特性曲线

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 1.4.12 (b) 可得:

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

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:

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

令  $\omega = 2\pi f$ , 其化简公式在 MATLAB 中表示为:

```
1. filt_au_z = ((2*pi*f)*(filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r3)+(4i*pi^2*f^2)*...
2. (filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+ filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3)-...
3. (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i)/...
4. (2*pi*f)*(filt.c1*filt.r3+filt.c3*filt.r1+filt.c2*filt.r3)+...
5. (4i*pi^2*f^2)*(filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3...
6. +filt.c1*filt.c3*filt.r1*filt.r3+filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r3-...
7. (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i);
```

在 MATLAB 中求其幅频特性曲线与求无源低通滤波器得幅频特性曲线基本一致。

与无源低通滤波器得幅频特性曲线不同得地方如下:

函数“`filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f(c));`”如下代码所示:

```

1. function filt_au_z = Filter_Analysis_filt_auz(filt_ch, filt, f)
2. % 计算滤波器的幅频特性
3. % filt_ch 表示选择滤波器。7 有源带阻
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 7
7.         filt_au_z = ((2*pi*f)*(filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r3)+(4i*pi^2*f^2)*...
8.             (filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+ filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3)-...
9.             (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i)/...
10.            ((2*pi*f)*(filt.c1*filt.r3+filt.c3*filt.r1+filt.c2*filt.r3)+...
11.            (4i*pi^2*f^2)*(filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r2*f
12.            +filt.c1*filt.c3*filt.r1*filt.r3+filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r3)-...
13.            (8*pi^3*f^3)*(filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3)-1i);
14. end
    
```

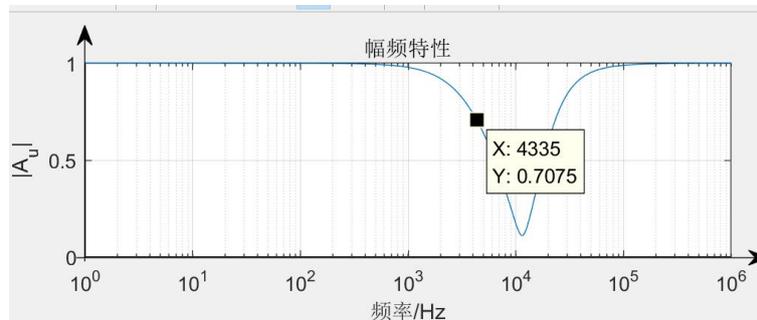


图 1.4.14 有源带阻滤波器幅频特性

### 1.4.3 实验设备

- 1.信号与系统实验平台（含信号源单元、有源与无源滤波器单元）1 台。
- 2.实验导线 6 根。
- 3.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.4.4 实验步骤

- 1.使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。
- 2.使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

(1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

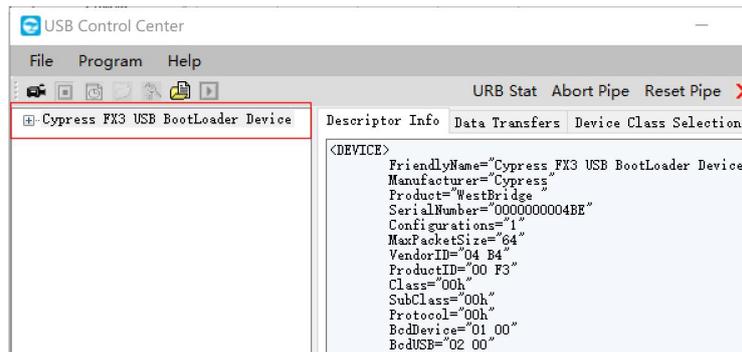


图 1.4.15 选择 FX3 设备

(2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

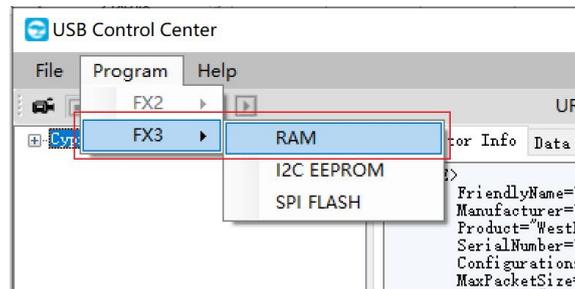


图 1.4.16 选择下载方式

(3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

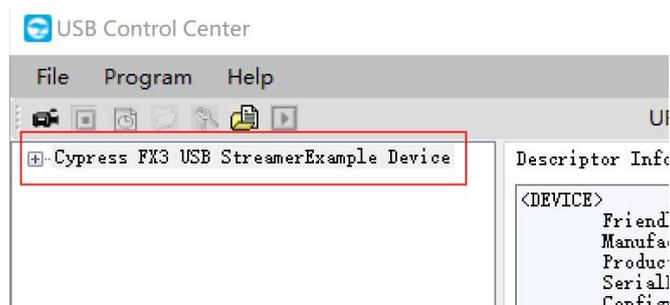


图 1.4.17 FX3 程序下载完成

3.打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

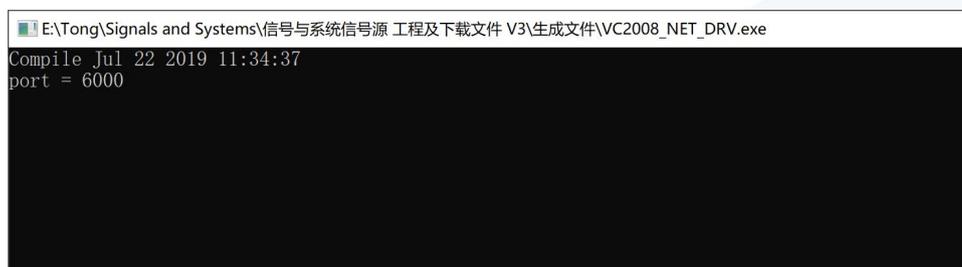


图 1.4.18 打开 VC2008\_NET\_DRV

4.打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

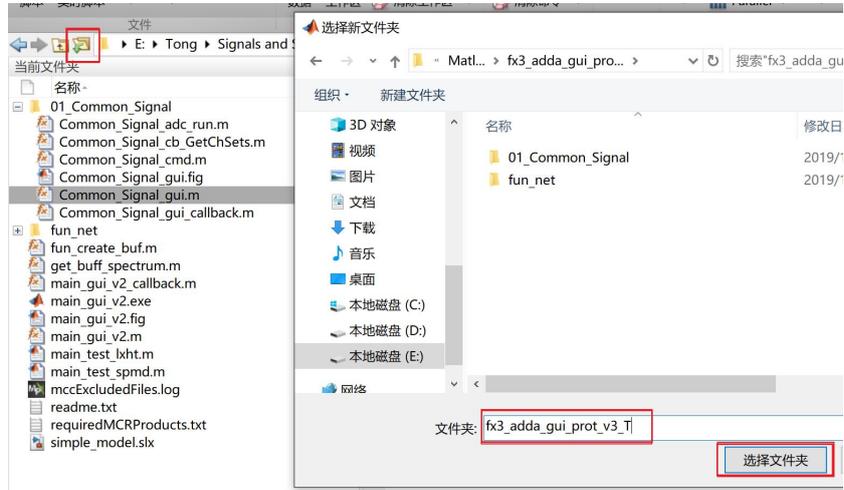


图 1.4.19 打开工程文件夹

5.选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

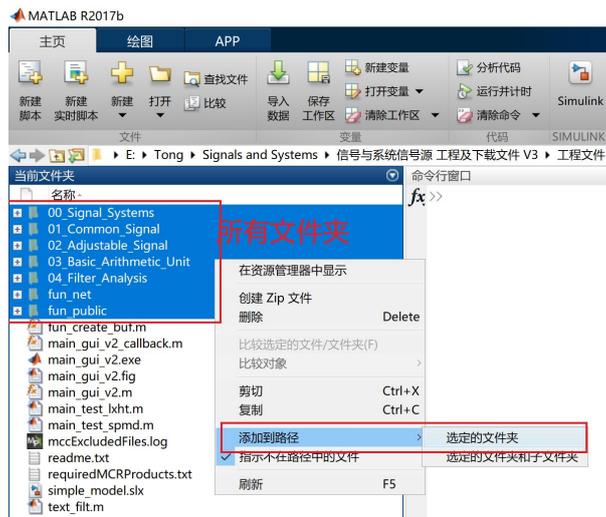


图 1.4.20 添加路径

6.在命令行窗口输入“Filter\_Analysis\_gui”，按下回车键运行程序。

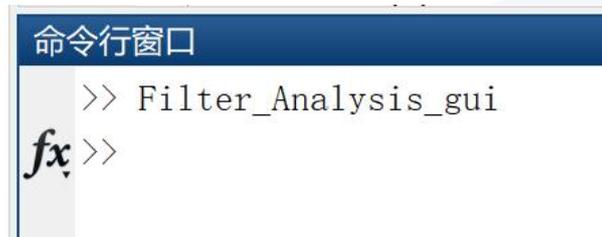


图 1.4.21 运行程序

7.运行程序后，打开滤波器界面。



图 1.4.22 滤波器界面

8.将信号源的 DA1 输出端口与 AD1 采集端口用实验导线连接。

9.无源低通滤波器实验

- (1) 将信号源的 DA1 输出端口与滤波器的输入端口用实验导线连接。
- (2) 在滤波器界面的 DA 输出窗口处，信号选择“扫频信号”，DA 通道输入“1”，点击“DA”输出。
- (3) 点击菜单中的“滤波器类型”，选择“低通滤波器”。



图 1.4.23 选择低通滤波器

(4) 在低通滤波器界面的低通滤波器窗口中，选择“无源低通滤波器”，根据原理图输入电路的相关参数，点击“确认”。在 MATLAB 中  $x$  乘  $10$  的  $n$  次方表示为  $x \times 10^n$ 。



图 1.4.24 无源低通滤波器电路参数配置

(5) “AD 通道”输入“1”，点击 AD 采集，若是波形显示窗口显示波形不完整或是不便观察，则点击“停止”，停止 AD 采集信号，滑动“采集信号频率调节”滑动条，再次点击“AD 采集”，直至正常显示。记录采集信号波形。

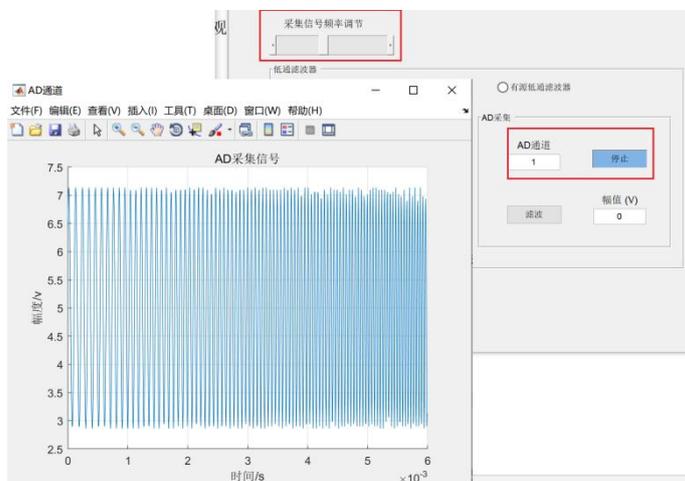


图 1.4.25 AD 采集信号

(6) 点击“滤波”按钮，对采集信号进行滤波处理。记录滤波后的波形。

(7) 使用双踪示波器的通道 1 观测 DA1 输出的信号，通道 2 观测无源低通滤波器输出端的信号。记录波形，与 MATLAB 软件中采集和滤波后的波形对比分析。

10.其他滤波器实验与无源低通滤波器实验步骤相同。



图 1.4.26 有源低通滤波器电路参数配置



图 1.4.27 选择高通滤波器



图 1.4.28 无源高通滤波器电路参数配置



图 1.4.29 有源高通滤波器电路参数配置



图 1.4.30 选择带通滤波器



图 1.4.31 无源带通滤波器电路参数配置



图 1.4.32 有源带通滤波器电路参数配置



图 1.4.33 选择带阻滤波器



图 1.4.34 无源带阻滤波器电路参数配置



图 1.4.35 有源带阻滤波器电路参数配置

### 1.4.5 实验结果

实验中使用的扫频信号频率为 0~20KHz，幅值为 3.5V。

#### 1.低通滤波器实验

##### (1) 无源低通滤波器

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图

1.4.36、图 1.4.37、图 1.4.38 所示。

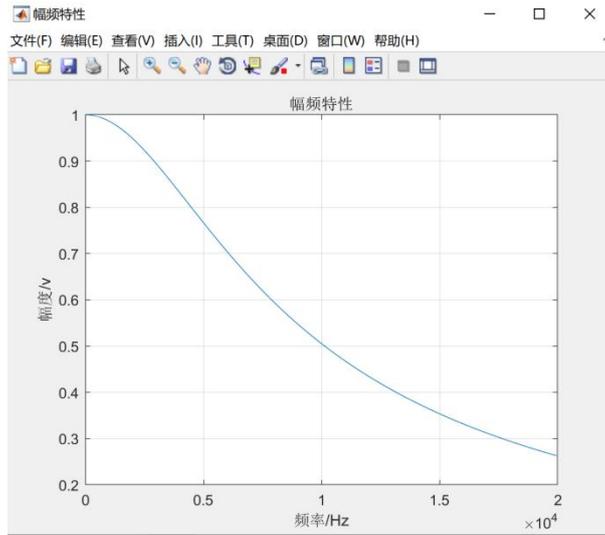


图 1.4.36 无源低通滤波器的幅频特性

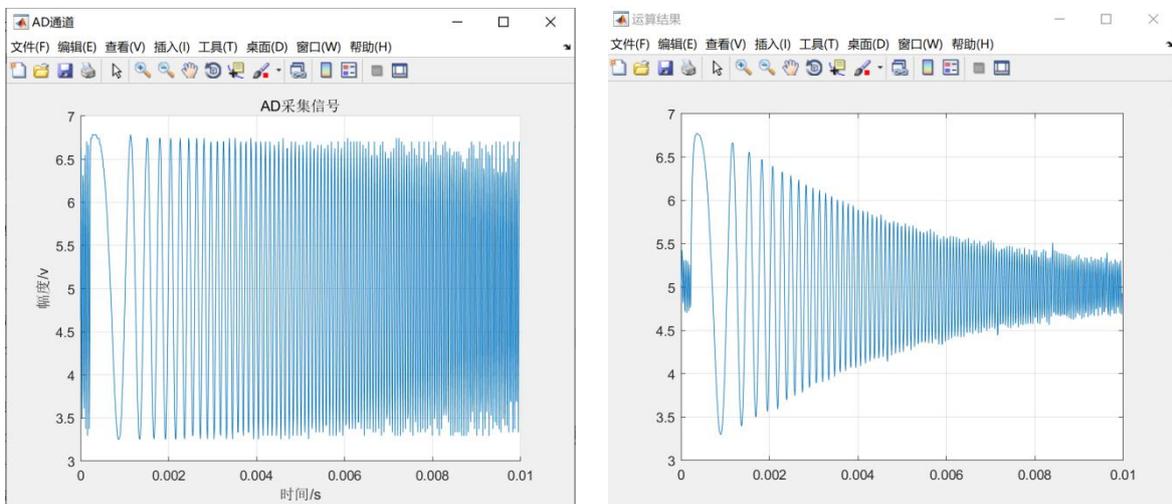


图 1.4.37 AD 采集信号和滤波后信号



图 1.4.38 滤波后信号的最大幅值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端, 通道 2 接无源低通滤波器的输出端。

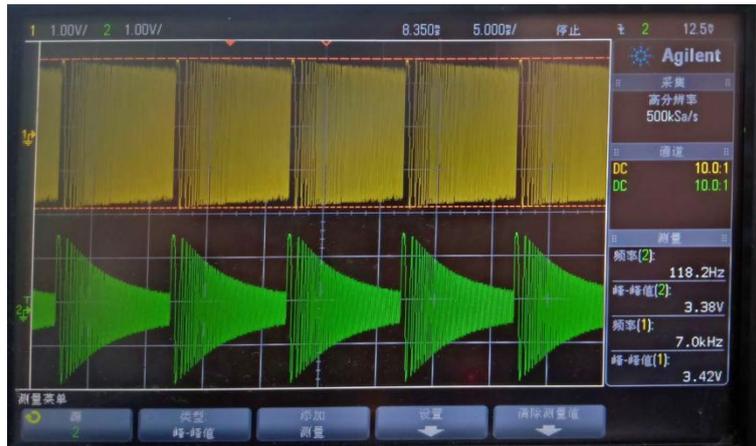


图 1.4.39 双踪示波器观测信号

## (2) 有源低通滤波器实验

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图 1.4.40、图 1.4.41、图 1.4.42 所示。

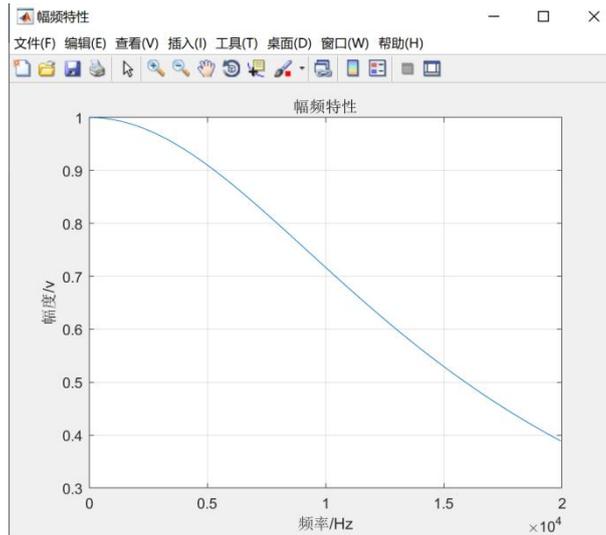


图 1.4.40 有源低通滤波器的幅频特性

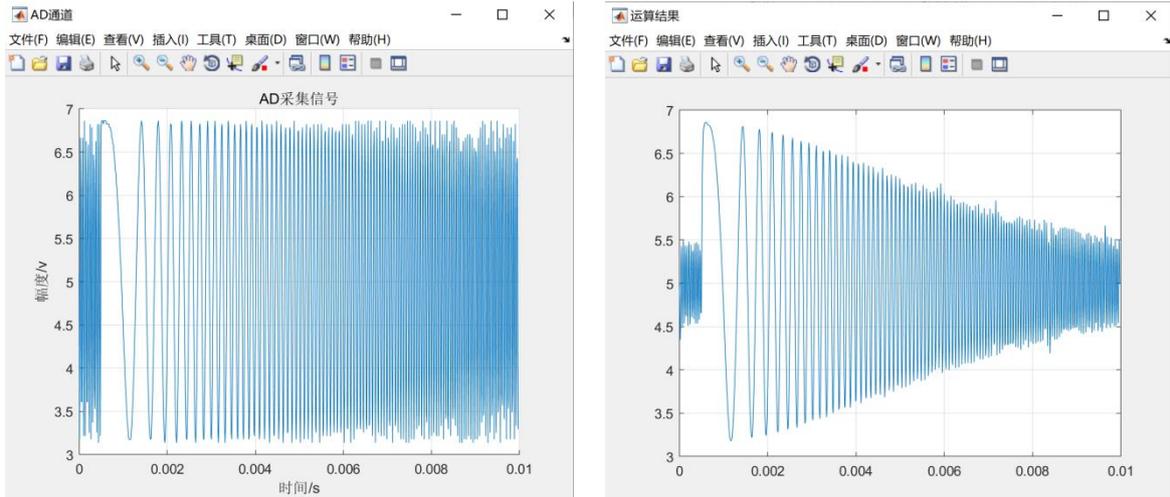


图 1.4.41 AD 采集信号和滤波后信号



图 1.4.42 滤波后信号的最大值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端，通道 2 接有源低通滤波器的输出端。

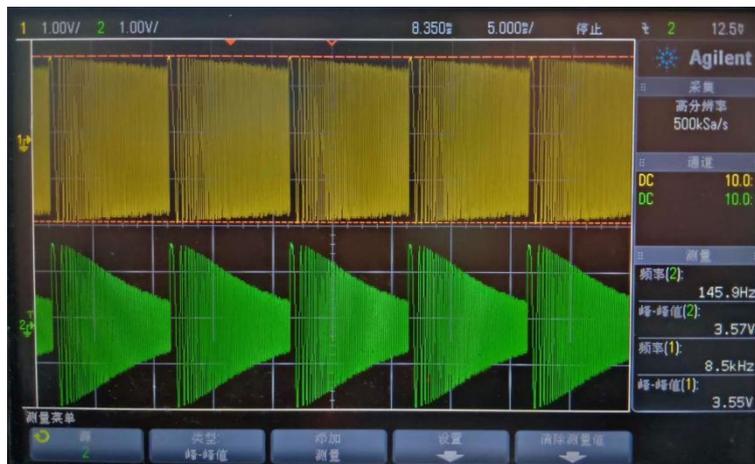


图 1.4.43 双踪示波器观测信号

## 2.高通滤波器实验

### (1) 无源高通滤波器实验

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图 1.4.44、图 1.4.45、图 1.4.46 图 1.4.40 所示。

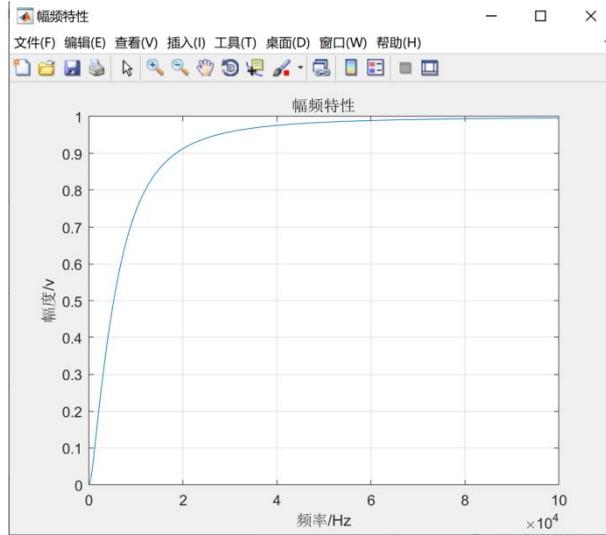


图 1.4.44 无源高通滤波器的幅频特性

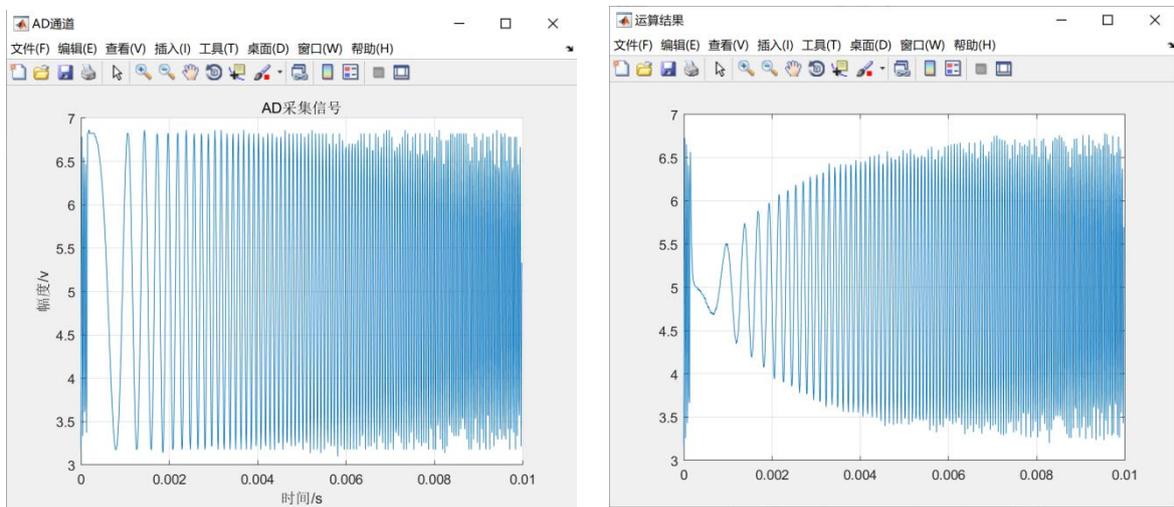


图 1.4.45 AD 采集信号和滤波后的信号

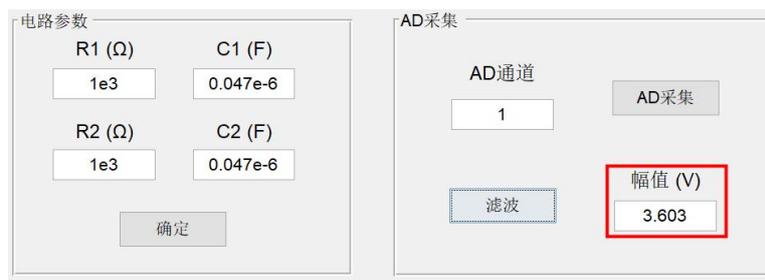


图 1.4.46 滤波后信号的最大值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端，通道 2 接无源高通滤波器的输出端。

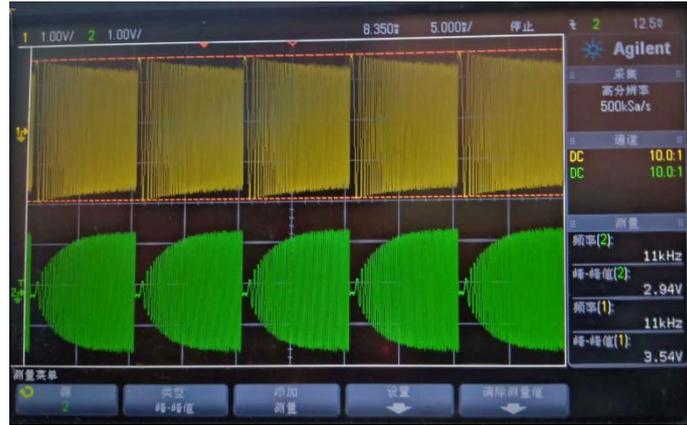


图 1.4.47 双踪示波器观测信号

(2) 有源高通滤波器实验

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图 1.4.48、图 1.4.49、图 1.4.50 图 1.4.40 所示。

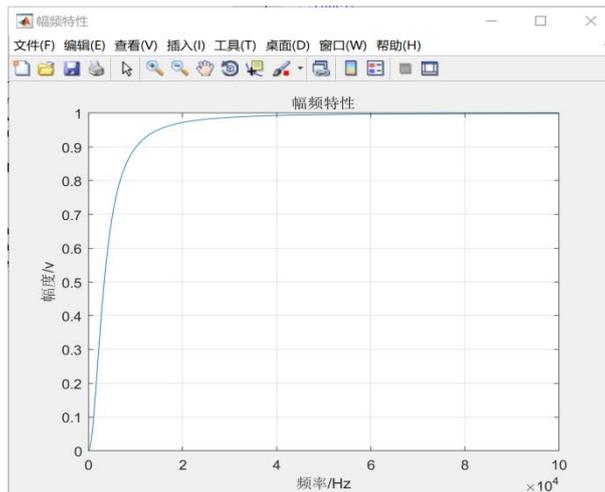


图 1.4.48 有源高通滤波器的幅频特性

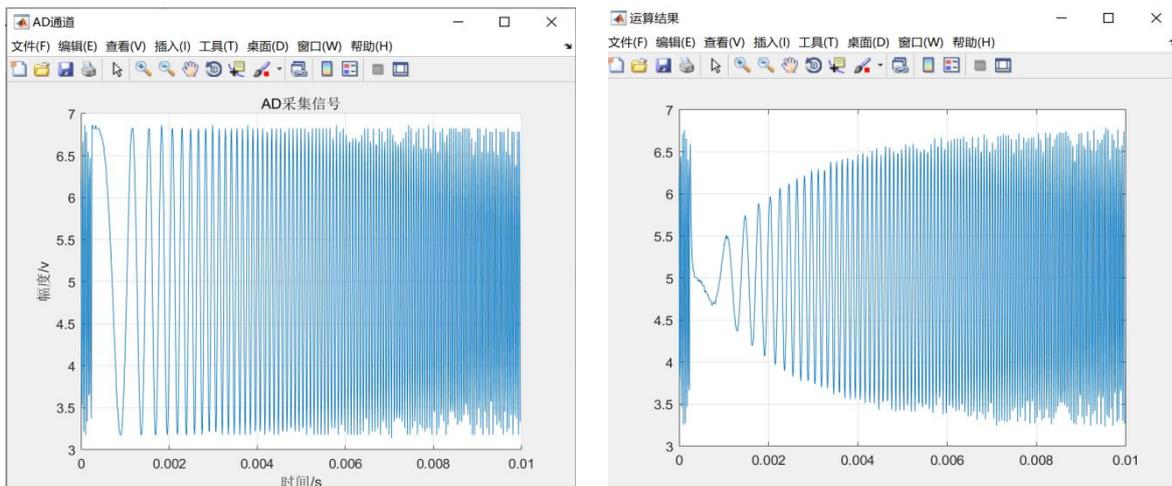


图 1.4.49 AD 采集信号和滤波后信号



图 1.4.50 滤波后信号的最大值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端，通道 2 接有源高通滤波器的输出端。

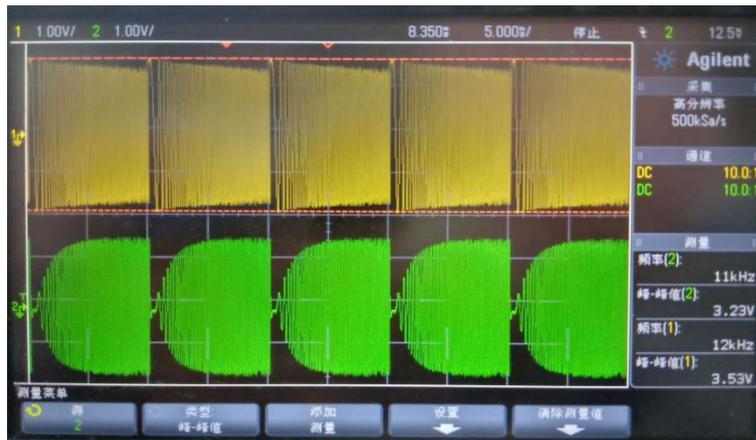


图 1.4.51 双踪示波器观测结果

### 3.带通滤波器实验

#### (1) 无源带通滤波器实验

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图 1.4.52、图 1.4.53、图 1.4.54 图 1.4.40 所示。

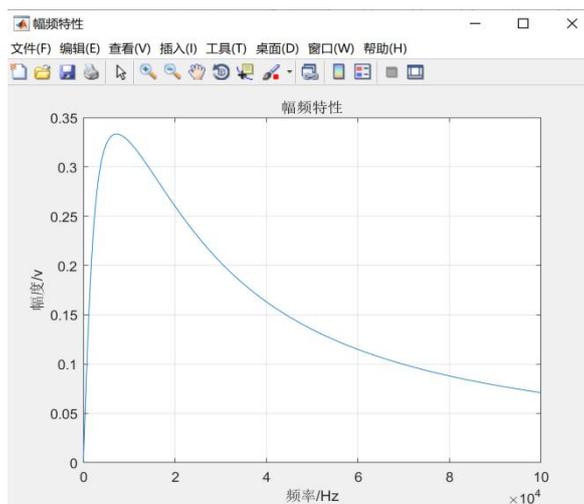


图 1.4.52 无源带通滤波器的幅频特性

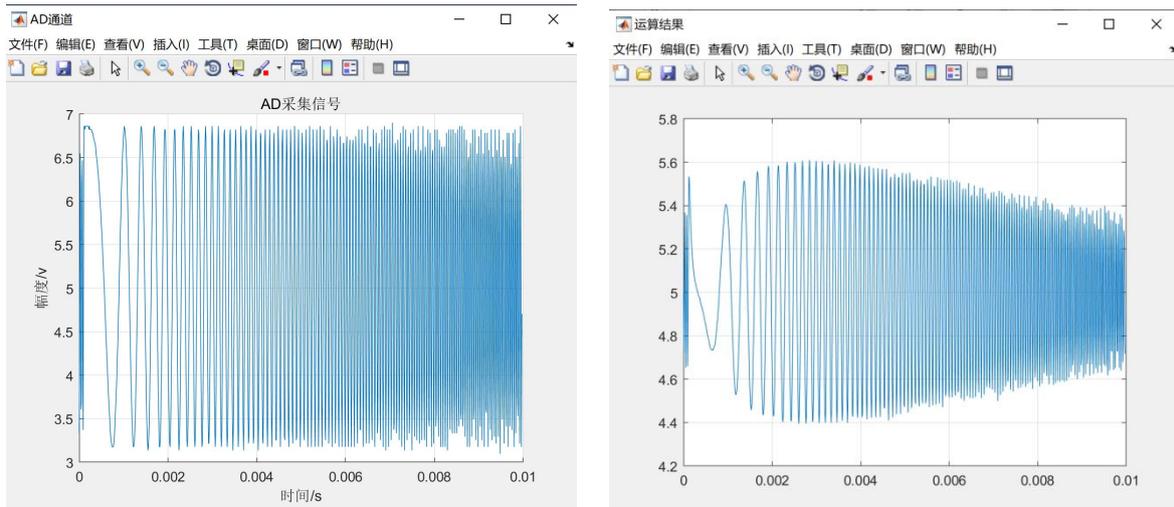


图 1.4.53 AD 采集信号和滤波后信号

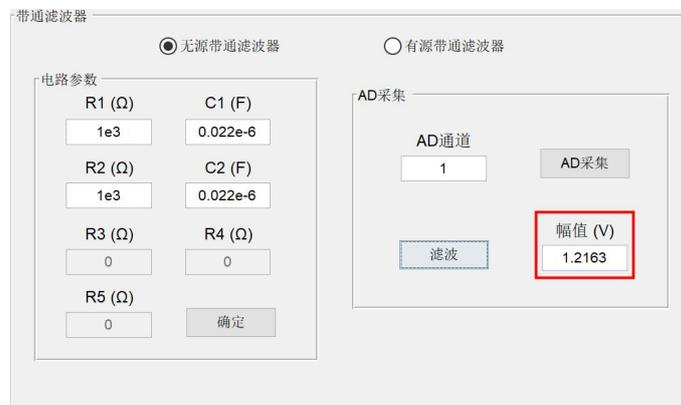


图 1.4.54 滤波后信号的最大值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端，通道 2 接无源带通滤波器的输出端。

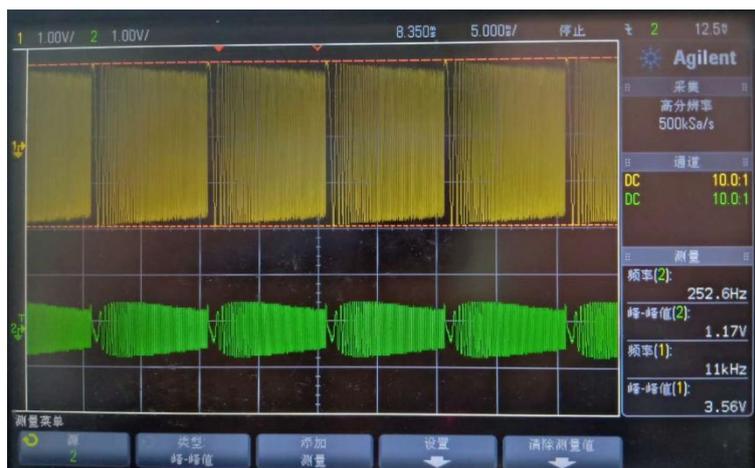


图 1.4.55 双踪示波器观测结果

## (2) 有源带通滤波器实验

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图 1.4.56、图 1.4.57、图 1.4.58 图 1.4.40 所示。

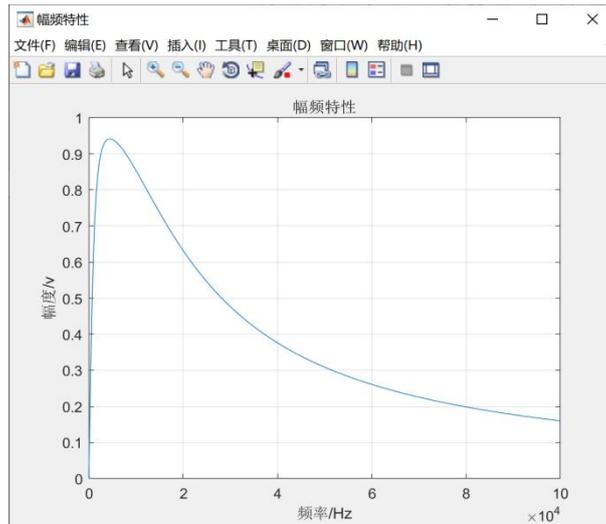


图 1.4.56 有源带通滤波器的幅频特性

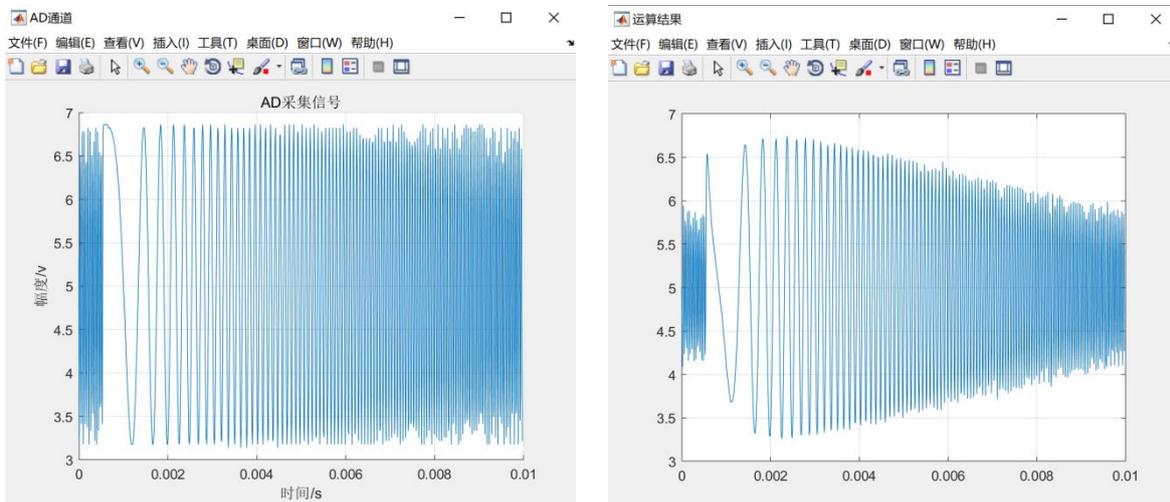


图 1.4.57 AD 采集信号和滤波后的信号



图 1.4.58 滤波后信号的最大值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端，通道 2 接有源带通滤波器的输出端。



图 1.4.59 双踪示波器观测结果

#### 4.带阻滤波器实验

##### (1) 无源带阻滤波器实验

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图 1.4.60、图 1.4.61、图 1.4.62 图 1.4.40 所示。

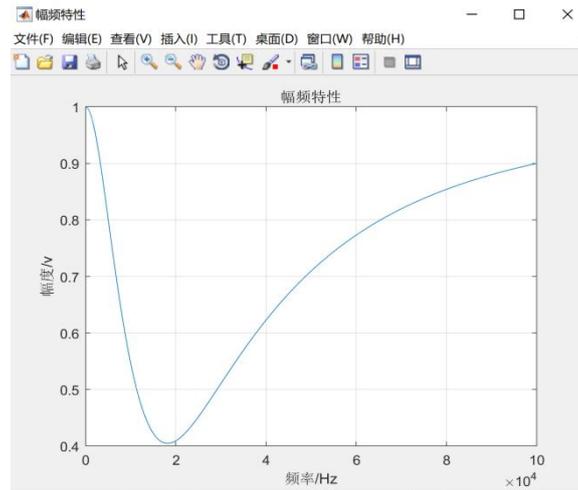


图 1.4.60 无源带阻滤波器的幅频特性

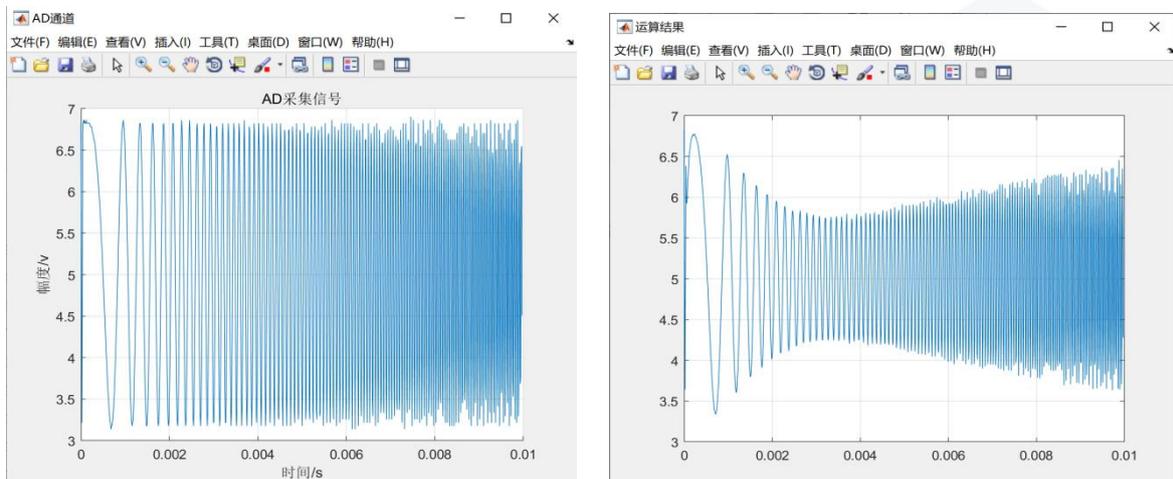


图 1.4.61 AD 采集信号和滤波后的信号



图 1.4.62 滤波后信号的最大值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端，通道 2 接无源带阻滤波器的输出端。

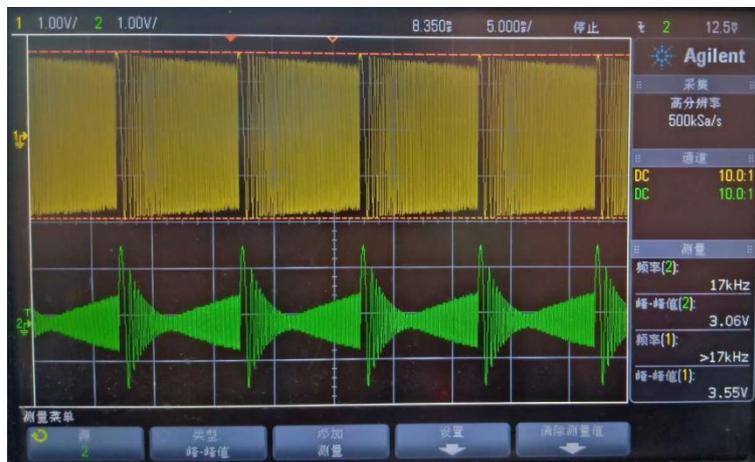


图 1.4.63 示波器观测结果

## (2) 有源带阻滤波器实验

使用 MATLAB 软件进行滤波器的幅频特性分析、信号采集和滤波的结果分别如图 1.4.64、图 1.4.65、图 1.4.66 图 1.4.40 所示。

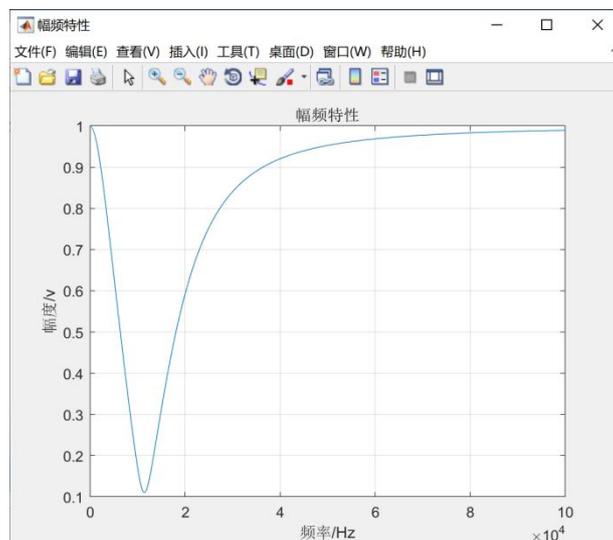


图 1.4.64 有源带阻滤波器的幅频特性

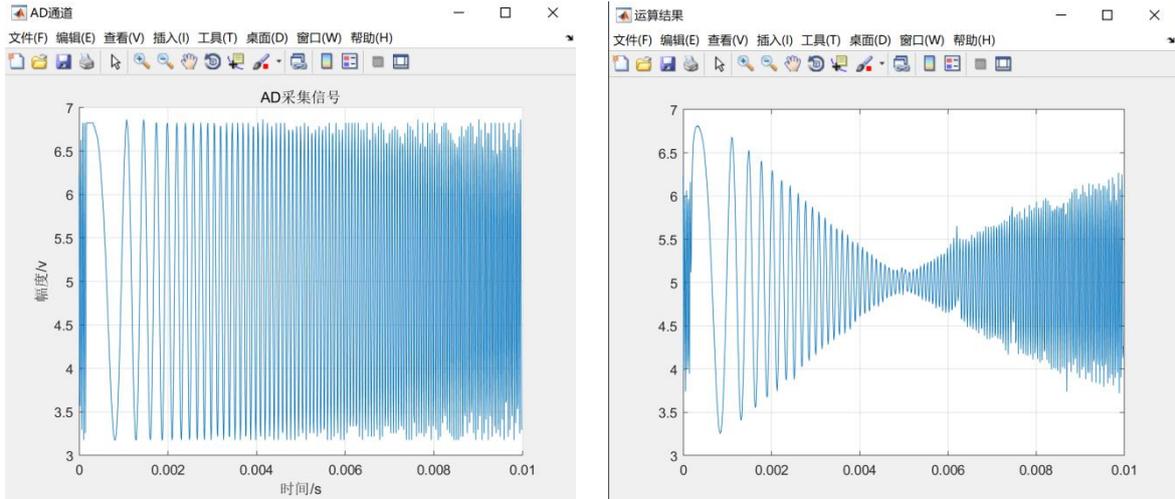


图 1.4.65 AD 采集信号和滤波后信号



图 1.4.66 滤波后信号的最大值

双踪示波器的通道 1 接信号源单元的 DA1 端，通道 2 接有源带阻滤波器的输出端。

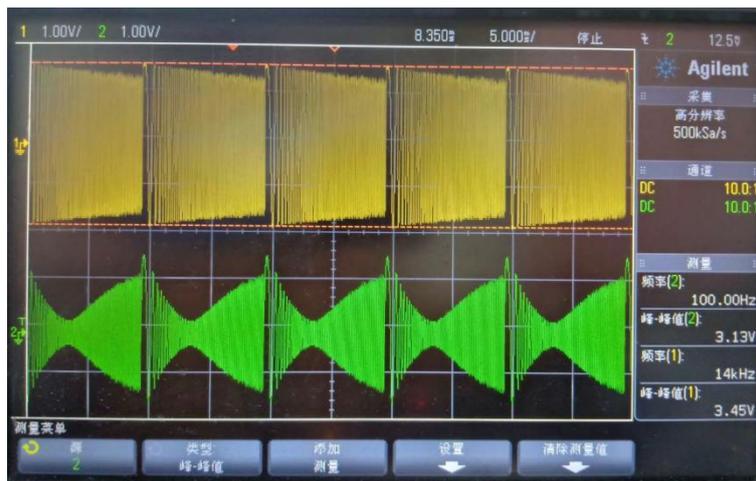


图 1.4.67 双踪示波器观测结果

## 1.5 滤波器综合实验

### 1.5.1 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。

#### 2. 实验任务

使用信号源单元输出不同频率的正弦波信号, 使用 MATLAB 软件采集该信号, 并将其进行滤波处理, 记录不同频率时的幅值; 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。

### 1.5.2 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 1.5.1 所示。

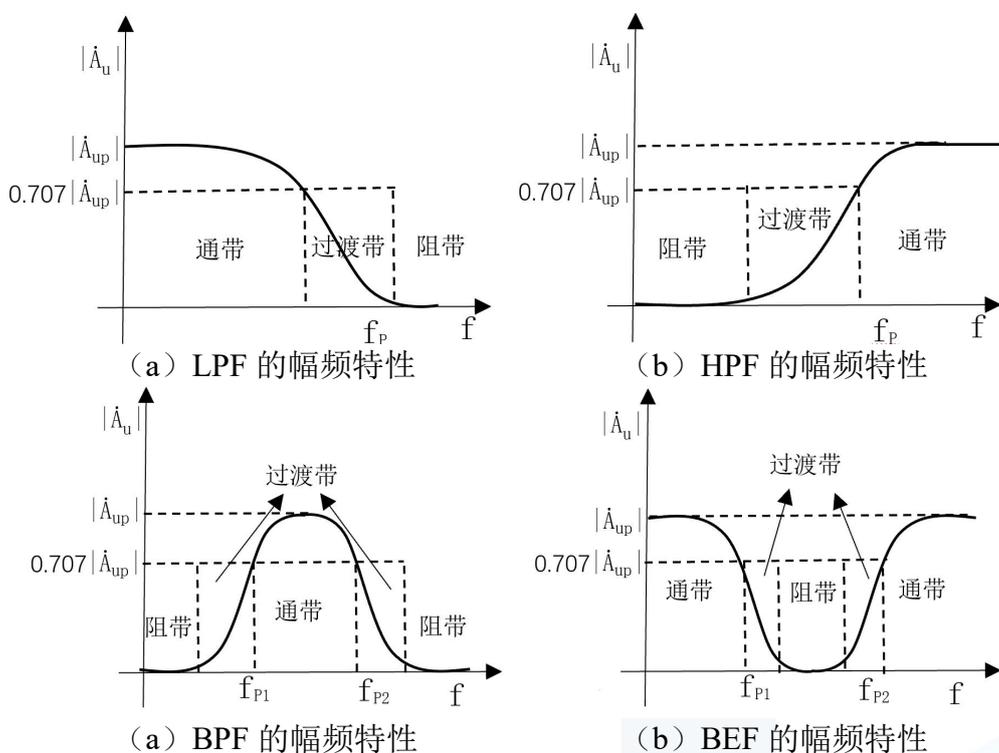


图 1.5.1 滤波电路实际幅频特性

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。

在MATLAB中系统传递函数用连续时间传递函数模型“tf”表示。

$$\text{sys}=\text{tf}(\mathbf{b},\mathbf{a})$$

其中， $\mathbf{a}$ 为系统传递函数中分母各项的系数， $\mathbf{b}$ 为系统传递函数中分子各项的系数。

求解系统响应使用函数“lsim”模拟连续或离散线性系统对输入信号的响应。

$$\mathbf{y}=\text{lsim}(\text{sys},\mathbf{x},\mathbf{t})$$

### (1) 无源低通滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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：

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

在MATLAB中调用函数“[tf\_sys]=Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)”计算系统传递

函数。其中“filt\_ch”表示滤波器类型，“filt”表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。0: 无源低通
4. switch(filt_ch)
5.     case 0
6.         tf_sys = tf([0 0 1/filt.r1], ...
7.             [filt.r2*filt.c1*filt.c2 (filt.r2*filt.c2)/filt.r1+filt.c2+filt.c1 1/filt.r1]);
8.         .....
9.     end
    
```

### (2) 有源低通滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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：

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

在 MATLAB 中调用函数 “[tf\_sys]=Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)” 计算系统传递函数。其中“filt\_ch”表示滤波器类型，“filt”表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。1: 有源低通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 1
7.         tf_sys = tf([0 0 1/filt.r1], ...
8.             [filt.r2*filt.c1*filt.c2 (filt.r2*filt.c2)/filt.r1+filt.c2 1/filt.r1]);
9.         .....
10.    end
    
```

调用“lsim”函数仿真一定时间长度内输入激励信号所产生的激励信号。

```
11. filt_buf = lsim(filt_sys, filt_buf, filt_t);
```

### (3) 无源高通滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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：

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

在 MATLAB 中调用函数 “[tf\_sys]=Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)” 计算系统传递函数。其中 “filt\_ch” 表示滤波器类型, “filt” 表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。2: 无源高通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 2
7.         tf_sys = tf([filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r2 0 0], ...
8.                    [filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r2 ...
9.                    filt.c1*filt.r1+filt.c2*filt.r1+filt.c2*filt.r2 ...
10.                   1]);
11.     .....
12. end
    
```

#### (4) 有源高通滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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:

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

在 MATLAB 中调用函数 “[tf\_sys]=Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)” 计算系统传递函数。其中 “filt\_ch” 表示滤波器类型, “filt” 表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。3: 有源高通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 3
7.         tf_sys = tf([filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r2 0 0], ...
8.                    [filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r2 ...
9.                    filt.c1*filt.r1+filt.c2*filt.r1+ ...
10.                   1]);
11.     .....
12. end
    
```

#### (5) 无源带通滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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:

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

在 MATLAB 中调用函数 “[tf\_sys]=Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)” 计算系统传递函数。其中 “filt\_ch” 表示滤波器类型, “filt” 表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。4: 无源带通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 4
7.         tf_sys = tf([0 filt.c1*filt.r2 0],...
8.             [(filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r2) ...
9.             (filt.c1*filt.r1+filt.c1*filt.r2+filt.c2*filt.r2 ...
10.             1]);
11.     .....
12. end
    
```

#### (6) 有源带通滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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:

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

在 MATLAB 中调用函数 “[tf\_sys]=Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)” 计算系统传递函数。其中 “filt\_ch” 表示滤波器类型, “filt” 表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。5: 有源带通
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 5
7.         tf_sys = tf([0 filt.c1*filt.r1*filt.r3*(filt.r4+filt.r5) 0],...
8.             [(filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r2*filt.r3*filt.r4) ...
9.             filt.c1*filt.r1*filt.r2*filt.r5+filt.c1*filt.r1*filt.r3*filt.r4+...
10.             filt.c1*filt.r2*filt.r3*filt.r4+filt.c2*filt.r2*filt.r3*filt.r4 ...
11.             filt.r3*filt.r4-filt.r2*filt.r5]);
12.     .....
13. end
    
```

#### (7) 无源带阻滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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:

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

在 MATLAB 中调用函数 “[tf\_sys] = Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)” 计算系统传递函数。其中 “filt\_ch” 表示滤波器类型, “filt” 表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。6: 无源带阻
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 6
7.         tf_sys = tf([filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3 ...
8.             filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3 ...
9.             filt.c2*filt.r3+filt.c1*filt.r3 ...
10.            1],...
11.            [filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3 ...
12.            filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3+...
13.            filt.c1*filt.c3*filt.r1*filt.r3+filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2+...
14.            filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r3 ...
15.            filt.c2*filt.r1+filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r2+filt.c3*filt.r1+filt.c2*
filt.r3 ...
16.            1]);
17.     .....
18. end
    
```

### (8) 有源带阻滤波器的系统传递函数

由实验 11.1.4 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:

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

在 MATLAB 中调用函数 “[tf\_sys]=Filter\_Analysis\_Sys(filt\_ch, filt)” 计算系统传递函数。其中 “filt\_ch” 表示滤波器类型, “filt” 表示滤波器器件参数。

```

1. function [tf_sys] = Filter_Analysis_Sys(filt_ch, filt)
2. % 算系统传递函数
3. % filt_ch 表示选择滤波器。7: 有源带阻
4. switch(filt_ch)
5.     .....
6.     case 7
7.         tf_sys = tf([filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3 ...
8.             filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3 ...
9.             filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r3 ...
10.            1],...
11.            [filt.c1*filt.c2*filt.c3*filt.r1*filt.r2*filt.r3 ...
12.            filt.c1*filt.c2*filt.r1*filt.r3+filt.c1*filt.c2*filt.r2*filt.r3+...
13.            filt.c1*filt.c3*filt.r1*filt.r3+filt.c2*filt.c3*filt.r2*filt.r3 ...
14.            filt.c1*filt.r3+filt.c2*filt.r3+filt.c3*filt.r1 ...
15.            1]);
16.     .....
17. end

```

### 1.5.3 实验设备

- 1.信号与系统实验平台 (含信号源单元、有源与无源滤波器单元) 1 台。
- 2.实验导线 6 根。
- 3.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.5.4 实验步骤

- 1.使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。
- 2.使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

(1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面, 在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备, 点击选择设备。

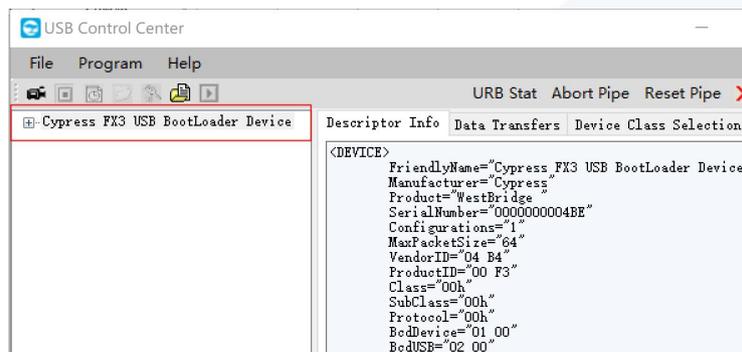


图 1.5.2 选择 FX3 设备

(2) 点击菜单栏的“Program”下的FX3，选择“RAM”。

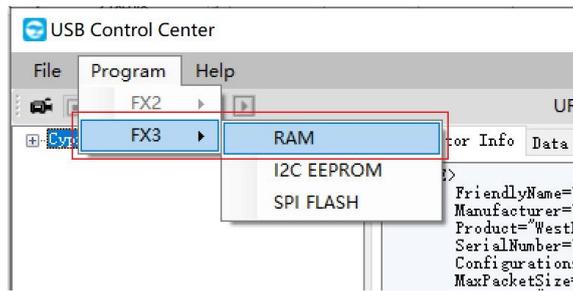


图 1.5.3 选择下载方式

(3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cypress FX3 USB StreamExample Device。

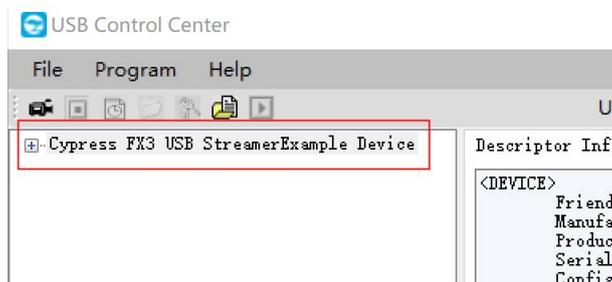


图 1.5.4 FX3 程序下载完成

3.打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

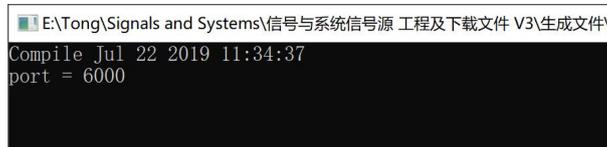


图 1.5.5 打开 VC2008\_NET\_DRV

4.打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

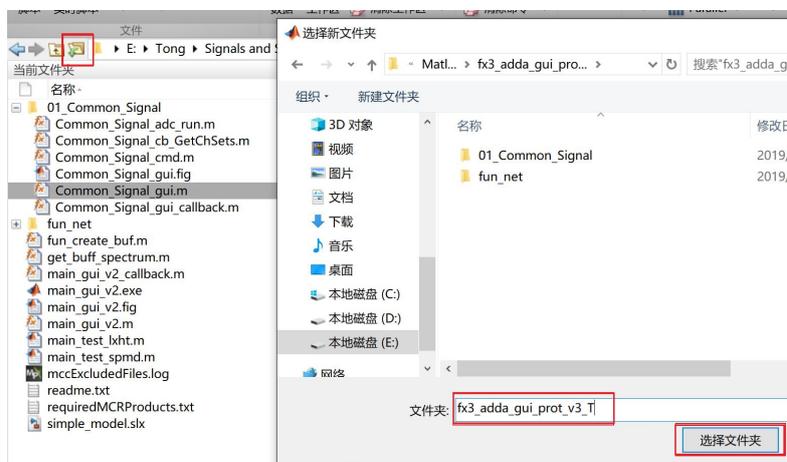


图 1.5.6 打开工程文件夹

5.选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

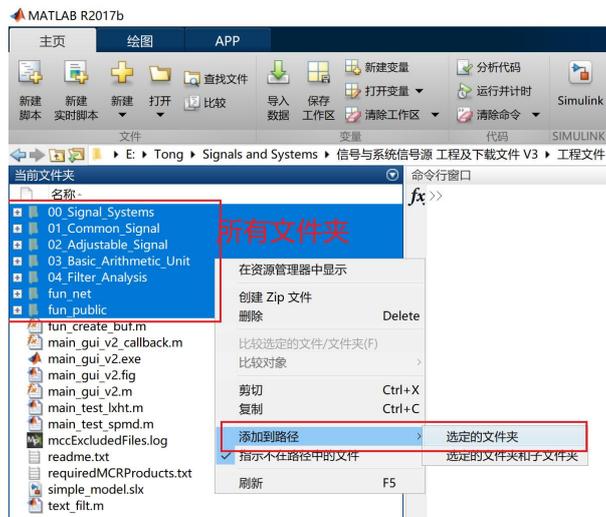


图 1.5.7 添加路径

6.在命令行窗口输入“Filter\_Analysis\_gui”，按下回车键运行程序。

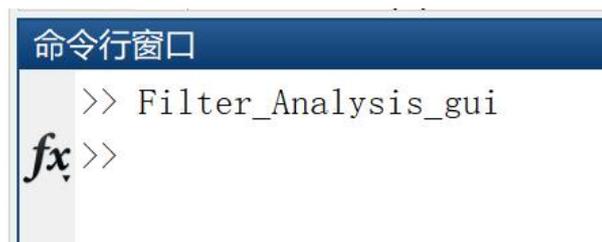


图 1.5.8 运行程序

7.运行程序后，打开滤波器界面。



图 1.5.9 滤波器界面

8.将信号源的 DA1 输出端口与 AD1 采集端口用实验导线连接。

9.无源低通滤波器实验

- (1) 将信号源的 DA1 输出端口与滤波器的输入端口用实验导线连接。
- (2) 在滤波器界面的 DA 输出窗口处，信号选择“正弦信号”，输入频率，DA 通道输入“1”，点击“DA”输出。
- (3) 点击菜单中的“滤波器类型”，选择“低通滤波器”。

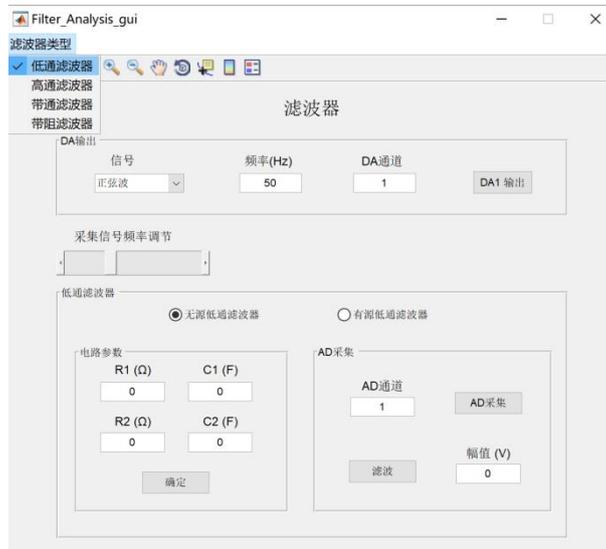


图 1.5.10 选择低通滤波器

- (4) 在低通滤波器界面的低通滤波器窗口中，选择“无源低通滤波器”，根据原理图输入电路的相关参数，点击“确认”。在 MATLAB 中  $x$  乘 10 的  $n$  次方表示为  $xen$ 。



图 1.5.11 无源低通滤波器电路参数配置

- (5) “AD 通道”输入“1”，点击 AD 采集，若是波形显示窗口显示波形不完整或是不便观察，则点击“停止”，停止 AD 采集信号，滑动“采集信号频率调节”滑动条，再次点击“AD 采集”，直至正常显示。调节信号源单元的 RW1 旋钮，使其输出信号为 5V。记录采集信号波形。

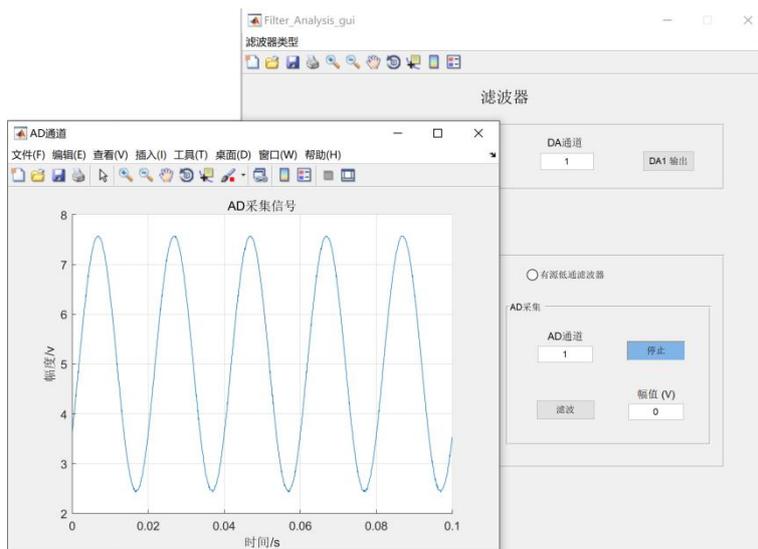


图 1.5.12 AD 采集信号

(6) 点击“滤波”按钮，对采集信号进行滤波处理。记录滤波后的幅值。

(7) 使用双踪示波器的通道 1 观测 DA1 输出的信号，通道 2 观测无源低通滤波器输出端的信号。记录波形，与 MATLAB 软件中采集和滤波后的波形对比分析。

(8) 改变输出信号频率，重复以上步骤，记录与不同输出信号频率不同所对应的滤波后的信号的幅值，使用坐标纸绘制频率与幅值的曲线。

10.其他滤波器实验与无源低通滤波器实验步骤相同。



图 1.5.13 有源低通滤波器电路参数配置



图 1.5.14 选择高通滤波器



图 1.5.15 无源高通滤波器电路参数配置



图 1.5.16 有源高通滤波器电路参数配置



图 1.5.17 选择带通滤波器



图 1.5.18 无源带通滤波器电路参数配置



图 1.5.19 有源带通滤波器电路参数配置



图 1.5.20 选择带阻滤波器



图 1.5.21 无源带阻滤波器电路参数配置



图 1.5.22 有源带阻滤波器电路参数配置

## 1.5.5 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 1.5.1 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 <sub>o</sub> (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 1.5.2 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 <sub>o</sub> (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 1.5.3 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 <sub>o</sub> (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 1.5.4 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 <sub>o</sub> (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 1.5.5 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 <sub>o</sub> (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 1.5.6 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 <sub>o</sub> (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 1.5.7 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
Uo(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 1.5.8 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
Uo(V)	5	4.9	4.1	3.1	1.7	0.9	0.5	1.4	4.0	4.5	4.7	4.8



## 1.6 一阶电路的时域特征实验

### 1.6.1 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) 学会使用 MATLAB 进行一阶电路的时域分析。

#### 2.实验任务

(1) 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) 使用 MATLAB 分析积分电路和微分电路的响应信号，实验任务 1 的结果对比分析。

### 1.6.2 实验原理

#### 1.一阶RC积分电路

图 1.6.1 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。

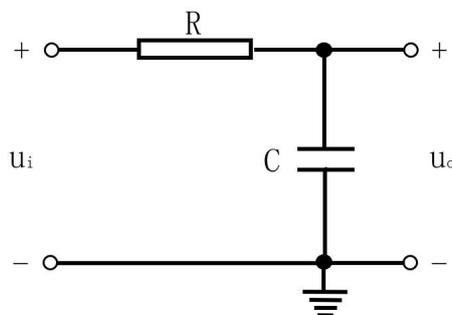


图 1.6.1 一阶RC积分电路

设 $u_i$ 为方波信号，当时间常数 $\tau$ 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 1.6.2 所示。

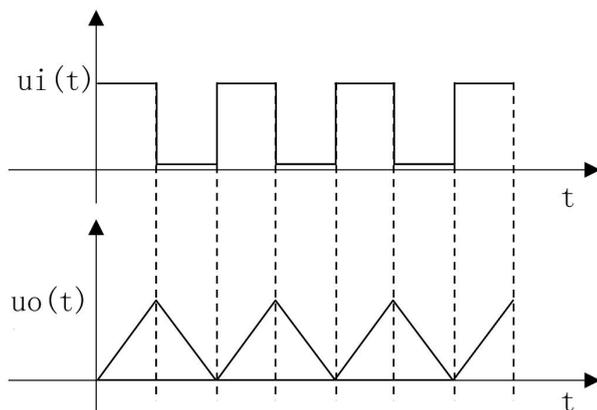


图 1.6.2 积分电路波形

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 $\tau$ 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 1.6.1 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:

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

在 MATLAB 中调用函数“First\_T\_Domain\_Sys”和函数“First\_T\_Domain\_filt”求系统的传递函数和响应信号

```
1. Int_Sys = First_T_Domain_Sys('Int', rc_value) % 求系统传递函数
2. First_T_Domain_filt(Int_Sys, ad_ch_cmd, opr_amp); % 求系统响应信号
```

## 2. 一阶 RC 微分电路

图 1.6.1 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。

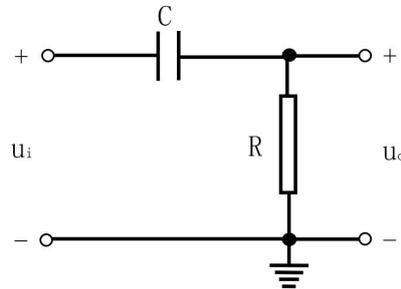


图 1.6.3 一阶RC串联微分电路

设 $u_i$ 为方波信号，当时间常数 $\tau$ 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 1.6.4 所示。

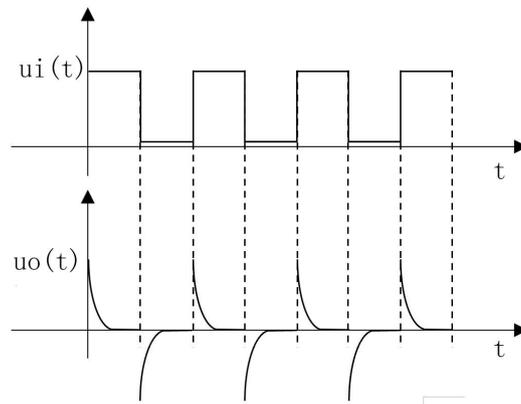


图 1.6.4 微分电路波形

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 $\tau$ 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 1.6.4 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：

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

在 MATLAB 中调用函数 “First\_T\_Domain\_Sys” 和函数 “First\_T\_Domain\_filt” 求系统的传递函数和响应信号

```
1. Diff_Sys = First_T_Domain_Sys('Diff', rc_value)
2. First_T_Domain_filt(Diff_Sys, ad_ch_cmd, opr_amp);
```

### 3 .MATLAB 中所调用的函数

函数 “[tf\_sys] = First\_T\_Domain\_Sys(type, rc\_value)”

```
1. function [tf_sys] = First_T_Domain_Sys(type, rc_value)
2. % 计算系统传递函数
3. switch(type)
4.     case 'Int'
5.         tf_sys = tf([0 1/rc_value.r], [rc_value.c 1/rc_value.r]);
6.     case 'Diff'
7.         tf_sys = tf([1 0], [1 1/(rc_value.r*rc_value.c)]);
8. end
```

其中：

tf\_sys 示返回的系统传递函数。

type 表示选择电路类型：

Int: 积分电路；

Diff: 微分电路。

rc\_value 表示电路器件参数。

函数 “First\_T\_Domain\_filt(opr\_Sys, ad\_ch\_cmd, opr\_amp)”

```
3. function First_T_Domain_filt(opr_Sys, ad_ch_cmd, opr_amp)
4. % 求积分电路、微分电路的响应信号
5. global tops
6. persistent ad_buf ad_t amplitude
7. ad_buf = tops.adc_dbuf; % 获取激励信号数组
8. ad_t = ad_ch_cmd.t(1:ad_ch_cmd.leng); % 获取时间长度
9. ad_buf = lsim(opr_Sys, ad_buf, ad_t); % 求系统响应
10. figure('Name', '运算结果', 'NumberTitle', 'off');
11. plot(ad_t, ad_buf); % 绘制响应信号
12. grid on;title('运算结果');
13. xlabel('时间/s'),ylabel('幅度/v');
14. axis([0,max(ad_ch_cmd.t(1:ad_ch_cmd.leng)), -5,5]);
```

其中：

opr\_Sys 为系统传递函数。

ad\_ch\_cmd 含有激励信号。

### 1.6.3 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8根。
- 3.USB3.0数据线1根。
- 4.双踪示波器1台。
- 5.安装有VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b软件的PC1台。

### 1.6.4 实验步骤

1.使用实验箱上的扩展模块搭建一阶RC串联电路,输入激励信号,观察并记录响应信号。

(1)按照图 1.6.1 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 $\tau$ ,并记录在表 1.6.1 中。

(2)在实验箱上取一路占空比为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。

(5)按照图 1.6.3 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: $R = 100\Omega$ 、 $510\Omega$ 、 $1K\Omega$ ,  $C = 0.01\mu F$ 、 $0.1\mu F$ ,计算相对应的时间常数 $\tau$ ,并记录在表 1.6.2 中。

(6)在实验箱上中取一路占空比为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)。

(7)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)。

(8)观察输入信号与输出信号,并记录其波形。

(9)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,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.使用MATLAB软件做一阶电路的时域分析。

(1) 编写一阶RC串联电路构建的积分电路的 MATLAB 仿真程序, 并计算电路对应的时间常数 $\tau$ 。

(2) 使用 MATLAB 构建一个占空比为 50%、频率为 1KHz 的方波信号作为激励信号, 仿真求积分电路的响应信号。

(3) 编写一阶RC串联电路构建的微分电路的 MATLAB 仿真程序, 并计算电路对应的时间常数 $\tau$ 。

(4) 并使用 MATLAB 构建一个占空比为 50%、频率为 500Hz 的方波信号作为激励信号, 仿真微分电路的响应信号。

(5) 根据较为理想的微分和积分效果, 将激励信号改为三角波信号、正弦波信号, 计算相对应的响应信号。

### 3.MATLAB 下载程序。

(1) 使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。

(2) 使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面, 在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备, 点击选择设备。

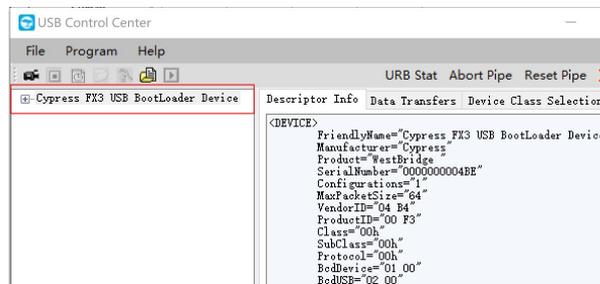


图 1.6.5 选择 FX3 设备

(3) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3, 选择“RAM”。

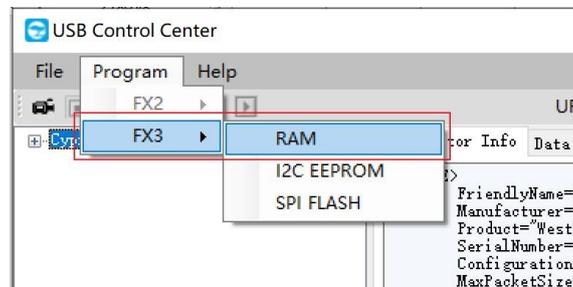


图 1.6.6 选择下载方式

(4) 选择打开资料包中的“.img”文件, FX3 的程序下载完成后, 界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

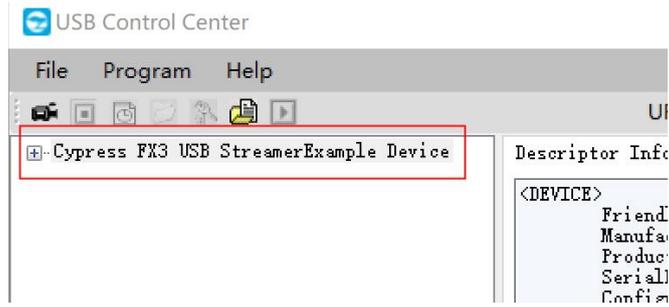


图 1.6.7 FX3 程序下载完成

(5) 打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

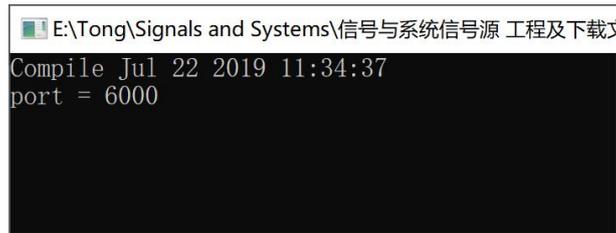


图 1.6.8 打开 VC2008\_NET\_DRV

(6) 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

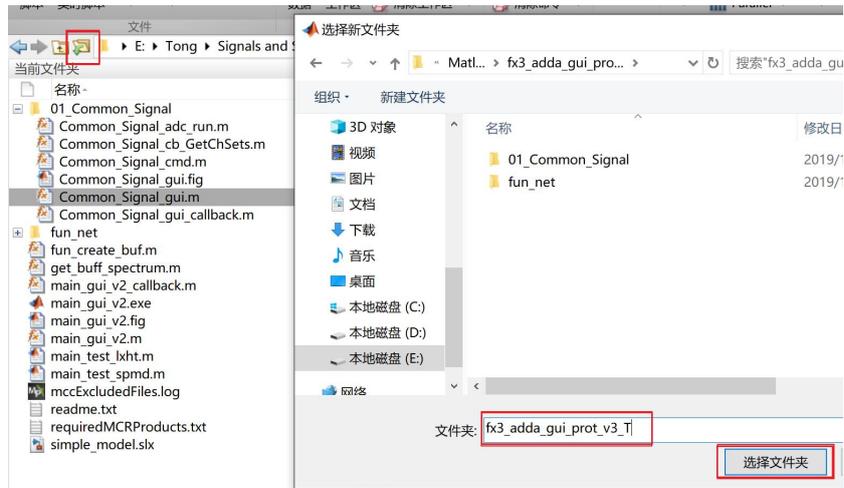


图 1.6.9 打开工程文件夹

(7) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

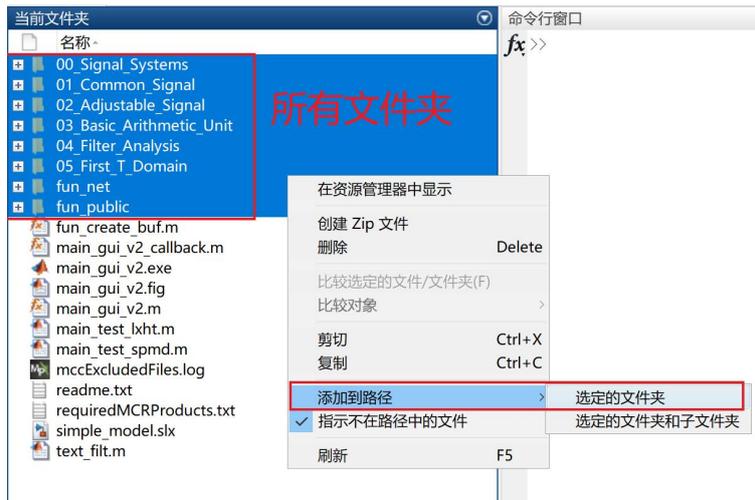


图 1.6.10 添加路径

(8) 在命令行窗口输入“Filter\_Analysis\_gui”，按下回车键运行程序。



图 1.6.11 运行程序

(9) 运行程序后，打开一阶电路的时域分析界面。



图 1.6.12 一阶电路的时域分析

## 8. MATLAB 仿真积分电路实验

- (1) 编写积分电路的 MATLAB 仿真程序。
- (2) 选择为 50%、频率为 1KHz 的方波信号。



图 1.6.13 DA 输出方波信号

(3) 选择“积分电路”，按照实际搭建电路参数输入电阻电容值，点击“确认”，计算时间常数 $\tau$ ，如电阻选用  $100\Omega$ ，电容使用  $1\mu F$ ，MATLAAB 计算其时间常数。



图 1.6.14 设置积分电路参数

(4) 选择积分，对方波信号进行积分运算，观察其运算结果。

(7) 修改电阻电容值，重复以上步骤。

## 10. MATLAB 仿真微分电路实验

(1) 编写积分电路的 MATLAB 仿真程序。

(2) 选择为 50%、频率为 1Kz 的方波信号。



图 1.6.15 DA 输出方波信号

(3)) 选择“微分电路”，按照实际搭建电路参数输入电阻电容值，点击“确认”，计算时间常数 $\tau$ ，如电阻选用  $100\Omega$ ，电容使用  $0.011\mu F$ ，MATLAAB 计算其时间常数。



图 1.6.16 设置积分电路参数

- (4) 选择微分，对方波信号进行微分运算，观察其运算结果。
- (7) 修改电阻电容值，重复以上步骤。

### 1.6.5 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 $\tau$ 。

(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 1.6.1 所示。

表 1.6.1 积分电路元件参数与时间常数对应表

	$0.1\mu F$	$1\mu F$
$510\Omega$	$5.1 \times 10^{-5}$	$5.1 \times 10^{-4}$
$1K\Omega$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$
$10K\Omega$	$1 \times 10^{-3}$	0.01

(2) 元件参数不同时的积分效果。

当 $R = 510\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ 时，输入输出波形如图 1.6.17 所示。

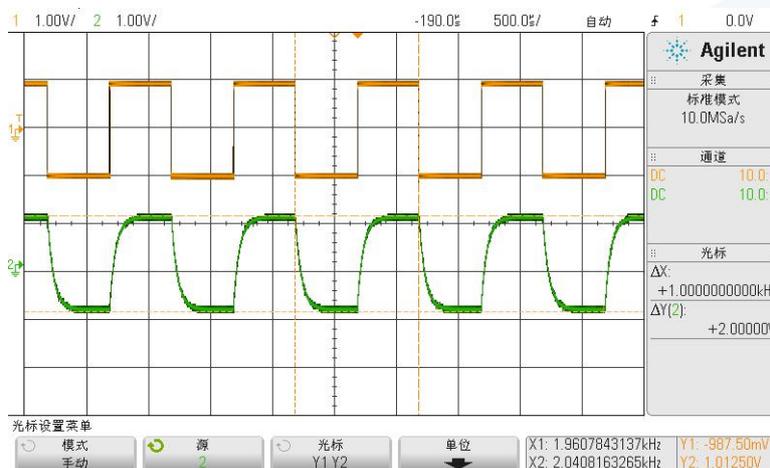


图 1.6.17  $R = 510\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 1K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.18 所示。

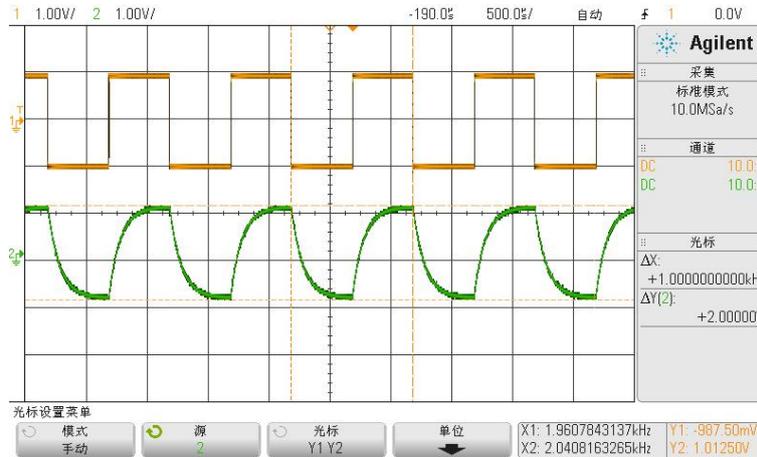


图 1.6.18  $R = 1K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 10K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.19 所示。



图 1.6.19  $R = 10K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 510\Omega$ ,  $C = 1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.20 所示。

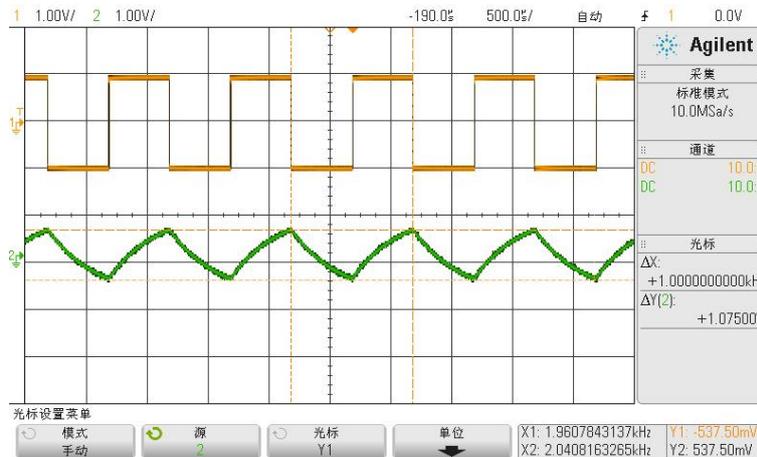


图 1.6.20  $R = 510\Omega$ ,  $C = 1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 1K\Omega$ ,  $C = 1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.21 所示。

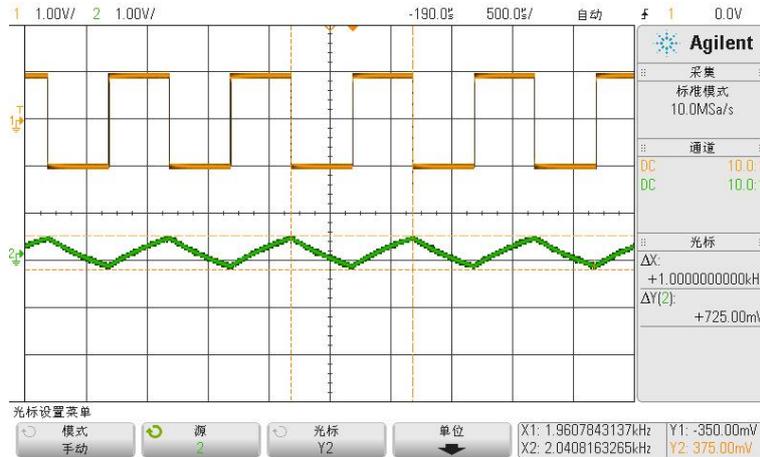


图 1.6.21  $R = 1K\Omega$ ,  $C = 1\mu F$ 时的积分效果

当 $R = 10K\Omega$ ,  $C = 1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.22 所示。



图 1.6.22  $R = 10K\Omega$ ,  $C = 1\mu F$ 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 1.6.2 所示。

表 1.6.2 微分电路元件参数与时间常数对应表

	$0.01\mu F$	$0.1\mu F$
$100\Omega$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
$510\Omega$	$5.1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-5}$
$1K\Omega$	$1 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-4}$

(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 1.6.23 所示。

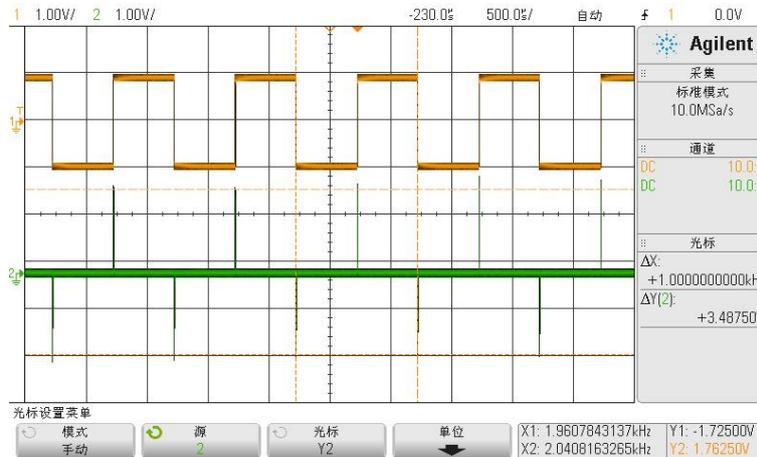


图 1.6.23  $R = 100\Omega$ ,  $C = 0.01\mu F$  时的微分效果

当  $R = 510\Omega$ ,  $C = 0.01\mu F$  时, 输入输出波形如图 1.6.24 所示。



图 1.6.24  $R = 510\Omega$ ,  $C = 0.01\mu F$  时的微分效果

当  $R = 1K\Omega$ ,  $C = 0.01\mu F$  时, 输入输出波形如图 1.6.25 所示。



图 1.6.25  $R = 1K\Omega$ ,  $C = 0.01\mu F$  时的微分效果

当 $R = 100\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.26 所示。

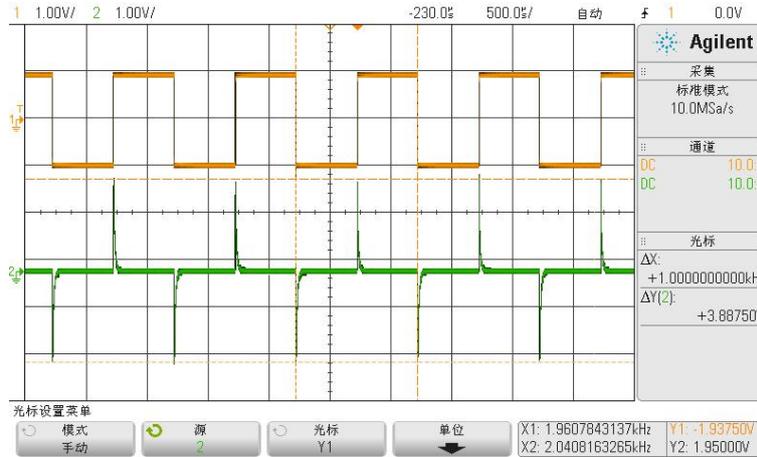


图 1.6.26  $R = 100\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时的微分效果

当 $R = 510\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.27 所示。



图 1.6.27  $R = 510\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时的微分效果

当 $R = 1K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时, 输入输出波形如图 1.6.28 所示。

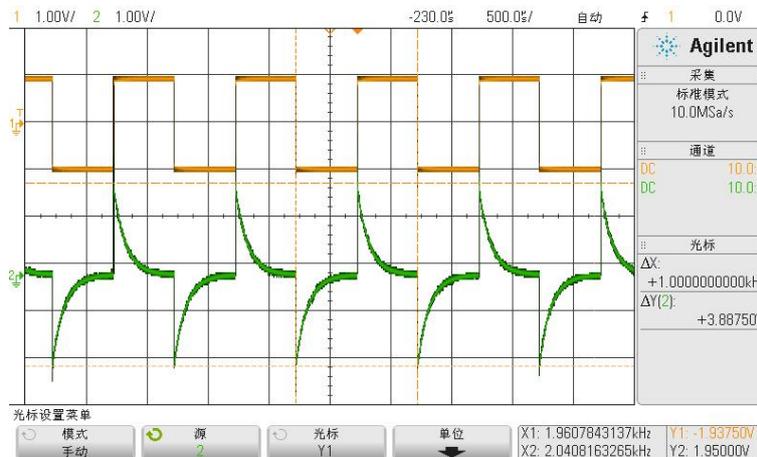


图 1.6.28  $R = 1K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 时的微分效果

(5) 根据以上实验结得出当 $R = 10K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 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 1.6.29 和图 1.6.30 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。

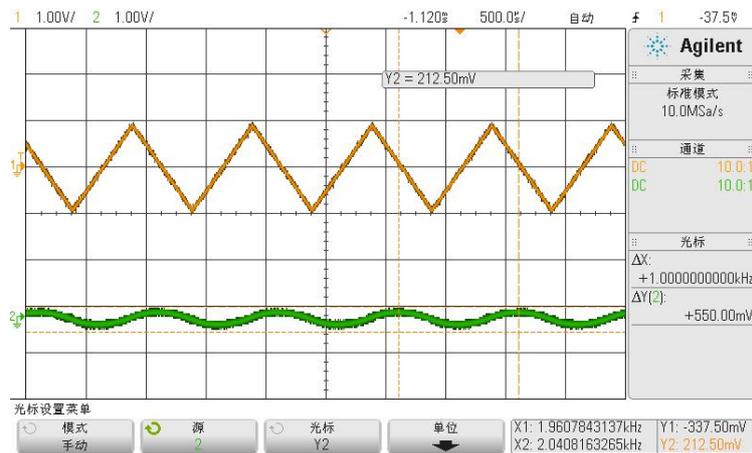


图 1.6.29 理想积分状态下, 输入三角波及其输出信号

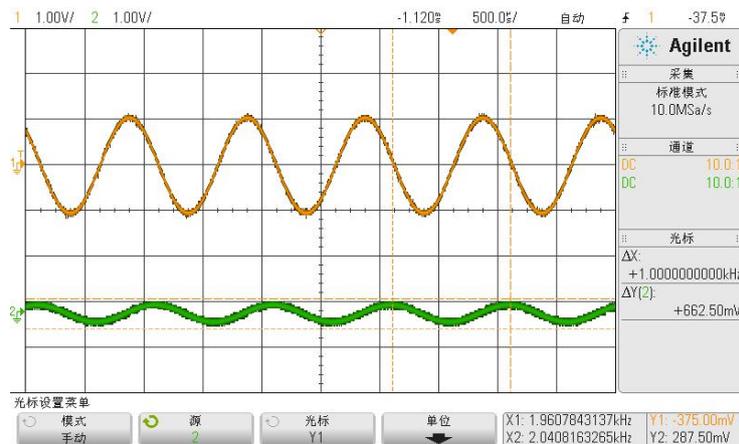


图 1.6.30 理想积分状态下, 输入正弦波及其输出信号

图 1.6.31 图 1.6.32 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。

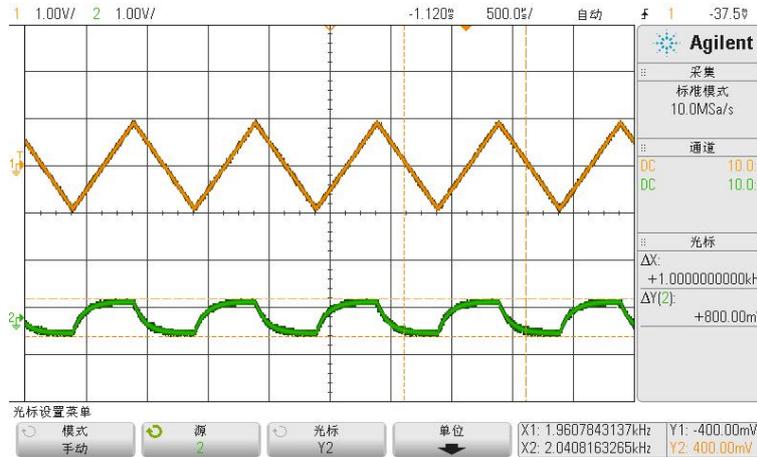


图 1.6.31 理想微分状态下，输入三角波及其输出信号

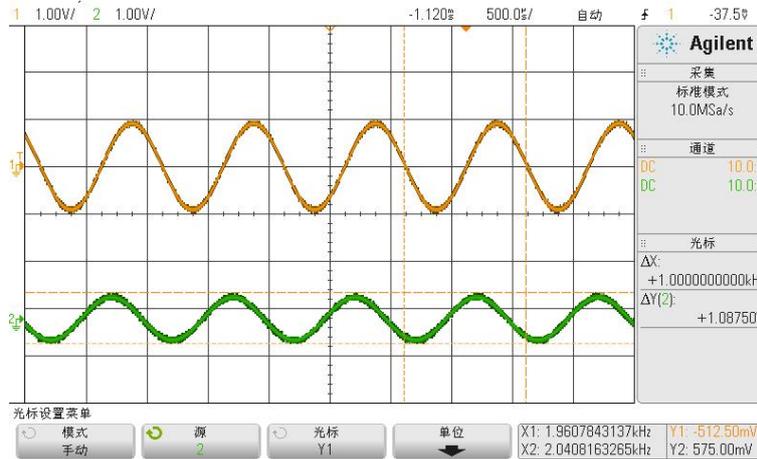


图 1.6.32 理想微分状态下，输入正弦波及其输出信号

## 1.7 一阶电路的频域分析实验

### 1.7.1 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) 学会使用 MATLAB 仿真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。

(3) 使用 MATLAB 计算一阶电路输入信号为扫频信号时的响应信号,并求该电路的幅频特性。

(4) 使用 MATLAB 计算一阶电路输入不同频率正弦波信号时的输出响应信号。

### 1.7.2 实验原理

#### 1.一阶 RC 低通滤波电路

图 1.7.1 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  $Z_L(j\omega) = j\omega L$ ,  $\omega = 2\pi f$ 。

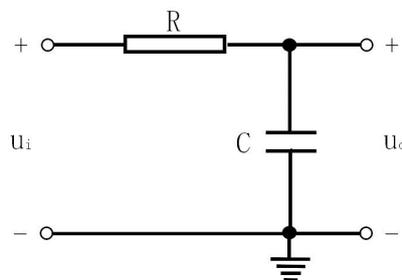


图 1.7.1 一阶RC低通滤波电路

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。

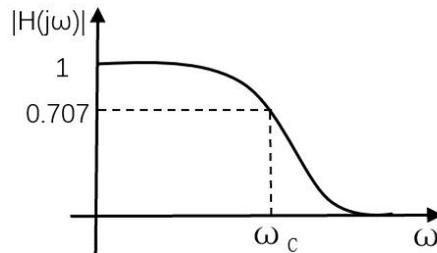


图 1.7.2 一阶RC积分电路幅频特性曲线

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 1.7.3 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的通过, 而毛刺得到有效抑制。

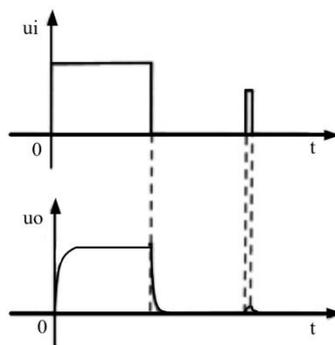


图 1.7.3 积分电路去除毛刺

## 2. 一阶高通滤波电路

图 1.6.1 为一阶CR串联电路组成的高通滤波电路。系统的放大倍数为:

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

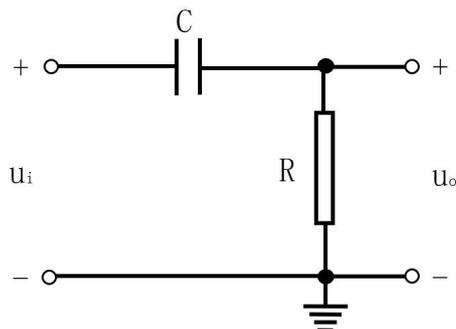


图 1.7.4 一阶RC高通滤波电路

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。

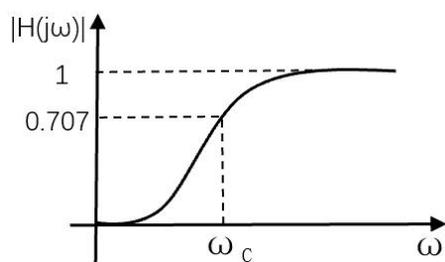


图 1.7.5 一阶RC高通滤波电路的幅频特性曲线

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倍提取出来，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。

### 1.7.3 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 8 根。
- 3.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.7.4 实验步骤

- 1.使用实验箱扩展模块搭建一阶电路，输入激励信号，观察其输出响应信号，并分

析其频域特性。

(1) 按照图 1.7.1 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:  $R = 510\Omega$ 、 $1K\Omega$ 、 $10K\Omega$ ,  $C = 0.1\mu F$ 、 $1\mu F$ 。

(2) 在实验箱上选取扫频信号, 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, 并绘制输出信号的大致波形。

(5) 将输入信号改为幅值为 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, 并记录其频率与幅值的变化, 绘制幅频特性曲线。

(2) 按照图 1.7.4 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:  $R = 100\Omega$ 、 $510\Omega$ 、 $1K\Omega$ ,  $C = 0.01\mu F$ 、 $0.1\mu F$ 。

(2) 在实验箱上选取扫频信号, 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。

(5) 将输入信号改为幅值为 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, 并记录其频率与幅值的变化, 绘制幅频特性曲线。

## 2. 使用 MATLAB 软件做一阶电路的频域分析。

(1) 编写一阶 $RC$ 串联电路构建的低通滤波电路和高通滤波电路的 MATLAB 仿真程序, 并计算其各自对应的幅频特性曲线。

(2) 使用 MATLAB 构建一个扫频信号作为激励信号, 分别仿真求低通滤波电路和高通滤波器电路的响应信号。

(3) 使用 MATLAB 构建频率不同的正弦波信号做激励信号分别计算其各自对应的响应信号, 观察响应信号, 记录频率不同频率时对应的响应信号的幅值。

## 3. MATLAB 下载程序。

(1) 使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。

(2) 使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面, 在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备, 点击选择设备。

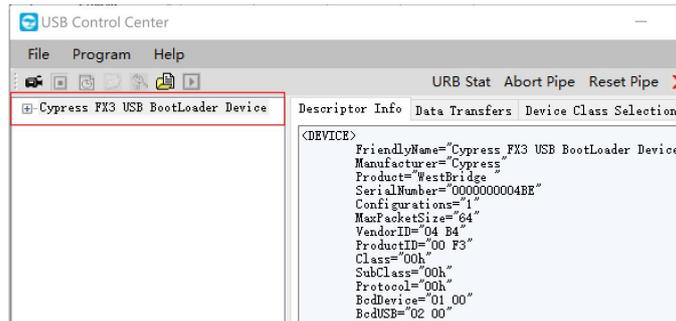


图 1.7.6 选择 FX3 设备

2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

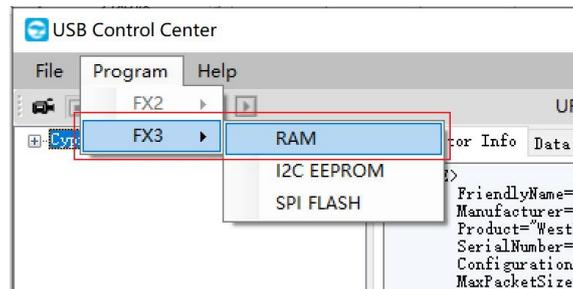


图 1.7.7 选择下载方式

3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

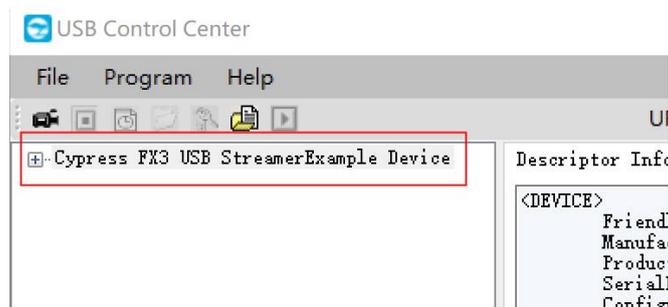


图 1.7.8 FX3 程序下载完成

(3) 打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

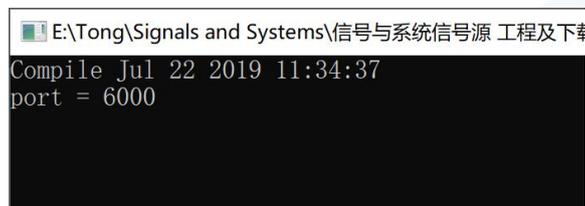


图 1.7.9 打开 VC2008\_NET\_DRV

(4) 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

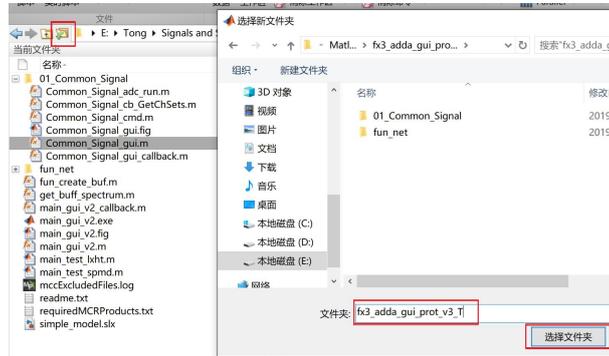


图 1.7.10 打开工程文件夹

(5) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

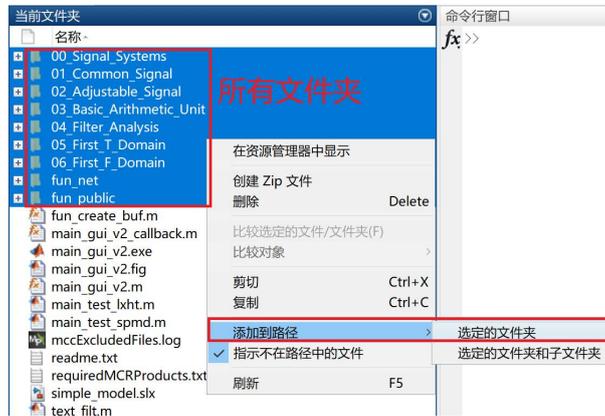


图 1.7.11 添加路径

(6) 在命令行窗口输入“Filter\_Analysis\_gui”，按下回车键运行程序。

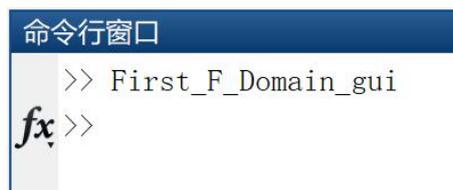


图 1.7.12 运行程序

(7) 运行程序后, 打开一阶电路的频域分析界面。



图 1.7.13 一阶电路的频域分析

#### 4. 仿真低通滤波电路实验

(1) 参照图 1.7.1 所示的电路和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 1.7.1 所示的参数, 使用实验导线在扩展单元处搭建一阶低通滤波电路,  $u_i$  端连接信号源的 DA1 端。示波器通道 1 接  $u_i$  端, 通道 2 接  $u_o$  端。计算并记录时间常数  $\tau$ 。

(2) 在一阶电路的时域分析界面的 DA 输出窗口选择正弦信号, 频率以 100Hz 为例, DA 输出通道输入“1”, 点击“DA1 输出”。



图 1.7.14 DA 输出方波信号

(3) 观察示波器中显示的波形, 调节信号源单元上的旋钮 RW1, 调节输出正弦波信号的幅值为 1V。

(4) 在一阶电路的频域分析界面的电路参数窗口, 选择“一阶低通滤波电路”, 按照实际搭建电路参数输入电阻电容值, 点击“确认”, 计算时间常数  $\tau$ , 如电阻选用 100  $\Omega$ , 电容使用 1  $\mu\text{F}$ 。并计算电路的幅频特性。

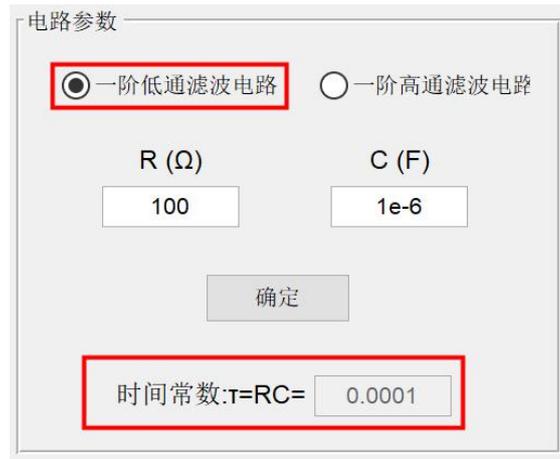


图 1.7.15 设置一阶低通滤波电路参数

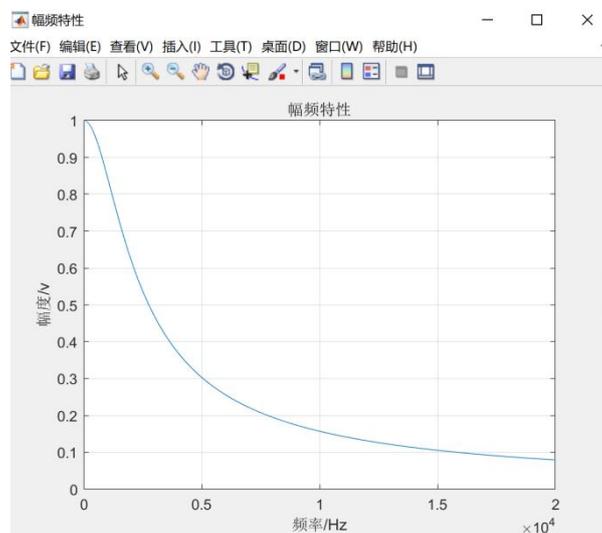


图 1.7.16 一阶低通滤波电路的幅频特性曲线

(5) AD 采集窗口的“AD 通道”输入“1”，点击 AD 采集，若是波形显示窗口显示波形不完整或是不便观察，则点击“停止”，停止 AD 采集信号，滑动“采集信号频率调节”滑动条，再次点击“AD 采集”，直至正常显示。记录采集信号波形。

(6) 点击“滤波”按钮，对采集信号进行滤波运算。记录滤波后信号的幅值。

(7) 修改电阻电容值，重复以上步骤。

## 10. 仿真高通滤波电路实验

(1) 参照图 1.7.4 所示的电路和表 1.7.2 所示的参数，使用实验导线在扩展单元处搭建一阶高通滤波电路， $u_i$  端连接信号源的 DA1 端。示波器通道 1 接  $u_i$  端，通道 2 接  $u_o$  端。计算并记录时间常数  $\tau$ 。

(2) 在一阶电路的时域分析界面的 DA 输出窗口选择正弦信号，频率以 100Hz 为例。DA 输出通道输入“1”，点击“DA1 输出”。



图 1.7.17 DA 输出方波信号

(3) 观察示波器中显示的波形，调节信号源单元上的旋钮 RW1，调节输出正弦波信号的幅值为 1V。

(4) 在一阶电路的时域分析界面的电路参数窗口，选择“一阶高通滤波电路”，按照实际搭建电路参数输入电阻电容值，点击“确定”，计算时间常数  $\tau$ ，如电阻选用 100  $\Omega$ ，电容使用 0.01  $\mu\text{F}$ 。



图 1.7.18 设置积分电路参数

(5) AD 采集窗口的“AD 通道”输入“1”，点击 AD 采集，若是波形显示窗口显示波形不完整或是不便观察，则点击“停止”，停止 AD 采集信号，滑动“采集信号频率调节”滑动条，再次点击“AD 采集”，直至正常显示。调节信号源单元的 RW1 旋钮，使其输出信号为 5V。记录采集信号波形。

(6) 点击“滤波”按钮，对采集信号进行滤波运算。记录滤波后信号的幅值。

(7) 修改电阻电容值，重复以上步骤。

## 1.7.5 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  $\tau$ 。

(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： $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu\text{F}$ 时，输入扫频信号与输出波形如图 1.7.19 所示。

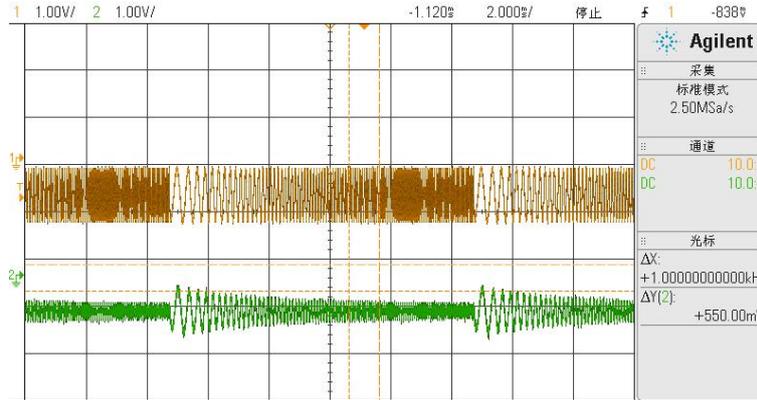


图 1.7.19

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 1.7.20 所示。

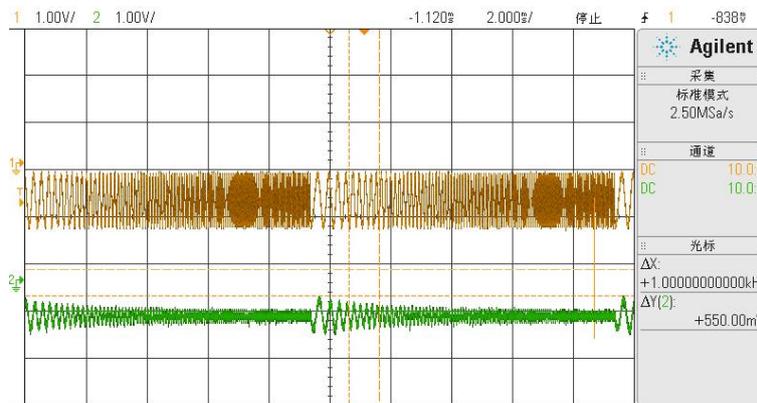


图 1.7.20

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 1.7.21 所示。

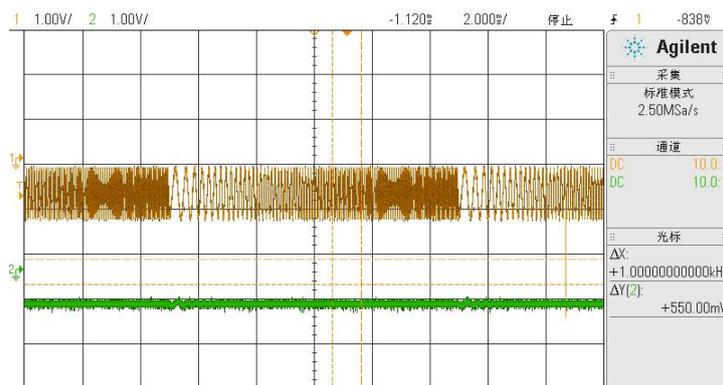


图 1.7.21

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 1.7.22 所示。

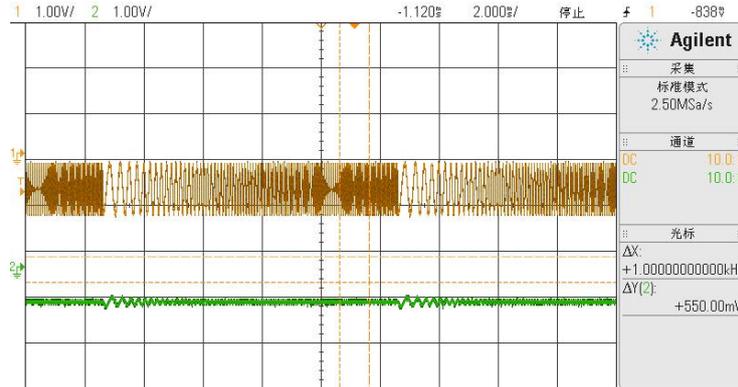


图 1.7.22

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 1.7.23 所示。

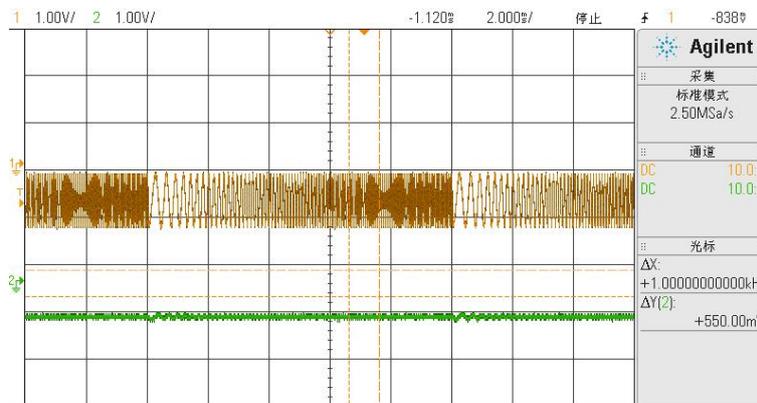


图 1.7.23

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 1.7.24 所示。

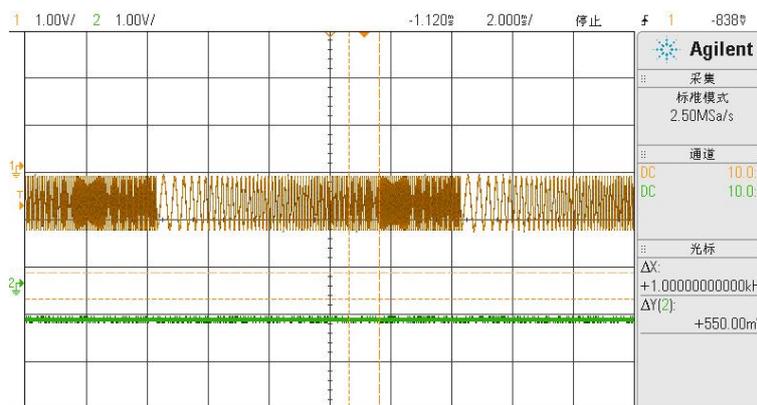


图 1.7.24

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 1.7.1  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 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 1.7.2  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 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 1.7.3  $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 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 1.7.4  $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

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

表 1.7.5  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

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

表 1.7.6  $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时低通滤波电路的频率特性表

$F(Hz)$	10	15	20	30	40	50	60	80	100	150	180	200	250	300
$u_o(mV)$	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 1.7.25 所示。

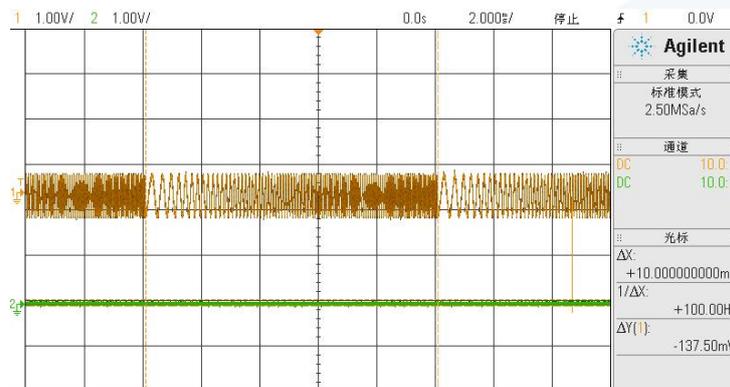


图 1.7.25

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 1.7.26 所示。

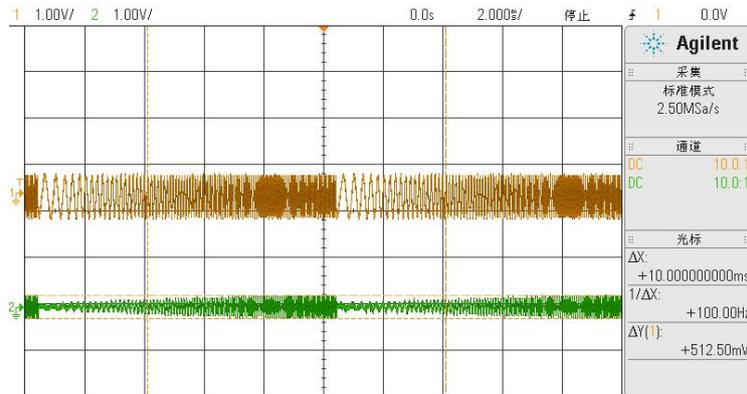


图 1.7.26

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 1.7.27 所示。

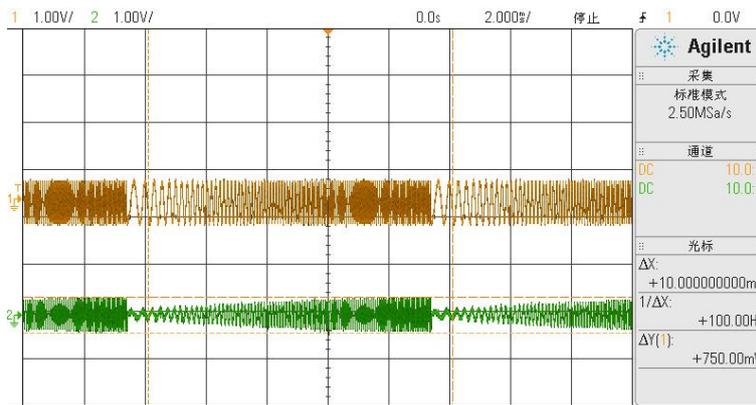


图 1.7.27

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 1.7.28 所示。

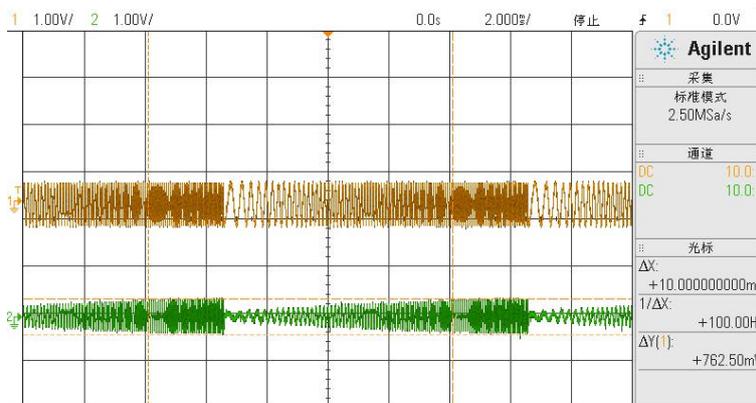


图 1.7.28

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 1.7.29 所示

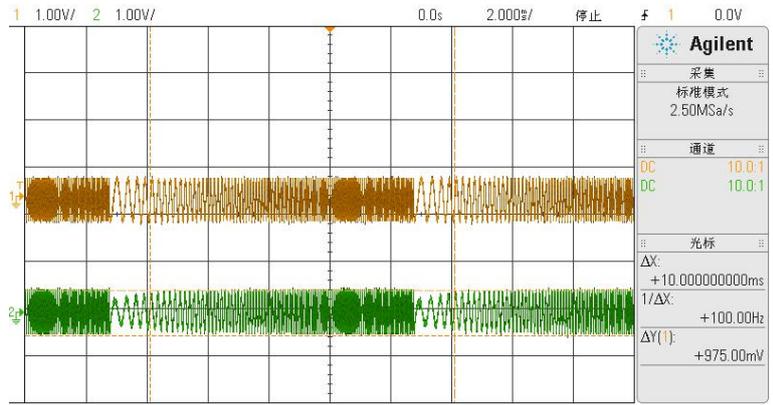


图 1.7.29

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 1.7.30 所示。

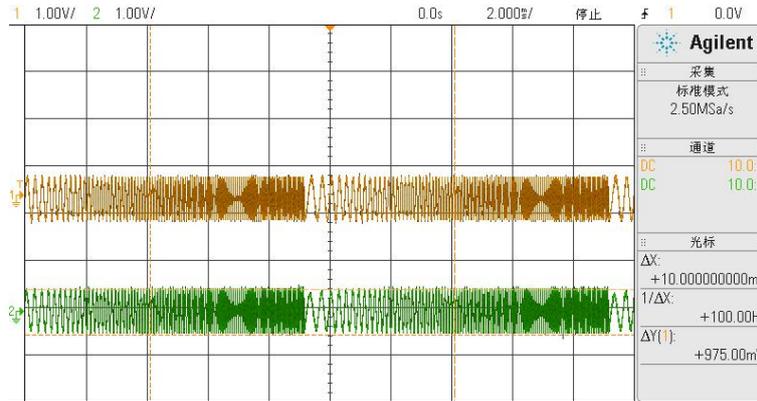


图 1.7.30

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 1.7.7  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 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 1.7.8  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 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 1.7.9  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 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 1.7.10  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 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 1.7.11  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 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 1.7.12  $R = 1K$ 、 $C = 0.1\mu F$ 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



## 1.8 一阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验

### 1.8.1 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) 学会使用 MATLAB 对一阶电路进行阶跃响应和冲激响应分析。

#### 2.实验任务

- 1.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.使用 MATLAB 仿真一阶串联电路，模拟运算一阶RC串联电路的阶跃响应和冲激响应。

### 1.8.2 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。

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

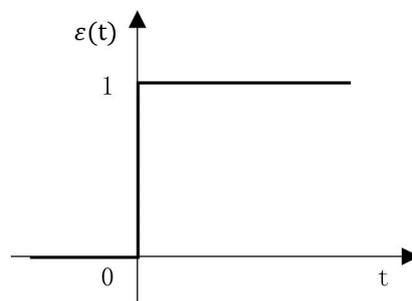


图 1.8.1 单位阶跃函数

若阶跃函数在 $t = t_0$ 是时刻发生跃变，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：

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

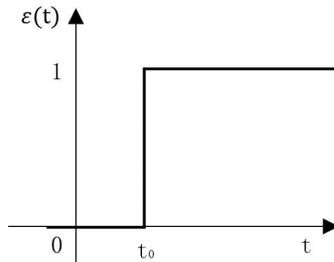


图 1.8.2 延迟阶跃函数

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

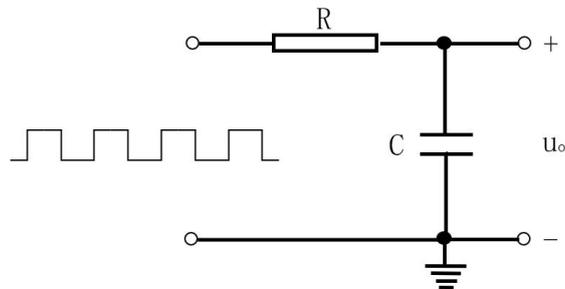


图 1.8.3 一阶RC串联电路

图 1.8.3 为一阶RC串联电路的阶跃响应示意图。

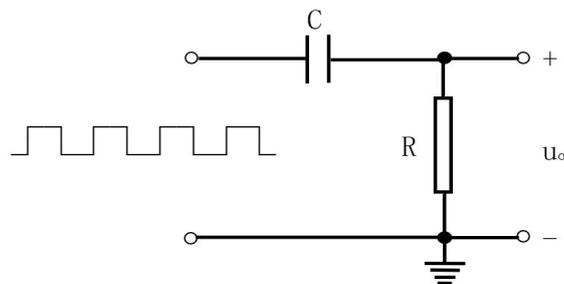


图 1.8.4 一阶CR串联电路

图 1.8.4 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 $\delta$ 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 $\infty$ 、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 1.8.5 所示为宽度为  $\Delta t$ 、高度为  $1/\Delta t$  的矩形脉冲，其面积  $A = \Delta t \cdot 1/\Delta t = 1$ 。

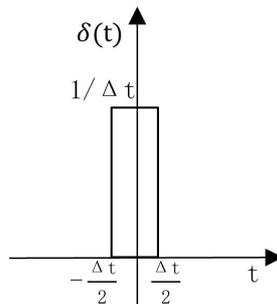


图 1.8.5 单位脉冲

当宽度  $\Delta t$  不断减小时，矩形脉冲的高度就不断增大，当脉冲宽度  $\Delta t$  趋近于 0 时，其高度趋近于  $\infty$ ，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 1.8.6 所示，用带箭头的线段表示，箭头旁边标注的是它的强度。

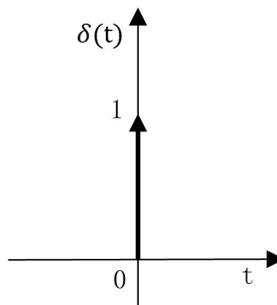


图 1.8.6 单位冲激函数

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”。

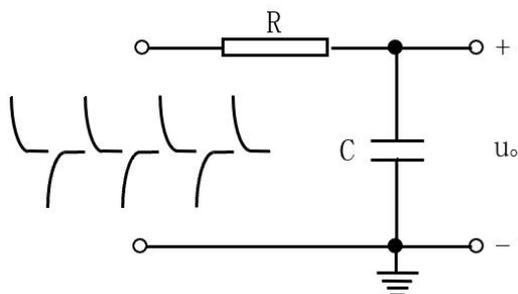


图 1.8.7 一阶RC串联电路

图 1.8.7 为一阶RC串联电路的冲激响应示意图。

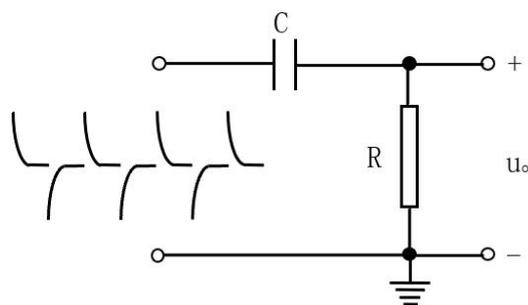


图 1.8.8 一阶CR串联电路

图 1.8.8 为一阶CR串联电路的冲激响应示意图。

### 1.8.3 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 8 根。
- 3.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.8.4 实验步骤

- 1.使用实验箱的扩展模块搭建一阶 RC 串联电路。RC 电路的元件参数为： $R = 510\Omega$ 、 $1K\Omega$ 、 $10K\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ 、 $1\mu F$ 。
- 2.信号源输出频率为 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 17.1.6，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. 使用实验箱的扩展模块搭建一阶 CR 串联电路。CR 电路的元件参数为： $R = 100\Omega$ 、 $510\Omega$ 、 $1K\Omega$ ， $C = 0.01\mu F$ 、 $0.1\mu F$ 。

8.使用 CR 电路，重复实验步骤 2 ~ 6 。

9.使用 MATLAB 仿真一阶 RC 串联电路和一阶 CR 串联电路，并构建方波信号，用来近似阶跃信号和构建冲激信号。

10.使用阶跃信号和冲激信号做电路的激励信号，分别计算其对应的响应信号。

11.改变电路元件参数，重复实验步骤 10。

12.MATLAB 程序下载。

(1) 使用 USB3.0 数据线连接信号源模块至电脑。信号源接通电源。

(2) 使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

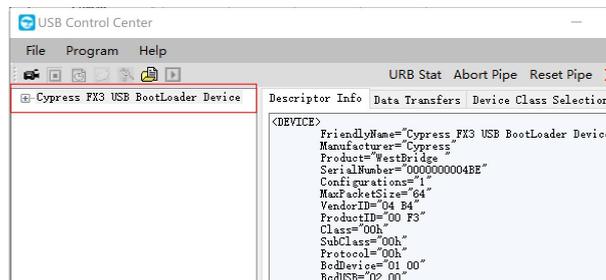


图 1.8.9 选择 FX3 设备

2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

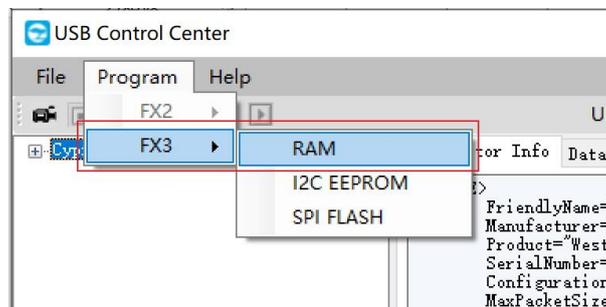


图 1.8.10 选择下载方式

3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

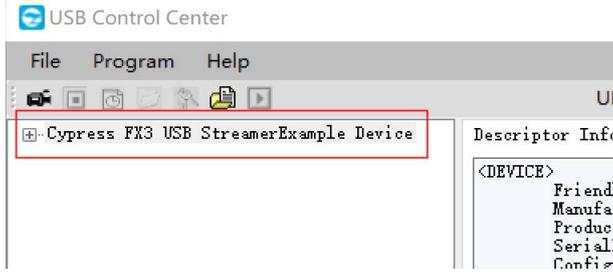


图 1.8.11 FX3 程序下载完成

(3) 打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

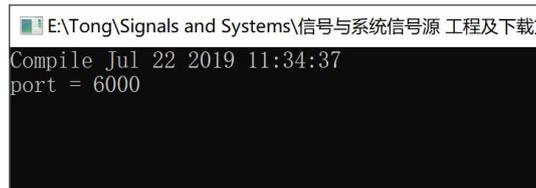


图 1.8.12 打开 VC2008\_NET\_DRV

(4) 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

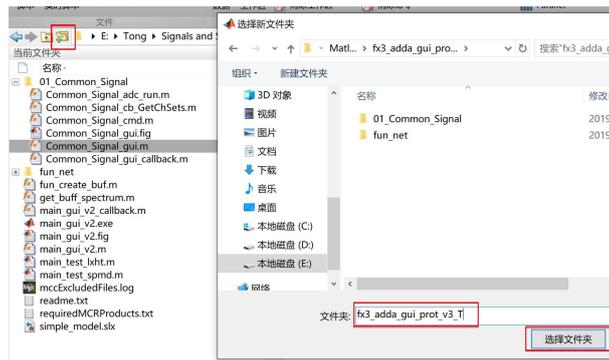


图 1.8.13 打开工程文件夹

(5) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。



图 1.8.14 添加路径

(6) 在命令行窗口输入“Filter\_Analysis\_gui”，按下回车键运行程序。

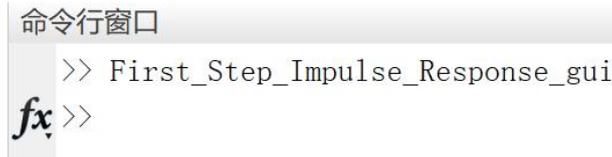


图 1.8.15 运行程序

(7) 运行程序后，打开一阶电路的单位阶跃响应、单位脉冲响应分析界面。



图 1.8.16 一阶电路的单位阶跃响应、单位脉冲响应分析界面

## 1.8.5 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 1.8.17 所示。

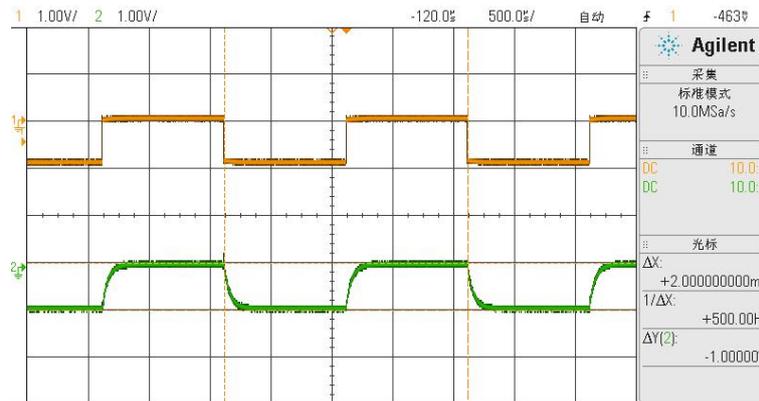


图 1.8.17  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(2) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 1.8.18 所示。

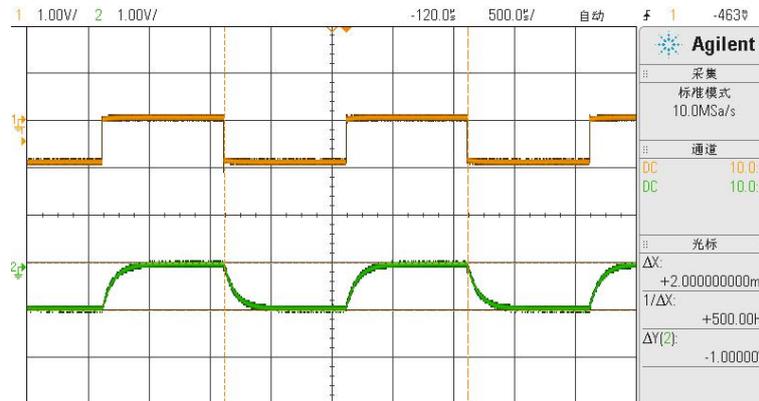


图 1.8.18  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(3) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 1.8.19 所示。

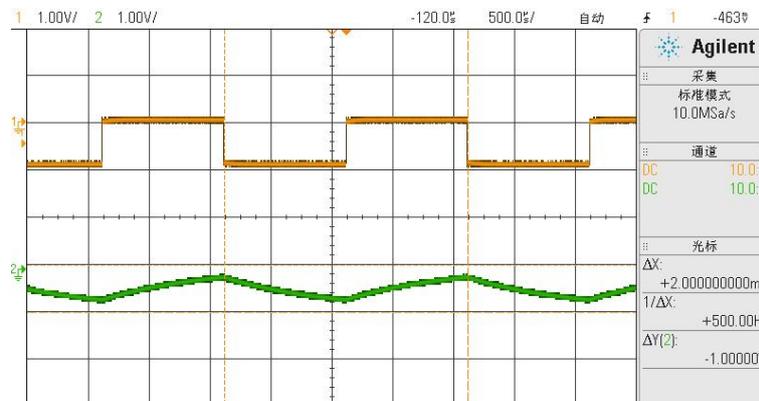


图 1.8.19  $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(4) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 1.8.20 所示。

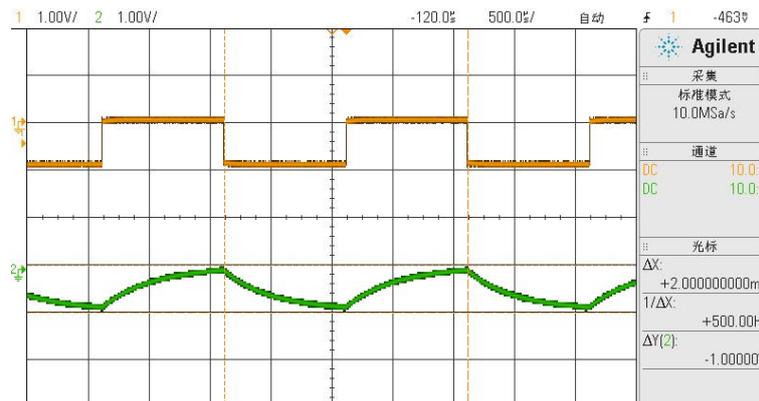


图 1.8.20  $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(5) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 1.8.21 所示。

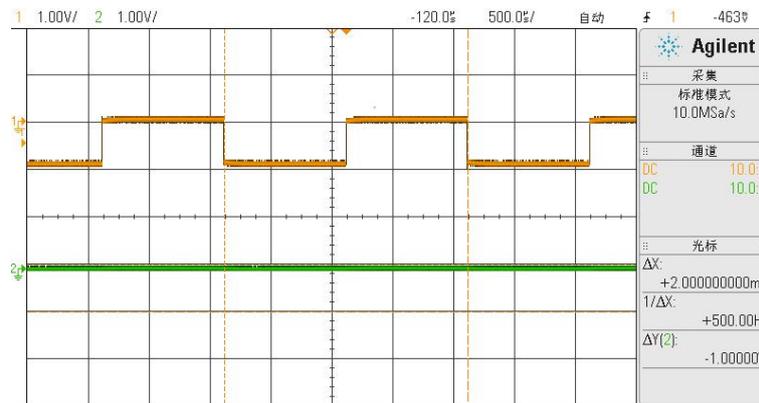


图 1.8.21  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(6) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的阶跃响应信号如图 1.8.22 所示。

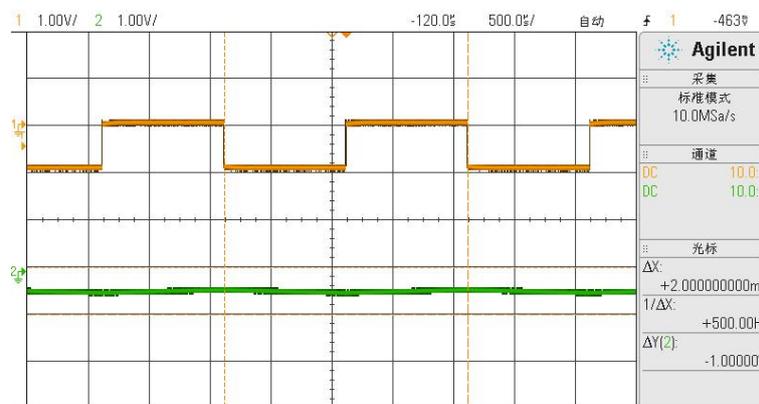


图 1.8.22  $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的阶跃响应信号

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 1.8.23 图 1.8.17 所示。

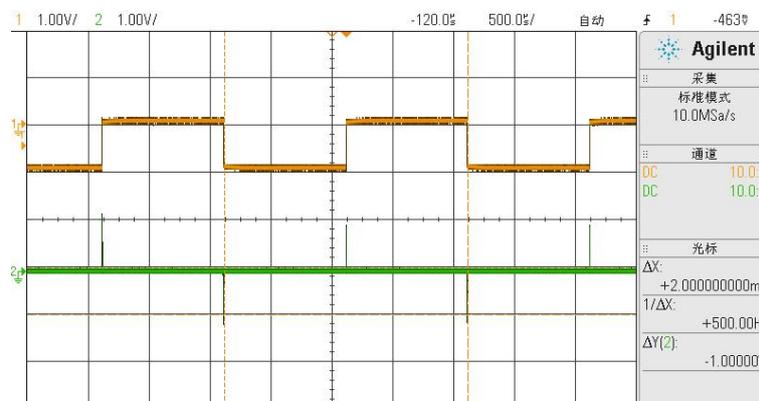


图 1.8.23  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(2) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 1.8.24 所示。

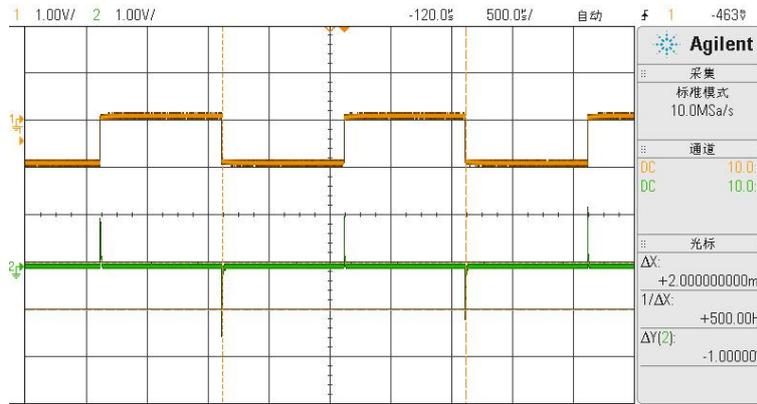


图 1.8.24  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(3) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 1.8.25 所示。

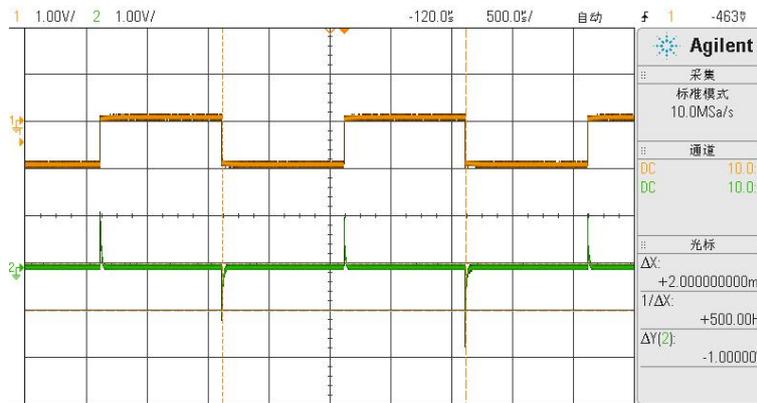


图 1.8.25  $R = 10K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(4) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时, RC 电路的冲激响应信号如图 1.8.26 所示。

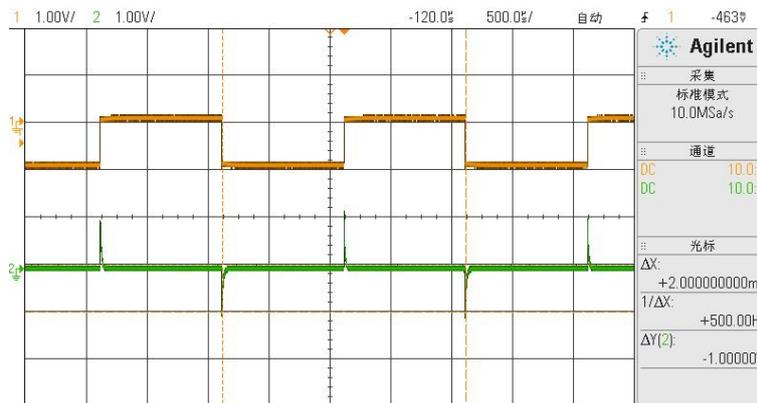


图 1.8.26  $R = 510\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的冲激响应信号

(5) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时，RC 电路的冲激响应信号如图 1.8.27 所示。

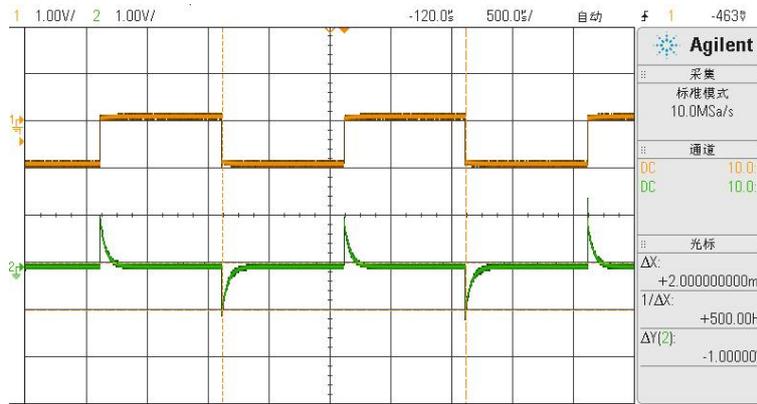


图 1.8.27  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的冲激响应信号

(6) 当 $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时，RC 电路的冲激响应信号如图 1.8.28 所示。

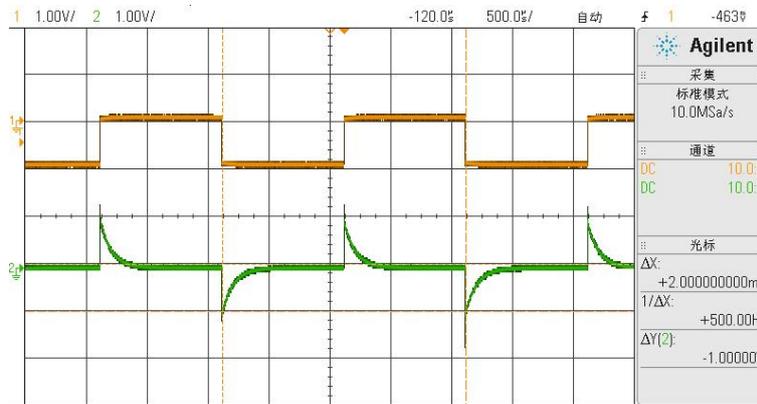


图 1.8.28  $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ 时的冲激响应信号

### 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 1.8.29 所示。

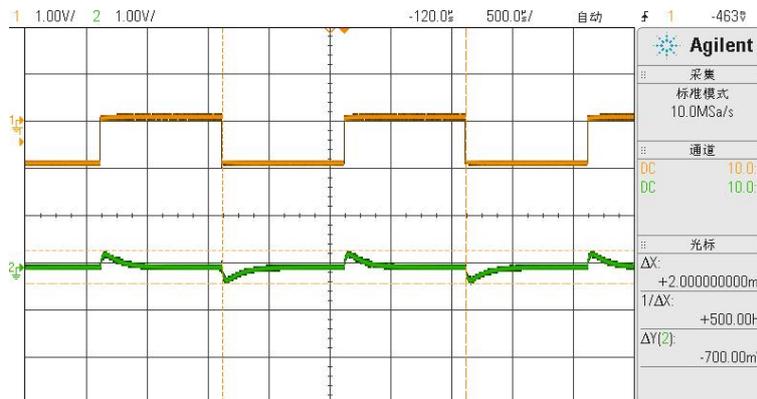


图 1.8.29  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的阶跃响应信号

(2) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，CR 电路的阶跃响应信号如图 1.8.30 所示。

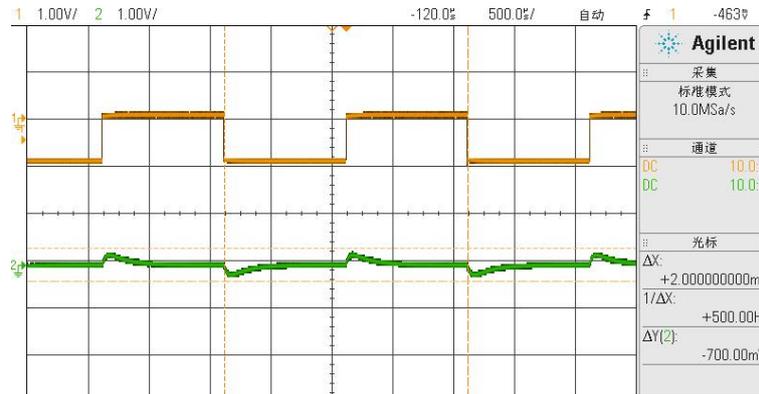


图 1.8.30  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的阶跃响应信号

(3) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，CR 电路的阶跃响应信号如图 1.8.31 所示。

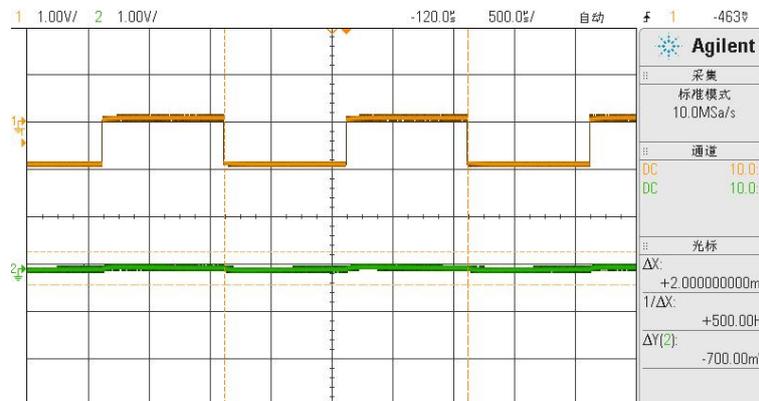


图 1.8.31  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的阶跃响应信号

(4) 当 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的阶跃响应信号如图 1.8.32 所示。

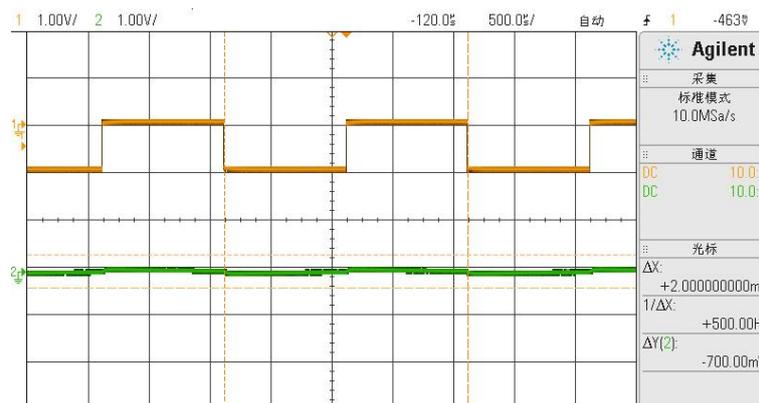


图 1.8.32  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(5) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, CR 电路的阶跃响应信号如图 1.8.33 所示。

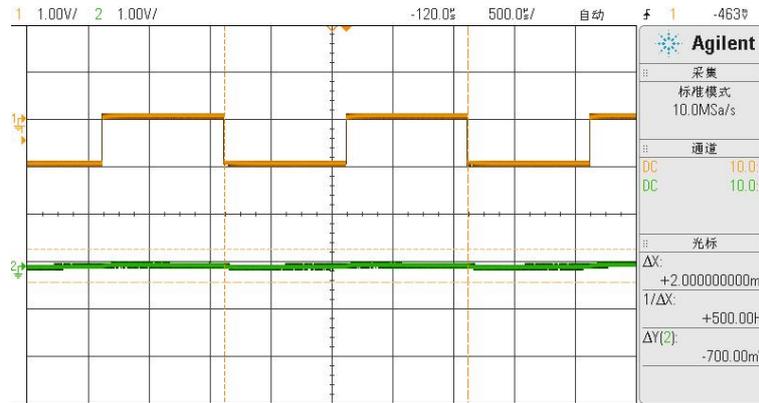


图 1.8.33  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

(6) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时, CR 电路的阶跃响应信号如图 1.8.34 所示。

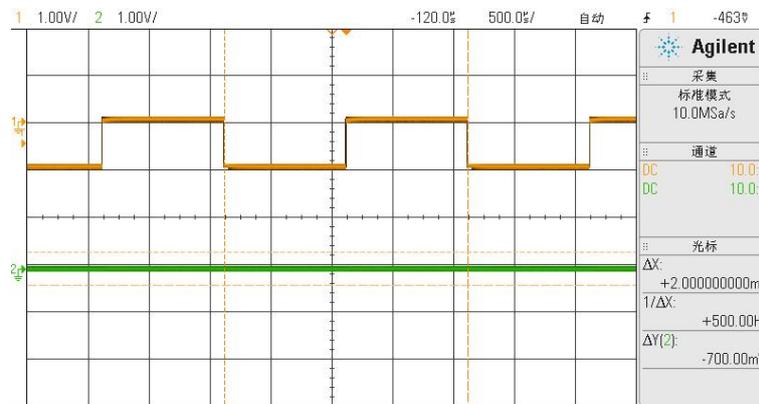


图 1.8.34  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的阶跃响应信号

#### 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 1.8.35 所示。

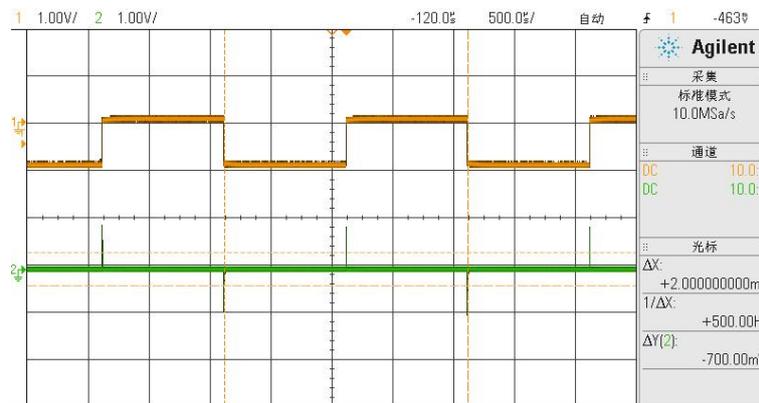


图 1.8.35  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的冲激响应信号

(2) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 1.8.36 所示。

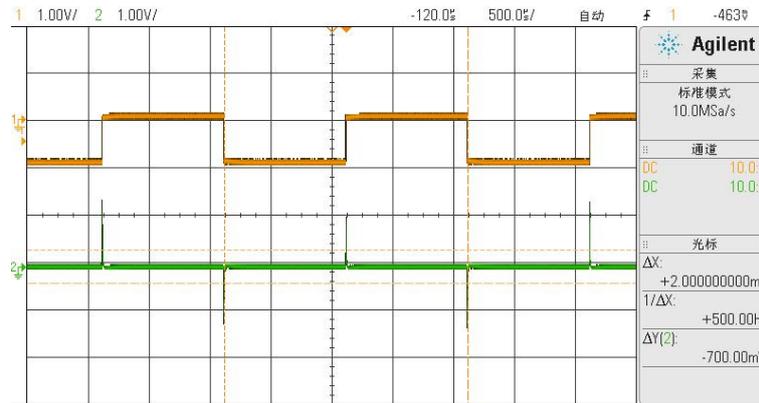


图 1.8.36  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的冲激响应信号

(3) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 1.8.37 所示。

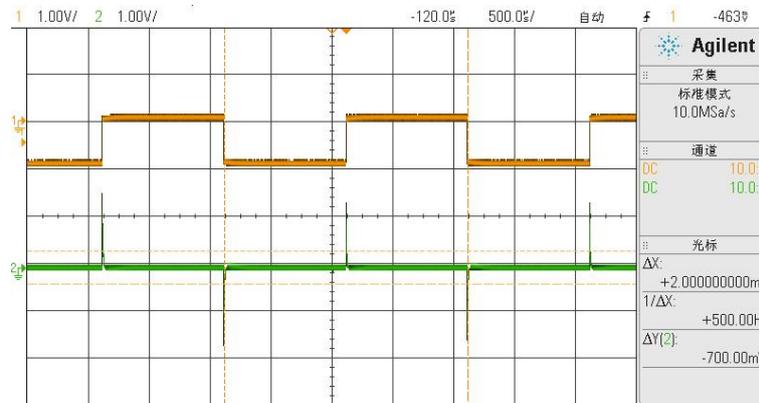


图 1.8.37  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.01\mu F$ 时的冲激响应信号

(4) 当 $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 1.8.38 所示。

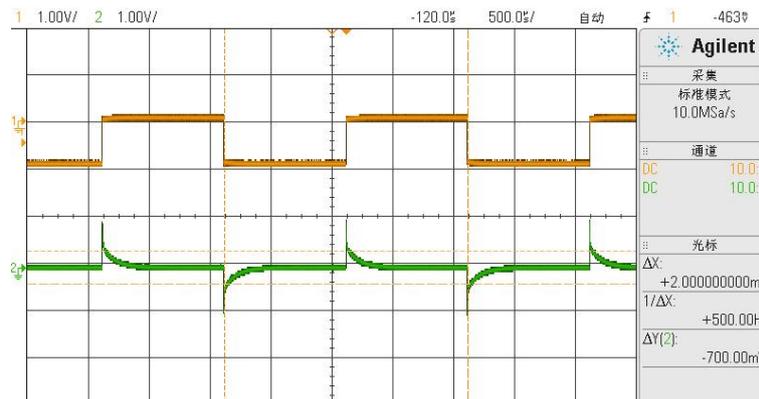


图 1.8.38  $R = 100\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(5) 当 $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 1.8.39 所示。

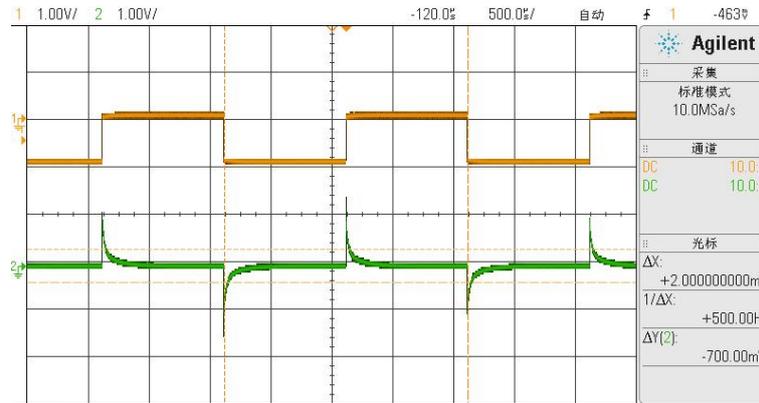


图 1.8.39  $R = 510\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

(6) 当 $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时，CR 电路的冲激响应信号如图 1.8.40 所示。

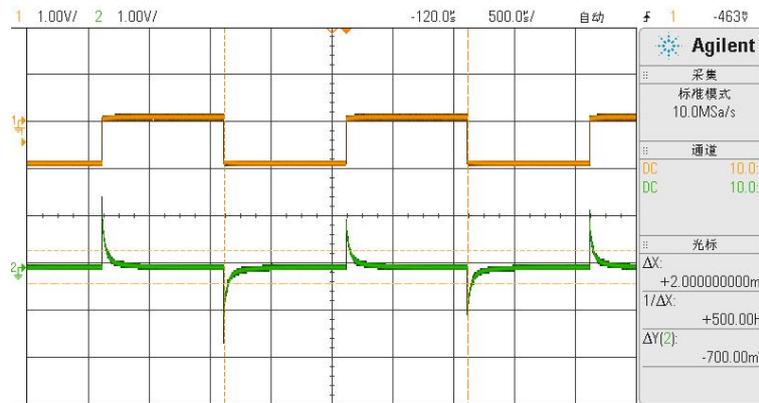


图 1.8.40  $R = 1K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 时的冲激响应信号

## 1.9 一阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验

### 1.9.1 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) 学会使用 MATLAB 软件计算一阶电路的零输入响应和零状态响应。

#### 2.实验任务

- (1) 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) 使用 MATLAB 软件计算一阶零输入响应、零状态响应及全响应的波形,并于示波器观察到的波形进行对比。

### 1.9.2 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。

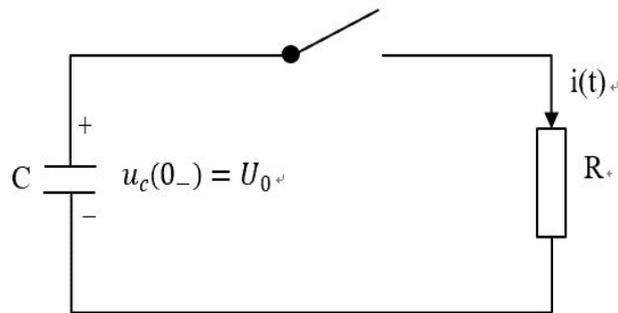


图 1.9.1 一阶 RC 电路的零输入响应示意图

一阶 RC 电路的零输入响应如图 1.9.1 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:

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

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

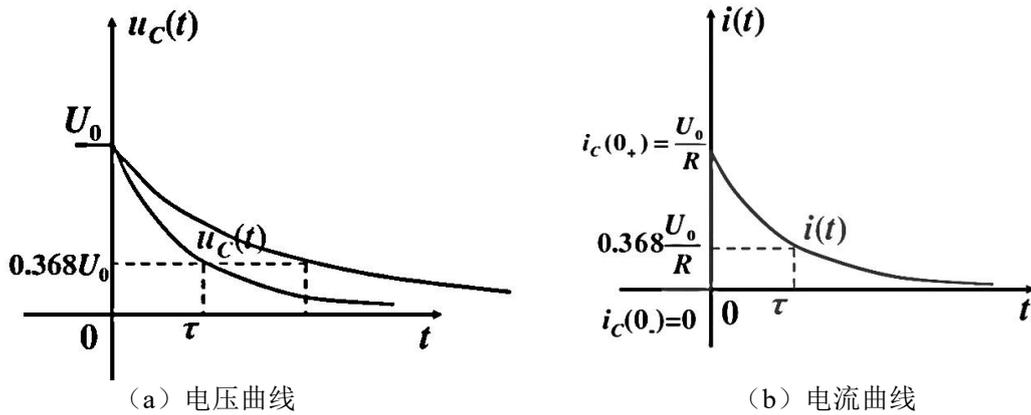


图 1.9.2 零输入响应曲线

## 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。

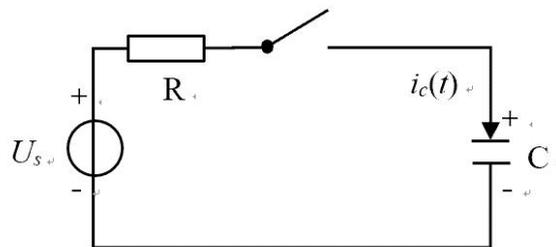


图 1.9.3 一阶 RC 电路的零状态响应示意图

一阶 RC 电路的零状态响应如图 1.9.3 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  $u_{c特} = B$ , 带入方程式中,  $B = U_s = u_c(\infty)$ .

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

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:

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

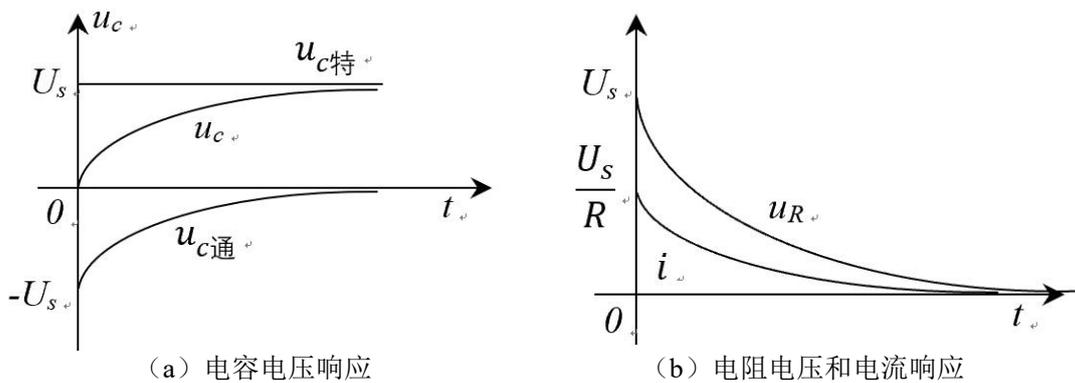


图 1.9.4 零状态响应曲线

### 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。

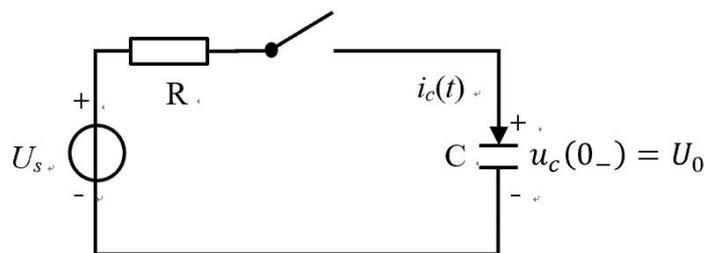


图 1.9.5 一阶RC电路的全响应示意图

一阶 RC 电路的零状态响应如图 1.9.5 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:

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

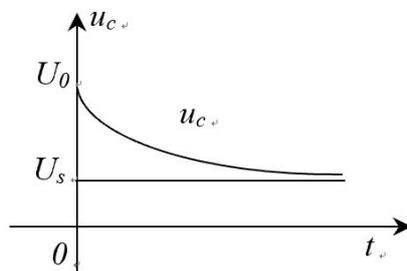


图 1.9.6 全响应曲线

#### 4. 实验电路原理图

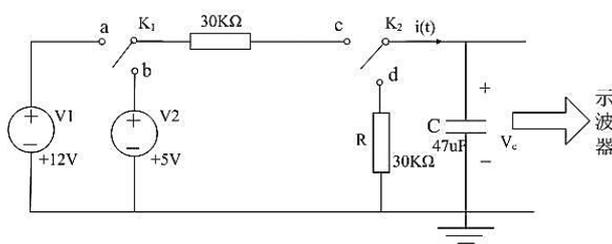


图 1.9.7 一阶RC电路的响应原理图

### 1.9.3 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 8 根。
3. USB3.0 数据线 1 根。
4. 双踪示波器 1 台。
5. 安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.9.4 实验步骤

1. 使用实验箱的扩展模块搭建如图 1.9.7 所示的电路。实验箱上电。

2.使用示波器通道 1 (或通道 2) 接电路的输出端 (即图 1.9.7 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 1.9.7 所示电路中的开关 $K_1$ 置于 $a$ 端, 开关 $K_2$ 置于 $c$ 端, 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 $K_2$ 拨至 $d$ 端, 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 1.9.7 所示电路中的开关 $K_1$ 置于 $b$ 端, 开关 $K_2$ 置于 $d$ 端, 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 $K_2$ 拨至 $c$ 端, 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。

5.观察电路的全响应。将图 1.9.7 所示电路中的开关 $K_1$ 置于 $a$ 端, 开关 $K_2$ 置于 $c$ 端, 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关 $K_1$ 拨至 $b$ 端, 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。

8. 编写一阶电路的 MATLAB 仿真程序, 模拟运算一阶电路的零输入响应、零状态响应及全响应分析。

9.运行 MATLAB 程序。

(1) 打开 MATLAB 软件, 点击右上角的“浏览文件夹”按钮, 选择打开工程所在文件夹。

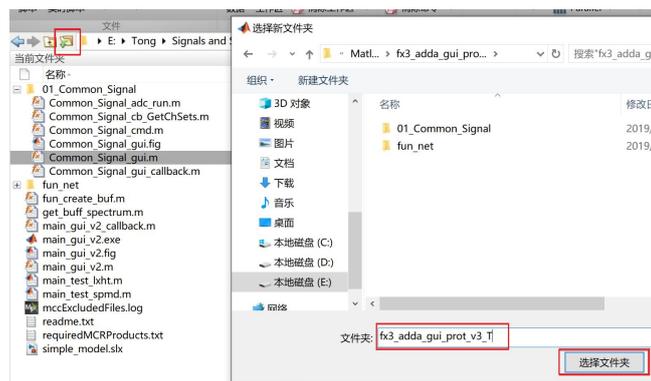


图 1.9.8 打开工程文件夹

(2) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

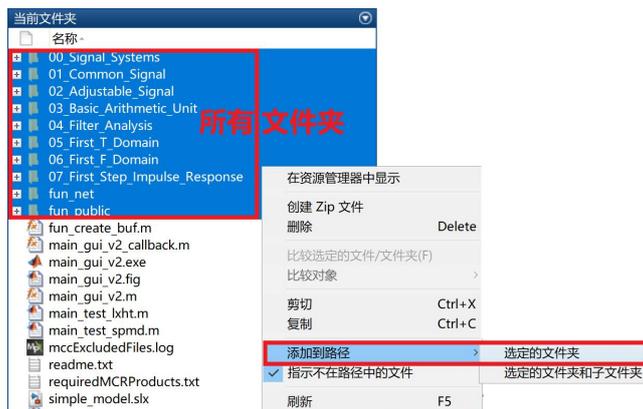


图 1.9.9 添加路径

(3) 在命令行窗口输入“First\_State\_Response\_gui”，按下回车键运行程序。



图 1.9.10 运行程序

(4) 运行程序后，一阶电路的零状态跃响应、零输入响应分析界面如所示。



图 1.9.11 一阶电路的零状态跃响应、零输入响应分析界面

(5) 在一阶电路的零状态跃响应、零输入响应分析界面中的 K1、K2 的初始状态分别为 a 和 c，K1、K2 的切换后的状态为 a 和 d 时，表示为零输入响应。

(6) 在一阶电路的零状态跃响应、零输入响应分析界面中的 K1、K2 的初始状态分别为 b 和 d，K1、K2 的切换后的状态为 b 和 c 时，表示为零状态响应。

(7) 在一阶电路的零状态跃响应、零输入响应分析界面中的 K1、K2 的初始状态分别为 a 和 c，K1、K2 的切换后的状态为 b 和 c 时，表示为全响应。

10. 选择开关状态, 点击对应的按钮, 进行响应运算, 观察其对应的响应波形。
11. 将 $V_1$ 与 $V_2$ 的值互换, 重复实验, 观察对应的响应波形。

### 1.9.5 实验结果

1. 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的零输入响应如图 1.9.12 所示。

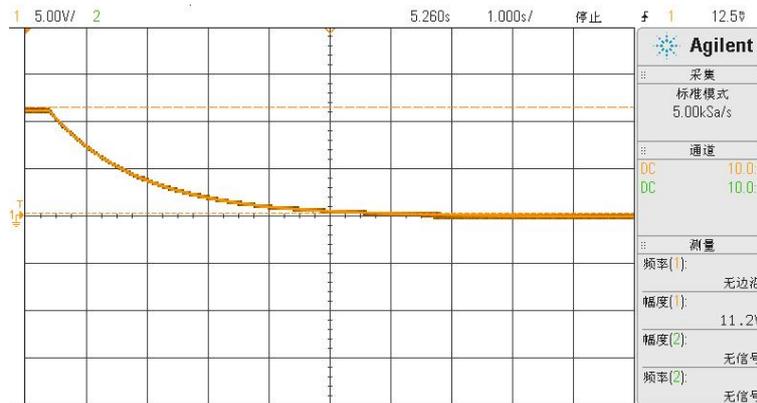


图 1.9.12  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时的零输入响应

2. 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的零状态响应如图 1.9.13 所示。

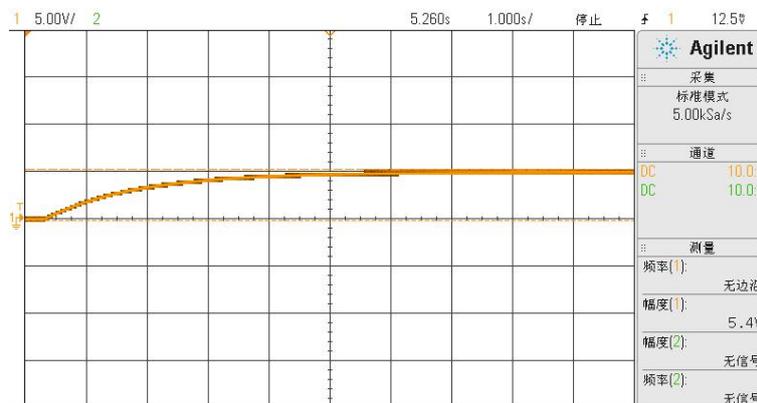


图 1.9.13  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时的零状态响应

3. 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的全响应如图 1.9.14 所示。

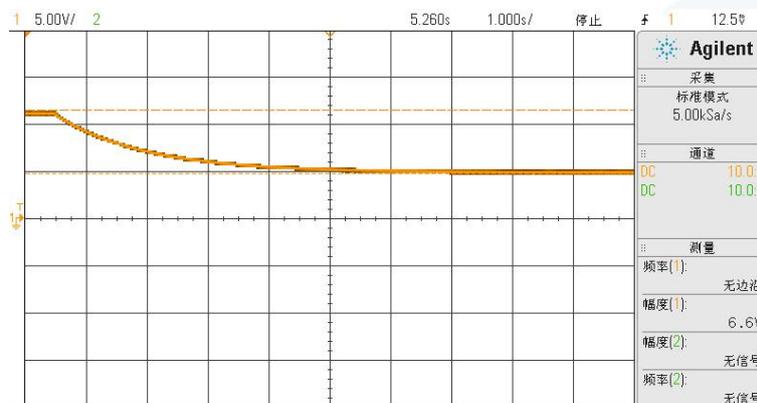


图 1.9.14  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时的全响应

4.当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时,电路的零输入响应如图 1.9.15 所示。

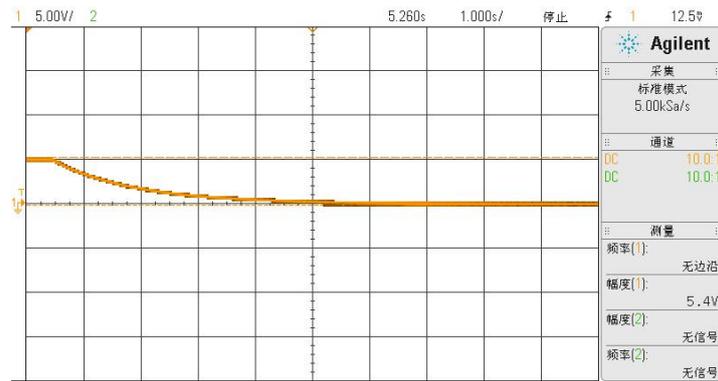


图 1.9.15  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时的零输入响应

5.当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时,电路的零状态响应如图 1.9.16 所示。

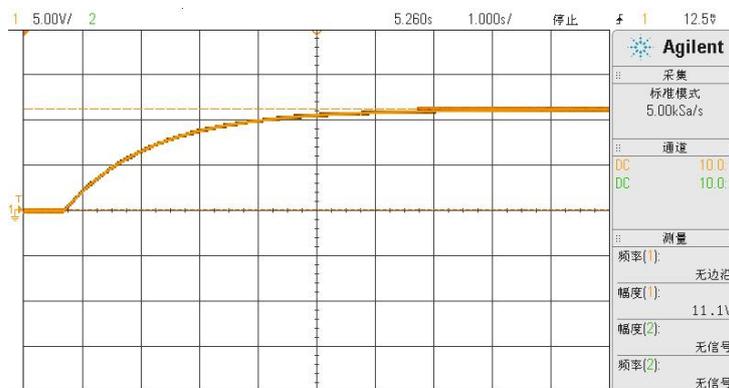


图 1.9.16  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时的零状态入响应

6.当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时,电路的全响应如图 1.9.17 所示。

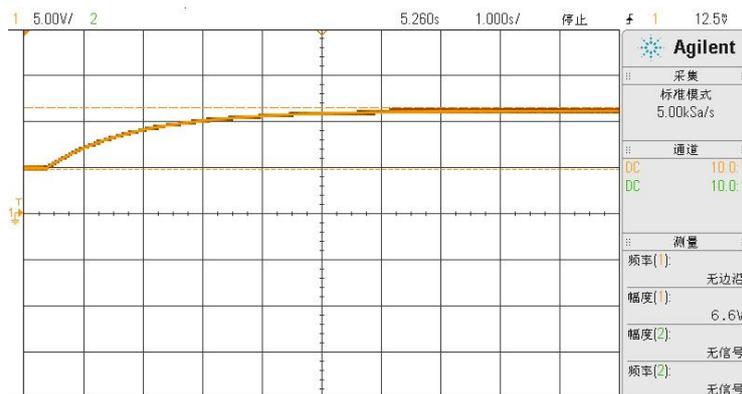


图 1.9.17  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时的全响应

7.使用 MATLAB 仿真一阶电路的零输入响应、零状态响应分析。

(1) 电路中参数:  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 、 $R = 30K\Omega$ 、 $C = 47\mu F$ 。

V1(V)	V2(V)	R ( $\Omega$ )	C (F)
12	5	30e3	47e-6

图 1.9.18 电路参数

零输入响应的波形如图 1.9.19 所示。

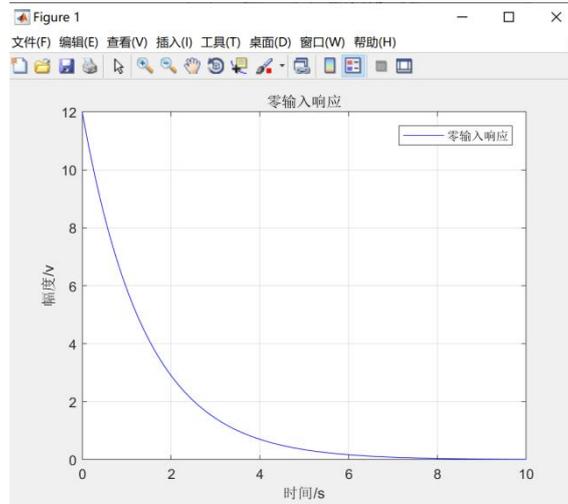


图 1.9.19 零输入响应的波形

零状态响应的波形如图 1.9.20 所示。

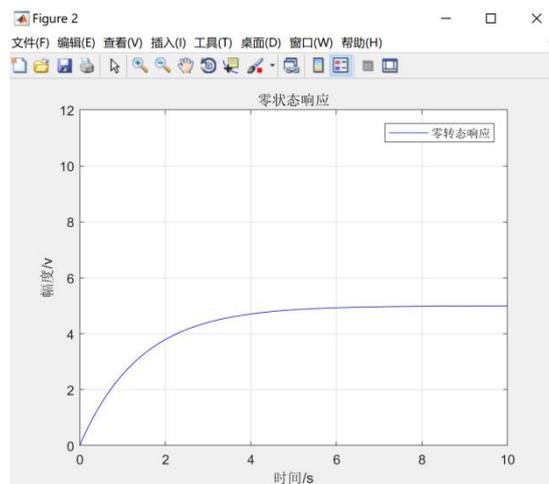


图 1.9.20 零状态响应的波形

全响应的波形如图 1.9.21 所示。

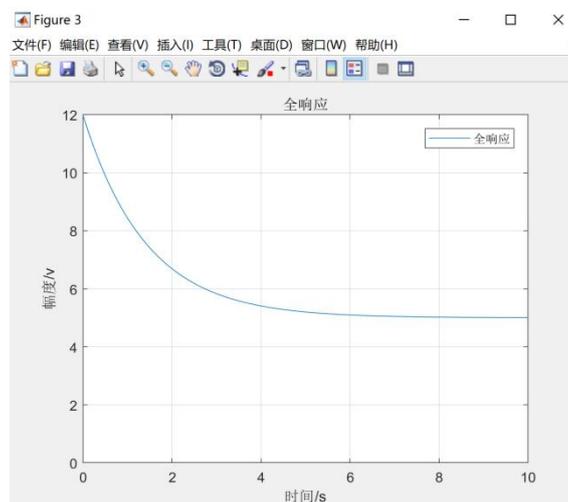


图 1.9.21 全响应的波形

(2) 电路中参数:  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 、 $R = 30K\Omega$ 、 $C = 47\mu F$ 。

V1(V)	V2(V)	R ( $\Omega$ )	C (F)
5	12	30e3	47e-6

图 1.9.22 电路参数

零输入响应的波形如图 1.9.23 所示。

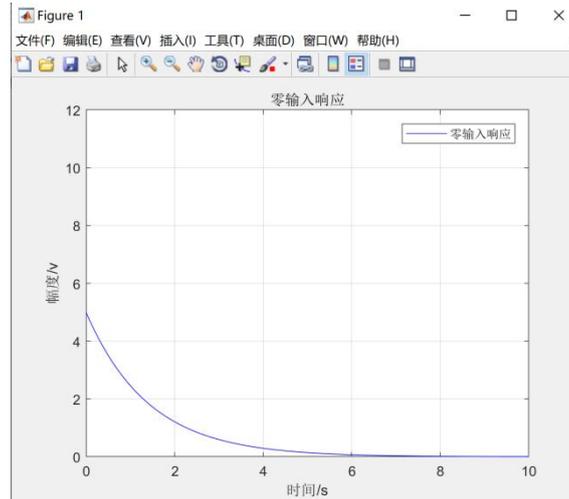


图 1.9.23 零输入响应的波形

零状态响应的波形如图 1.9.24 所示。

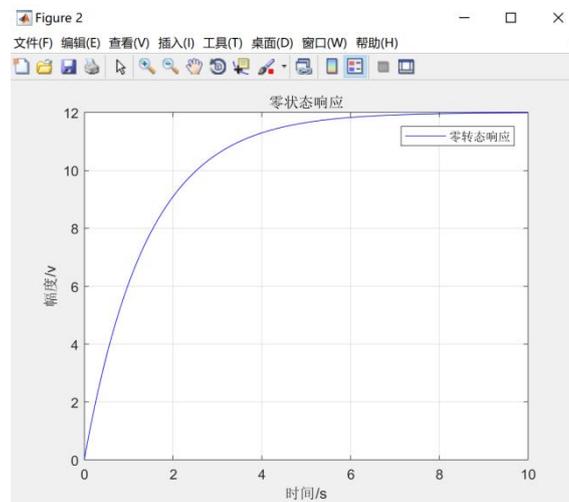


图 1.9.24 零状态响应的波形

全响应的波形如图 1.9.25 所示。

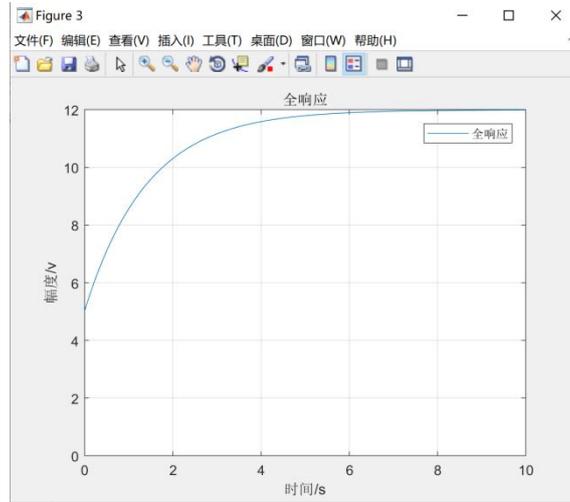


图 1.9.25 全响应的波形

## 1.10 二阶电路的频域分析实验

### 1.10.1 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) 学会使用 MATLAB 分析二阶RLC串联电路的频率特性。

#### 2.实验任务

- (1) 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) 使用 MATLAB 软件仿真完成二阶电路的频域分析。

### 1.10.2 实验原理

#### 1.二阶 RLC 串联电路

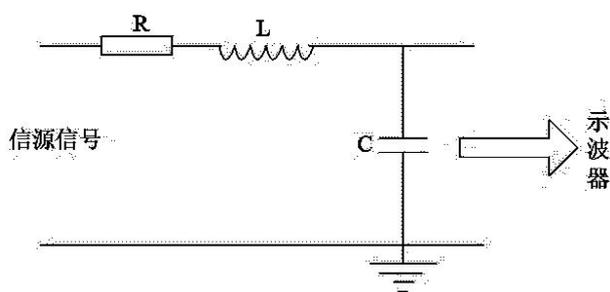


图 1.10.1RLC串联电路

#### (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 1.10.1 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 1.10.2 所示，所以：

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

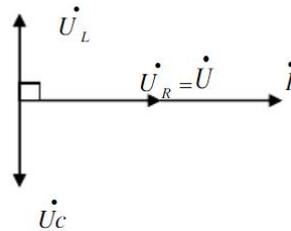


图 1.10.2 串联谐振时的相量图

谐振的角频率 $\omega_0$ 为：

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

即谐振频率 $f_0$ 为：

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

$f_0$ 称做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 1.10.2 分析得，电感两端或电容两端得电压比外加电压大 $Q$ 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。

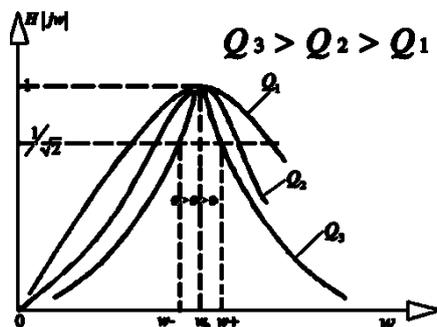


图 1.10.3 RLC串联电路的幅频特性曲线

RLC串联电路的相频特性曲线如图 1.10.4 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。

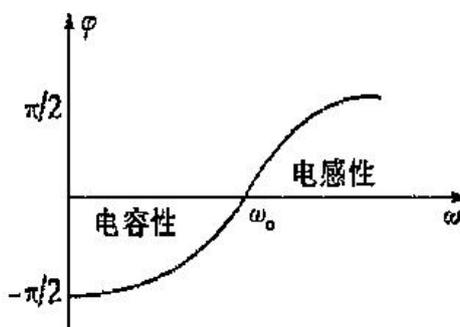


图 1.10.4 RLC串联电路的相频特性曲线

## 2 .MATLAB 仿真二阶RLC串联电路

在 MATLAB 中,使用电路的系统传递函数表示电路。二阶RLC串联电路的仿真如下代码所示:

```

1. function [tf_sys] = Second_F_Domain_Sys(r, l, c)
2. % 计算系统传递函数
3. % r、l、c 表示选择电路器件参数。
4. tf_sys = tf([0 0 1], [c*l c*r 1]);
5. end
    
```

## 1. 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8根。
- 3.USB3.0 数据线1根。
- 4.双踪示波器1台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.10.4 实验步骤

1.使用实验箱的扩展模块搭建如图 1.10.1 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）。

2.从信号源取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.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。

5. 使用 MATLAB 软件仿真完成二阶电路的频域分析。

(1) 编写 RLC 串联电路的 MATLAB 仿真程序，计算谐振频率、幅频特性曲线及相频特性曲线。

(2) 编写扫频信号及正弦波信号程序，或编写高速 ADDA 模块采集扫频信号及正弦波信号。（程序下载参考步骤 3）

(3) MATLAB 仿真输入扫频信号，输出便记录响应信号。

(4) MATLAB 仿真分别输入幅值为 1V，频率不同的正弦波信号，输出并记录响应信号幅值。

(5) 对比步骤 1 中的结果与步骤 2 中的结果，分析 RLC 串联电路的频率特性。

6.MATLAB 程序下载。

(1) 使用 USB3.0 数据线连接高速 ADDA 模块至电脑。信号源接通电源。

(2) 使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

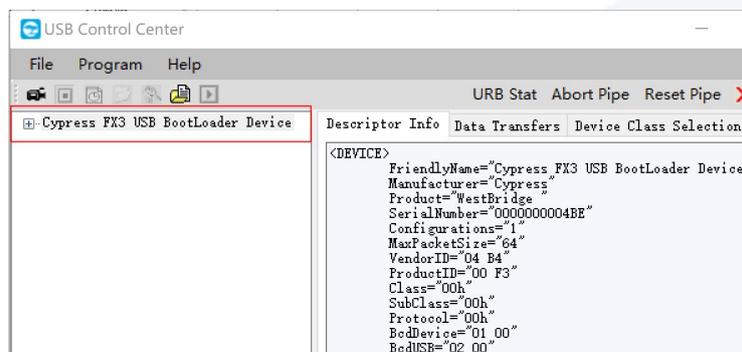


图 1.10.5 选择 FX3 设备

2) 点击菜单栏的“Program”下的FX3，选择“RAM”。

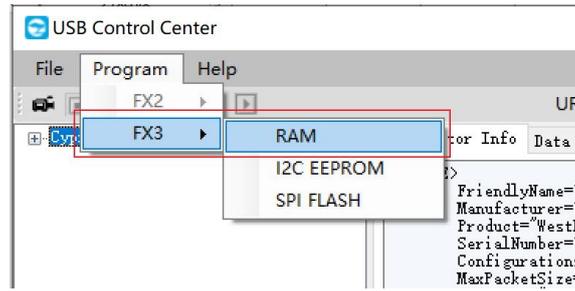


图 1.10.6 选择下载方式

3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cypress FX3 USB StreamExample Device。

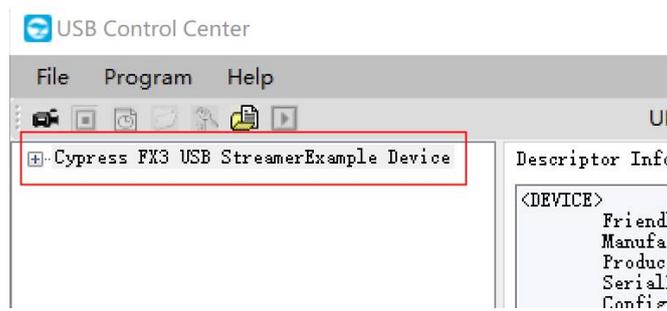


图 1.10.7 FX3 程序下载完成

(3) 打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

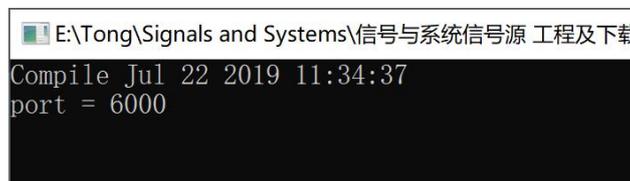


图 1.10.8 打开 VC2008\_NET\_DRV

(4) 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

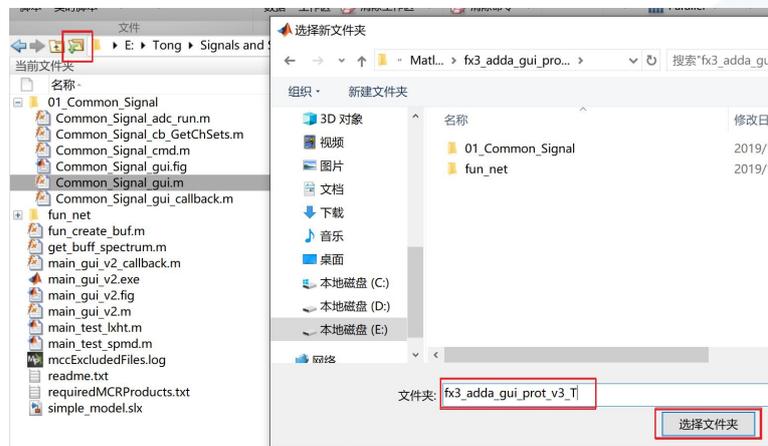


图 1.10.9 打开工程文件夹

(5) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。



图 1.10.10 添加路径

(6) 在命令行窗口输入“Second\_F\_Domain\_gui”，按下回车键运行程序。



图 1.10.11 运行程序

### 1.10.5 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 1.10.12 所示。

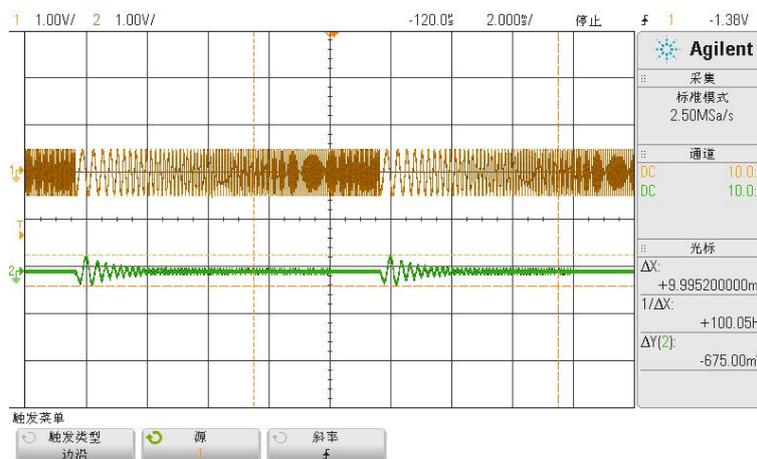


图 1.10.12 扫频信号及其对应得响应信号

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 1.10.13 所示。

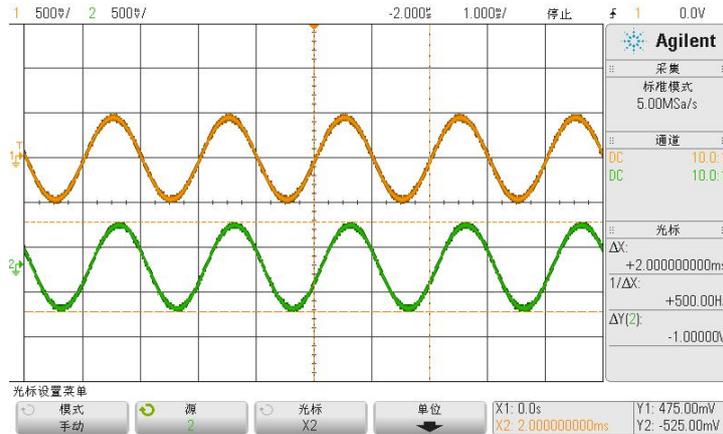


图 1.10.13 500Hz 的正弦波信号及响应信号波形图

(2) 正弦波频率为 1.5KHz 时, 其对应的响应信号波形如图 1.10.14 图 1.10.13 所示。

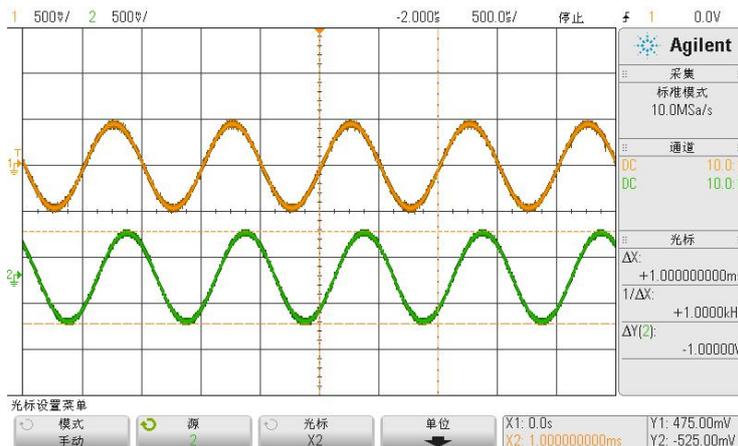


图 1.10.14 1KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(3) 正弦波频率为 1.5KHz 时, 其对应的响应信号波形如图 1.10.15 所示。

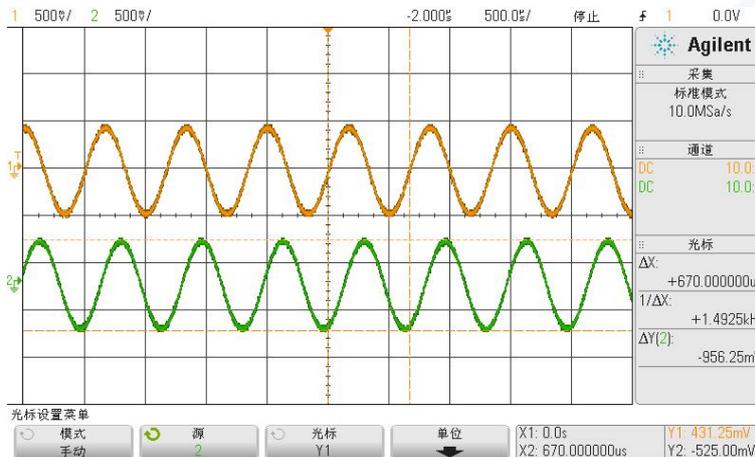


图 1.10.15 1.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(4) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 1.10.16 所示。

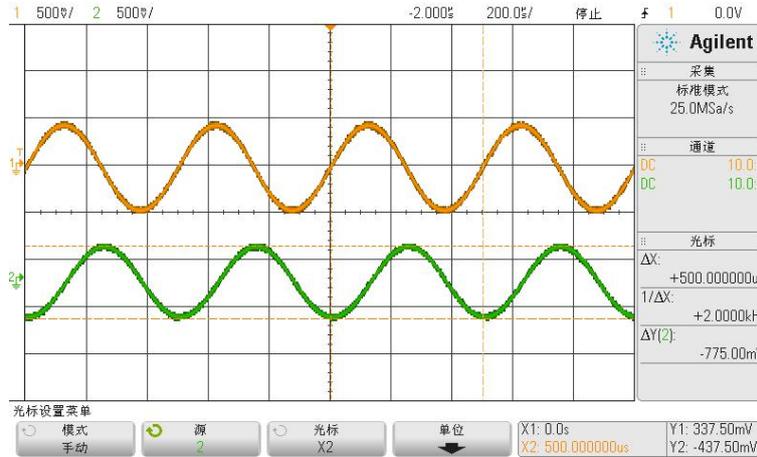


图 1.10.16 2KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(5) 正弦波频率为 2.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 1.10.17 所示。

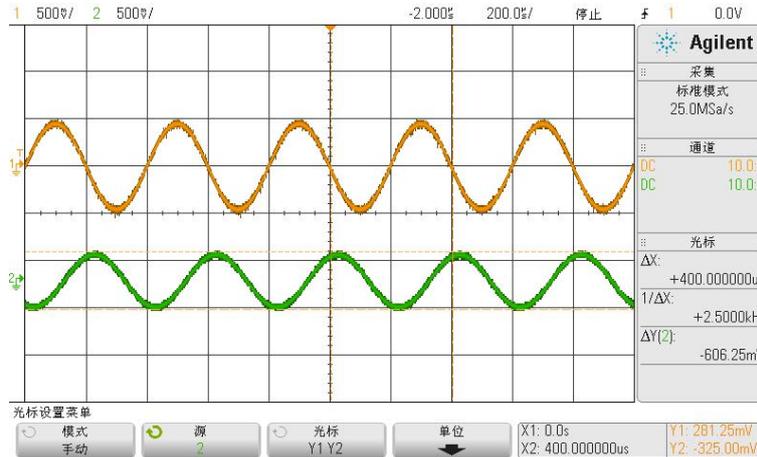


图 1.10.17 2.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(6) 正弦波频率为 3KHz 时，其对应的响应信号波形如图 1.10.18 所示。

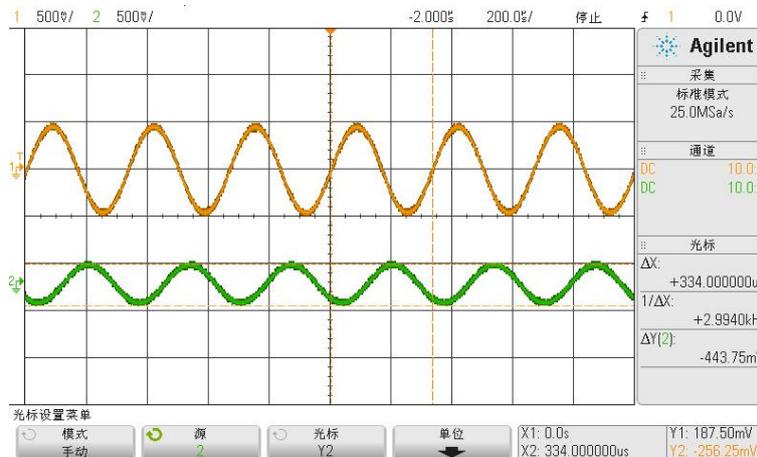


图 1.10.18 3KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(7) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 1.10.19 所示。

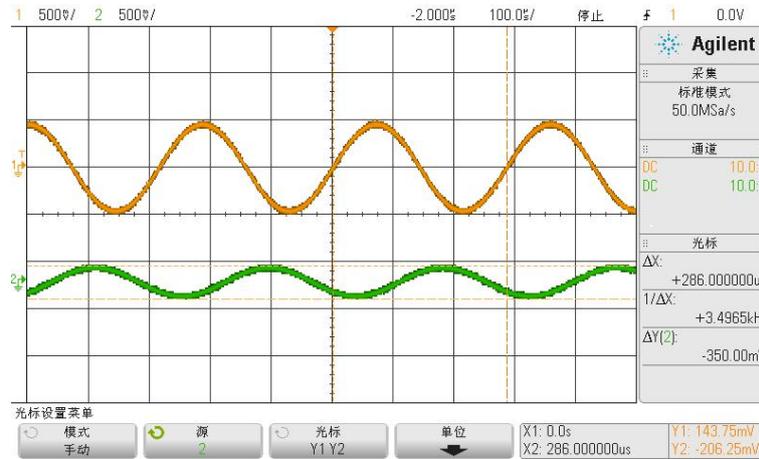


图 1.10.19 3.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(8) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 1.10.20 所示。

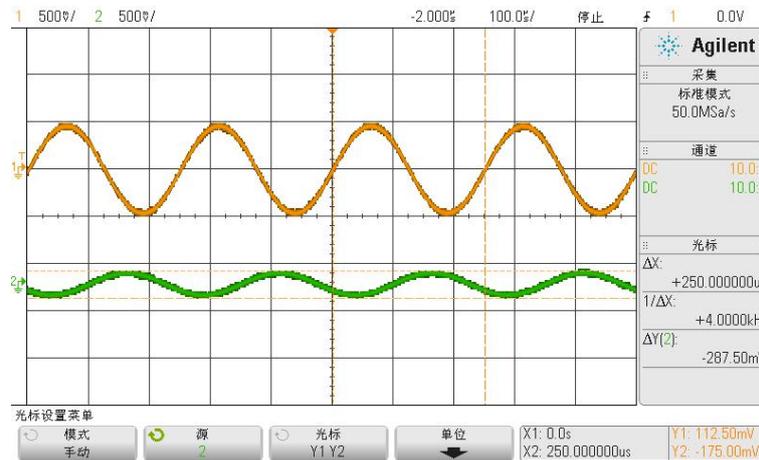


图 1.10.20 4KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(9) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 1.10.21 所示。

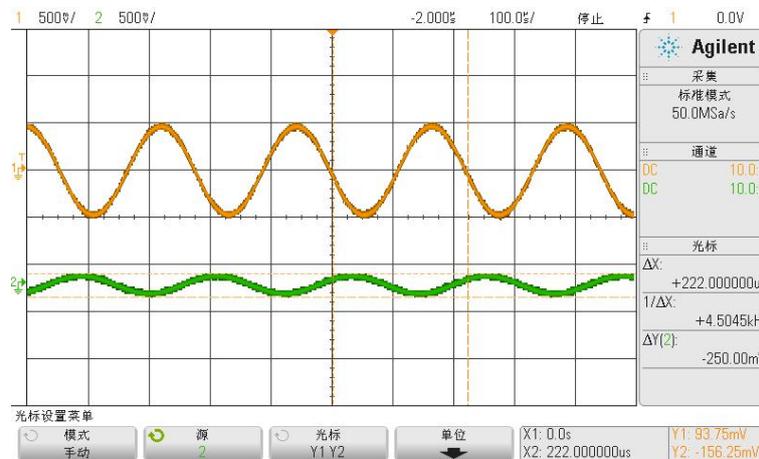


图 1.10.21 4.5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

(10) 正弦波频率为 1.5KHz 时，其对应的响应信号波形如图 1.10.22 所示。



图 1.10.22 5KHz 的正弦波信号及响应信号波形图

### 3. MATLAB 软件仿真二阶电路的频域分析结果

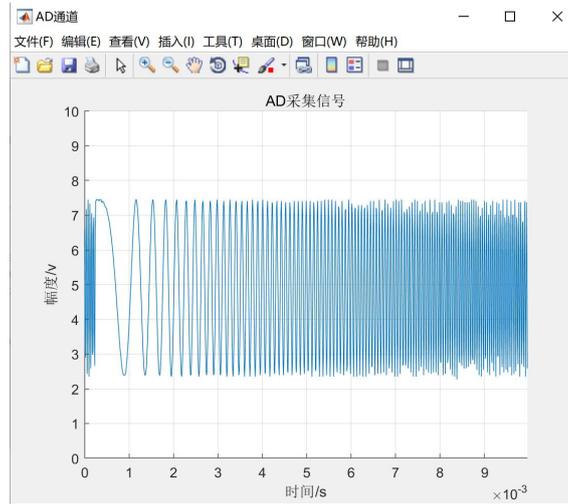


图 1.10.23 扫频信号

(1) RLC 串联电路参数： $R = 100\Omega$ ， $L = 10mH$ ， $C = \mu F$ 。幅频特性曲线及相频特性曲线如图 1.10.25 和图 1.10.26 所示。



图 1.10.24 电阻 $R = 100\Omega$

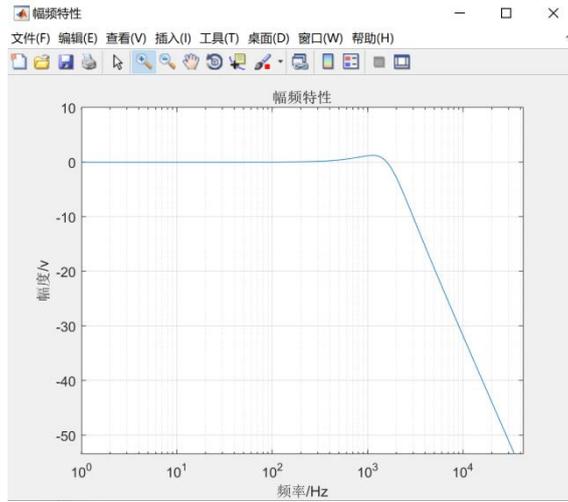


图 1.10.25 电阻 $R = 100\Omega$ 时的幅频特性曲线

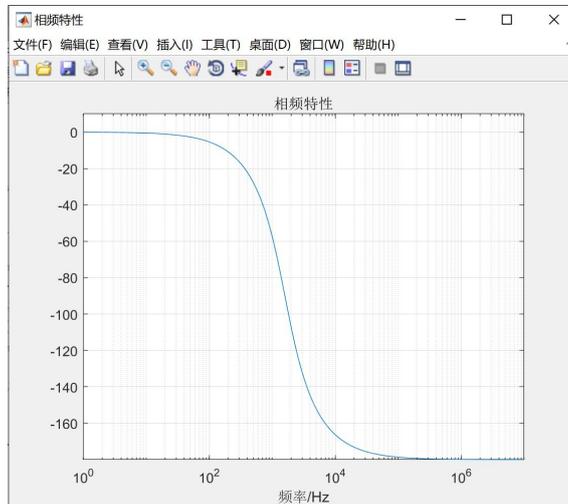


图 1.10.26 电阻 $R = 100\Omega$ 时的幅频特性曲线

此时，输入扫频信号，输出响应如图 1.10.27 所示。

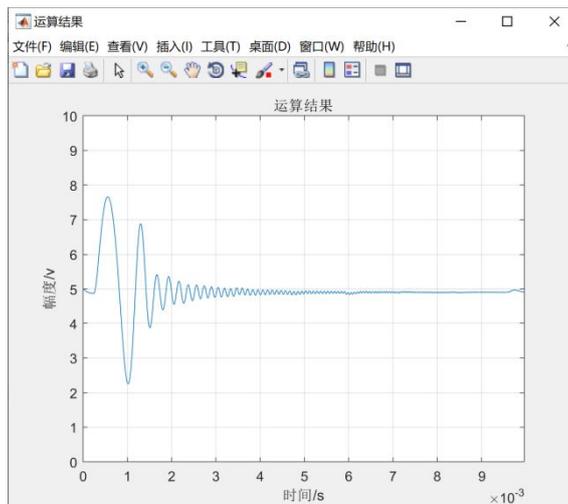


图 1.10.27 电阻 $R = 100\Omega$ 时输入扫频信号的响应

(2) RLC 串联电路参数:  $L = 10\text{mH}$ ,  $C = \mu\text{F}$ ,  $R = 100\Omega$ 时, 输入频率不同的正弦波信号。

正弦波信号频率为 500Hz 时, 响应信号的波形及幅值如图 1.10.28 所示。

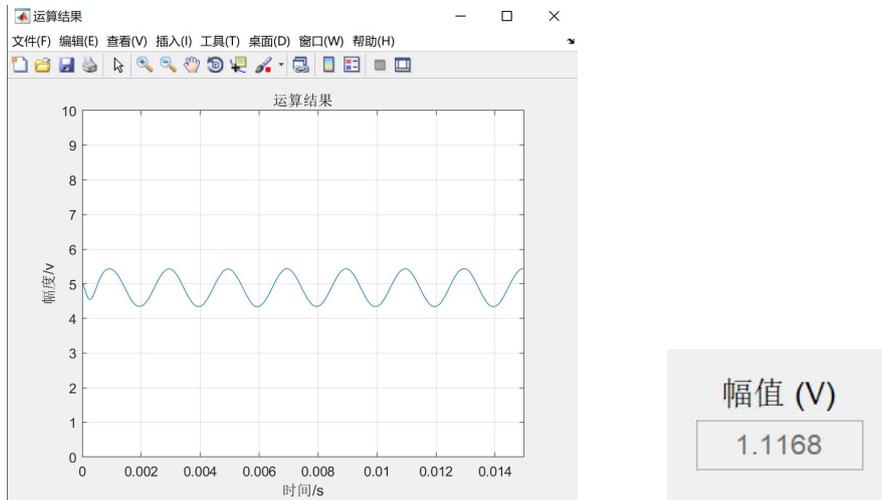


图 1.10.28 正弦波信号频率为 500Hz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 1KHz 时, 响应信号的波形及幅值如图 1.10.29 所示。

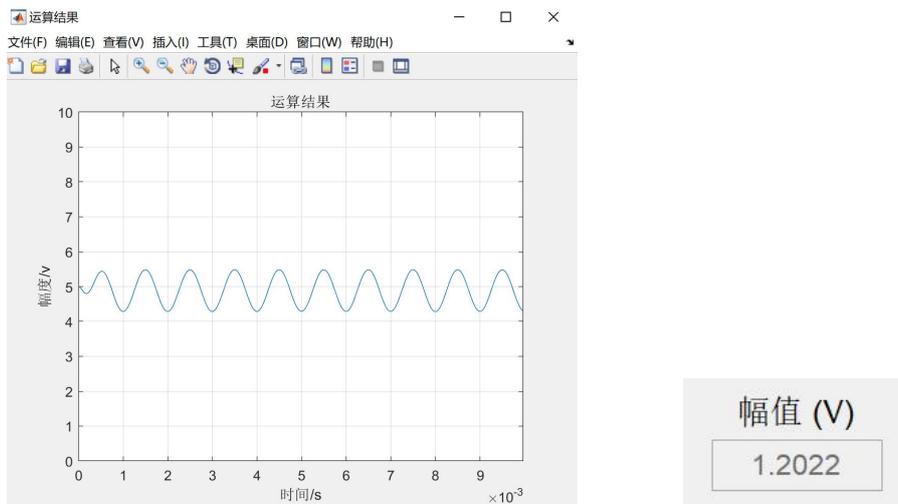


图 1.10.29 正弦波信号频率为 1KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 1.5KHz 时, 响应信号的波形及幅值如图 1.10.30 所示。

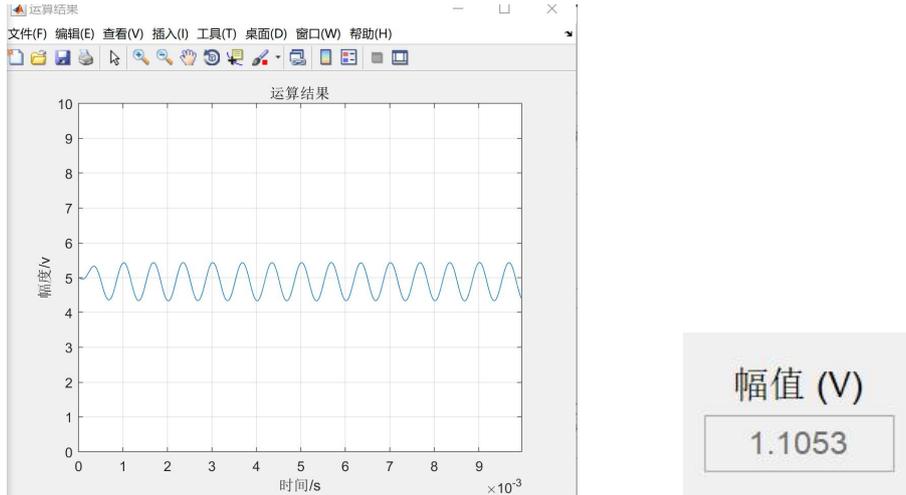


图 1.10.30 正弦波信号频率为 1.5KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 2KHz 时，响应信号的波形及幅值如图 1.10.31 所示。

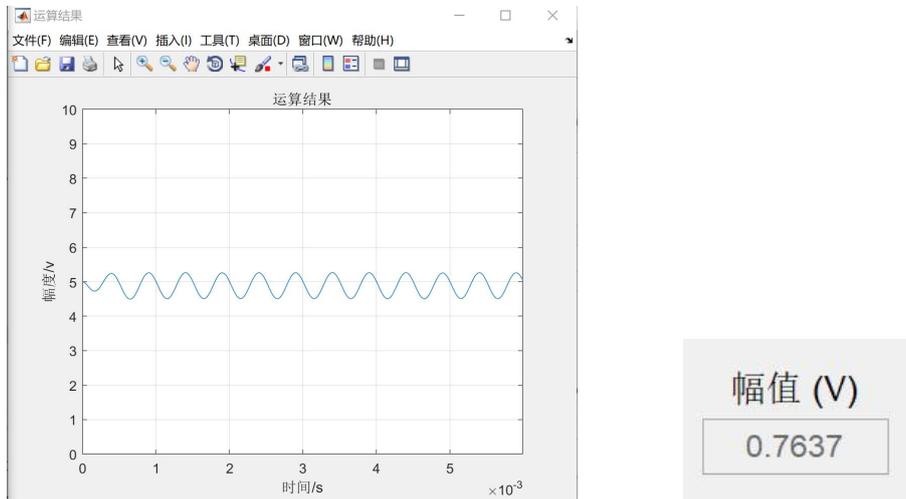


图 1.10.31 正弦波信号频率为 2KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 2.5KHz 时，响应信号的波形及幅值如图 1.10.32 所示。

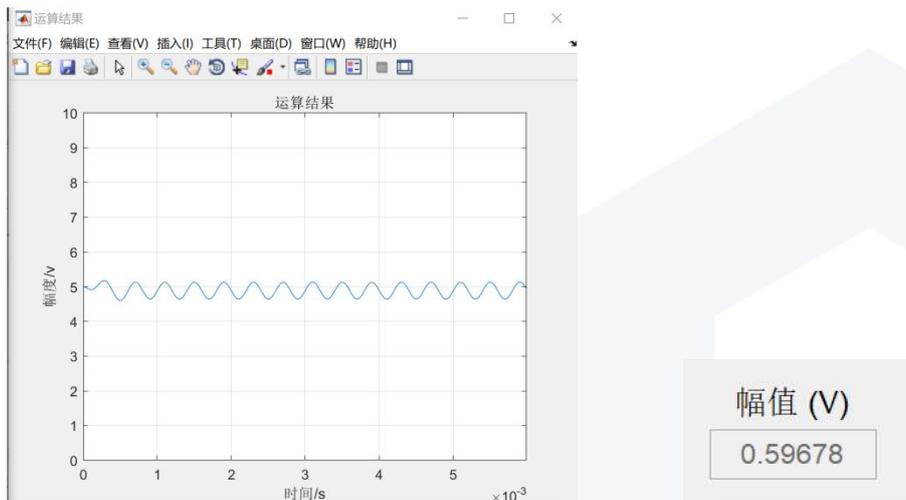


图 1.10.32 正弦波信号频率为 2.5KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 3KHz 时，响应信号的波形及幅值如图 1.10.33 所示。

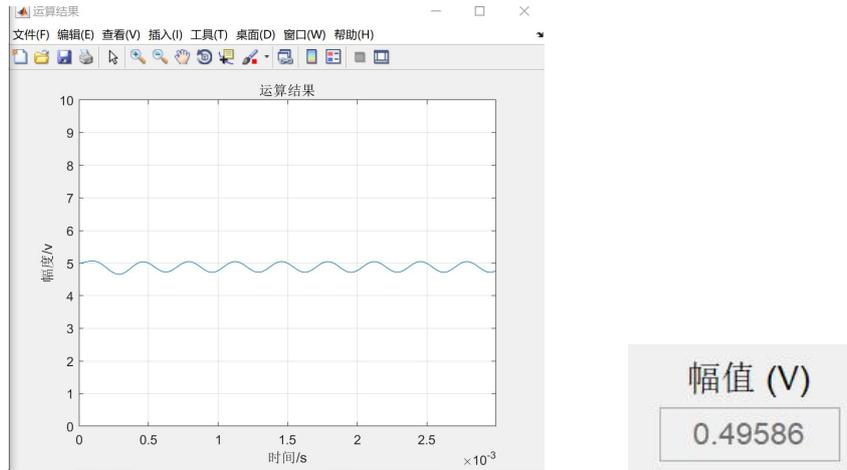


图 1.10.33 正弦波信号频率为 3KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 3.5KHz 时，响应信号的波形及幅值如图 1.10.34 所示。

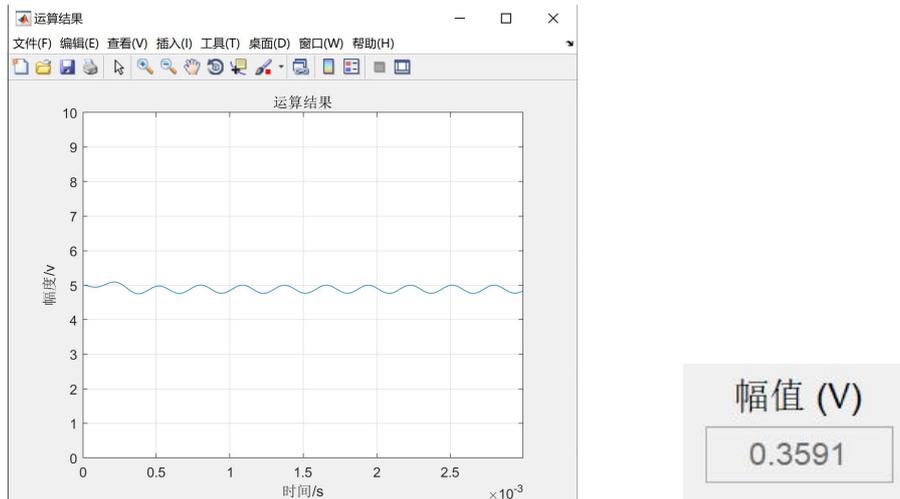


图 1.10.34 正弦波信号频率为 3.5KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 4KHz 时，响应信号的波形及幅值如图 1.10.35 所示。

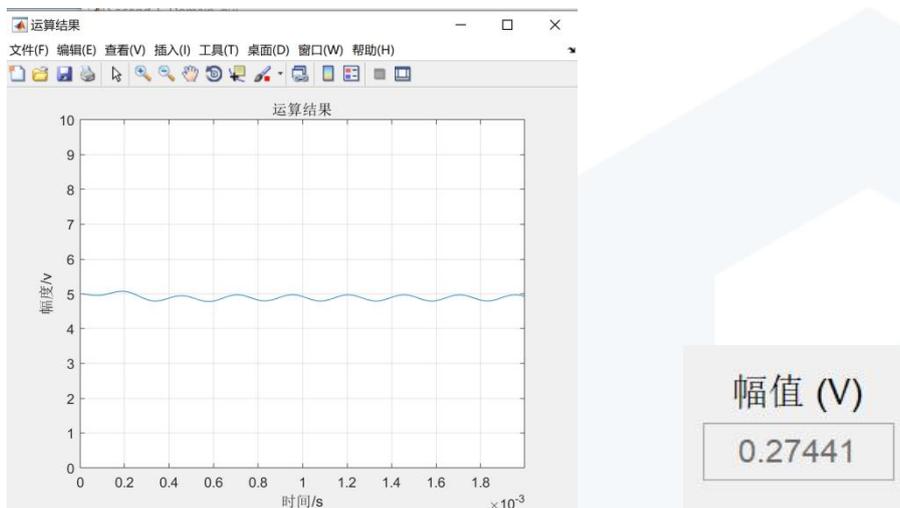


图 1.10.35 正弦波信号频率为 4KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 4.5KHz 时，响应信号的波形及幅值如图 1.10.36 所示。

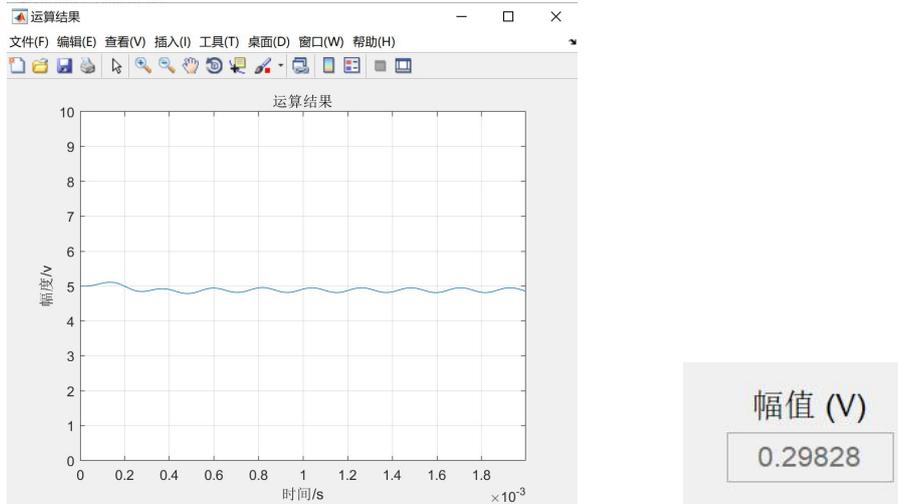


图 1.10.36 正弦波信号频率为 4.5KHz 时的响应信号及其幅值

正弦波信号频率为 5KHz 时，响应信号的波形及幅值如图 1.10.37 所示。

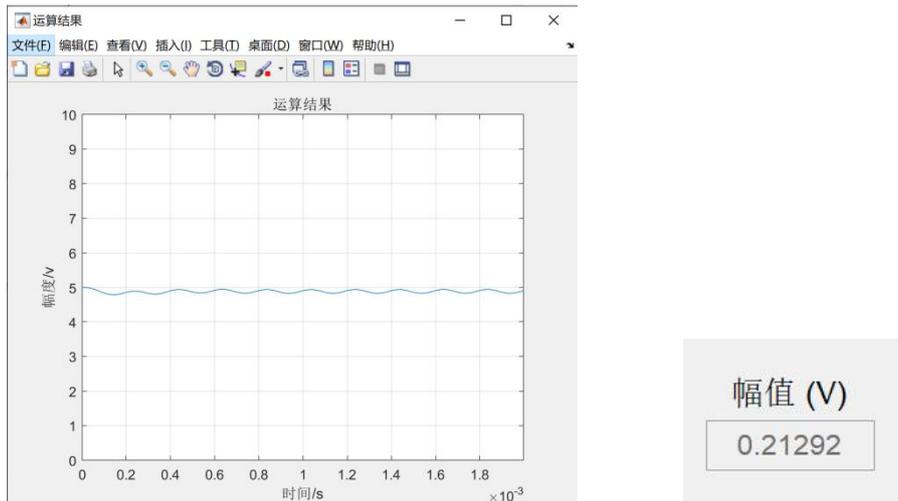


图 1.10.37 正弦波信号频率为 5KHz 时的响应信号及其幅值

## 1.11 二阶电路的单位阶跃响应、单位冲激响应分析实验

### 1.11.1 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;
- (4) 学会使用 MATLAB 软件计算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。

### 1.11.2 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 1.11.1 所示。

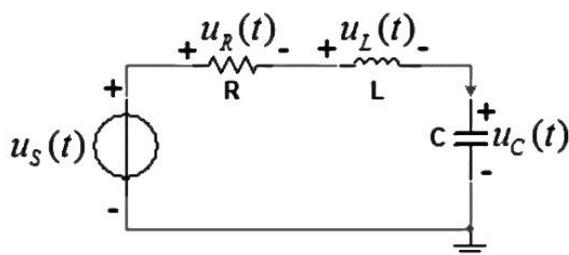


图 1.11.1 二阶 RLC 串联电路

根据基尔霍夫定律, 图 1.11.1 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: s

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

#### 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  $\omega_0$  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 1.11.2 (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 1.11.2 (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。

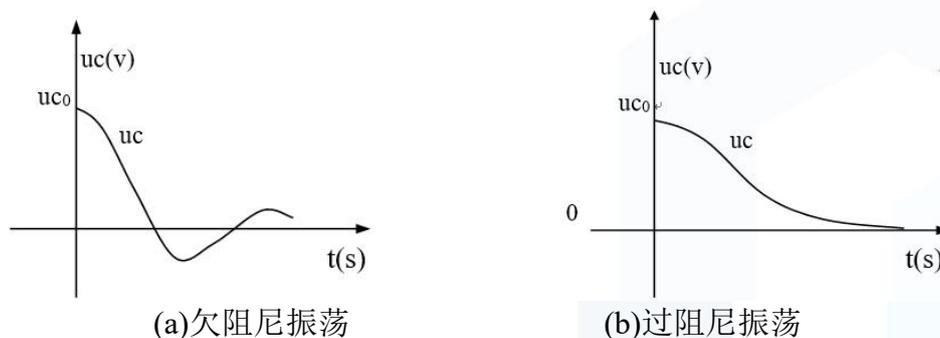


图 1.11.2 二阶电路电压响应波形

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。

3. MATLAB 中仿真二阶电路的冲激响应、阶跃响应

由 RLC 串联电路的微分方程可得其系统函数为：

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

在 MATLAB 中表示如下：

```

1. function [tf_sys] = Second_Step_Impulse_Response_Sys(r, l, c)
2. % 计算系统传递函数
3. % r、l、c 表示选择电路期间参数。
4. tf_sys = tf([0 0 1], [c*l c*r 1]);
5. end
    
```

### 1. 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 8 根。
3. USB3.0 数据线 1 根。
4. 双踪示波器 1 台。
5. 安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1. 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。

两种信号的产生：

(1) 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。

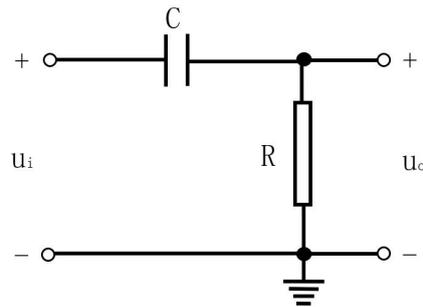


图 1.11.3 微分电路

(2)使用 MATLAB 生成方波信号及冲激信号。冲激信号由方波信号经过微分得到，微分电路也由 MATALB 仿真构成（电路器件参数选择 $R = 510\Omega$ ， $C = 0.1\mu F$ 。也可自己选择电路器件参数）。

生成方波信号及冲激信号可参考以下参考代码：

```

1.     switch(int8(sets.mode))
2.         case 1 % 方波
3.             % 生成方波信号
4.             dbuf = uint8(((248/2)*square(2*pi*t/sets.leng, sets.duty))+128);
5.         case 2 % 冲激函数信号
6.             dbuf = uint8(((248/2)*square(2*pi*t/sets.leng, sets.duty))); % 方波信号
7.             % 微分电路的系统函数
8.             tf_sys = tf([1 0], [1 1/(510*0.1e-6)]);
9.             dbuf = lsim(tf_sys, dbuf, ad_t(1:sets.leng))+128; % 生成冲激信号
10.    end
    
```

其中，sets.mode 为选择信号源标志位。1 表示选择方波信号，2 表示冲激信号。tf\_sys 为微分电路的系统函数。

2.使用实验箱的扩展模块按照图 1.11.1 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  $10K\Omega$ 可调电阻。（也可以使用二阶电路特性单元电路）。

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电路，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)。

6.使用 MATLAB 软件编写程序仿真 RLC 串联电路，并输入构建的方波信号或是冲激信号，输出响应信号，改变电阻 $R$ 值(选用电阻值为： $R = 1K\Omega$ 、 $6.325K\Omega$ 、 $10K\Omega$ )，观察并记录输出波形。与步骤 3 和步骤 4 的结果做对比。MATLAB 软件计算 RLC 串联理论临界阻尼状态时的电阻 $R$ 值。

### 7. MATLAB 程序下载。

- (1) 使用 USB3.0 数据线连接高速 ADDA 模块至电脑。信号源接通电源。
- (2) 使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

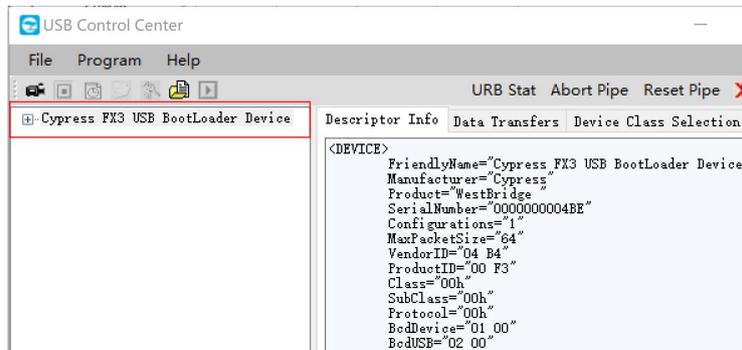


图 1.11.4 选择 FX3 设备

2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

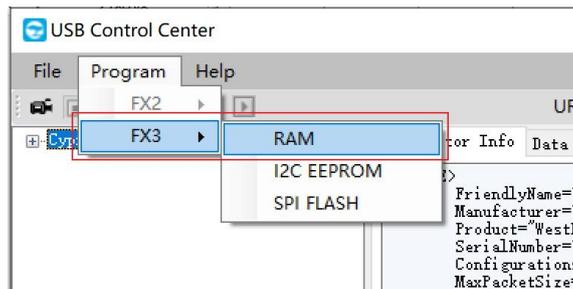


图 1.11.5 选择下载方式

3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

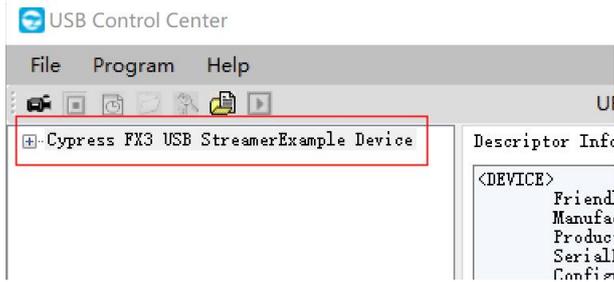


图 1.11.6 FX3 程序下载完成

(3) 打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

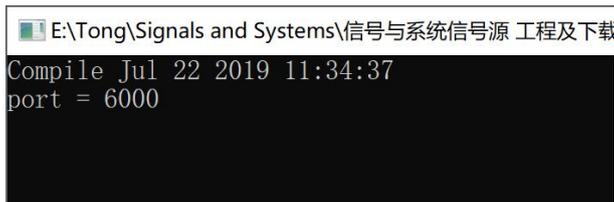


图 1.11.7 打开 VC2008\_NET\_DRV

(4) 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

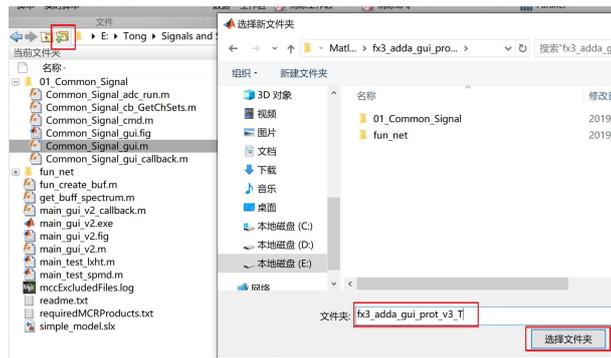


图 1.11.8 打开工程文件夹

(5) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。



图 1.11.9 添加路径

(6) 在命令行窗口输入“Second\_Step\_Impulse\_Response\_gui”，按下回车键运行程序。

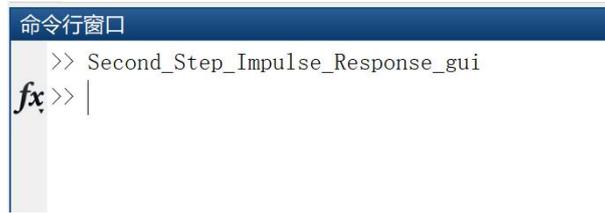


图 1.11.10 运行程序

### 1.11.5 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 1.11.11 所示。

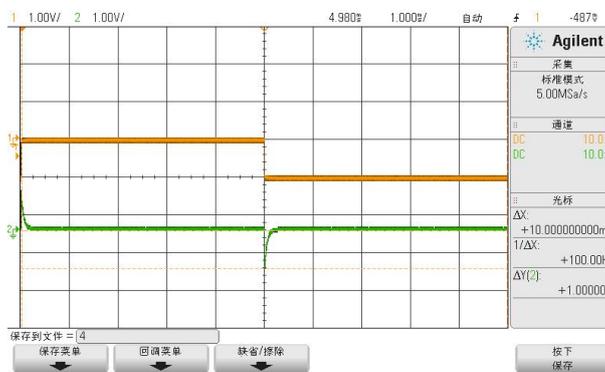


图 1.11.11 近似阶跃信号和近似冲激信号

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) MATLAB 生成频率为 100Hz 的方波信号近似阶跃信号和构建冲激信号。

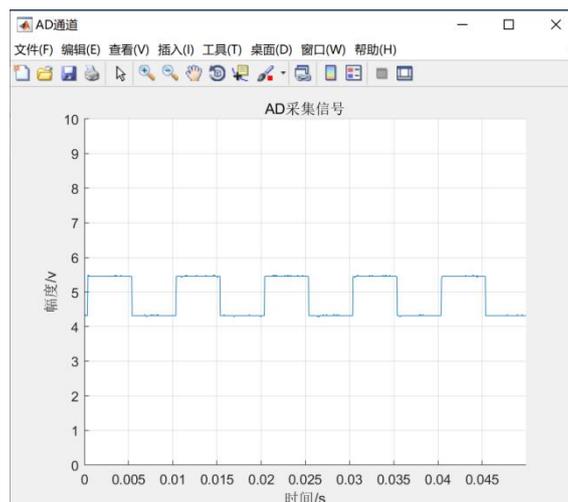


图 1.11.12 频率为 100Hz 的方波信号

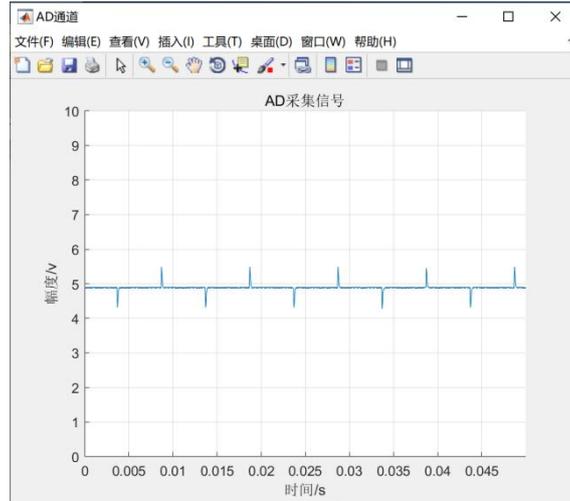


图 1.11.13 冲激信号

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 1.11.14 所示, 测得此时的电阻为  $1K\Omega$ 。

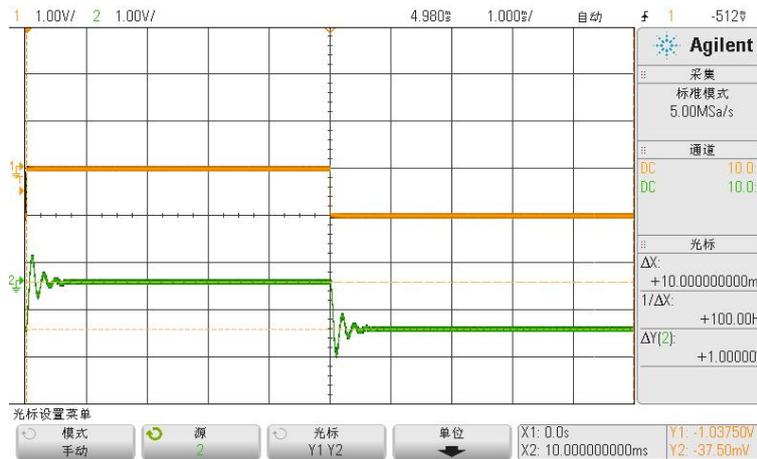


图 1.11.14 电路过阻尼时响应波形

(2) 当输出信号为临界阻尼状态时, 如图 1.11.15 所示, 测得此时的电阻为  $5.498K\Omega$ 。



图 1.11.15 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 1.11.16 所示,测得此时的电阻为  $9.356K\Omega$ 。

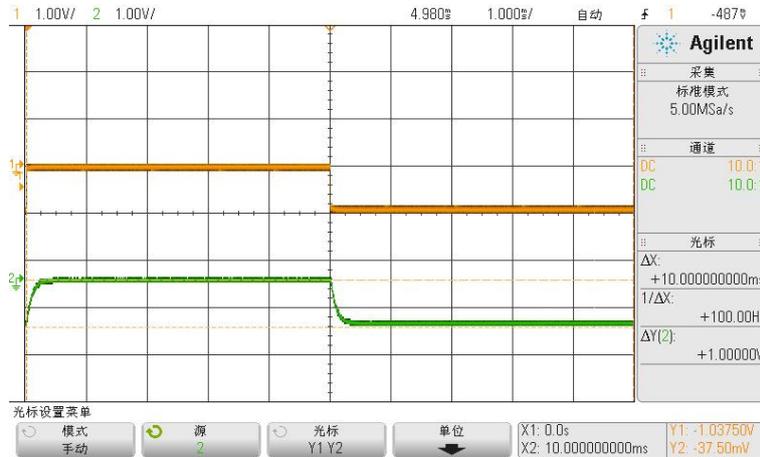


图 1.11.16 电路欠阻尼时响应信号波形

2. 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 1.11.17 所示,测得此时的电阻为  $1K\Omega$ 。

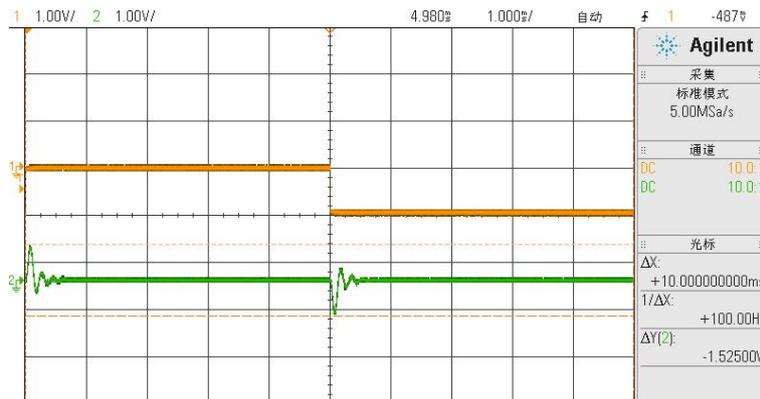


图 1.11.17 电路过阻尼时响应信号波形

(2) 当输出信号为临界阻尼状态时,如图 1.11.18 所示,测得此时的电阻为  $3.126K\Omega$ 。

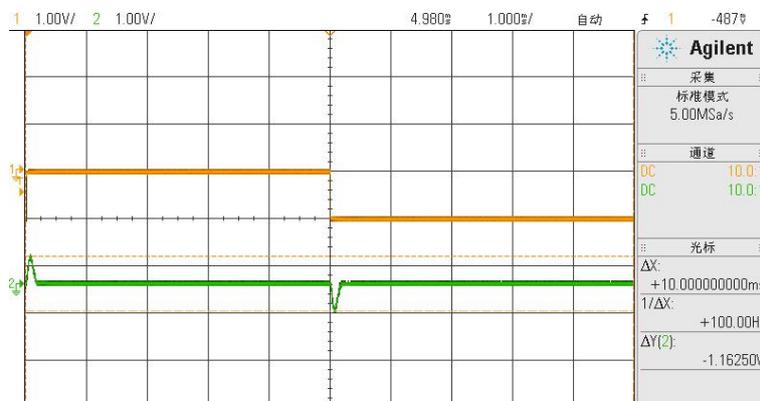


图 1.11.18 电路临界阻尼时响应信号波形

(3) 当输出信号为欠阻尼状态时,如图 1.11.19 所示,测得此时的电阻为  $9.356K\Omega$ 。

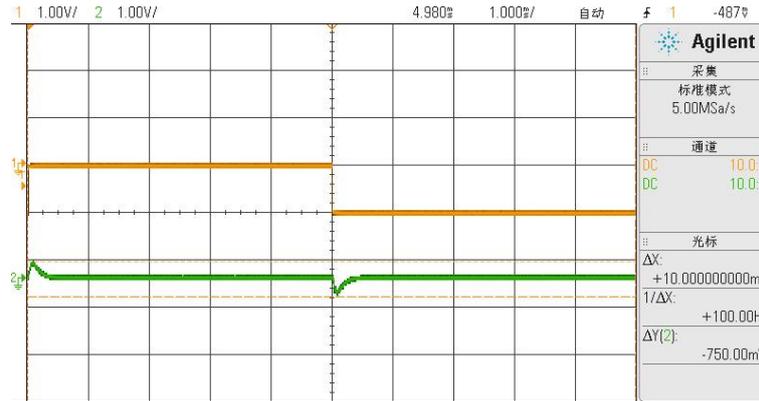


图 1.11.19 电路欠阻尼时响应信号波形

5.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 1.11.20 和图 1.11.21 所示。

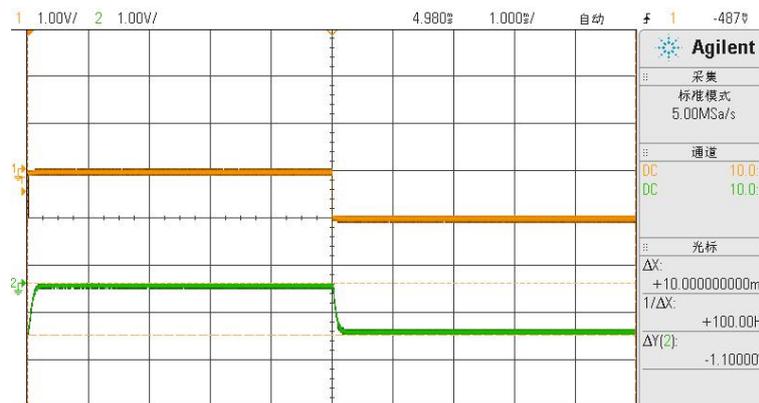


图 1.11.20 激励信号为阶跃信号时理论临界阻尼状态的响应波形

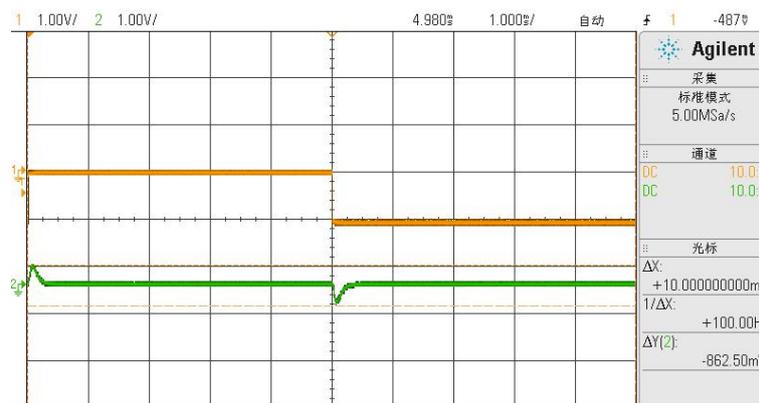


图 1.11.21 激励信号为阶跃信号时理论临界阻尼状态的响应波形

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： $R = 5.498K\Omega$ 。

6. MATLAB 软件仿真 RLC 串联电路的阶跃响应及冲激响应。

系统计算理论临界阻尼状态时，电阻 $R \approx 6.325K\Omega$ 。

(1) 电阻 $R = 1K\Omega$ 时，此时的阻尼系数为 0.158，为欠阻尼系统，系统的阶跃响应及冲激响应如图 1.11.23 和图 1.11.24 所示。

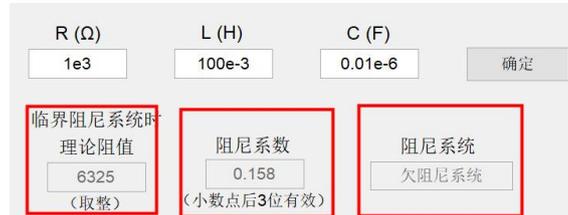


图 1.11.22 电阻 $R = 1K\Omega$ 时的系统状态

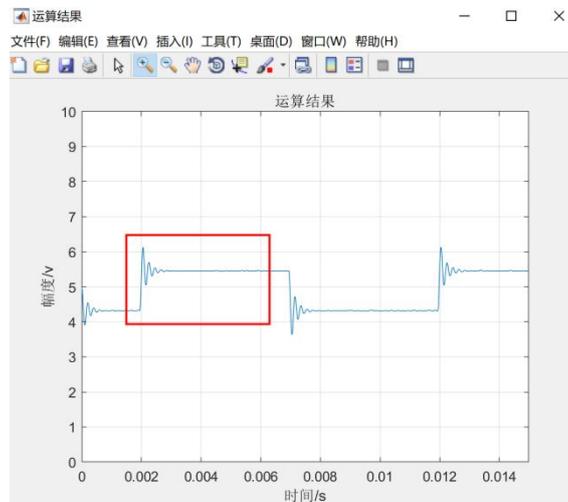


图 1.11.23 电阻 $R = 1K\Omega$ 时的系统阶跃响应

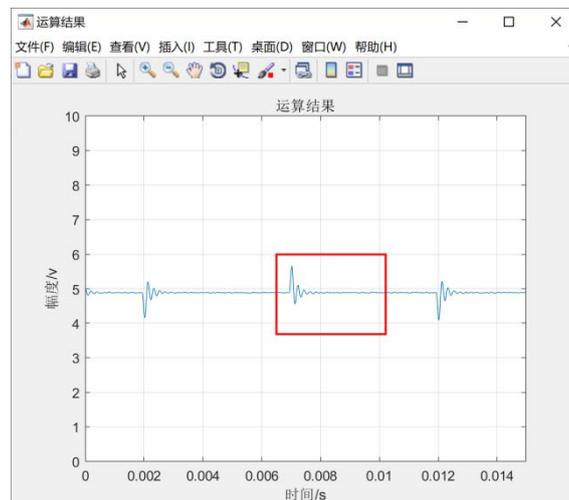


图 1.11.24 电阻 $R = 1K\Omega$ 时的系统冲激响应

(2) 电阻 $R = 6.325K\Omega$ 时，此时的阻尼系数约为 1，为临界阻尼系统，系统的阶跃响应及冲激响应如图 1.11.26 和图 1.11.27 所示。

R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	确定
6.325e3	100e-3	0.01e-6	
临界阻尼系统时 理论阻值 6325 (取整)	阻尼系数 1 (小数点后3位有效)	阻尼系统 临界阻尼系统	

图 1.11.25 电阻 $R = 6.325K\Omega$ 时的系统状态

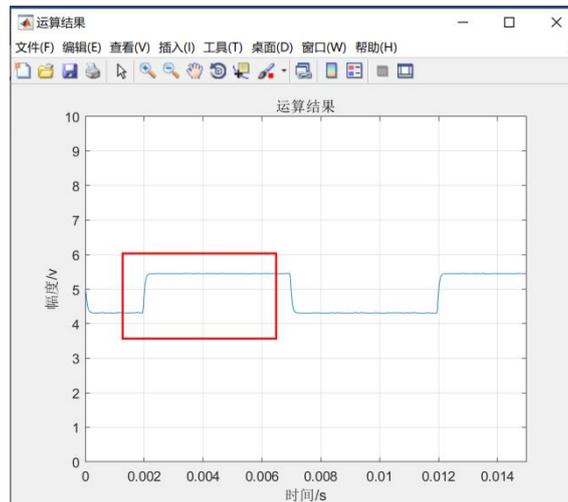


图 1.11.26 电阻 $R = 6.325K\Omega$ 时的阶跃响应

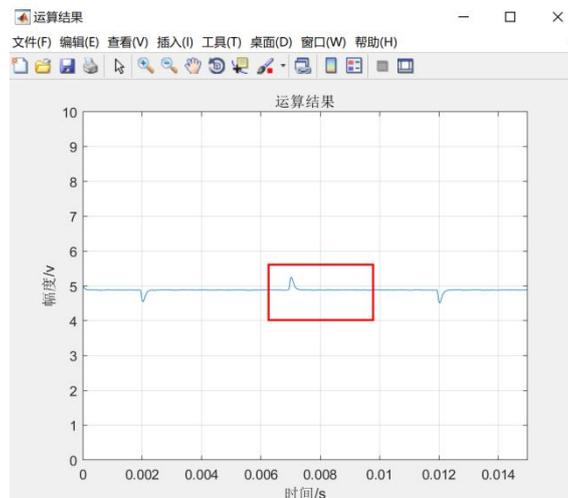


图 1.11.27 电阻 $R = 6.325K\Omega$ 时的冲激响应

(3) 电阻 $R = 10K\Omega$ 时, 此时的阻尼系数为 1.581, 为过阻尼系统, 系统的阶跃响应及冲激响应如图 1.11.29 和图 1.11.30 所示。

R ( $\Omega$ )	L (H)	C (F)	确定
10e3	100e-3	0.01e-6	
临界阻尼系统时 理论阻值 6325 (取整)	阻尼系数 1.581 (小数点后3位有效)	阻尼系统 过阻尼系统	

图 1.11.28  $R = 10K\Omega$ 时的系统状态

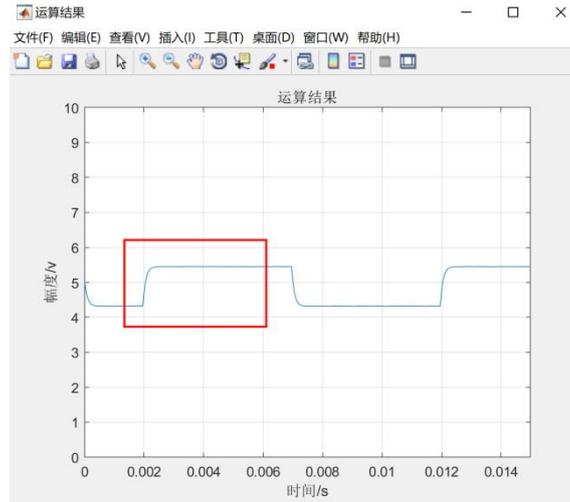


图 1.11.29  $R = 10K\Omega$ 时的阶跃响应

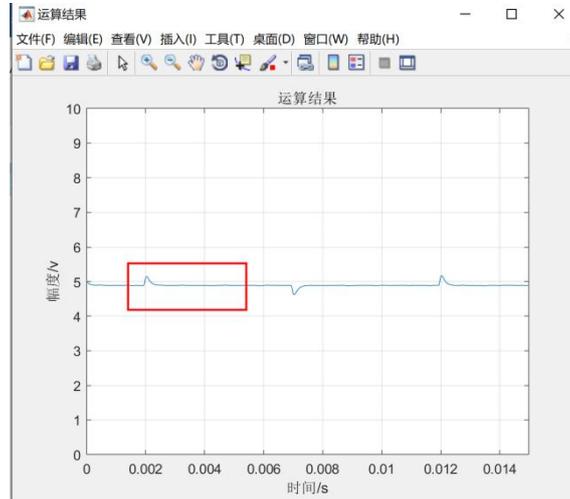


图 1.11.30  $R = 10K\Omega$ 时的冲激响应

## 1.12 二阶电路的零输入响应、零状态响应分析实验

### 1.12.1 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。

### 1.12.2 实验原理

#### 1.二阶电路

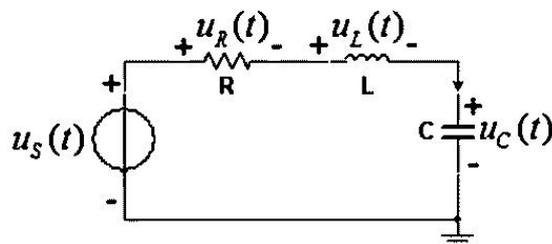


图 1.12.1 二阶 RLC 串联电路

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, 电容两端得电压  $u_c$  响应曲线如图 1.12.2 所示。

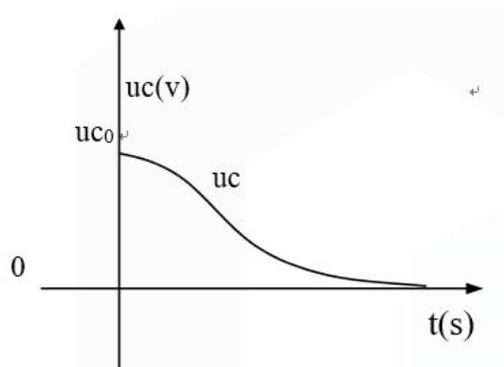


图 1.12.2 非振荡放电(过阻尼)

(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, 电容两端得电压  $u_c$  响应曲线与过阻尼情况类似, 如图 1.12.3 所示。

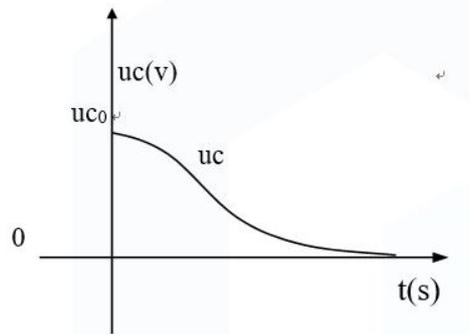


图 1.12.3 非振荡放电(临界阻尼)

(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  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 。三者之间得关系为:

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

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, 电容两端得电压  $u_c$  响应曲线如图 1.12.4 所示。

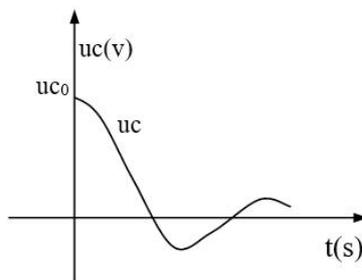


图 1.12.4 衰减振荡放电(欠阻尼)

### 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。

电路得微分方程为:

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

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

本实验所示用的二阶电路如图 1.12.5 所示, 其中  $R_1 = R_2 = 30K\Omega$ ,  $L = 100mH$ ,  $C = 47\mu F$ 。

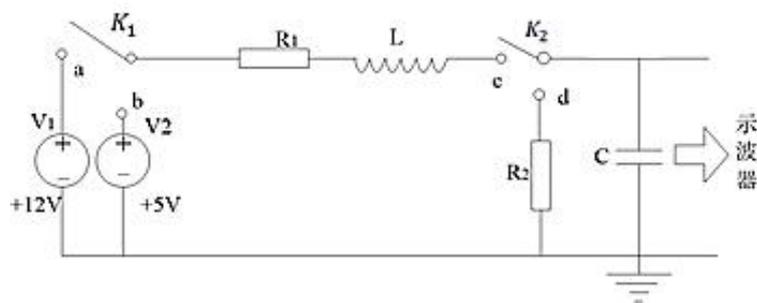


图 1.12.5 二阶电路实验图

## 1. 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 8 根。
3. USB3.0 数据线 1 根。
4. 双踪示波器 1 台。
5. 安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.12.4 实验步骤

1. 使用实验箱的扩展模块搭建如图 1.12.5 所示的电路。实验箱上电。
2. 使用示波器通道 1 (或通道 2) 接电路的输出端 (即图 1.9.7 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 1.12.5 所示电路中的开关  $K_1$  置于  $a$  端, 开关  $K_2$  置于  $c$  端, 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关  $K_2$  拨至  $d$  端, 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 1.12.5 所示电路中的开关  $K_1$  置于  $b$  端, 开关  $K_2$  置于  $d$  端, 当示波器的光点回到起始位置后, 将开关  $K_2$  拨至  $c$  端, 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。
5. 观察电路的全响应。将图 1.12.5 所示电路中的开关  $K_1$  置于  $a$  端, 开关  $K_2$  置于  $c$  端, 待示波器的光点回到起始位置后, 将开关  $K_1$  拨至  $b$  端, 观察示波器上的波形变化, 并记录其波形。
5. 将  $V_1$  与  $V_2$  互换即取  $V_1 = 5V$ ,  $V_2 = 12V$ , 重复步骤 2~5。
6. 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。
7. 将交流电源作为信源信号, 重做该实验。
8. 编写程序, 使用 MATLAB 仿真验证二阶电路的零输入响应、零状态响应及全响应分析。

### 1.12.5 实验结果

1. 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 1.12.6 所示。

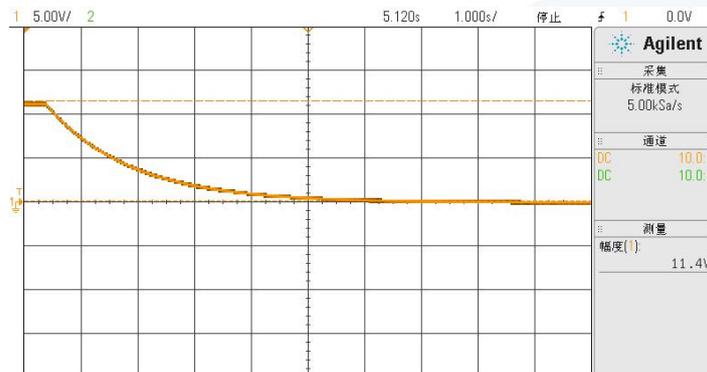


图 1.12.6  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$  时, 零输入响应波形图

(2) 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的零状态响应如图 1.12.7 所示。

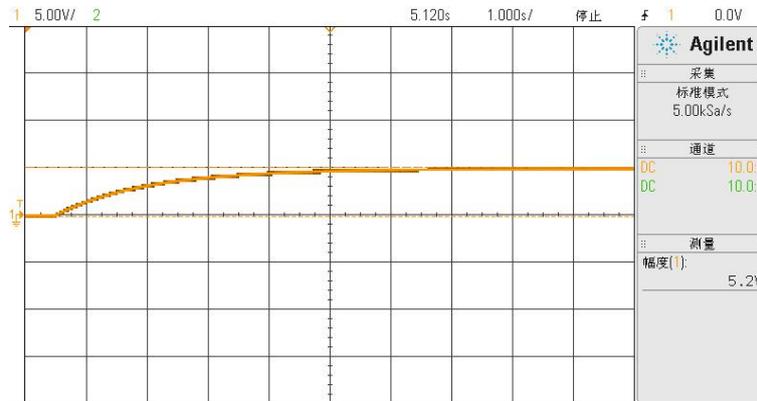


图 1.12.7  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 零状态响应波形图

(3) 当 $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 电路的全响应如图 1.12.8 所示。

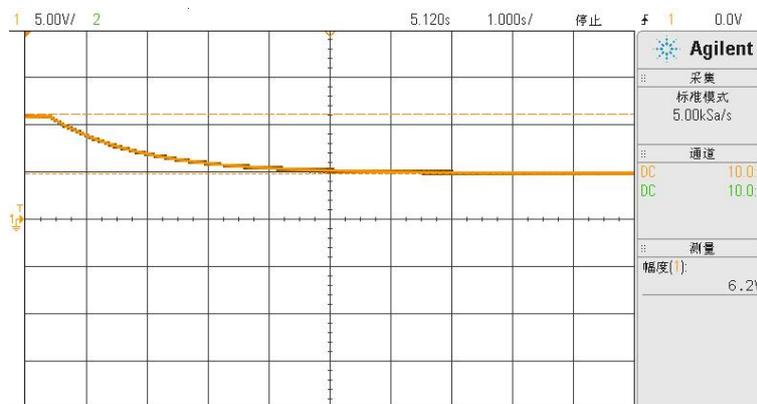


图 1.12.8  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 全响应波形图

(4) 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的零输入响应如图 1.12.9 所示。

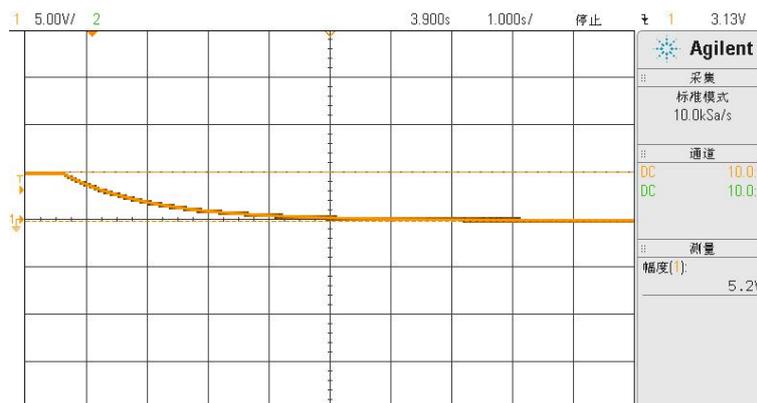


图 1.12.9  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 零输入响应波形图

(5) 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的零状态响应如图 1.12.10 所示。

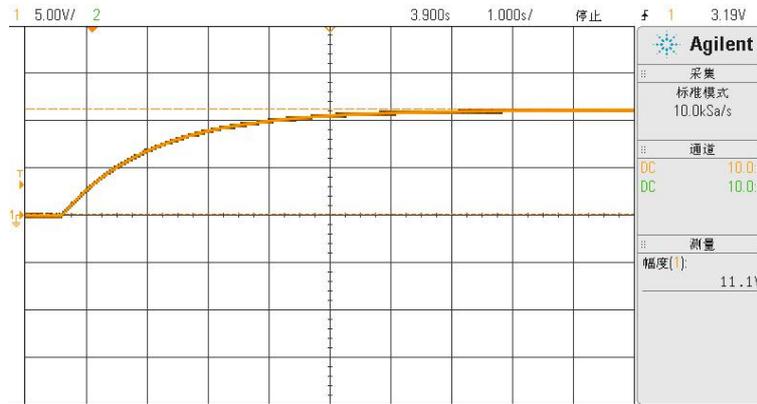


图 1.12.10  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 零状态响应波形图

(6) 当 $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 电路的全响应如图 1.12.11 所示。

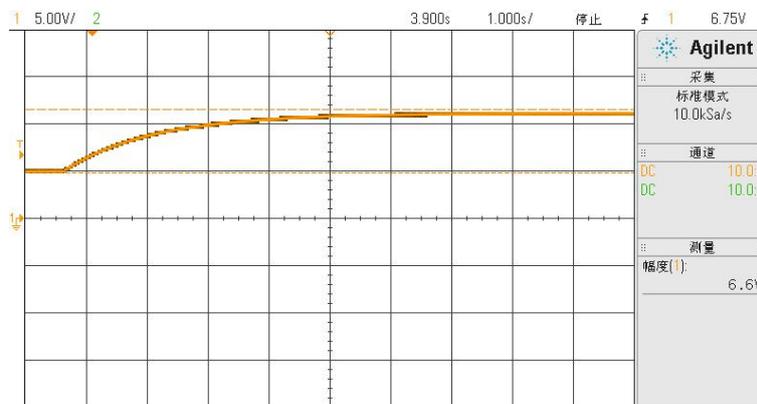


图 1.12.11  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 全响应波形图

## 2.使用 MATLAB 仿真二阶电路的响应运算。

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

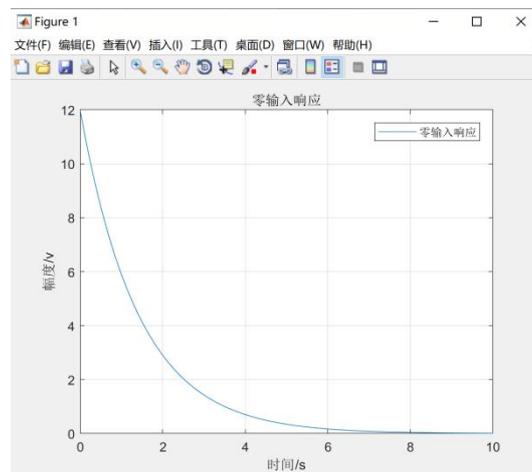


图 1.12.12  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时, 零输入响应波形图

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

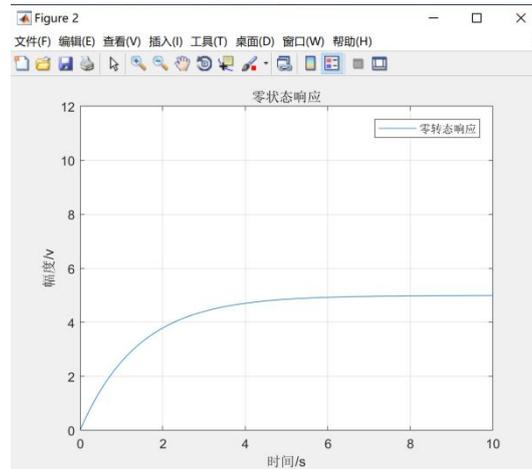


图 1.12.13  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时，零状态响应波形图

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

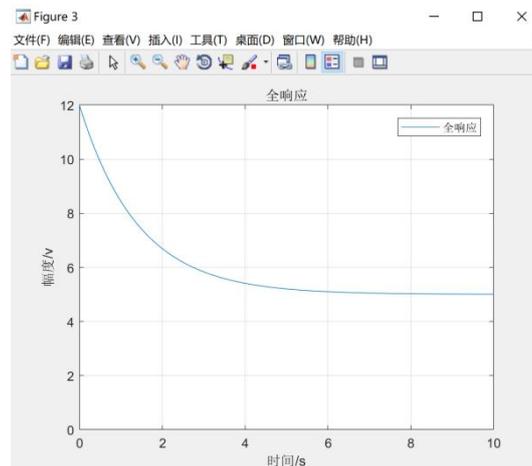


图 1.12.14  $V_1 = 12V$ 、 $V_2 = 5V$ 时，全响应波形图

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

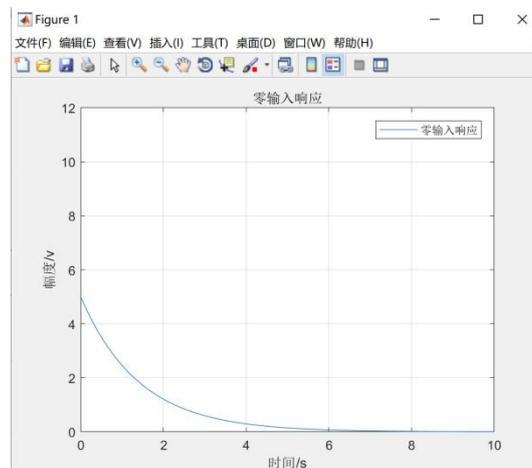


图 1.12.15  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时，零输入响应波形图

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

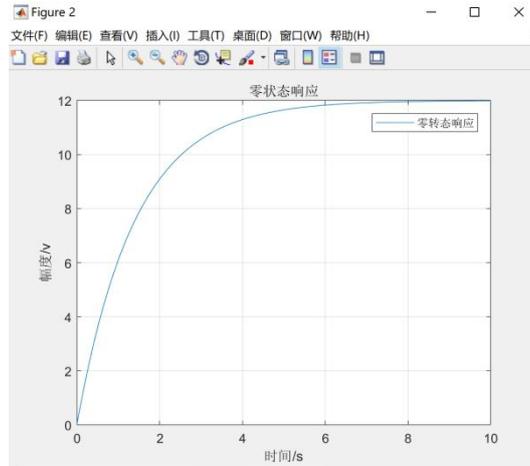


图 1.12.16  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 零状态响应波形图

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

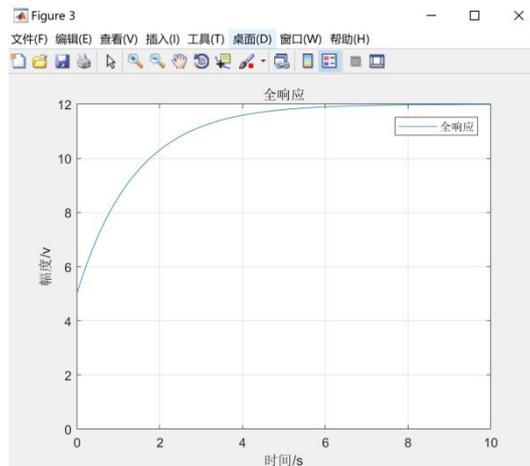


图 1.12.17  $V_1 = 5V$ 、 $V_2 = 12V$ 时, 全响应波形图

## 1.13 二阶系统的模拟实验

### 1.13.1 实验分析

#### 1.实验目的

- (1) 了解二阶网络函数电路模型;
- (2) 了解参数变化对响应的影响;
- (3) 学会使用基本运算模拟系统的微分方程和传递函数;
- (4) 掌握二阶网络的模拟方法;
- (5) 学会使用 MATLAB 进行二阶网络的模拟仿真。

#### 2.实验任务

(1) 计算 RLC 串联电路的传输函数, 画出其大致的幅频特性曲线, 并计算出其谐振频率与通频带。使用二阶系统模拟单元做 RLC 串联系统的模拟实验, 记录响应信号的幅值, 绘制幅频特性曲线, 与 RLC 串联电路的幅频特性曲线做比较。

(2) 使用 MATLAB 软件仿真 RLC 串联电路, 并计算其谐振频率与通频带, 仿真二阶系统模拟单元, 并求其幅频特性曲线。

(3) 归纳和总结用基本运算单元模拟二阶电路的要点。

### 1.13.2 实验原理

#### 1.连续系统的连接

一个复杂的系统可以由多个子系统通过一定方式连接而成, 通过分析每个子系统的性能及子系统之间的连接方式, 就可以得出复杂系统的性能。系统连接的基本方式主要有级联、并联、反馈环路三种。

#### (1) 系统的级联

设两个子系统的系统传递函数分别为:

$$H_1(s) = \frac{W(s)}{X(s)}, H_2(s) = \frac{Y(s)}{W(s)}$$

两个子系统的级联如图 1.13.1 所示。

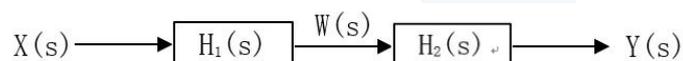


图 1.13.1 两个子系统级联

则信号通过整个系统的响应为:

$$Y(s) = H_2(s)W(s) = H_1(s)H_2(s)X(s)$$

根据系统函数的定义，两个子系统通过级联方式连接的系统的系统传递函数为：

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = H_1(s)H_2(s)$$

显然，级联系统的系统传递函数时各个子系统的系统传递函数之乘积。

两个子系统级联的等效示意图如图 1.13.2 所示。

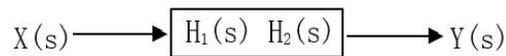


图 1.13.2 两个子系统级联等效图

### (2) 系统的并联

两个子系统的并联如图 1.13.3 所示。

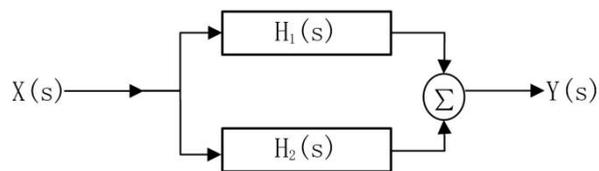


图 1.13.3 两个子系统的并联

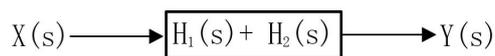
则信号通过整个系统的响应为：

$$Y(s) = H_1(s)X(s) + H_2(s)X(s) = [H_1(s) + H_2(s)]X(s)$$

根据系统函数的定义，两个子系统通过级联方式连接的系统的系统传递函数为：

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = H_1(s) + H_2(s)$$

可见，并联系统的系统传递函数时各个子系统的传递系统函数之乘和。



两个子系统并联的等效示意图如

图 1.13.4 所示。

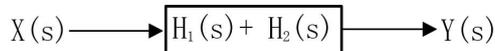


图 1.13.4 两个子系统并联等效图

### (3) 反馈环路

反馈环路由两个子系统组成，如图 1.13.5 所示。其特点时输出量的一部分返回到输入端与输入量进行叠加，形成反馈。

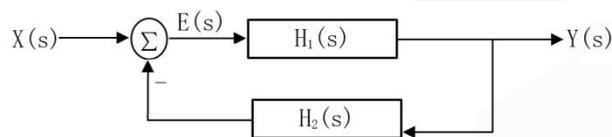


图 1.13.5 反馈环路

图 1.13.5 中的  $H_1(s)$  称为前向通路的系统传递函数,  $H_2(s)$  称为反馈通路的系统传递函数。从图中可看出:

$$Y(s) = E(s)H_1(s)$$

$$E(s) = X(s) - H_2(s)Y(s)$$

$$Y(s) = \frac{H_1(s)}{1 + H_1(s)H_2(s)}X(s)$$

反馈环路的系统传递函数为:

$$H(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{H_1(s)}{1 + H_1(s)H_2(s)}$$

## 2. 连续系统的模拟

系统模拟一般通过系统传递函数进行模拟, 而同一个系统传递函数可以存在多种形式的实现方案, 常用的直接型、级联型和并联型等。

### (1) 直接型

描述连续时间 LTI 系统的微分方程的一般形式为:

$$y^{(n)}(t) + a_{n-1}y^{(n-1)}(t) + \dots + a_1y'(t) + a_0y(t) = b_mx^{(m)}(t) + b_{m-1}x^{(m-1)}(t) + \dots + b_1x'(t) + b_0x(t)$$

相对应的系统传递函数为:

$$H(s) = \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_1s + a_0}$$

设二阶系统的系统传递函数为:

$$H(s) = \frac{b_2s^2 + b_1s + b_0}{s^2 + a_1s + a_0}$$

为了使框图表示方便, 将系统传递函数改写为:

$$H(s) = \frac{1}{s^2 + a_1s + a_0}(b_2s^2 + b_1s + b_0) = H_1(s)H_2$$

其中,  $H_1(s) = \frac{1}{s^2 + a_1s + a_0}$ ,  $H_2(s) = b_2s^2 + b_1s + b_0$ 。即系统  $H(s)$  可以看成两个子系统级联而成, 如图 1.13.6 所示。

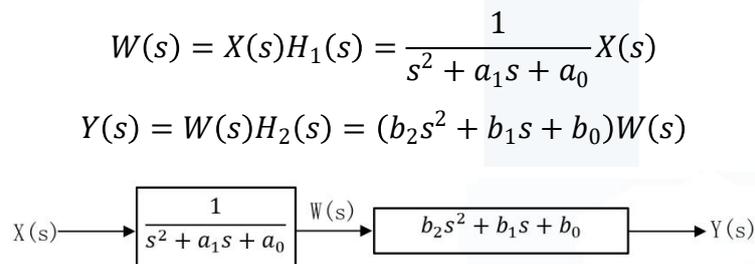


图 1.13.6 系统 $H(s)$ 由 $H_1(s)$ 核为 $H_2(s)$ 级联

对以上两式作 Laplace 反变换, 可写出 $H_1(s)$ 和 $H_2(s)$ 两个子系统的微分方程:

$$w''(t) + a_1w'(t) + a_0w(t) = x(t)$$

$$y(t) = b_2w''(t) + b_1w'(t) + b_0w(t)$$

以上微分方程中设计相加、相乘和微分三种运算, 在实际实现时由于微分器实现较难, 且积分器对误差和噪声较为敏感, 而积分器不仅可以抑制高频噪声, 还可以利用运算放大器实现, 因此在实际实现时普遍使用积分器。

设已知 $w''(t)$ 通过两个积分器级联可分别得到 $w'(t)$ 和 $w(t)$ , 如图 1.13.7 所示。

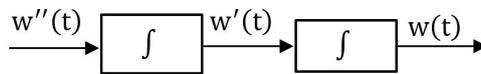


图 1.13.7 两个积分器级联

则 $w''(t) + a_1w'(t) + a_0w(t) = x(t)$ 可以改写成:

$$w''(t) = x(t) - a_1w'(t) - a_0w(t)$$

即 $w''(t)$ 可以由输入信号 $x(t)$ 以及 $w'(t)$ 、 $w(t)$ 负反馈连接到输入端的信号之和得到, 如图 1.13.8 所示。

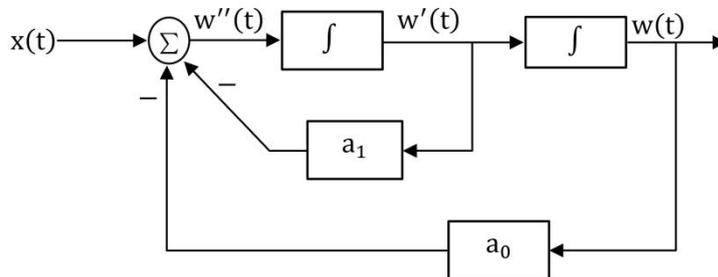


图 1.13.8 反馈环路框图

类似将 $y(t) = b_2w''(t) + b_1w'(t) + b_0w(t)$ 模拟, 可得二阶系统的时域框图, 如图 1.13.9 所示。

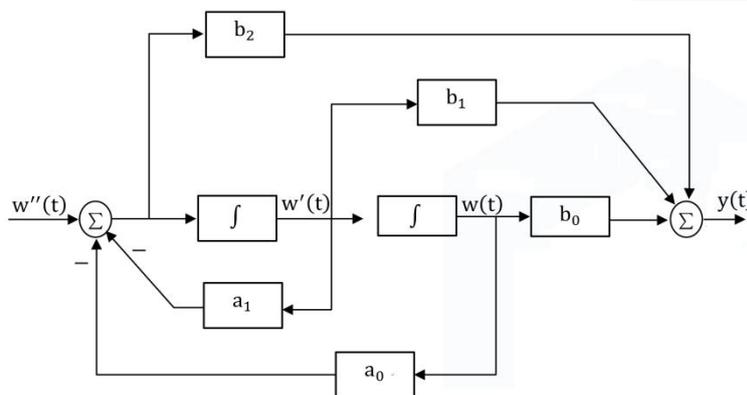


图 1.13.9 二阶系统时域框图

## (2) 级联型与并联型

若将 $H(s)$ 的分子和分母都分解成一阶和二阶实系数因子形式,然后将它们组成一阶和二阶系统,即:

$$H(s) = H_1(s) H_2(s) \cdots H_n(s)$$

对于每一个子系统画出直接型结构框图,然后将这些子系统级联起来,便可以得到连续时间系统级联型模拟框图。

若将系统传递函数 $H(s)$ 展开成部分分式,形成将一阶、二阶实系数子系统并联形式,即:

$$H(s) = H_1(s) + H_2(s) + \cdots + H_k(s)$$

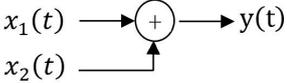
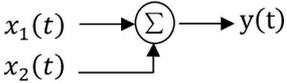
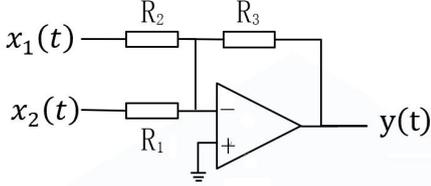
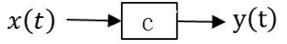
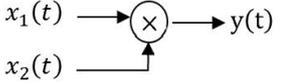
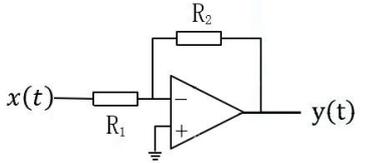
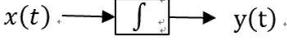
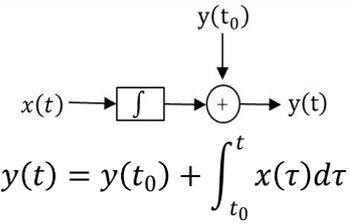
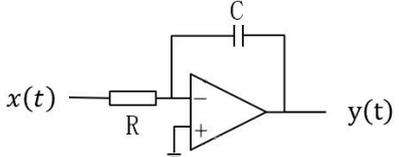
按照直接型结构,画出各个子系统的模拟框图,然后将它们并联起来,即可得到连续时间系统的并联型结构的模拟框图。

### 3.使用运算放大器电路实现仿真模型

任意  $n$  阶得连续时间 LTI 系统得微分方程都可用基于加法器、乘法器和积分器这三种基本运算单元构建 其图形化或框图模型。这种框图模型也称为系统的仿真模型。已经构建了系统的仿真模型时,可以使用运算放大器电路模拟实现加法器、乘法器和积分器,当给定系统的输入电压信号,电路的输出就是微分方程的解。这种系统仿真的实现时近似的。



表 1.13.1 三种基本运算单元的框图描述及对应的模拟和数值实现

基本运算单元	框图描述	运算放大器的实现
加法器	  $y(t) = x_1(t) + x_2(t)$	 $\frac{R_3}{R_2} = 1, \frac{R_3}{R_1} = 1$ $y(t) = -(x_1(t) + x_2(t))$
乘法器	 $x(t) \xrightarrow{c} y(t)$ $y(t) = c \cdot x(t)$  $y(t) = x_1(t) \times x_2(t)$	 $\frac{R_2}{R_1} = -c$
积分器	 $y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau$  $y(t) = y(t_0) + \int_{t_0}^t x(\tau) d\tau$	 $\frac{1}{RC} = -1$

#### 4.RLC 串联二阶电路的模拟

RLC 串联二阶电路如所示。

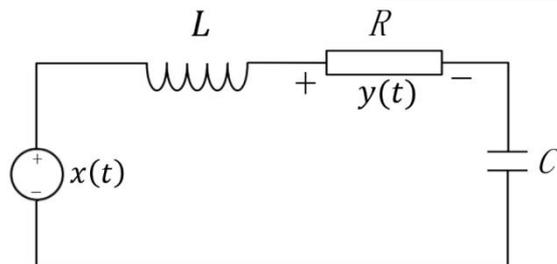


图 1.13.10 RLC 串联二阶电路

以电阻两端电压作为输出 $y(t)$ 进行分析:

$$u_L + u_C + y(t) = x(t)$$

因为

$$\begin{cases} u_L = L \cdot i'(t) \\ u_C = \frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt \\ i(t) = \frac{y(t)}{R} \end{cases}$$

上式化简得:

$$\begin{cases} u_L = \frac{L}{R} \cdot y'(t) \\ u_C = \frac{1}{RC} \cdot \int y(t) dt \end{cases}$$

所以:

$$\frac{L}{R} \cdot y'(t) + \frac{1}{RC} \cdot \int y(t) dt + y(t) = x(t)$$

等式两边求导:

$$\frac{L}{R} \cdot y''(t) + y'(t) + \frac{1}{RC} \cdot y(t) = x'(t)$$

引入辅助函数 $q(t)$ :

$$y(t) = \frac{R}{L} q'(t)$$

$$q''(t) + \frac{R}{L} q'(t) + \frac{1}{LC} \cdot y(t) = x'(t)$$

根据上式可画出模拟系统框图, 如图 1.13.11 所示。

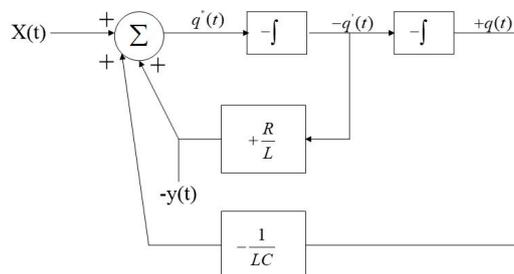


图 1.13.11 RLC 串联电路的模拟系统框图 (a)

为了使框图更加的符合实际, 将系统框图为如图 1.13.12 所示。

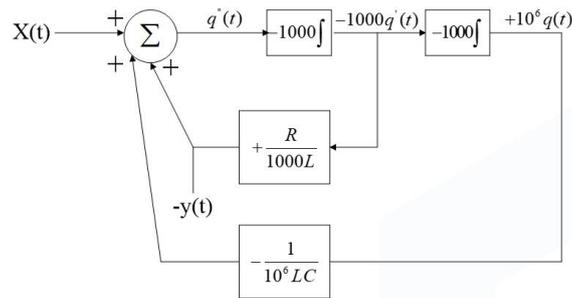


图 1.13.12 RLC 串联电路的模拟系统框图 (b)

若 RLC 中器件参数为:  $R = 10\Omega$ ,  $L = 100mH$ ,  $C = 10\mu F$ , 则使用运算放大器实现模拟系统框图的电路图如图 1.13.13 所示。

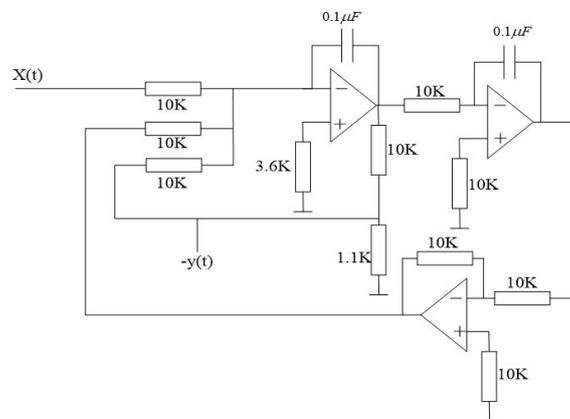


图 1.13.13 二阶模拟系统框图的实现

## 5.RLC 串联电路的特性

(1) 谐振频率。

RLC 串联电路的谐振频率  $f_0$  的计算公式:

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

(2) 通频带。

RLC 串联电路的通频带  $\Delta f$  的计算公式:

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q}, \quad Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

式中,  $f_0$  为电路的谐振频率,  $Q$  为品质因素。

### 1.13.3 实验设备

- 1.信号与系统实验平台(含信号源单元、扩展单元、二阶系统的模拟单元)1台。
- 2.实验导线若干。

- 3.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1. 13.4 实验步骤

1.根据图 1.13.10 所示 RLC 串联电路计算系统传输函数，画出其大致的幅频特性曲线，并计算出其谐振频率与通频带。(其中： $R = 10\Omega$ ， $L = 100mH$ ， $C = 10\mu F$ 。)

2.搭建图 1.13.10 所示的 RLC 串联电路，输入峰峰值为 1V 的正弦波信号，改变信号的频率，使用示波器观察并记录其输出信号的幅值大小（以 159Hz 参考频率，调整频率大小）。

3.从信号源模块取一路峰峰值为 1V 的正弦波信号接至二阶系统的模拟单元的输入端，使用示波器观察其输输出信号的波形，并记录其幅值大小。改变正弦波信号的频率大小，记录输出信号的幅值变化（以 159Hz 参考频率，调整频率大小）。结果与步骤 2 的结果进行比较分析。

4.编写 RLC 串联电路的 MATLAB 仿真程序，计算其谐振频率与通频带，以及幅频特性曲线。输入频率不变的正弦波信号，观察其输出波形。

5.编写二阶系统的模拟单元的 MATLAB 仿真程序，求其幅频特性曲线。输入频率不变的正弦波信号，观察其输出波形。

#### 6.MATLAB 程序下载。

- (1) 使用 USB3.0 数据线连接高速 ADDA 模块至电脑。信号源接通电源。
- (2) 使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

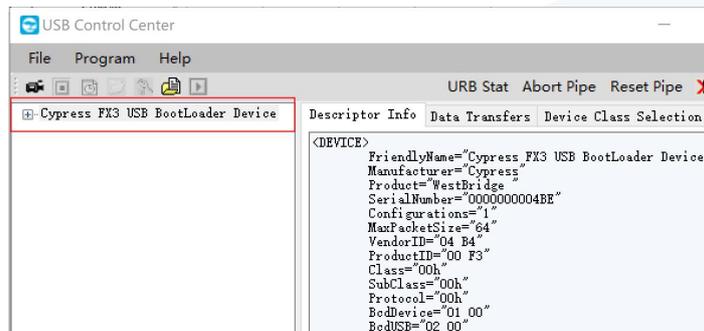


图 1.13.14 选择 FX3 设备

- 2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

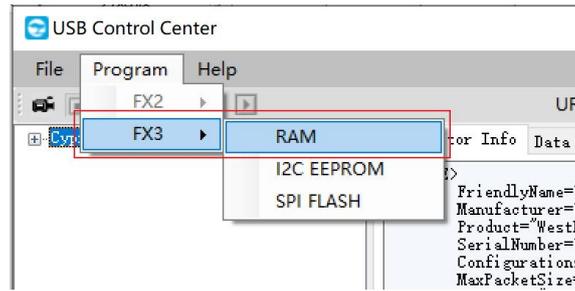


图 1.13.15 选择下载方式

3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cypress FX3 USB StreamExample Device。

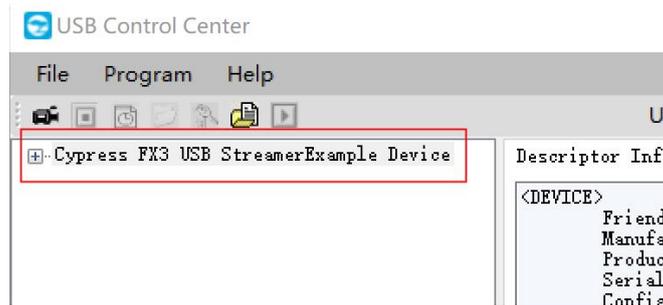


图 1.13.16 FX3 程序下载完成

(3) 打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

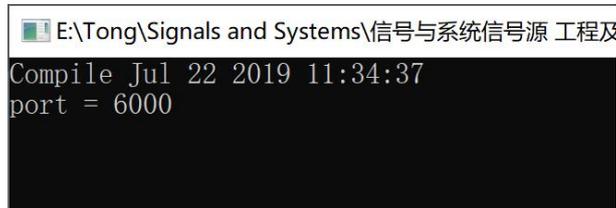


图 1.13.17 打开 VC2008\_NET\_DRV

(4) 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

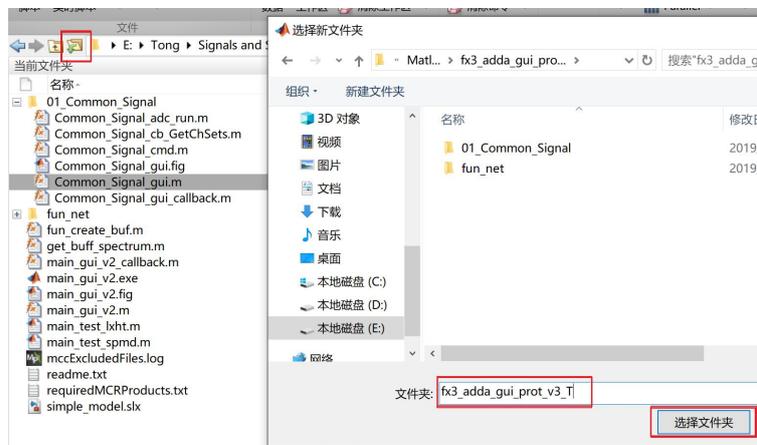


图 1.13.18 打开工程文件夹

(5) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。



图 1.13.19 添加路径

(6) 在命令行窗口输入“Second\_Order\_Network\_gui”，按下回车键运行程序。

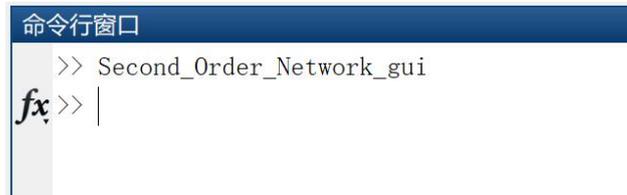


图 1.13.20 运行程序

### 1.13.5 实验结果

1.图 1.13.10 所示 RLC 串联的系统传递函数、幅频特性曲线、谐振频率及通频带。

根据图 1.13.10 分析，其系统传递函数为：

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1}$$

带入参数，则该电路的系统传递函数为：

$$H(s) = \frac{1}{LCs^2 + RCs + 1} = \frac{1}{10^{-6}s^2 + 10^{-4}s + 1}$$

幅频特性曲线：

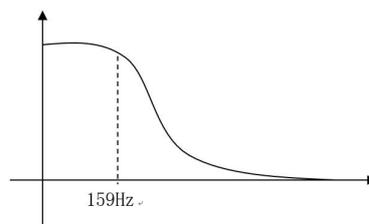


图 1.13.21 RLC 串联电路的大致幅频特性曲线

谐振频率：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 159\text{Hz}$$

通频带:

$$Q = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}} = 10$$

$$\Delta f = \frac{f_0}{Q} \approx 15.9$$

2.搭建 RLC 电路,输入幅值为 1 V 频率不同的正弦波信号,并使用示波器观察响应信号幅值的大小,记录二阶系统的模拟单元的输出信号幅值与频率关系。

表 1.13.2 RLC 电路的幅频特性

$F(\text{Hz})$	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
$u_o(\text{mV})$	860	706	587	450	390	362	342	331	281	262	190

3. 二阶系统的模拟单元输入幅值为 1 V 频率的不同的正弦波信号,并使用示波器观察激的响应信号幅值的大小,记录二阶系统的模拟单元的输出信号幅值与频率关系。

表 1.13.3 二阶系统的模拟电路的幅频特性

$F(\text{Hz})$	100	120	140	160	180	200	220	240	260	280	300
$u_o(\text{mV})$	150	181	318	581	362	281	206	181	175	156	131

4.使用 MTALAB 仿真图 1.13.10 所示 RLC 串联电路,并计算其系统传递函数、幅频特性曲线、谐振频率及通频带。

求系统传递函数参考代码:

```

1. function [tf_sys] = Second_Order_Network_Sys(value)
2. % 计算系统传递函数
3. % r、l、c 表示选择电路器件参数。
4. tf_sys = tf([0 0 1], [value.c*value.l value.c*value.r 1]);
5. end
    
```

$$\text{rlc\_sys} = \frac{1}{1e-06 s^2 + 0.0001 s + 1}$$

图 1.13.22 MATLAB 计算 RLC 串联电路的系统传递函数

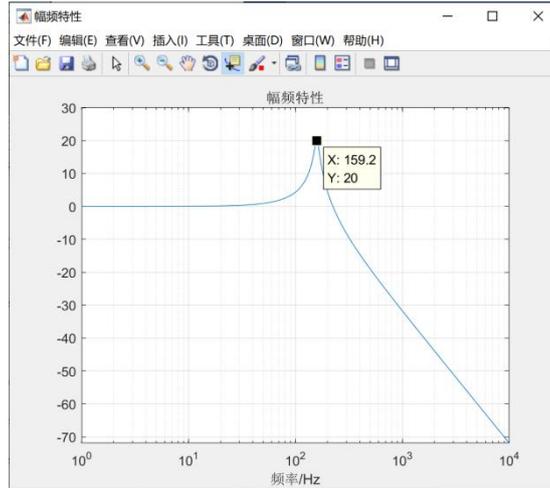


图 1.13.23 RLC 电路的幅频特性曲线



图 1.13.24 MATLAB 计算 RLC 串联电路的谐振频率及通频带

输入频率为不同频率正弦波信号时对应的输出波形。

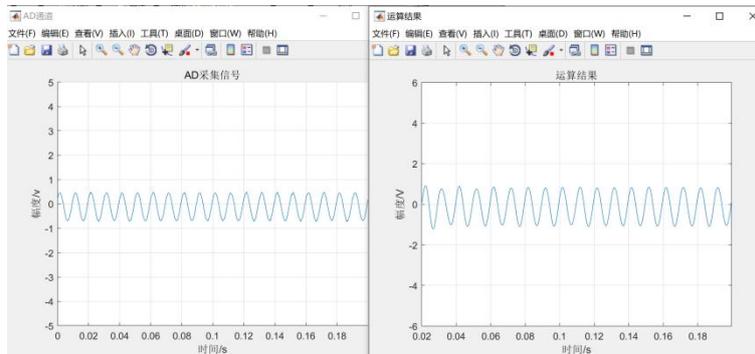


图 1.13.25 输入频率为 100Hz 的正弦波及输出波形

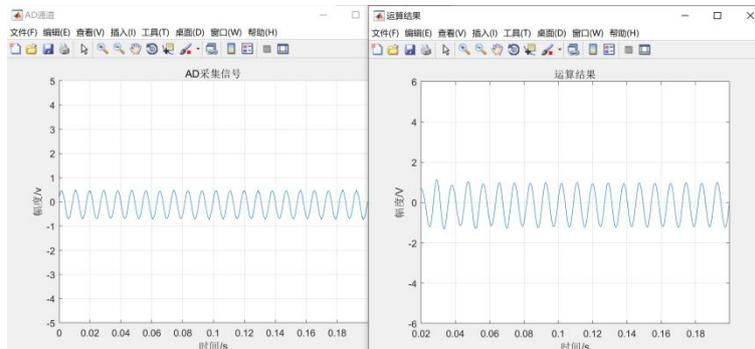


图 1.13.26 输入频率为 110Hz 的正弦波及输出波形

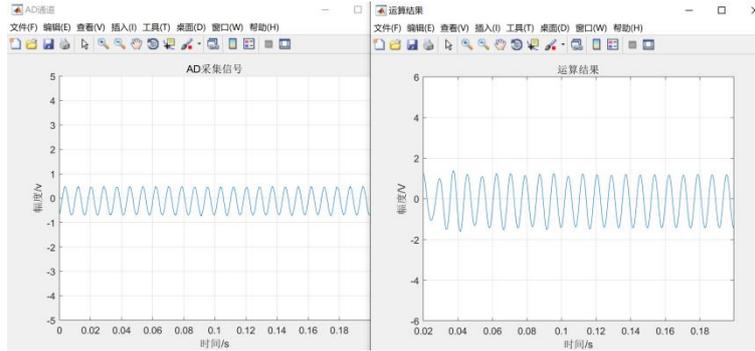


图 1.13.27 输入频率为 120Hz 的正弦波及输出波形

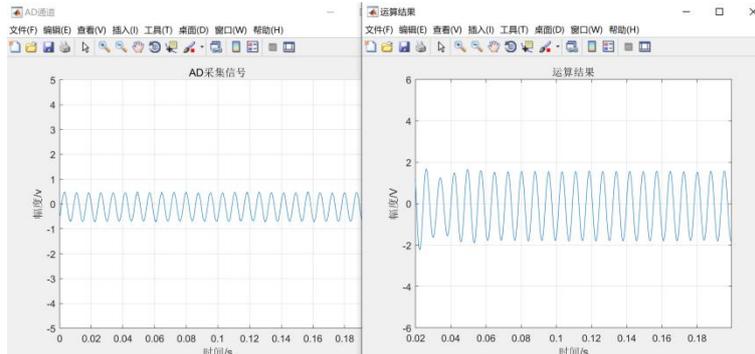


图 1.13.28 输入频率为 130Hz 的正弦波及输出波形

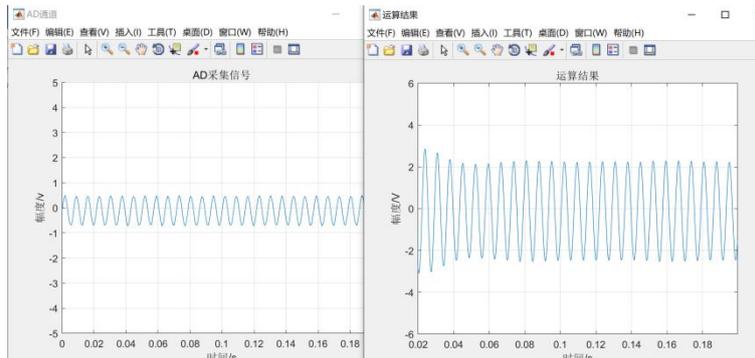


图 1.13.29 输入频率为 140Hz 的正弦波及输出波形

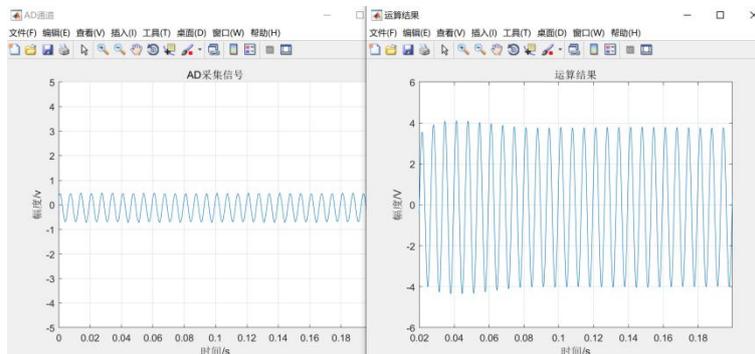


图 1.13.30 输入频率为 150Hz 的正弦波及输出波形

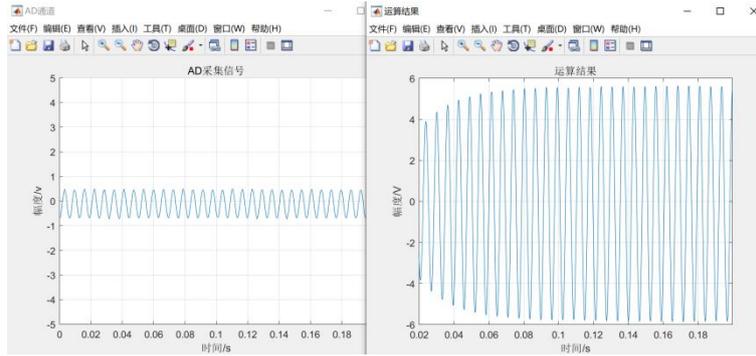


图 1.13.31 输入频率为 159Hz 的正弦波及输出波形

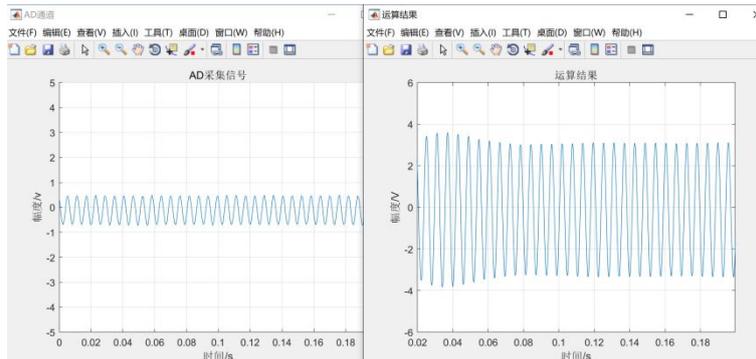


图 1.13.32 输入频率为 170Hz 的正弦波及输出波形

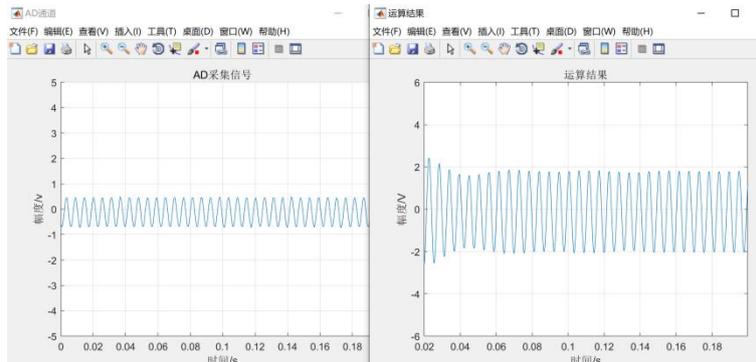


图 1.13.33 输入频率为 180Hz 的正弦波及输出波形

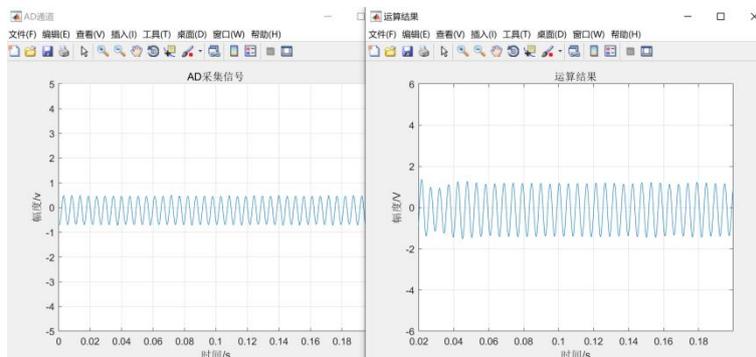


图 1.13.34 输入频率为 190Hz 的正弦波及输出波形

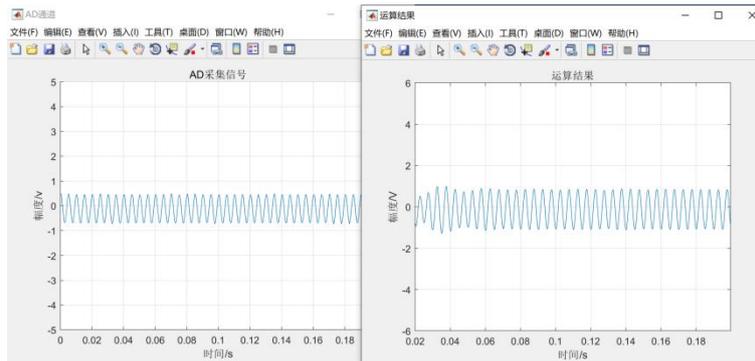


图 1.13.35 输入频率为 200Hz 的正弦波及输出波形

5. 使用 MTALAB 仿真图 1.13.13 所示二阶系统的模拟电路，并计算其系统传递函数、幅频特性曲线、谐振频率及通频带。

$$rc\_sys = \frac{-1.1e12 s}{1.11e10 s^2 + 1.1e12 s + 1e16}$$

图 1.13.36 二阶系统的模拟电路的系统传递函数

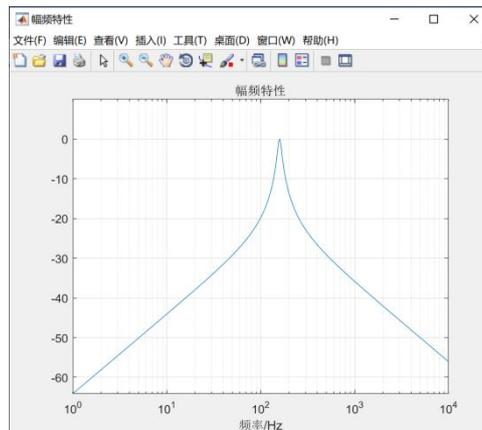


图 1.13.37 二阶系统的模拟电路的幅频特性曲线

幅值最高频点	159.221
通频带	15.7529

图 1.13.38 二阶系统的模拟电路的谐振频率及通频带

输入频率为不同频率正弦波信号时对应的输出波形。

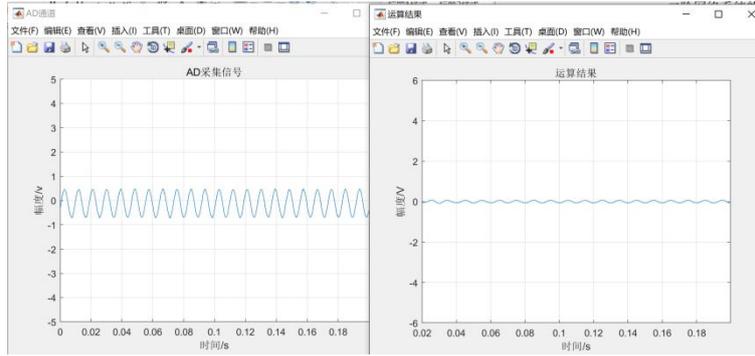


图 1.13.39 输入频率为 100Hz 的正弦波及输出波形

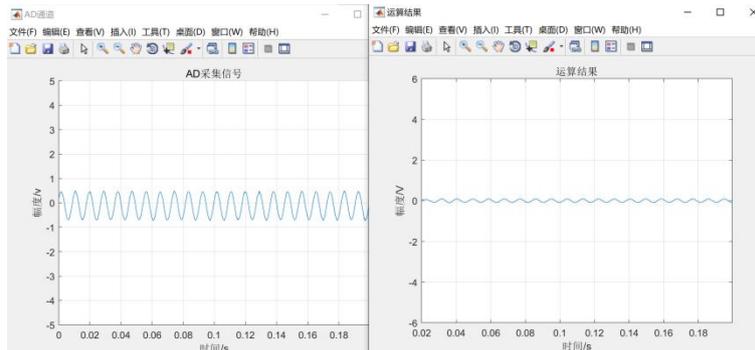


图 1.13.40 输入频率为 110Hz 的正弦波及输出波形

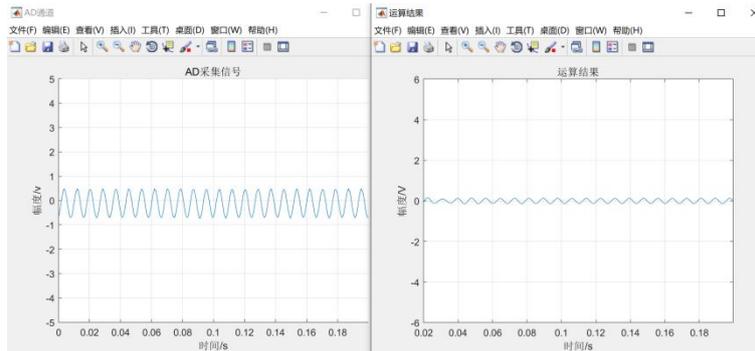


图 1.13.41 输入频率为 120Hz 的正弦波及输出波形

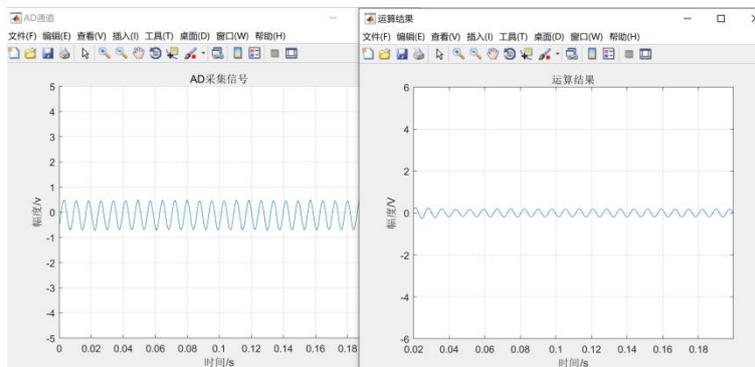


图 1.13.42 输入频率为 130Hz 的正弦波及输出波形

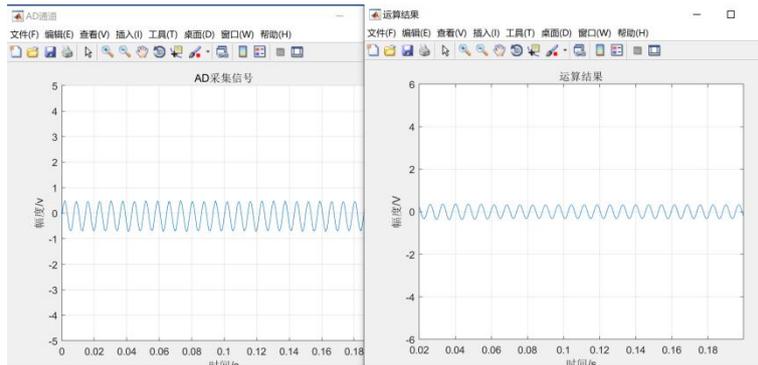


图 1.13.43 输入频率为 140Hz 的正弦波及输出波形

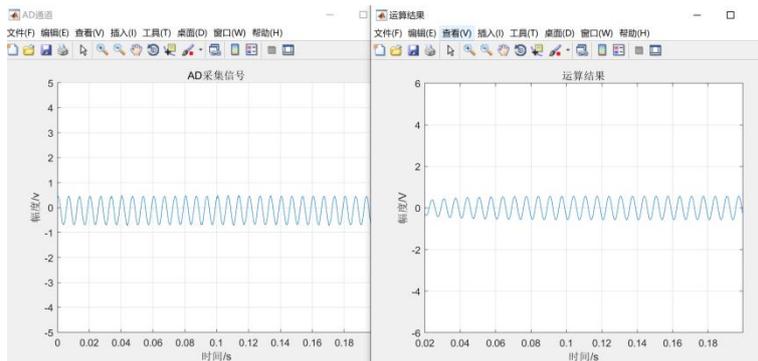


图 1.13.44 输入频率为 150Hz 的正弦波及输出波形

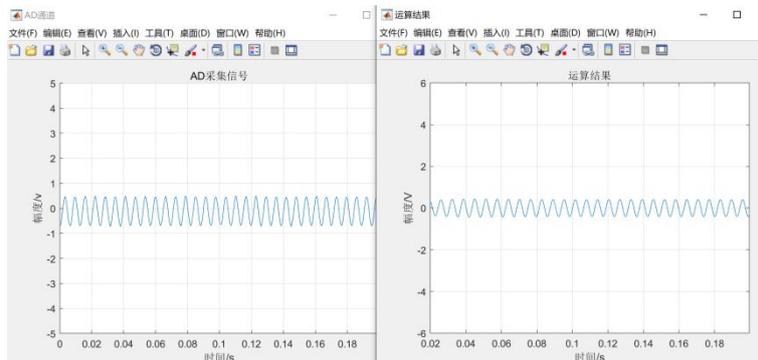


图 1.13.45 输入频率为 159Hz 的正弦波及输出波形

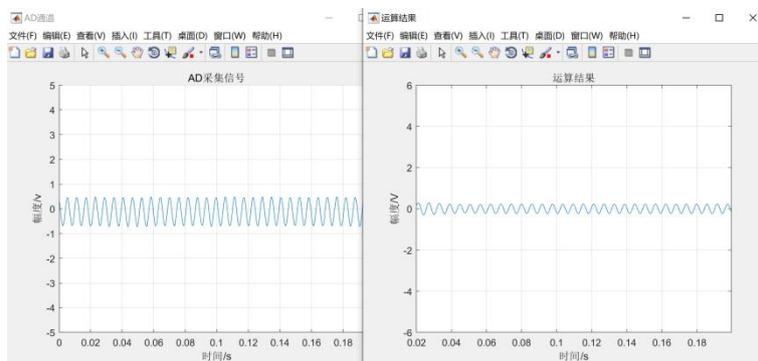


图 1.13.46 输入频率为 170Hz 的正弦波及输出波形

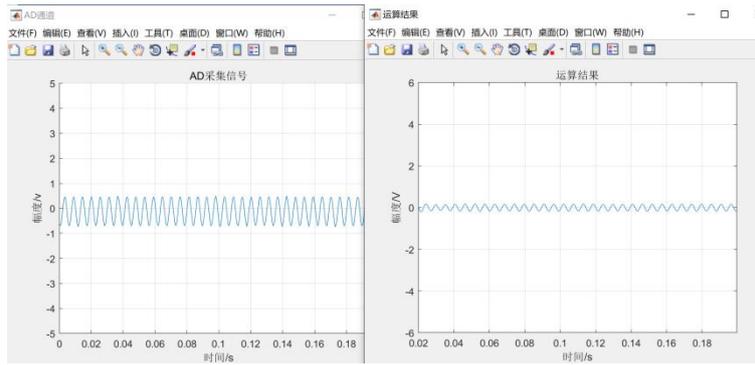


图 1.13.47 输入频率为 180Hz 的正弦波及输出波形

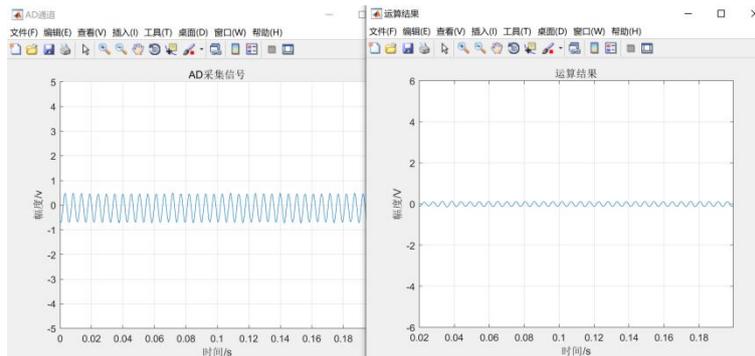


图 1.13.48 输入频率为 190Hz 的正弦波及输出波形

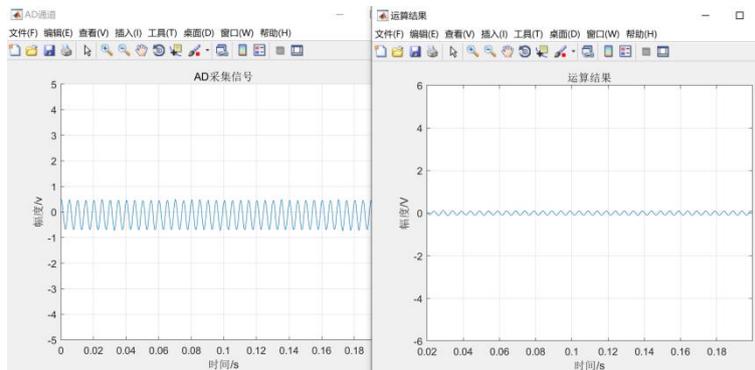


图 1.13.49 输入频率为 200Hz 的正弦波及输出波形



## 1.14 幅度调制与解调实验

### 1.14.1 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;
- (3) 掌握幅度调制与解调的 MATLAB 的仿真方法。

#### 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) 使用 MATLAB 软件仿真幅度调制与解调的过程。

### 1.14.2 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 1.14.1 所示。

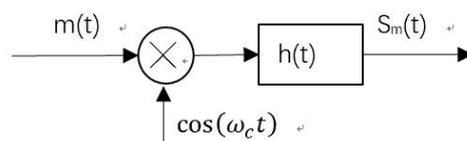


图 1.14.1 幅度调制器的一般模型

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:

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

式中,  $M(\omega)$ 为调制信号 $m(t)$ 的频谱,  $H(\omega)$ 对应 $h(t)$ ,  $\omega_c$ 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 1.14.1 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 1.14.2 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 $S_m(t)$ 最小值连城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。

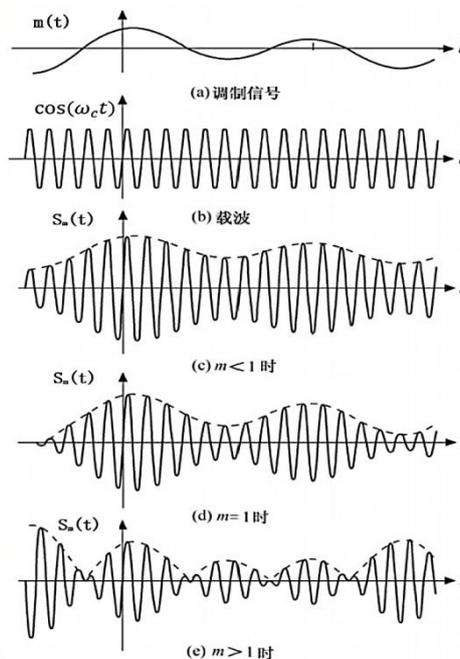


图 1.14.2 AM 调制过程波形图

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

1.14.3 所示。此时已调信号为：

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

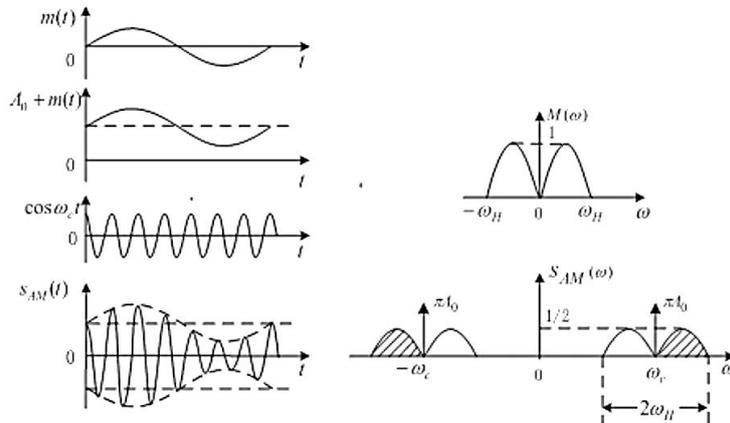


图 1.14.3 AM 调制过程波形图及频谱图

## 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的检出调制信号。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。

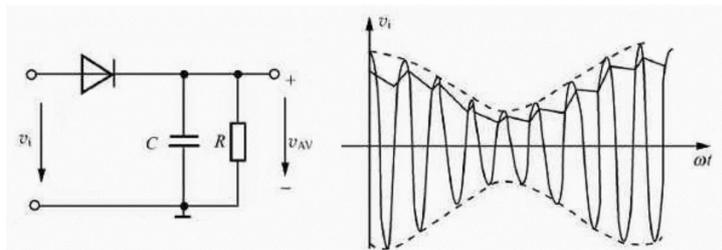


图 1.14.4 包络检波原理

## (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。

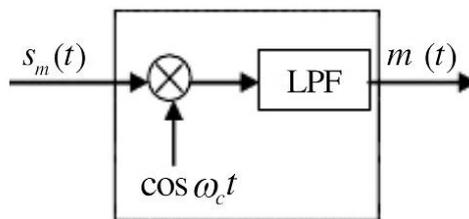


图 1.14.5 相干解调原理

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。

### 1.14.3 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.实验导线若干根。
- 3.USB3.0数据线1根。
- 4.双踪示波器1台。
- 5.安装有VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b软件的PC1台。

### 1.14.4 实验步骤

1.信号源输出一路10KHz的正弦波作调制信号,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。

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。

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。

6.使用 MATLAB 仿真运算信号的 AM 幅度调制与解调。

1. 14. 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 1.14.6 所示。

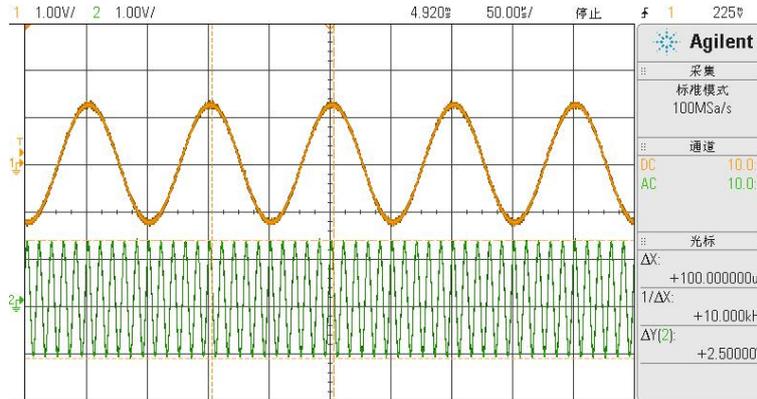


图 1.14.6 10KHz 的调制信号和 100KH 载波信号

2.不同包络状态的调制信号。

(1)  $0 < m < 1$  时，调制信号如图 1.14.7 所示。

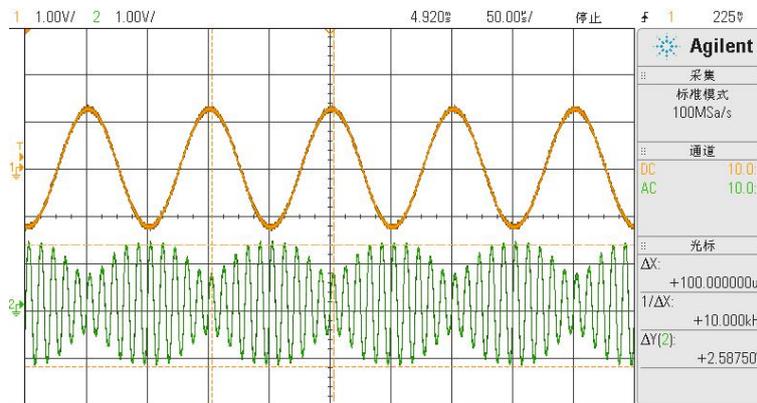


图 1.14.7  $0 < m < 1$

(2)  $m = 1$  时，调制信号如图 1.14.8 所示。

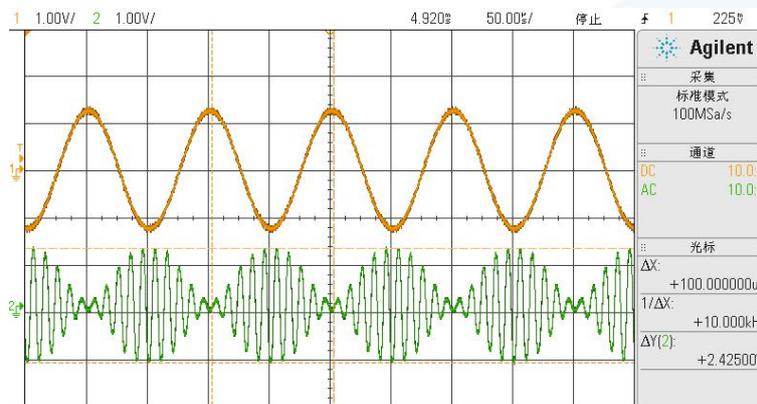


图 1.14.8  $m = 1$

(3)  $m > 1$  时, 调制信号如图 1.14.9 所示。

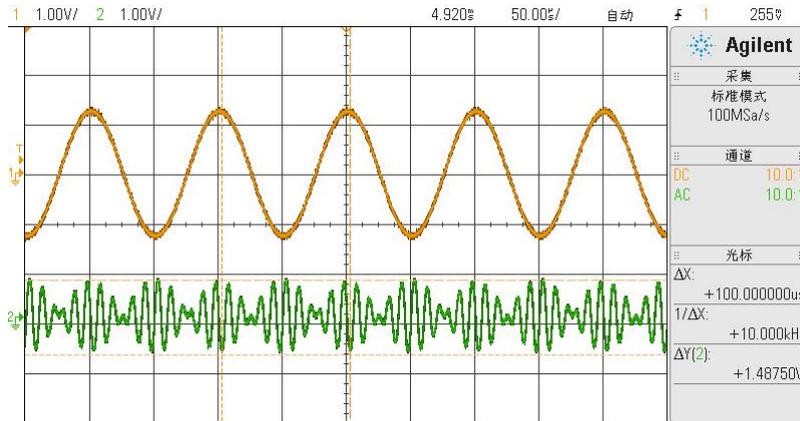


图 1.14.9  $m > 1$

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 1.14.10 所示。

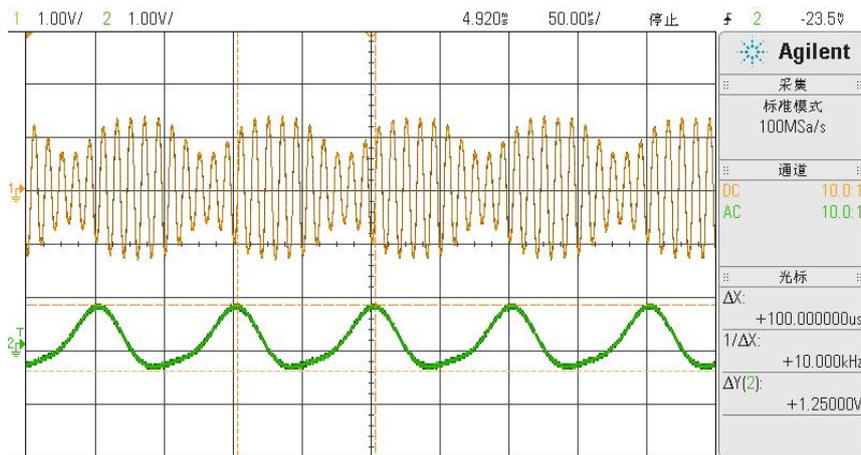


图 1.14.10  $0 < m < 1$

(2)  $m = 1$  时, 解调信号如图 1.14.11 所示。

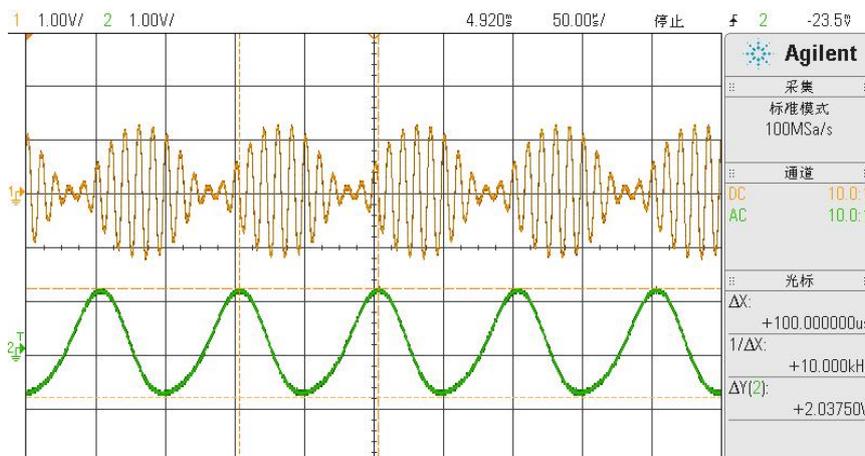


图 1.14.11  $m = 1$

(3)  $m > 1$  时, 解调信号如图 1.14.12 所示。

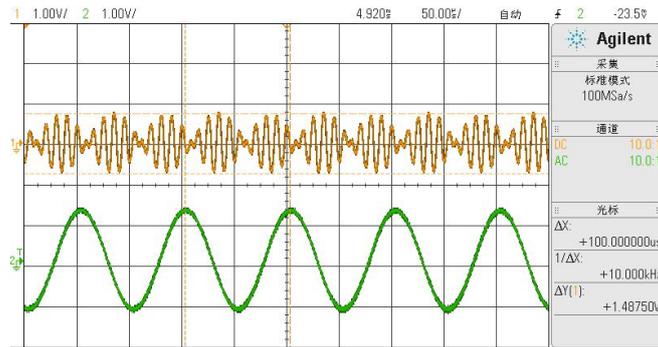


图 1.14.12  $m > 1$

## 2. 使用 MATLAB 仿真运算信号的 AM 幅度调制与解调。

(1) MATLAB 产生调制信号与载波信号, 并对其进行频谱分析。

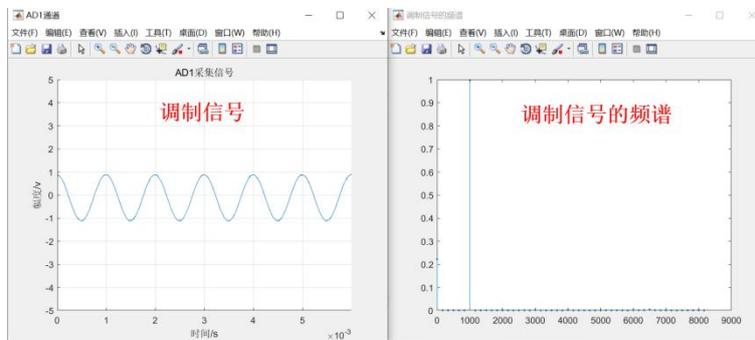


图 1.14.13 调制信号及其载波

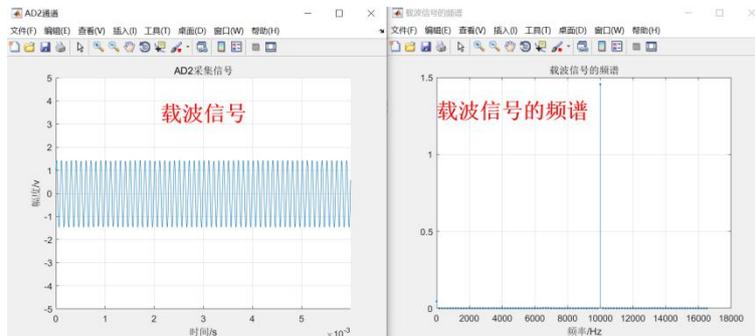


图 1.14.14 载波信号及其频谱

(2) 使用 MATLAB 进行 AM 调制, 并对调制后信号进行频谱分析。

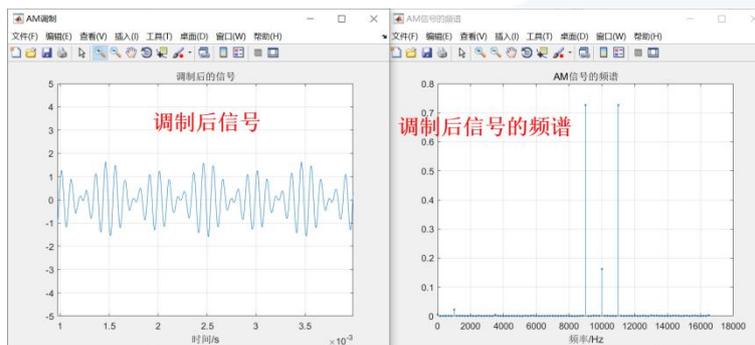


图 1.14.15 调制后信号及其频谱

(3) 使用 MATLAB 进行解调, 并对解调后信号进行频谱分析。

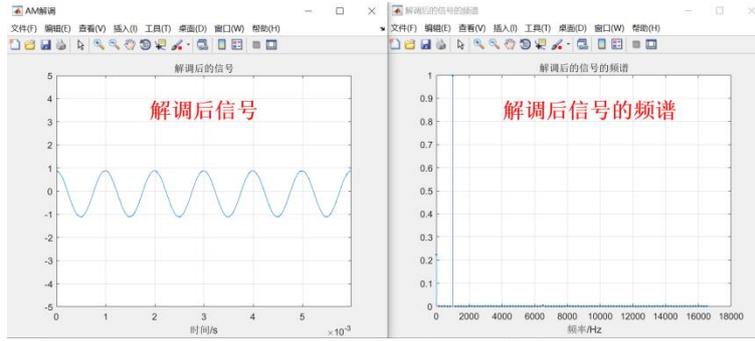


图 1.14.16 解调后信号及其频谱

## 1.15 抽样定理与信号恢复实验

### 1.15.1 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。

### 1.15.2 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。抽样定理是指,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。抽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 $f_s(t)$ 可以看成是连续信号 $f(t)$ 和一组开关函数 $s(t)$ 的乘积。即:

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

图 1.15.1 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。

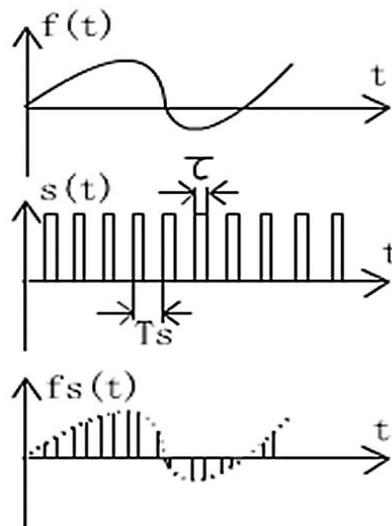
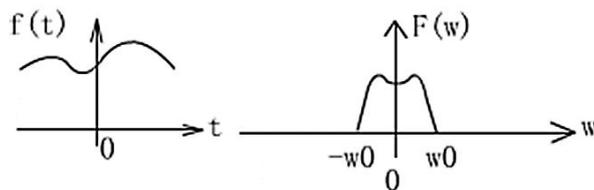


图 1.15.1 对连续时间信号进行抽样

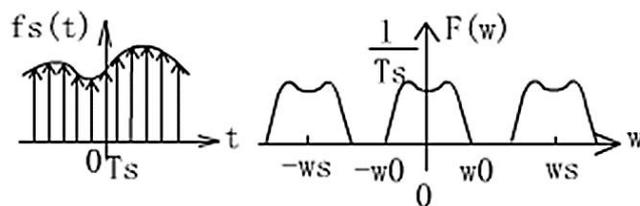
对抽样信号进行傅里叶分析可知，抽样信号的频谱包含了原连续信号以及无限多个经过平移的原信号频谱。平移后的频率等于抽样频率 $f_s$ 及其各次谐波频率 $2f_s, 3f_s, 4f_s, 5f_s, \dots$ 。

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。

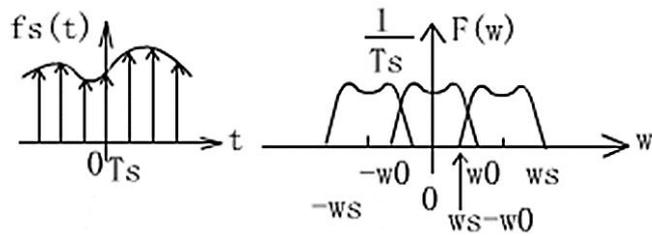
正如测到了足够的实验数据以后，我们可以在坐标纸上把一系列数据点连接起来，得到一条光滑的曲线一样，抽样信号在一定条件下也可以恢复到原信号。只要用一截止频率等于原信号频谱中最高频率 $f_{max}$ 的低通滤波器，滤除高频分量，经滤波后得到的信号包含了原信号频谱的全部内容，故在低通滤波器的输出可以得到恢复后的原信号。



(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 1.15.2 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 1.15.3 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。

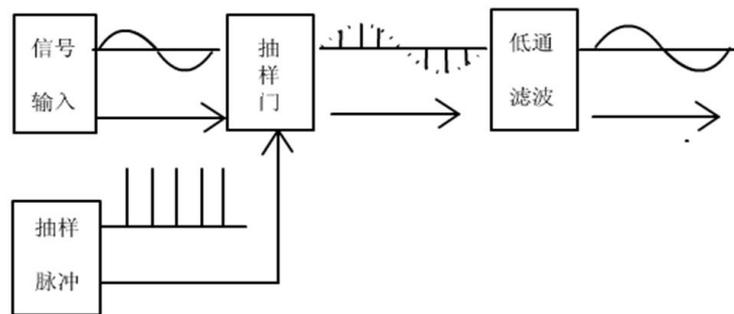


图 1.15.3 抽样定理实验方框图

### 1.15.3 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.实验导线若根。
- 3.USB3.0 数据线 1根。
- 4.双踪示波器 1台。

5. 安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1. 15. 4 实验步骤

1. 信号源产生一路频率为 100Hz、峰峰值为 3.5V 的正弦波信号做被抽样信号，一路频率为 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. 将抽样信号输入低通滤波器。

4. 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。

5. 改变抽样脉冲的频率为 10KHz，重复以上步骤。

6. 使用 MATLAB 仿真运算信号的抽样定理。

7. MATLAB 程序下载。

(1) 使用 USB3.0 数据线连接高速 ADDA 模块至电脑。信号源接通电源。

(2) 使用 Cyperss 软件的 Control Center 下载 FX3 程序。

1) 打开软件 Cyperss 软件的 Control Center 界面，在界面左侧的 Cyperss FX3 USB BootLoader Device 为发现的可用设备，点击选择设备。

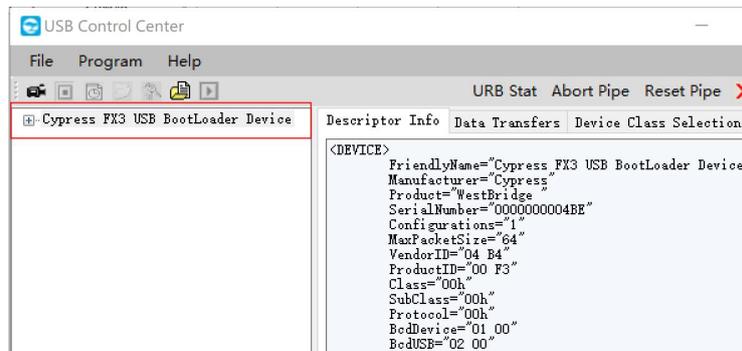


图 1.15.4 选择 FX3 设备

2) 点击菜单栏的“Program”下的 FX3，选择“RAM”。

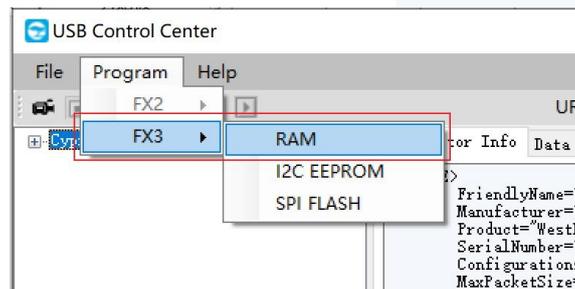


图 1.15.5 选择下载方式

3) 选择打开资料包中的“.img”文件，FX3 的程序下载完成后，界面左侧可用设备字样变成 Cyperss FX3 USB StreamExample Device。

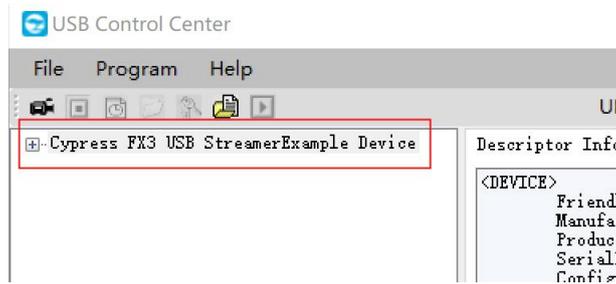


图 1.15.6 FX3 程序下载完成

(3) 打开 VC 软件。打开资料包，点击“VC2008\_NET\_DRV.exe”软件打开软件。

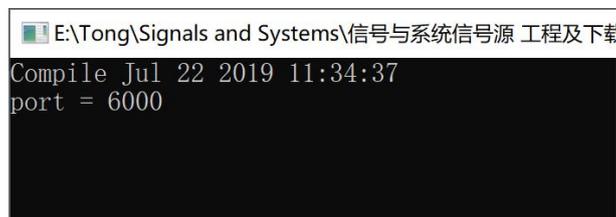


图 1.15.7 打开 VC2008\_NET\_DRV

(4) 打开 MATLAB 软件，点击右上角的“浏览文件夹”按钮，选择打开工程所在文件夹。

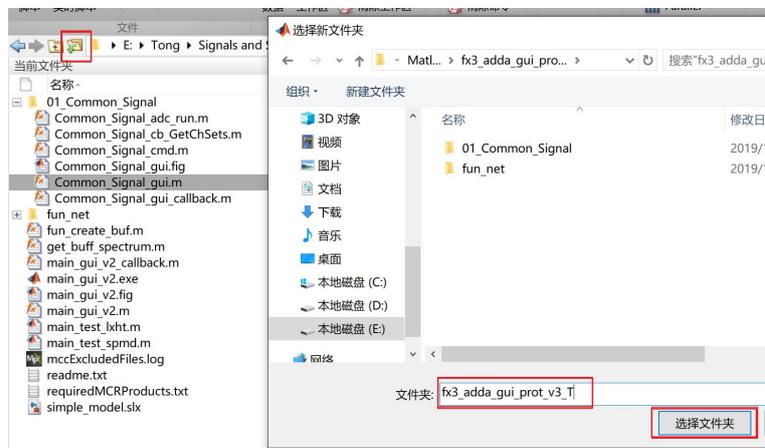


图 1.15.8 打开工程文件夹

(5) 选中所有文件夹，点击右键，选择“添加到路径”。

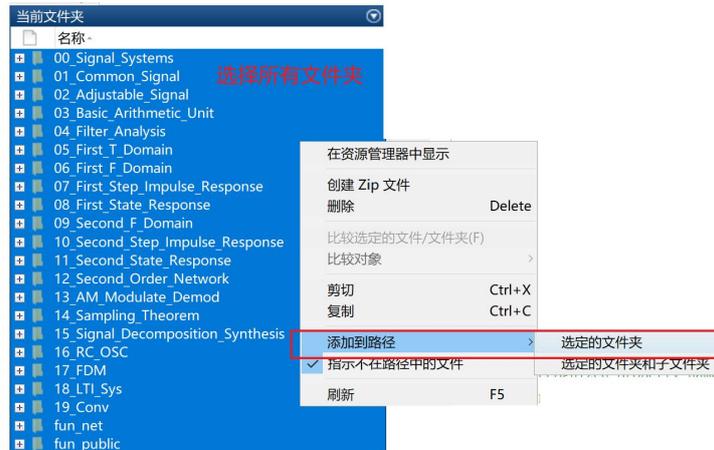


图 1.15.9 添加路径

(6) 在命令行窗口输入“Sampling\_Theorem\_gui”，按下回车键运行程序。

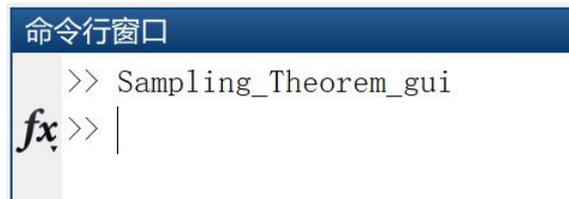


图 1.15.10 运行程序

## 1.15.5 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。

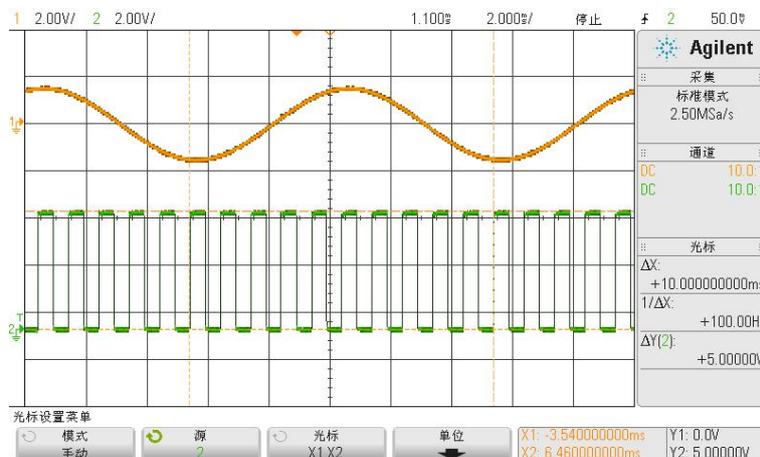


图 1.15.11 被抽样信号与抽样脉冲

### (2) 被抽样信号与抽样信号

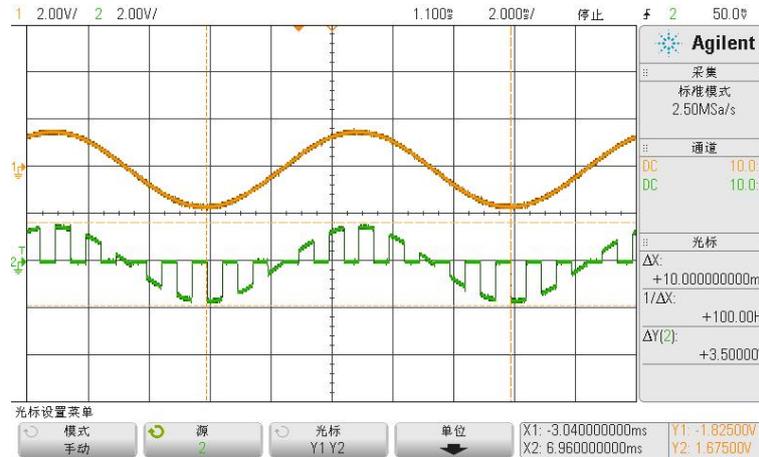


图 1.15.12 被抽样信号与抽样信号

### (3) 抽样信号与还原信号



图 1.15.13 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

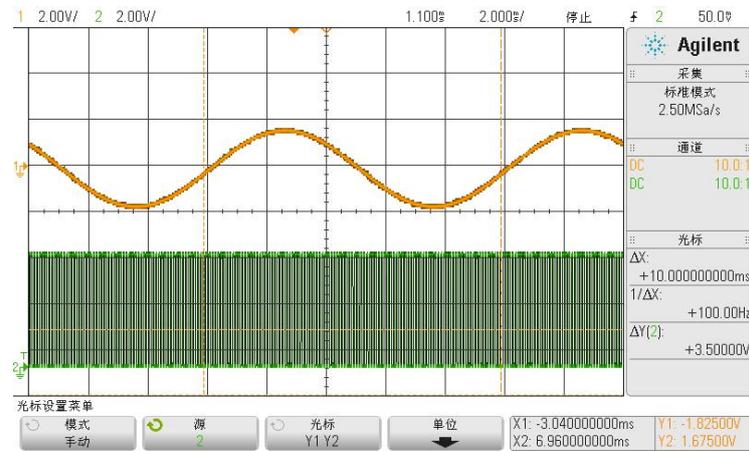


图 1.15.14 被抽样信号与抽样脉冲

### (2) 被抽样信号与抽样信号

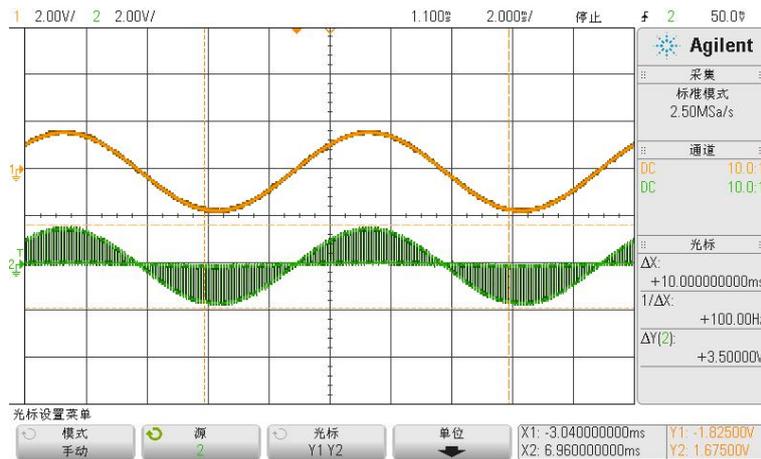


图 1.15.15 被抽样信号与抽样信号

### (3) 抽样信号与还原信号

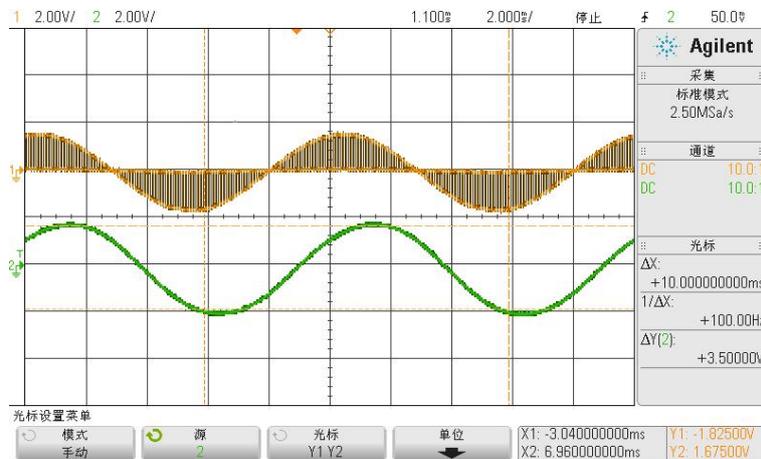


图 1.15.16 抽样信号与还原信号

## 1.16 周期方波信号的合成与分解实验

### 1.16.1 实验分析

#### 1.实验目的

- (1) 了解周期方波信号的组成原理;
- (2) 掌握周期方波信号的各次谐波的频率与幅值;
- (3) 学会使用示波器分析周期方波信号的频谱;
- (4) 掌握基波信号与不同谐波合成时的变化规律;
- (5) 学会使用 MATLAB 软件分析周期方波信号的合成与分解。

#### 2.实验任务

- (1) 使用示波器观察记录频率为 50Hz 的周期方波信号的频谱;
- (2) 使用 MATLAB 软件仿真创建周期方波信号分解电路,并将周期方波信号的一、三、五、七、九次谐波提取出;
- (3) 使用 MATLAB 软件求周期方波信号及各次谐波的频谱图;
- (4) 使用 MATLAB 软件将基波信号与不同谐波合成,观察记录波形。

### 1.16.2 实验原理

#### 1.傅里叶展开式

法国数学家傅里叶发现,任何周期函数都可以用正弦函数和余弦函数构成的无穷级数来表示(选择正弦函数与余弦函数作为基函数是因为它们是正交的),后世称傅里叶级数为一种特殊的三角级数,根据欧拉公式,三角函数又能化成指数形式,也称傅立叶级数为一种指数级数。

傅里叶展开式是指用三角级数表示的形式,即一个函数的傅里叶级数在它收敛于此函数本身时的一种称呼。若函数 $f(x)$ 的傅里叶级数处处收敛于 $f(x)$ ,则此级数称为 $f(x)$ 的傅里叶展开式。

按照傅里叶级数原理,任何周期信号在满足狄利克雷条件时都可以展开成无穷级数。展开形式为:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\Omega t) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n\Omega t) = \frac{A_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\Omega t + \varphi_n)$$

其中 $A_n \cos(n\Omega t + \varphi_n)$ 称为周期信号的 $n$ 谐波分量, $n$ 次谐波的频率为周期信号频率

的 $n$ 倍, 每一次的谐波的幅度随谐波次数的增加依次递减。当 $n = 0$ 时的谐波分量为 $\frac{a_0}{2}$  (直流分量)。当 $n = 1$ 时的谐波分量为 $A_1 \cos(n\Omega t + \varphi_1)$  (一次谐波或基波分量直流分量)。

## 2. 周期方波信号的傅里叶正弦级数

若周期方波信号的波形如图 1.16.1 所示。方波信号为奇谐对称信号, 因此, 其傅里叶级数为:

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left[ \sin \Omega t + \frac{1}{3} \sin 3\Omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\Omega t + \dots \right], n = 1, 3, 5 \dots$$

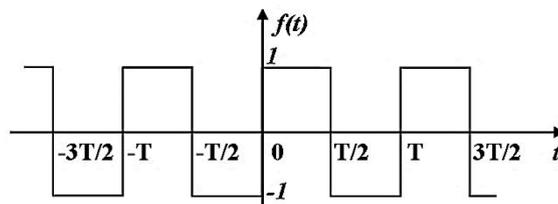


图 1.16.1 周期方波信号 (1)

若周期方波信号的波形如图 1.16.2 所示。方波信号为偶函数, 但仍为奇谐对称信号, 因此, 其傅里叶级数为:

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left[ \cos \Omega t - \frac{1}{3} \cos 3\Omega t + \frac{1}{5} \cos 5\Omega t - \frac{1}{7} \cos 7\Omega t + \dots \right], n = 1, 3, 5 \dots$$

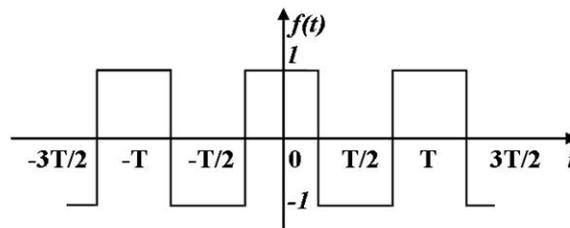


图 1.16.2 周期方波信号 (2)

由于 $a_n$ 既包含了 $n$ 次谐波振幅也包含了 $n$ 次谐波的相位, 因此周期方波信号的频谱可如图 1.16.3 所示。

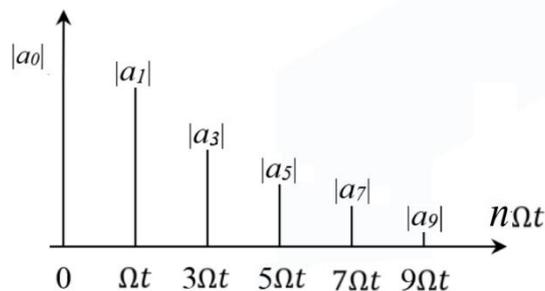


图 1.16.3 周期方波信号的频谱示意图

### 3.周期方波信号的分解

一般进行周期信号分解选用频率为 50Hz 的周期方波信号，周期方波信号是典型的容易实现信号的合成与分解的信号。结合图 1.16.3，使用不同中心频率的带通滤波器的可将方波的各次谐波提取出来，带通滤波器的中心频点分别为 50Hz、150Hz、250Hz、350Hz、450Hz…，带通滤波器的带宽要求足够窄保证能正确的提取出谐波。方波信号分解的过程原理如图 1.16.4 所示。

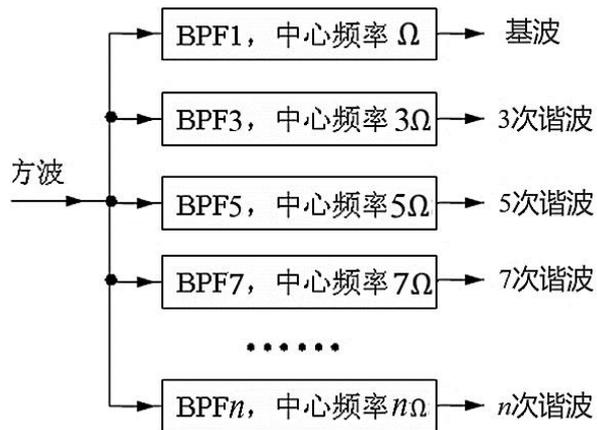


图 1.16.4 方波信号分解过程原理框图

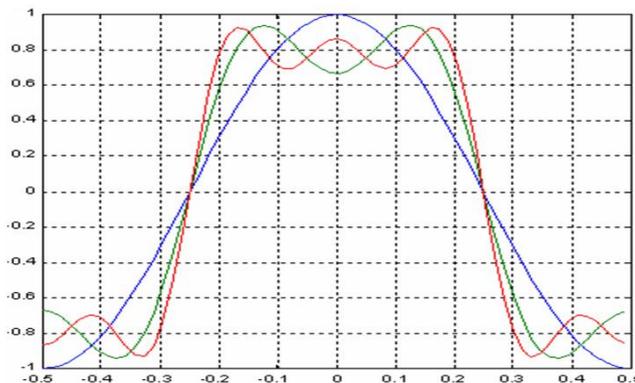


图 1.16.5 周期方波信号的 1、3、5 次谐波分量

### 4.周期方波信号的合成

按照三角形式的傅里叶级数理论可知，周期信号的无穷级数展开中，各次谐波的频率按照基波信号的频率的整数倍依次递增，幅度值随谐波次数的增加依次递减，趋近于零。因此，从信号能量分布的角度来讲，频率较低的谐波组成周期信号的主体。理论上只要满足一定关系的直流信号和无限多项正弦（或余弦）信号才能逼近原信号。但在实际中只可能用有限次谐波合成来逼近原始信号，不过会存在误差，当合成的谐波次数越多时，近似程度越高，可以用方均误差来定义这种近似程度，设傅里叶级数前有

限项(N项)和为

$$S_N(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^N [a_n \cos n\Omega t + b_n \sin n\Omega t]$$

用 $S_N(t)$ 近似表示 $f(t)$ 所引起的误差函数为:

$$\varepsilon_N(t) = f(t) - S_N(t)$$

方均误差可以定义为:

$$E_N = \overline{\varepsilon_N^2(t)} = \frac{1}{T} \int_0^T \varepsilon_N^2(t) dt$$

通常,随着合成的谐波次数的增加,方均误差逐渐减小,可见合成波形与原波形之间的偏差越来越小。方波信号有限次谐波的合成波形如图 1.16.6 所示。

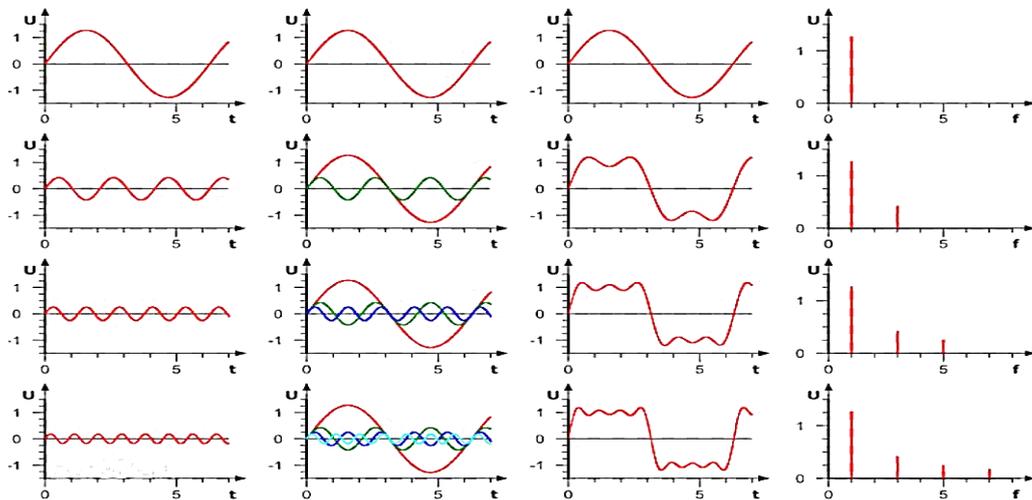


图 1.16.6 方波信号有限次谐波合成波形及频谱图

### 1.16.3 实验设备

- 1.信号与系统实验平台(含信号源单元、周期信号合成与分解单元)1台。
- 2.实验导线若干根。
- 3.USB3.0 数据线1根。
- 4.双踪示波器1台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.16.4 实验步骤

- 1.使用实验导线将实验箱大底板上的正负 5V 和地信号连接到周期信号合成与分解单元,给周期信号合成与分解单元供电。
- 2.使用周期信号合成与分解单元实现周期方波信号的合成与分解。

(1) 使用信号源输出频率为 50Hz、 $V_{pp}$  为 3V 的方波信号，并将该信号输入至周期信号合成与分解单元的信号输入端。

信号分解：

(2) 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号分解部分的通道 1，通过调节旋钮 RW1 和 RW2 调整基波信号的相位。

(3) 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号分解部分的通道 2，通过调节旋钮 RW3 和 RW4 调整三次谐波信号的相位。

(4) 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号分解部分的通道 3，通过调节旋钮 RW5 和 RW6 调整五次谐波信号的相位。

(5) 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号分解部分的通道 4，通过调节旋钮 RW7 和 RW8 调整七次谐波信号的相位。

(6) 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号分解部分的通道 5，通过调节旋钮 RW9 和 RW10 调整九次谐波信号的相位。

备注：在调节谐波信号的相位时，要两个旋钮一起调整，调整到没有相位偏移，建议先使用与谐波信号频率相同的正弦波信号先做调节。

信号调整：

(7) 将拨动开关 S1 拨至导通，双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号调整部分的合成输入 1 处的信号，通过调节旋钮 RW11 调整基波信号的幅值，基次谐波的理论幅值为  $V_{pp} \cdot \frac{4}{\pi}$ 。

(8) 将拨动开关 S2 拨至导通，使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号调整部分的合成输入 2 处的信号，通过调节旋钮 RW12 调整基波信号的幅值，三次谐波信号的理论幅值为  $V_{pp} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{3}$ 。

(9) 将拨动开关 S3 拨至导通，使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号调整部分的合成输入 3 处的信号，通过调节旋钮 RW13 调整基波信号的幅值，五次谐波信号的理论幅值为  $V_{pp} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{5}$ 。

(10) 将拨动开关 S4 拨至导通，使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号，示波器通道 2 观察信号调整部分的合成输入 4 处的信号，通过调节旋钮 RW14 调整基波信号的幅值，七次谐波信号的理论幅值为  $V_{pp} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{7}$ 。

(11) 将拨动开关 S5 拨至导通, 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号, 示波器通道 2 观察信号调整部分的合成输入 5 处的信号, 通过调节旋钮 RW15 调整基波信号的幅值, 九次谐波信号的理论幅值为  $V_{pp} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{9}$ 。

信号合成:

(12) 将拨动开关 S6、S7 拨至导通, 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号, 示波器通道 2 观察信号合成输出处信号, 即观察一次谐波信号和三次谐波信号的合成信号。

(13) 在上一步的基础上, 将拨动开关 S8 拨至导通, 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号, 示波器通道 2 观察信号合成输出处信号, 即观察一次谐波信号、三次谐波信号和五次谐波信号的合成信号。

(14) 在上一步的基础上, 将拨动开关 S9 拨至导通, 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号, 示波器通道 2 观察信号合成输出处信号, 即观察一次谐波信号、三次谐波信号、五次谐波信号和七次谐波信号的合成信号。

(15) 在上一步的基础上, 将拨动开关 S10 拨至导通, 使用双踪示波器的通道 1 观察输入方波信号, 示波器通道 2 观察信号合成输出处信号, 即观察一次谐波信号、三次谐波信号、五次谐波信号、七次谐波信号和九次谐波信号的合成信号。

2. 使用 MATLAB 软件进行模拟仿真周期方波信号的合成与分解实验。

(1) 使用 MATLAB 软件编写周期方波信号, 并分析其频谱。

(2) 使用 MATLAB 软件编写仿真周期方波信号分解出基波信号, 并分析其频谱。

(3) 使用 MATLAB 软件编写仿真周期方波信号分解出三次谐波信号, 并分析其频谱。

(4) 使用 MATLAB 软件编写仿真周期方波信号分解出五次谐波信号, 并分析其频谱。

(5) 使用 MATLAB 软件编写仿真周期方波信号分解出七次谐波信号, 并分析其频谱。

(7) 使用 MATLAB 软件编写仿真周期方波信号的基波信号与三次谐波信号合成的信号, 并分析其频谱图。

(8) 使用 MATLAB 软件编写仿真周期方波信号的基波信号与三次谐波信号、五次谐波信号合成的信号, 并分析其频谱。

(9) 使用 MATLAB 软件编写仿真周期方波信号的基波信号和三次谐波信号、五次谐波信号、七次谐波信号合成的信号，并分析其频谱图。

(10) 使用 MATLAB 软件仿真以上步骤的界面如所示。



图 1.16.7 周期信号合成与分解的界面

## 1.16.5 实验结果

1. 使用周期信号合成与分解单元实现周期方波信号的合成与分解。

(1) 信号源输出频率为 50Hz、 $V_{pp}$  为 3V 的方波信号。

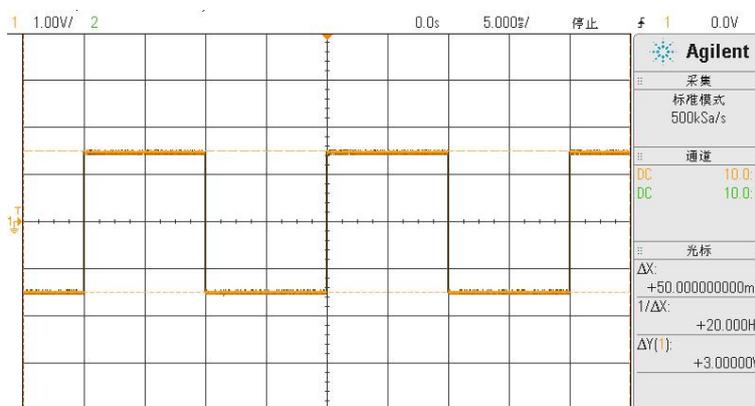


图 1.16.8 频率为 50Hz、 $V_{pp}$  为 3V 的周期方波信号

(2) 方波信号和经过相位调整的基波信号，及方波信号和经过幅度调整后的基波信号。

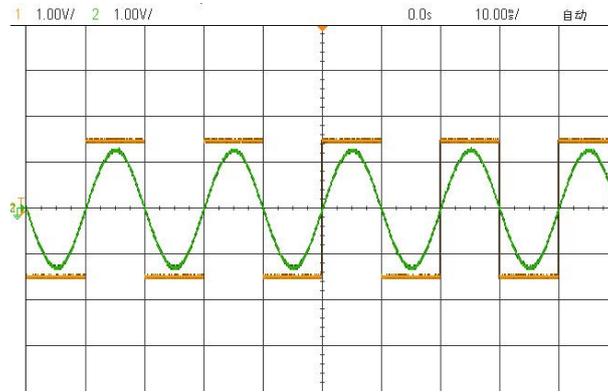


图 1.16.9 方波信号与经过相位调整的基波信号

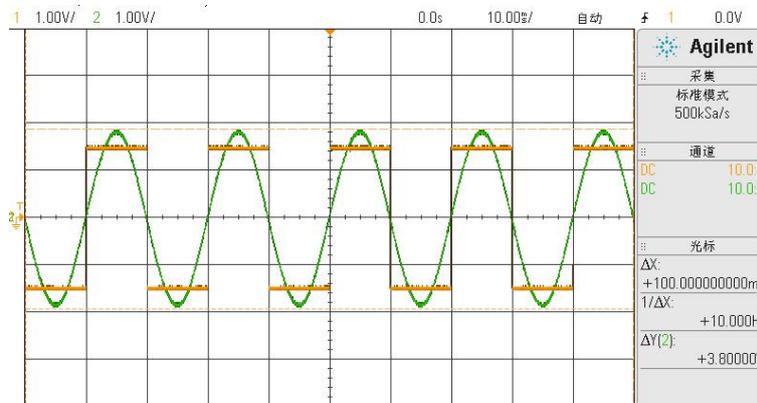


图 1.16.10 方波信号与经过幅度调整的基波信号

(3) 方波信号和经过相位调整的三次谐波信号，及方波信号和经过幅度调整后的三次谐波信号。

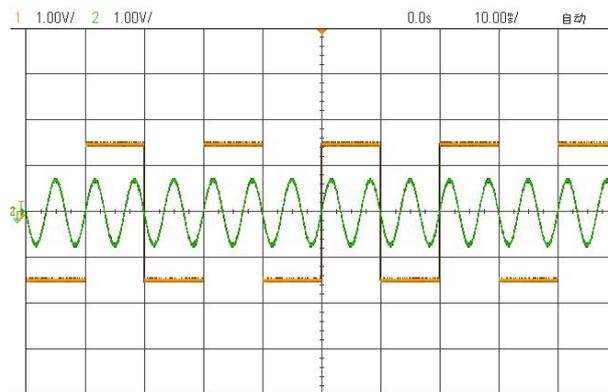


图 1.16.11 方波信号与经过相位调整的三次谐波信号

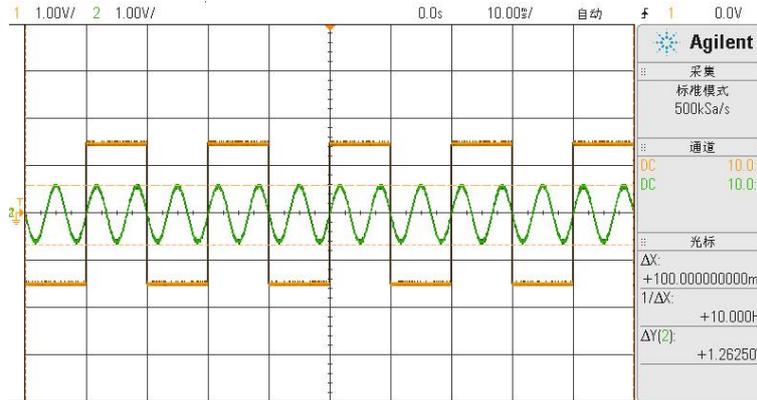


图 1.16.12 方波信号与经过幅度调整的三次谐波信号

(4) 方波信号和经过相位调整的五次谐波信号，及方波信号和经过幅度调整后的五次谐波信号。

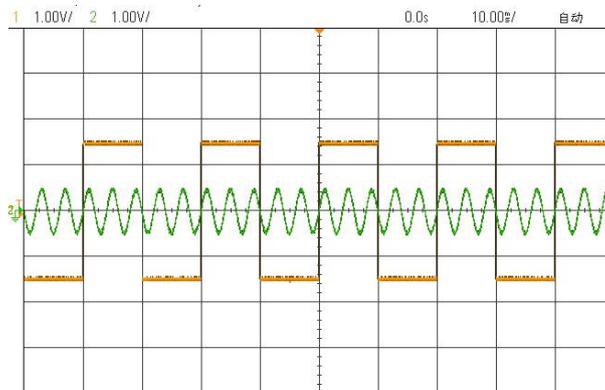


图 1.16.13 方波信号与经过相位调整的五次谐波信号

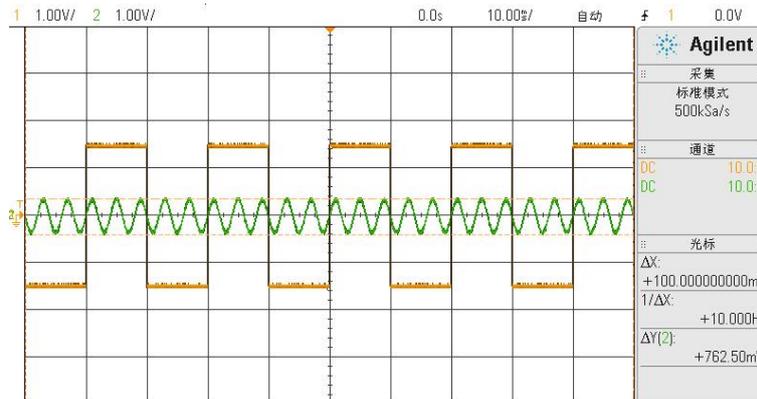


图 1.16.14 方波信号与经过幅度调整的五次谐波信号

(5) 方波信号和经过相位调整的七次谐波信号，及方波信号和经过幅度调整后的七次谐波信号。

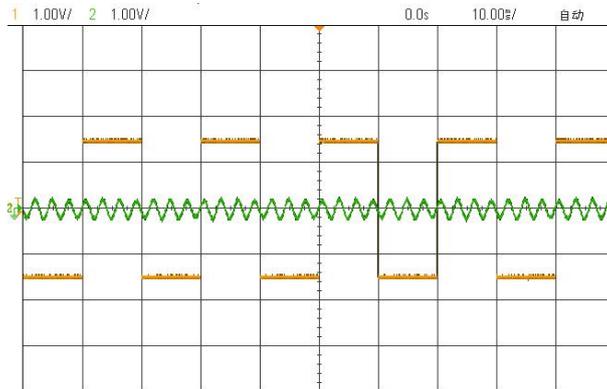


图 1.16.15 方波信号与经过相位调整的七次谐波信号

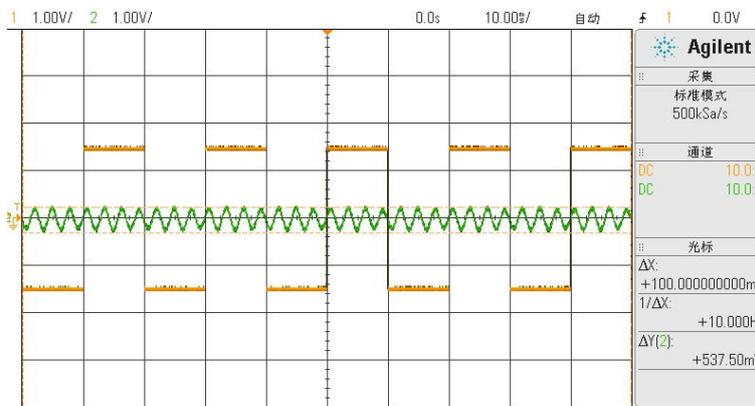


图 1.16.16 方波信号与经幅度调整的七次谐波信号

(6) 方波信号和经过相位调整的九次谐波信号，及方波信号和经过幅度调整后的九次谐波信号。

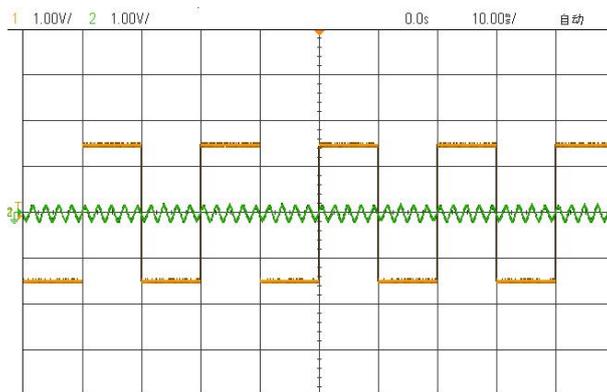


图 1.16.17 方波信号与经过相位调整的九次谐波信号

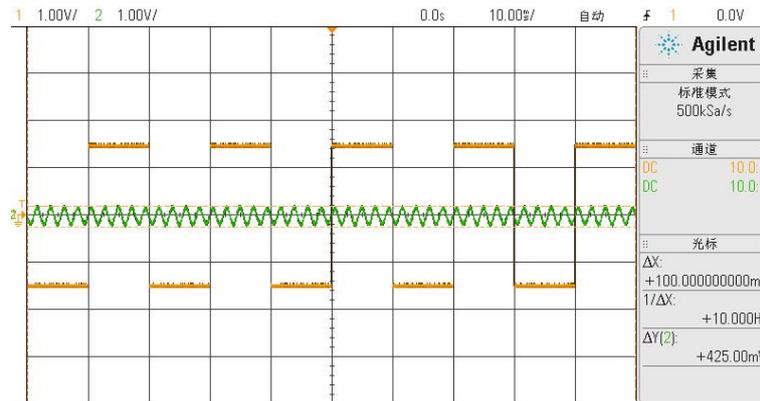


图 1.16.18 方波信号与经过幅度调整的九次谐波信号

(7) 方波信号与基波信号和三次谐波信号合成的信号。

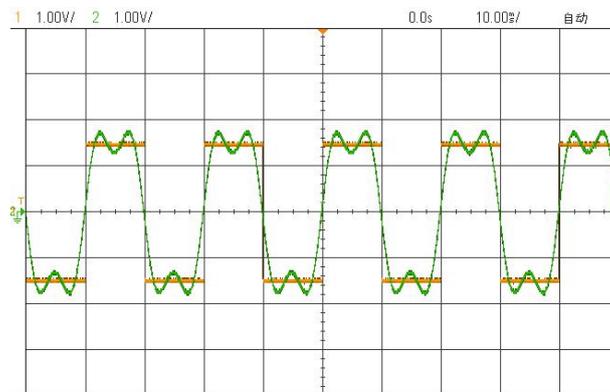


图 1.16.19 方波信号与一、三次谐波信号合成的信号

(8) 方波信号与基波信号、三次谐波信号及五次谐波信号合成的信号。

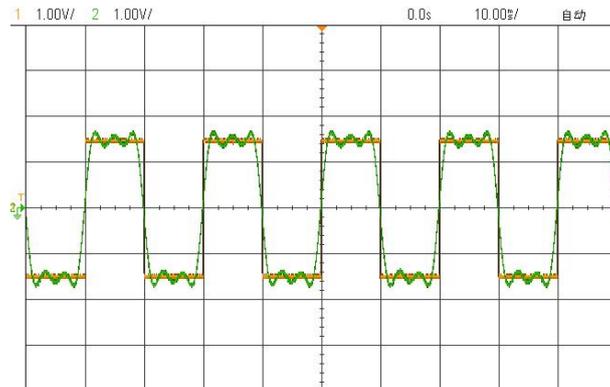


图 1.16.20 方波信号与一、三、五次谐波信号合成的信号

(9) 方波信号与基波信号、三次谐波信号、五次谐波信号和七次谐波信号合成的信号。

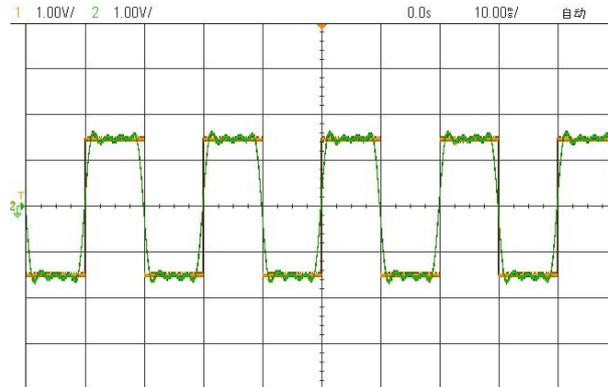


图 1.16.21 方波信号与一、三、五、七次谐波信号合成的信号

(10) 方波信号与基波信号三次谐波信号、五次谐波信号和七次谐波信号和九次谐波信号的合成信号。

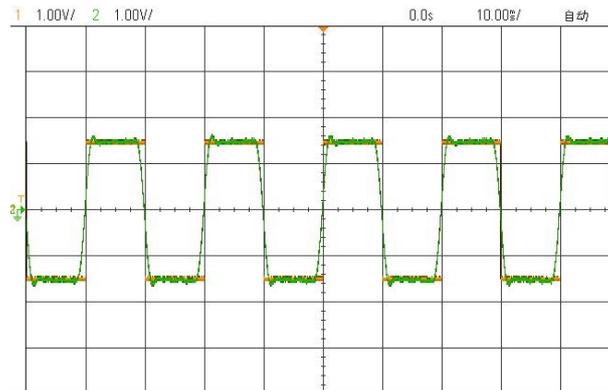


图 1.16.22 方波信号与一、三、五、七、九次谐波信号合成的信号

## 2. 使用 MATLAB 软件进行周期方波信号的合成与分解实验的仿真。

(1) MATLAB 软件生成周期方波信号，并对其进行频谱分析。

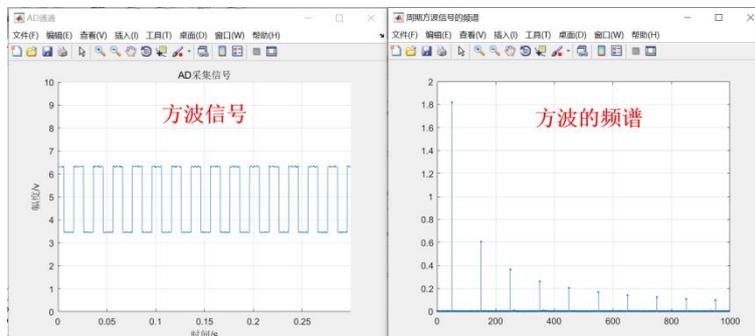


图 1.16.23 周期方波信号及其频谱

(2) 周期方波信号分解出基波信号，并对其进行频谱分析。

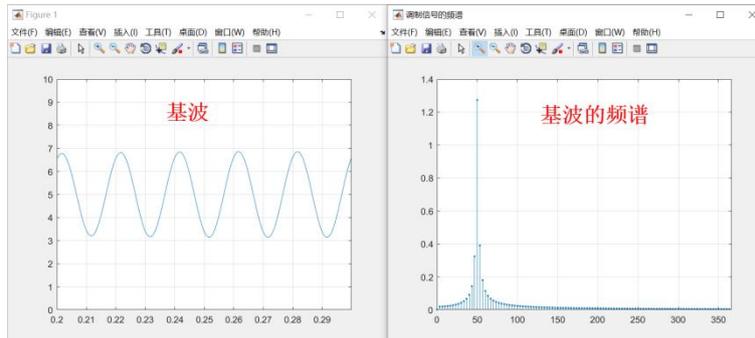


图 1.16.24 基波信号及其频谱

(3) 周期方波信号分解出三次谐波信号，并对其进行频谱分析。

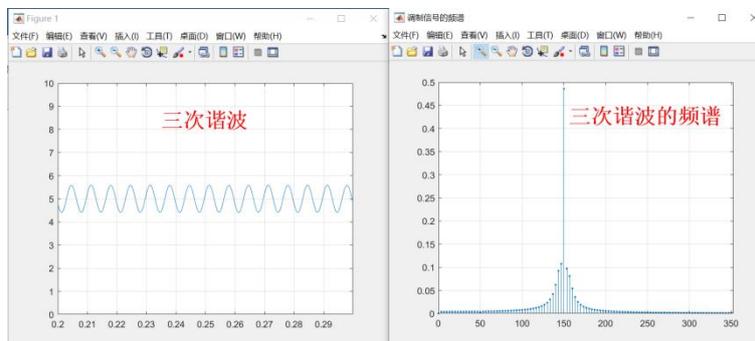


图 1.16.25 三次谐波信号及其频谱

(4) 周期方波信号分解出五次谐波信号，并对其进行频谱分析。

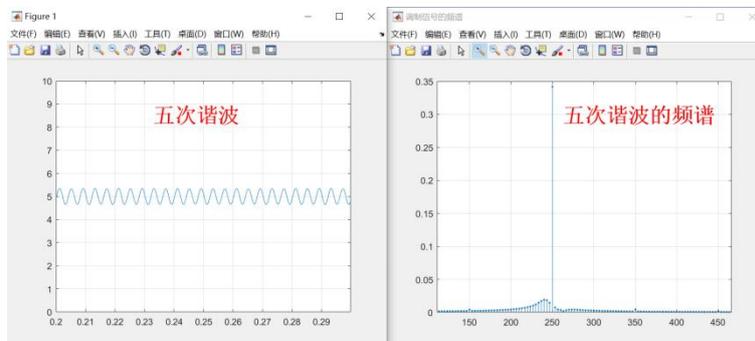


图 1.16.26 五次谐波信号及其频谱

(5) 周期方波信号分解出七次谐波信号，并对其进行频谱分析。

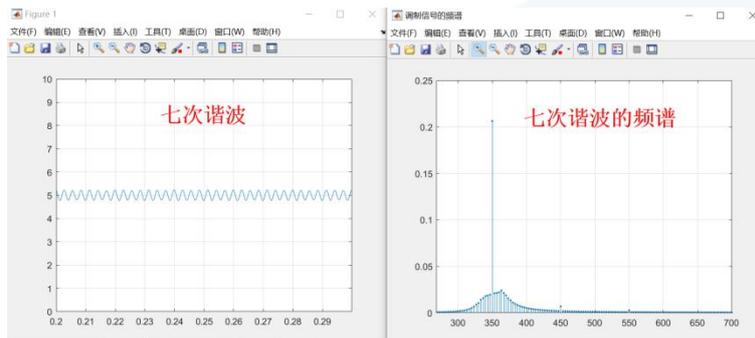


图 1.16.27 七次谐波分量及其频谱

(6) 基波信号与三次谐波信号合成，并分析其合成信号的频谱。

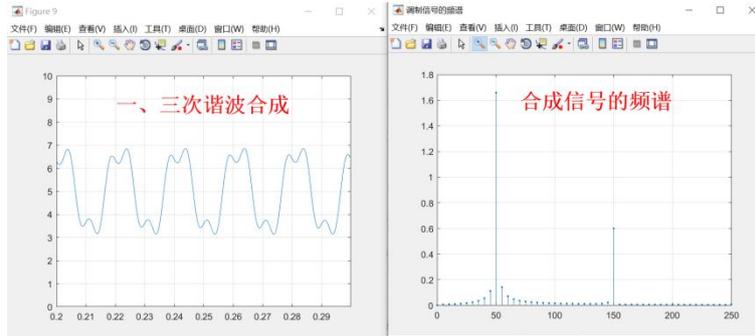


图 1.16.28 一、三次谐波合成信号及其频谱

(7) 对有限的谐波信号合成，并分析其合成信号的频谱。

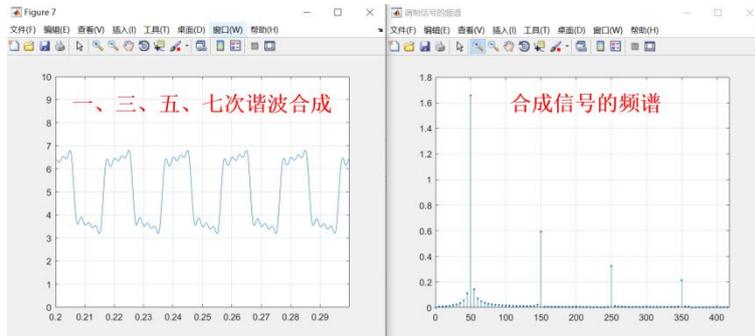


图 1.16.29 一、三、五、七次谐波合成信号及其频谱

## 1.17 周期信号的合成与分解综合实验

### 1.17.1 实验分析

#### 1.实验目的

- (1) 了解周期方波信号、三角波信号及锯齿波信号的傅里叶展级数表达式;
- (2) 进一步掌握周期信号分解与合成的原理和方法;
- (3) 熟练使用 MATLAB 软件进行周期信号分解与合成的仿真。

#### 2.实验任务

(1) 将不同频率的方波信号通过各带通滤波器, 分解出信号的谐波分量, 观察分解的谐波分量, 与 50Hz 方波的谐波分量做比较。

(2) 将常见 50Hz 的方波、三角波及锯齿波分别通过带通滤波器, 分解出各周期信号的谐波分量, 分析各周期信号的谐波分量组成。再将谐波分量通过加法器, 合成周期信号, 观察信号的失真度。

### 1.17.2 实验原理

#### 1.周期信号的傅里叶级数表达式

##### (1) 方波

周期三角波的波形如图 1.17.1 所示。

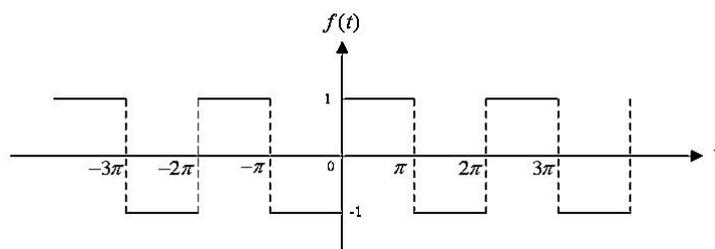


图 1.17.1 方波

$$f(t) = \frac{4}{\pi} \left[ \sin \Omega t + \frac{1}{3} \sin 3\Omega t + \dots + \frac{1}{n} \sin n\Omega t \right], n = 1, 3, 5 \dots$$

##### (2) 三角波

周期三角波的波形如图 1.17.2 所示, 可以看出,  $f(t)$  是级数且半波对称和四分之一波对称函数, 因此  $f(t)$  是奇函数, 故对所有  $n$  有  $a_n = 0$ , 又因该函数是半波对称的, 所以当  $n$  取偶数时,  $b_n = 0$ , 并且  $f(t)$  是四分之一波对称函数, 所以当  $n$  取奇数时有:

$$b_n = \frac{8}{T} \int_0^{T/4} f(t) \sin n\Omega t dt$$

在  $0 \leq t \leq \frac{T}{4}$  区间内,  $f(t)$  为:

$$f(t) = \frac{4}{T}t$$

因此:

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{8}{T} \int_0^{T/4} f(t) \sin n\Omega t dt \\ &= \frac{32}{T^2} \left( \frac{\sin n\Omega t}{n^2\Omega^2} - \frac{t \cos n\Omega t}{n\Omega} \right) \Big|_0^{T/4} \\ &= \frac{8}{n^2\Omega^2} \sin \frac{n\pi}{2}, n = 1, 3, 5, \dots \end{aligned}$$

所以,  $f(t)$  的傅里叶展开式为:

$$f(t) = \frac{8}{\pi^2} \left[ \sin \Omega t - \frac{1}{9} \sin 3\Omega t + \frac{1}{25} \sin 5\Omega t - \frac{1}{49} \sin 7\Omega t + \dots + \frac{1}{n^2} \sin n\Omega t \right], n \text{ 为奇数}$$

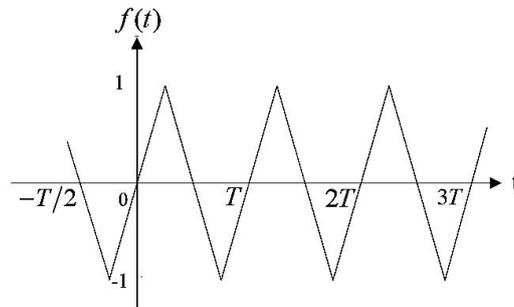


图 1.17.2 周期三角波

### (3) 锯齿波

锯齿波信号的波形如图 1.17.3 图 1.17.2 所示, 可以看出信号是奇函数, 因此根据对称性有  $a_n = 0$ , 而系数  $b_n$  为:

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} \frac{2E}{T} t \sin n\Omega t dt$$

所以,  $f(t)$  的傅里叶展开式为:

$$f(t) = 2E \left[ \sin \Omega t - \frac{1}{2} \sin 2\Omega t + \frac{1}{3} \sin 3\Omega t - \dots - \frac{1}{n} \sin n\Omega t \right], n = 1, 2, 3, \dots$$

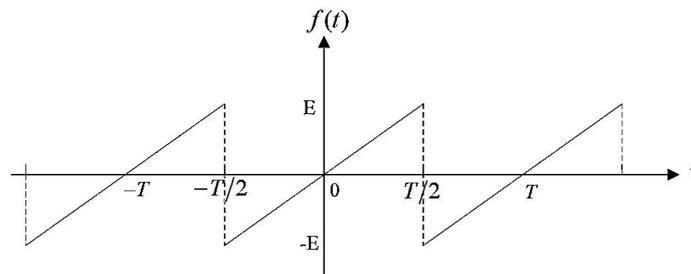


图 1.17.3 锯齿波

## 2. 周期信号分解与合成

周期信号分解与合成的原理框图如图 1.17.4 所示。

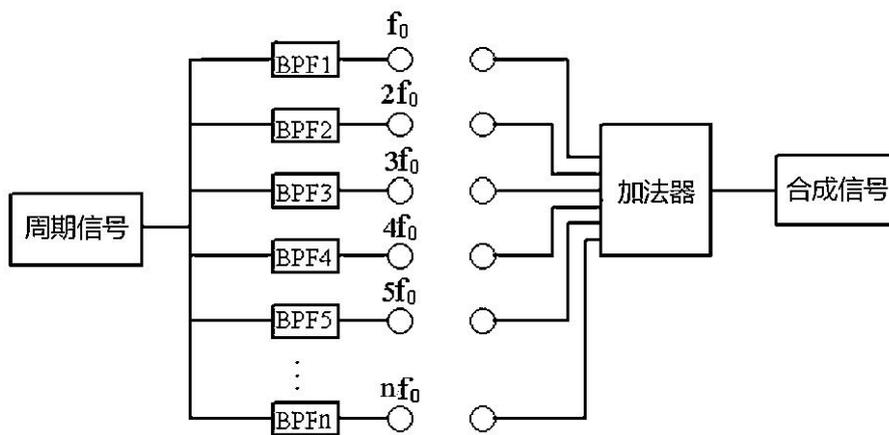


图 1.17.4 周期信号分解与合成框图

锯齿波信号的分解和有限次谐波分量的合成波形图如图 1.17.5 所示。

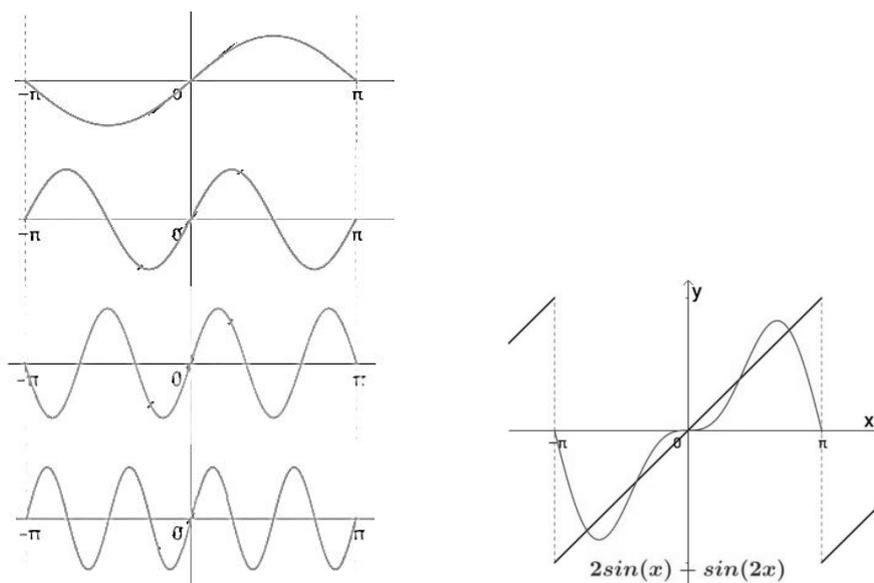


图 1.17.5 锯齿波的谐波分量及有限次谐波分量的合成

### 1.17.3 实验设备

1. 信号与系统实验平台(含信号源单元) 1 台。
2. 实验导线若干根。
3. USB3.0 数据线 1 根。
4. 双踪示波器 1 台。
5. 安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

#### 1. 17.4 实验步骤

1. 使用信号源输出频率为 50Hz、 $V_{pp}$  为 3V 的周期三角波信号和周期锯齿波信号，重复实验十六“周期方波信号的合成与分解”的步骤。

2. 三角波信号的一次谐波分量的幅值为  $\frac{8}{\pi^2} \cdot V_{pp}$ ，三次谐波分量的幅值为  $\frac{8}{\pi^2} \cdot V_{pp} \cdot \frac{1}{9}$ ，五次谐波分量的幅值为  $\frac{8}{\pi^2} \cdot V_{pp} \cdot \frac{1}{25}$ ，七次谐波分量的幅值为  $\frac{8}{\pi^2} \cdot V_{pp} \cdot \frac{1}{49}$ ，九次谐波分量的幅值为  $\frac{8}{\pi^2} \cdot V_{pp} \cdot \frac{1}{81}$ 。

3. 锯齿波信号的一次谐波分量的幅值为  $2 \cdot V_{pp}$ ，二次谐波分量的幅值为  $2 \cdot V_{pp} \cdot \frac{1}{2}$ ，三次谐波分量的幅值为  $2 \cdot V_{pp} \cdot \frac{1}{2}$ ，七次谐波分量的幅值为  $\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{49}$ ，九次谐波分量的幅值为  $\frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{81}$ 。

## 1.18 RC 振荡器特性测量实验

### 1.18.1 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。

### 1.18.2 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, 使电路获得一定的幅值得输出量;
- (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: 确定电路得振荡频率, 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与元件来命名, 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 1.18.1 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。

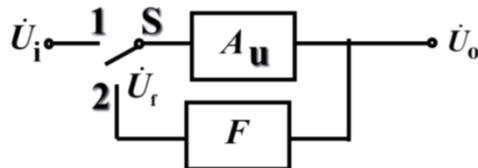


图 1.18.1 放大电路

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 1.18.2 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。

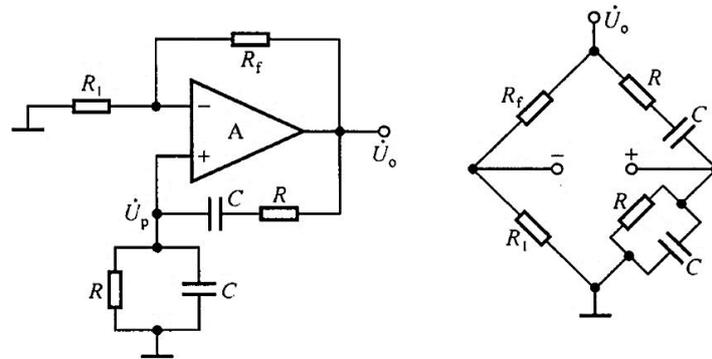


图 1.18.2 RC桥式振荡电路

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 $R_1$ 上的电流正大,  $R_1$ 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 1.18.3 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:

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

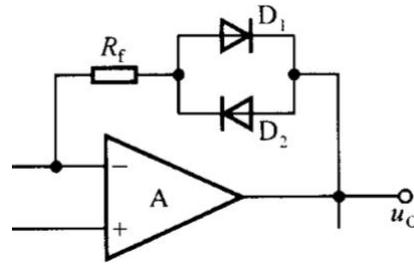


图 1.18.3 利用二极管作为非线性环节

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。

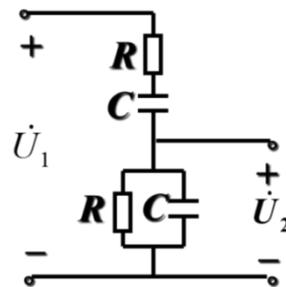


图 1.18.4 RC 串并联选频网络

该选频网络的幅频特性与相频特性如图 1.18.5 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：

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

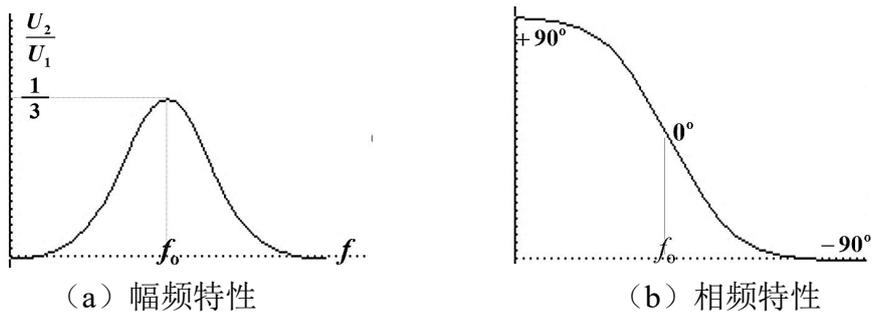


图 1.18.5 幅频特性与相频特性

电路振荡过程中 $u_2$ 与 $u_1$ 波形如图 1.18.6 所示, 稳定振荡后 $u_2$ 与 $u_1$ 波形如图 1.18.7 所示。

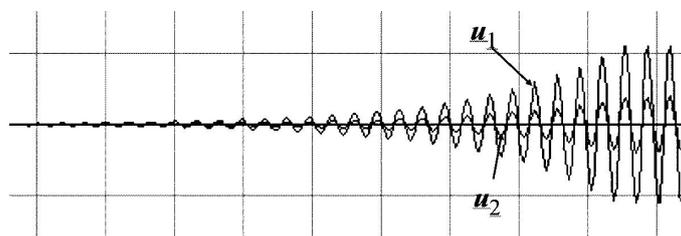


图 1.18.6 起振过程 $u_2$ 与 $u_1$ 波形

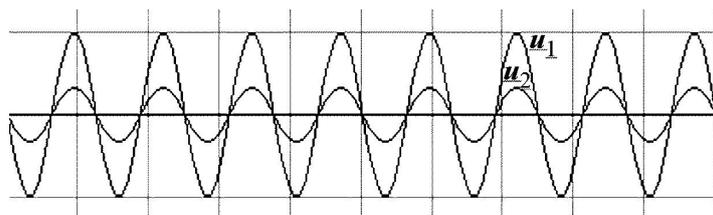


图 1.18.7 振荡稳定后 $u_2$ 与 $u_1$ 波形

### 1.18.3 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.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1.18.4 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。

## 1.19 频分复用(FDM)实验

### 1.19.1 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。

### 1.19.2 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,因而在接受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。

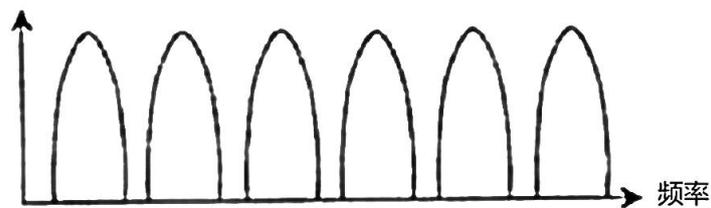


图 1.19.1 频分复用信道划分示意图

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得信号。
- (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 1.19.2 和图 1.19.3 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。

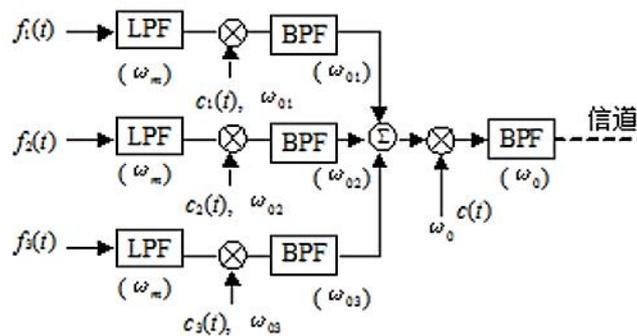


图 1.19.2 频分复用发射端原理示意图

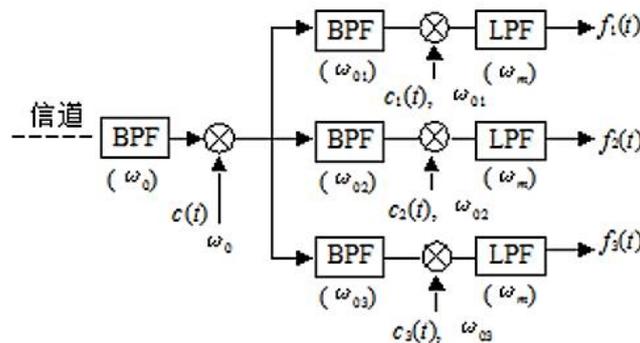


图 1.19.3 频分复用接收端原理示意图

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 1.19.4 所示。

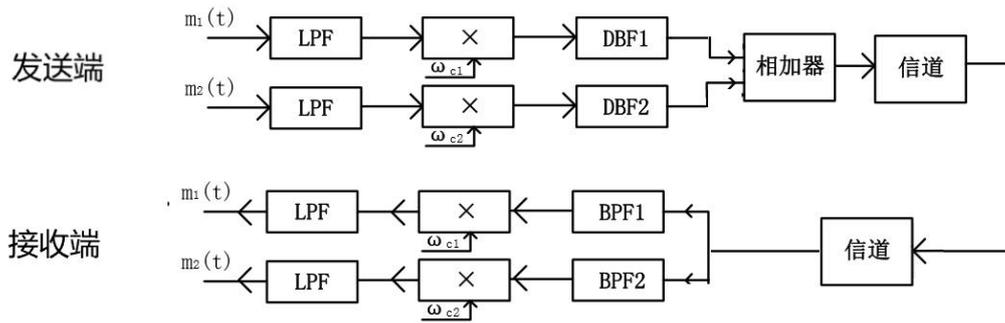


图 1.19.4 频分复用系统组成框图

### 1. 19.3 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.USB3.0 数据线 1 根。
- 4.双踪示波器 1 台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1. 19.4 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 2.5V 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 2.5V 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。
  - (4) 使用双踪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) 使用双踪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) 使用双踪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) 使用双踪示波器的通道 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) 使用双踪示波器的通道 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) 使用双踪示波器的通道 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) 使用双踪示波器的通道 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.使用 MATLAB 软件模拟仿真信号的频分复用实验。

(1) 使用 MATLAB 软件编写仿真两路低频且频率不同的正弦波信号, 做两路调制信号。

(2) 使用 MATLAB 软件编写仿真 1 路频率为 500KHz 信号和 1 路频率为 125KHz 的正弦波信号, 做两路载波信号。

(3) 使用 MATLAB 软件编写仿真两路调制信号分别与两路载波信号做 AM 调制, 并输出调制后信号。

(4) 使用 MATLAB 软件编写仿真将两路调制后信号叠加, 实现频率复用效果。

(5) 使用 MATLAB 软件编写仿真两路带通滤波器, 并将复用信号通过滤波器得到对应还原的调制后信号, 滤波器分别为中心频点为 500KHz 和 125KHz。

(6) 使用 MATLAB 软件编写仿真解调还原调制信号, 实现将载波信号再次与对应的调制后信号相乘, 后经过低通滤波器还原调制信号。

(7) 编写完成后的频分复用实验 gui 界面。

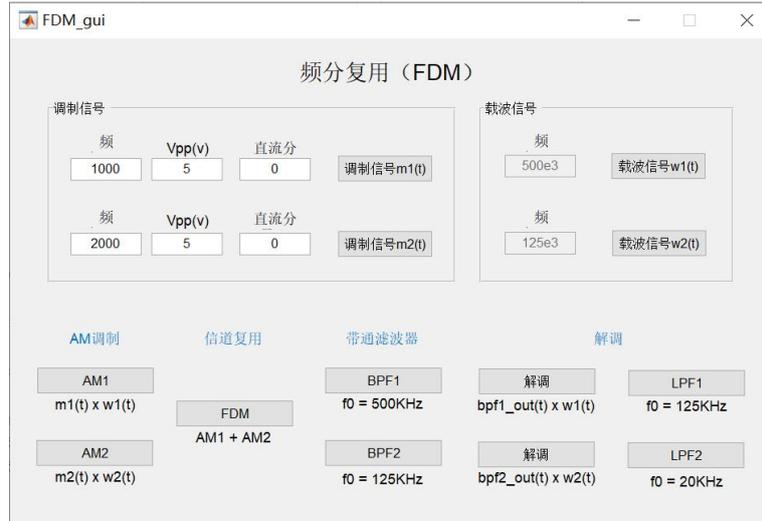


图 1.19.5 频分复用的 gui 界面

## 1. 19.5 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)。

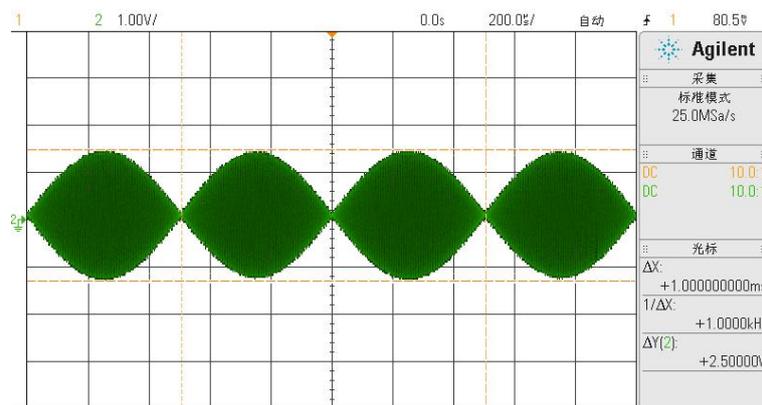


图 1.19.6 AM1 信号

(2) 乘法器 2 输出信号 (AM2 接口处信号)。

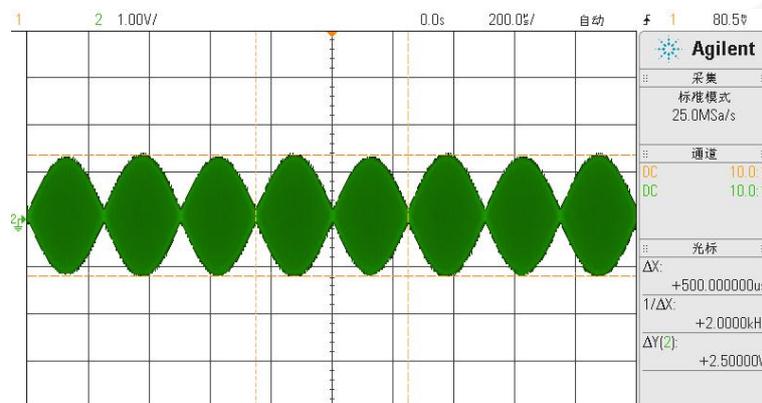


图 1.19.7 AM2 信号

(3) 加法器输出信号 (ADD 接口处信号)。

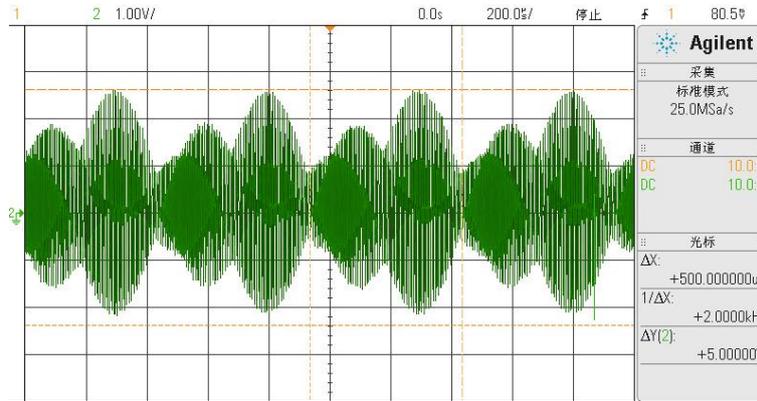


图 1.19.8 频率复用信号

(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。

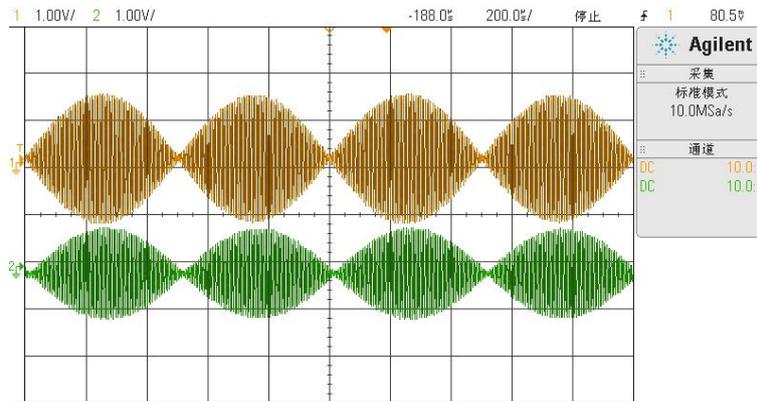


图 1.19.9 AM1 信号与 B\_OUT1 信号

(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。

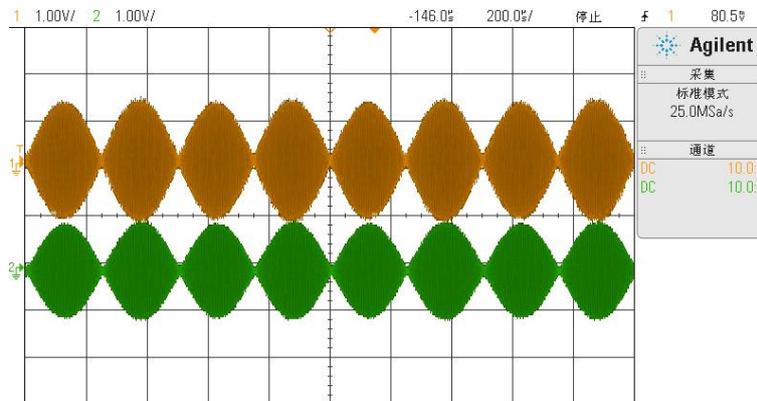


图 1.19.10 AM2 信号与 B\_OUT2 信号

(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。

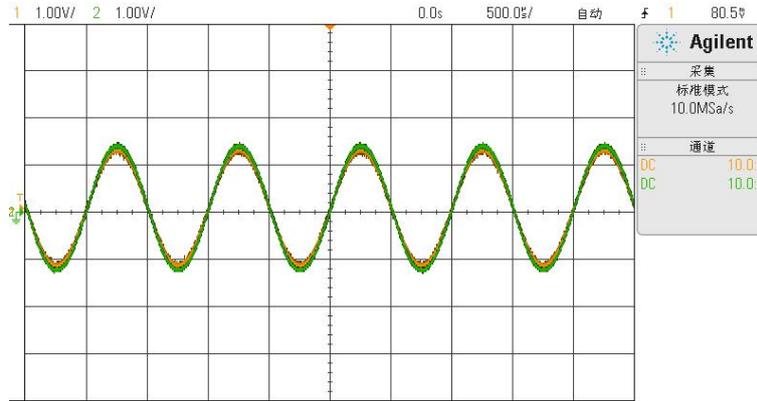


图 1.19.11 S-IN1 信号与 S-OUT1 信号

(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。

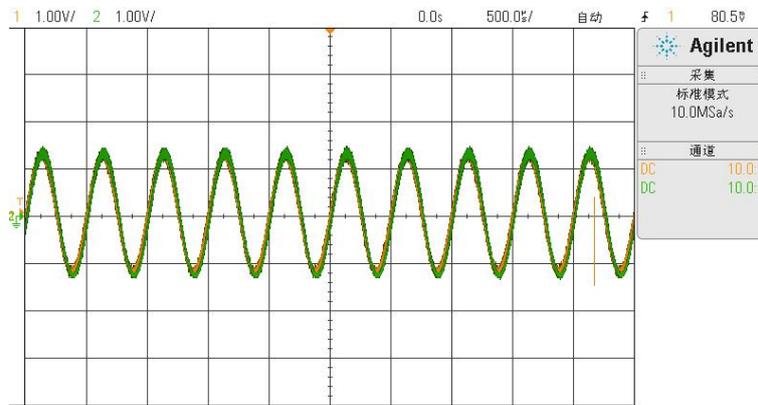
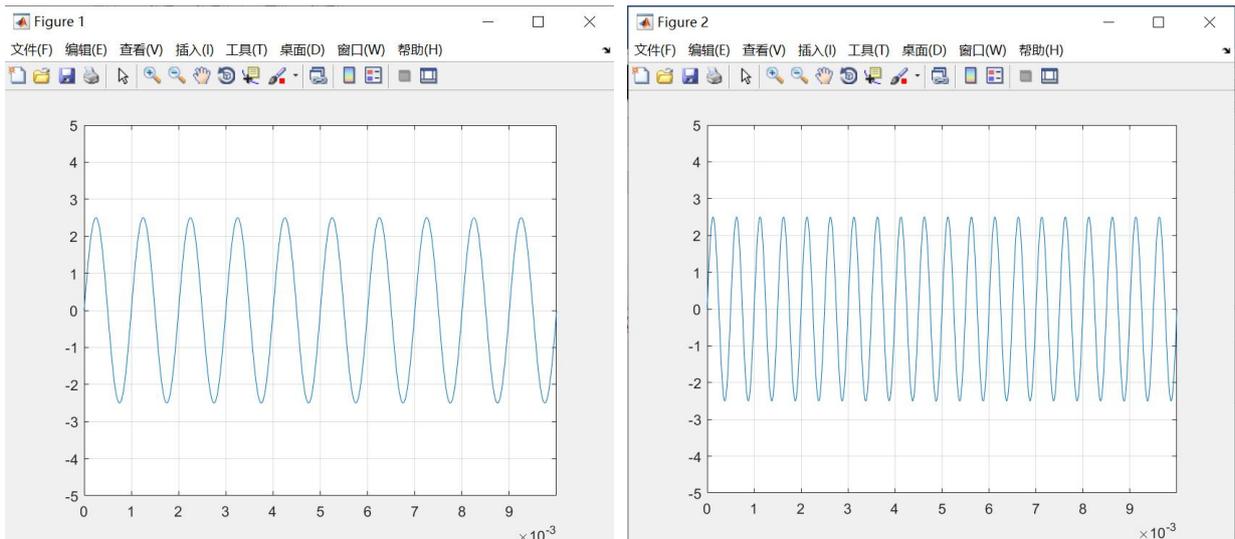
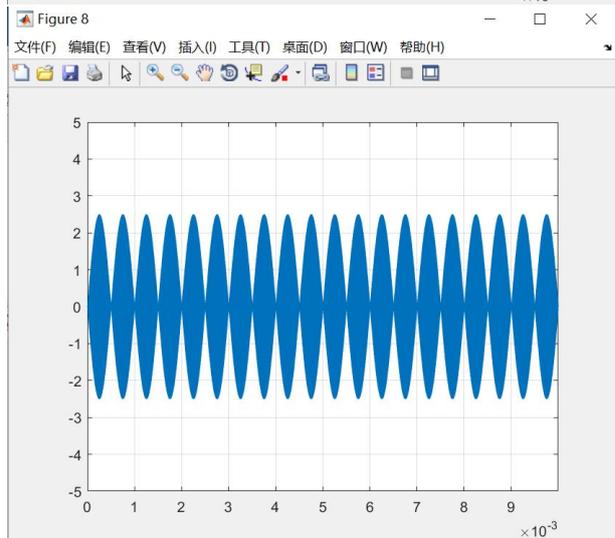
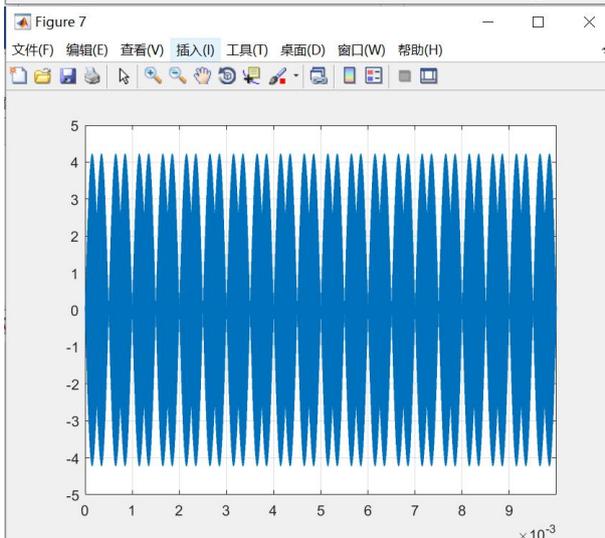
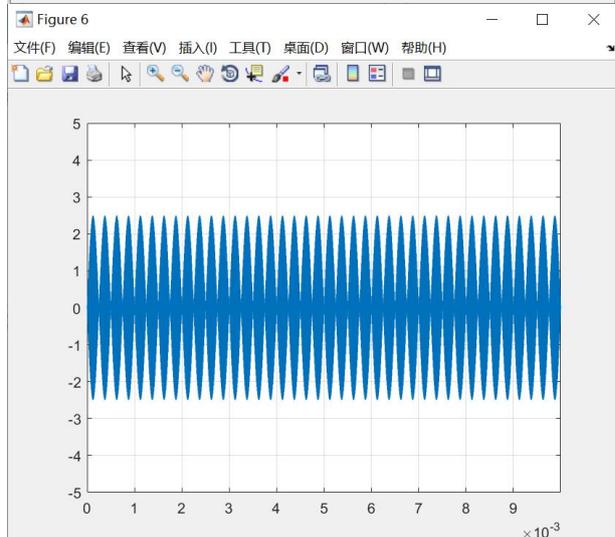
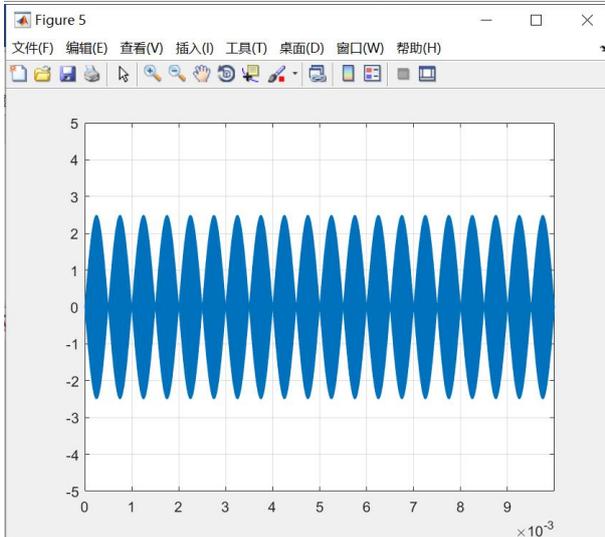
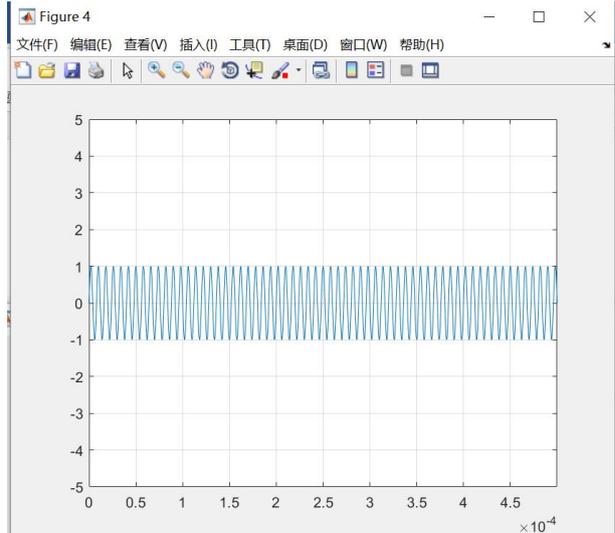
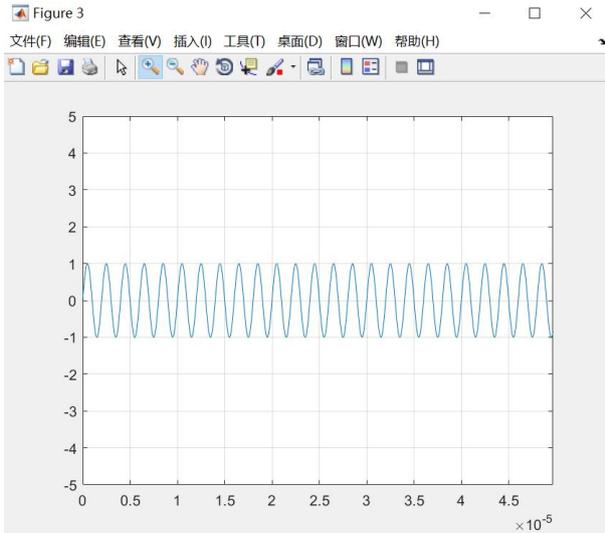
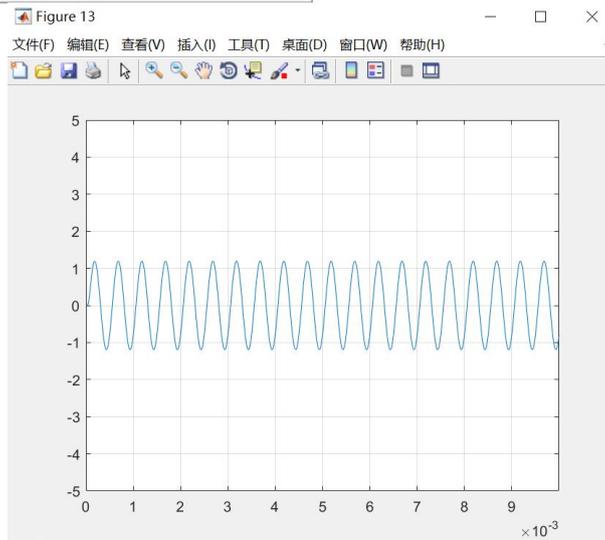
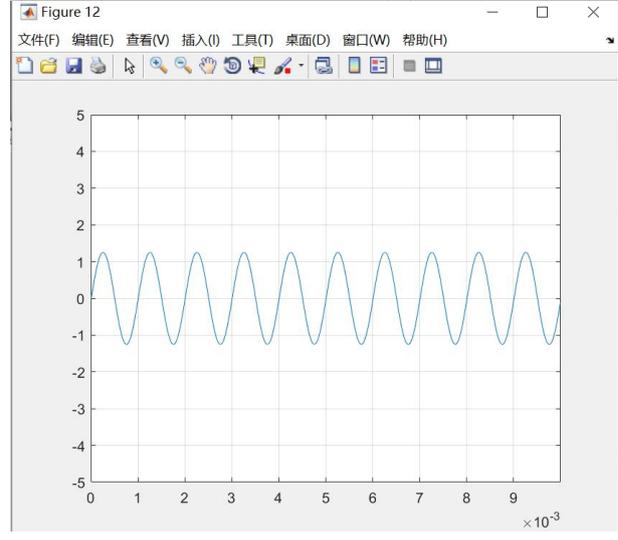
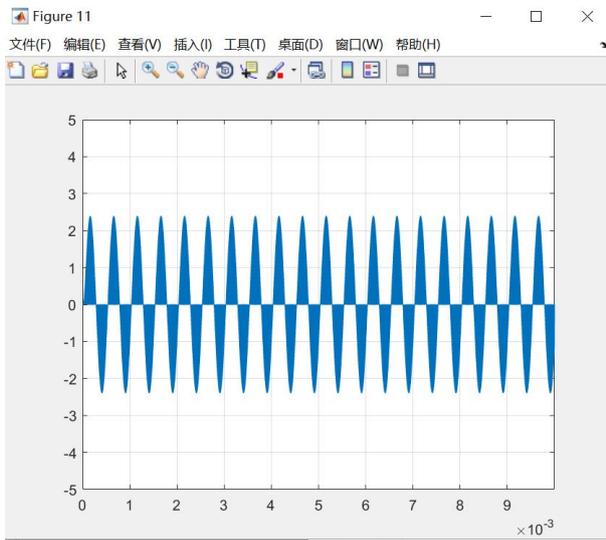
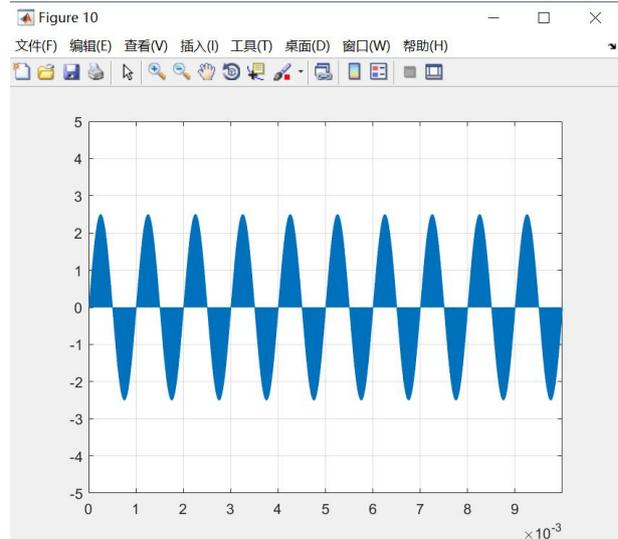
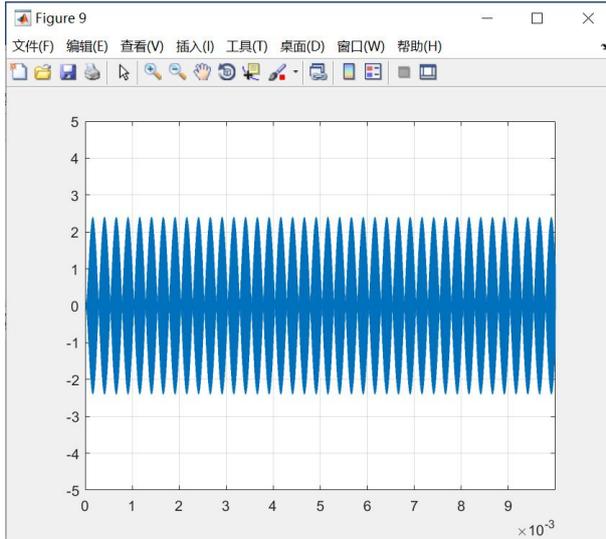


图 1.19.12 S-IN2 信号与 S-OUT2 信号

## 2. 使用 MATLAB 软件模拟仿真信号的频分复用实验。







## 1.20 线性时不变系统的特性研究实验

### 1.20.1 实验分析

#### 1.实验目的

- (1) 了解线性时不变系统在典型激励信号下的响应及其特征;
- (2) 掌握线性时不变系统的叠加性、均匀性、时不变等特性;
- (3) 学会使用示波器观察线性时不变系统的特性;
- (4) 学会验证线性时不变系统的性质。

#### 2.实验任务

- (1) 学习线性时不变系统的特性;
- (2) 构建线性时不变系统电路;
- (3) 使用示波器观察并记录线性时不变系统在典型激励信号下的响应及其特征。

### 1.20.2 实验原理

#### 1.线性时不变系统(LTI系统)

线性系统是根据系统输入和输出是否具有线性关系来定义,满足叠加原理的系统具有线性特性。即系统对两个激励信号 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ ,满足以下关系:

$$T[ax_1(n) + bx_2(n)] = aT[x_1(n)] + bT[x_2(n)]$$

式中 $a$ 、 $b$ 为任意常数。不满足此关系的为非线性系统。

还有可以根据组成系统的元件特性来定义是否为线性系统,由线性元件和独立电源组成的系统为线性系统。

线性时不变系统(简称LTI系统),就是系统的参数不随时间而变化,即不管输入信号作用的时间先后,输出信号响应的形状均相同,仅是从出现的时间不同。例如 $T[x(n)] = y[n]$ ,则 $T[x(n - n_0)] = y[n - n_0]$ ,表示序列 $x(n)$ 先移位后进行变换与它先进行变换后再移位是等效的。

线性时不变系统,即同时具有线性和时不变性的系统。线性时不变系统具有线性、时不变性、微积分性、因果性等性质。

## 2.线性

线性包含叠加性与均匀(齐次)性。

### (1) 叠加性

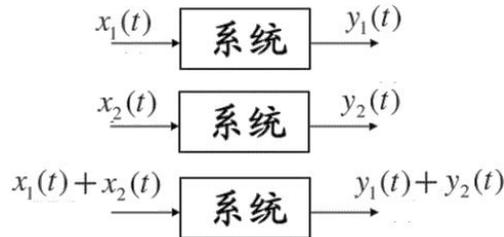


图 1.20.1 叠加性

图 1.20.1 中的系统为线性时不变系统,若激励信号为 $x_1(t)$ ,则系统的响应信号为 $y_1(t)$ ,若激励信号为 $x_2(t)$ ,则系统的响应信号为 $y_2(t)$ ,则当激励信号 $x(t) = x_1(t) + x_2(t)$ 时,则响应信号为 $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ ,该特性为系统的叠加性。

### (2) 均匀(齐次)性

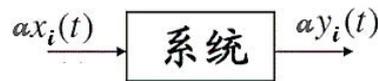


图 1.20.2 均匀性

图 1.20.2 中的系统为线性时不变系统,若激励信号为 $ax_i(t)$ ,则系统的响应信号为 $ay_i(t)$ ,该特性为系统的均匀性。

同时满足叠加性与均匀性的系统称为线性系统。

例如,设系统的输入与输出之间的关系为: $y(t) = tx(t)$ ,那么 $y_1(t) = tx_1(t)$ , $y_2(t) = tx_2(t)$ 。

若

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t)$$

则

$$\begin{aligned} y(t) &= tx(t) \\ &= t[x_1(t) + x_2(t)] \\ &= tx_1(t) + tx_2(t) \\ &= y_1(t) + y_2(t) \end{aligned}$$

所以,该系统满足叠加性。

若

$$x(t) = ax_1(t)$$

则

$$\begin{aligned} y(t) &= t x(t) \\ &= atx_1(t) \\ &= ay_1(t) \end{aligned}$$

所以系统满足均匀性，该系统为线性系统。根据叠加性和均匀性，线性可表示为：

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{k=1}^N a_k x_k(t) \\ y(t) = \sum_{k=1}^N a_k y_k(t) \end{cases}$$

其系统框图如图 1.20.3 所示。



图 1.20.3 线性系统

根据线性的特性，可得到一个结论：在全部时间上系统的输入为 0，输出必然为零，即零输入产生零输出。

### 3. 时不变性

对于时不变系统，由于系统参数本身不随时间改变，因此，在同样起始状态之下，系统响应与激励施加于系统的时刻无关。即：当  $x_1(t)$ 、 $y_1(t)$  为一对激励与响应时，则  $x_1(t - t_0)$ 、 $y_1(t - t_0)$  也为一对激励与响应。

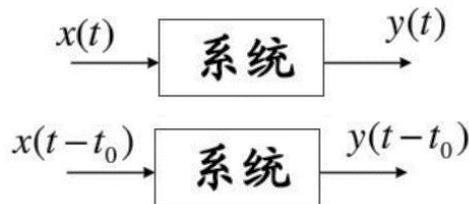


图 1.20.4 时不变性 (1)

设系统的输入与输出之间的关系为： $y(t) = ax(t) + b$ ， $y_1(t) = ax(t - t_0) + b = y(t - t_0)$ ，该特性为系统的时不变性。例如： $y(t) = x(2t)$ 。

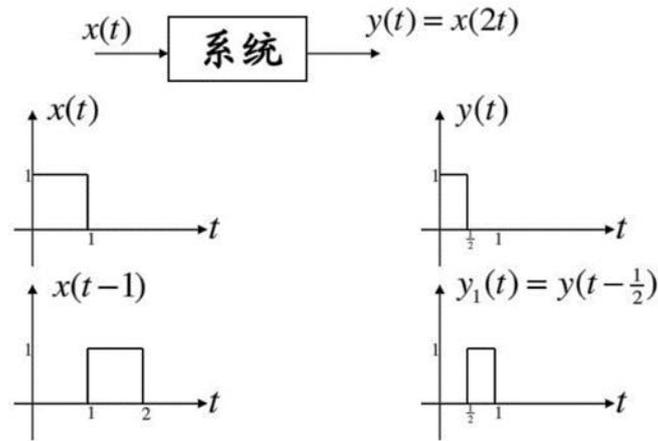


图 1.20.5 时不变性 (2)

综合线性与时不变性，线性时不变系统可表示为：

$$\begin{cases} x(t) = \sum_{k=1}^N a_k x_k(t - t_k) \\ y(t) = \sum_{k=1}^N a_k y_k(t - t_k) \end{cases}$$

例如，LTI 系统的输入  $x(t)$  与输出  $y(t)$  的关系如中图 1.20.6 所示，根据线性和时不变性，则当输入分别为  $x_1(t)$ 、 $x_2(t)$  时，对应的输出为  $y_1(t)$ 、 $y_2(t)$ ，如图 1.20.6 中所示。

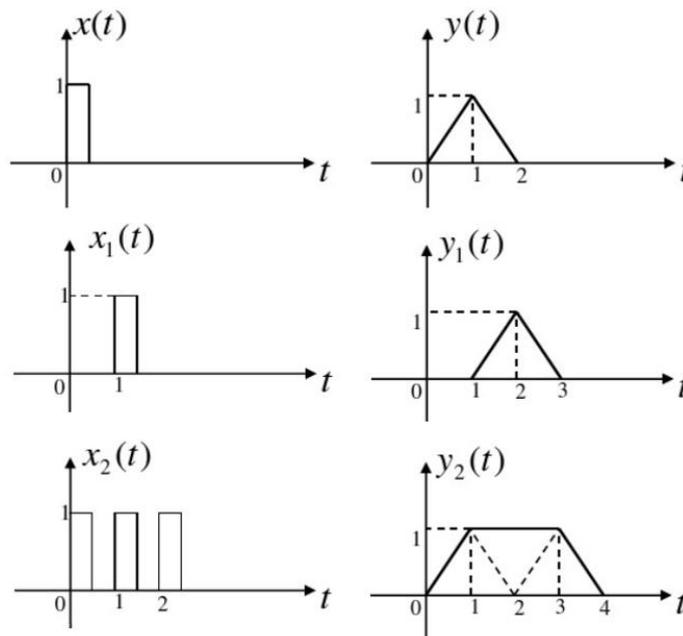


图 1.20.6 LTI 系统

#### 4.微积分性

##### (1) 微分性

对于线性时不变系统,当 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为一对激励与响应时,则 $\frac{dx(t)}{dt}$ 和 $\frac{dy(t)}{dt}$ 也为一对激励和响应。

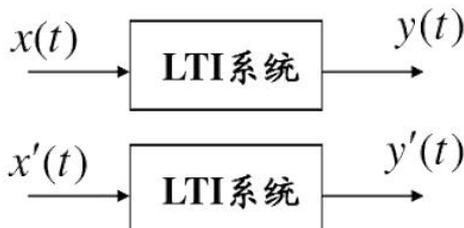


图 1.20.7 微分性

##### (2) 积分性

对于线性时不变系统,当 $x(t)$ 和 $y(t)$ 为一对激励与响应时,则 $\int_{-\infty}^t x(\tau)d\tau$ 和 $\int_{-\infty}^t y(\tau)d\tau$ 也为一对激励和响应。

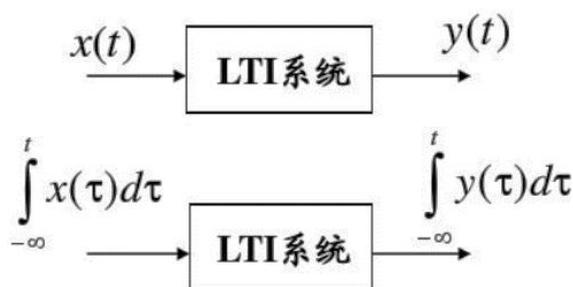


图 1.20.8 积分性

#### 4.因果性

因果系统是指系统在时刻 $t_0$ 的响应只与 $t = t_0$ 和 $t < t_0$ 时刻的输入有关。即激励是产生响应的原因,响应是激励引起的后果,这种特性称为因果性。通常由电阻器、电感线圈、电容器构成的实际物理系统都是因果系统。

#### 5.实验所用线性时不变系统

本实验所使用的线性时不变系统原理图如图 1.20.9 所示。实验中将使用到两个一样的线性时不变系统。

系统的系统微分方程为:

$$C \cdot R \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = x(t)$$

其系统频率响应函数为:

$$\frac{1}{j\omega RC + 1}$$

可见此电路的响应特性仅由 $C$ 、 $R$ 值决定。因此只要在两组这样的电路中,适当选择参数使得 $C$ 、 $R$ 值相同,在本实验中,这两电路系统就可看作是等价的。

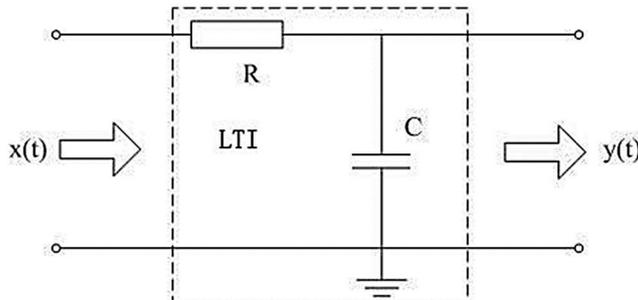


图 1.20.9 线性时不变系统原理图

### 1. 20. 3 实验设备

- 1.信号与系统实验平台(含信号源单元、扩展模块、基本运算单元)1台。
- 2.实验导线若干。
- 3.USB3.0 数据线1根。
- 4.双踪示波器1台。
- 5.安装有 VC2017、Cyperss、MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1. 20. 4 实验步骤

1.使用实验箱的扩展模块搭建两个如图 1.20.9 所示的线性时不变系统,系统 1 的电路参数为: $R = 10K\Omega$ 、 $C = 1\mu F$ ,系统 2 的电路参数为: $R = 100K\Omega$ 、 $C = 0.1\mu F$ 。

2.线性时不变系统的线性特性研究。

(1) 叠加性。

1) 从信号源选择一路频率为 100Hz、幅值 2V 的正弦波信号做系统 1 的激励信号输入系统 1,选择一路频率为 50Hz、幅值为 5V 的方波信号做系统 2 的激励信号输入系统 2。

2) 使用示波器通道 1 观察并记录系统 1 的输出响应信号,示波器通道 2 观察并记录系统 2 的输出响应信号。

3) 将两个系统的响应信号相加。①将两个系统的响应信号分别输入示波器的通道 1 和通道 2,使用示波器的数学运算功能将两路响应信号相加,观察叠加响应信号;②将

两个系统的响应信号分别输入电压跟随电路,将经过电压跟随电路的两路信号输入基本运算单元的加法器电路中,使用示波器观察输出叠加响应信号。

4)将两路激励信号同时输入系统1或系统2,用示波器观察并记录其输出的叠加响应信号,与上一步骤结果进行比较分析。

(2)均匀性。

1)从信号源选择一路频率为100Hz、幅值2V的正弦波信号输入基本运算单元中的同相比例放大电路中,用示波器观察并记录其输出响应信号波形。

2)将输出的响应信号做激励信号输入系统1或系统2,用示波器观察并记录系统的输出响应信号波形,将响应信号与激励信号进行比较分析。

2.线性时不变系统的时不变特性研究。

(1)从信号源选择一路频率为50Hz、幅值2V、占空比较小(选取占空比为5%)的方波信号,近似一系列的冲击串,将方波信号输入系统1或是系统2。

(2)使用示波器通道1观察系统输入信号,示波器通道2观察系统输出响应信号。

(3)调节方波的频率,观察不同延时的输入冲击信号与输出响应信号的延时关系。

3.线性时不变系统的微分特性观察

(1)信号源选择输出一路方波信号,将其输入系统1中。

(2)示波器的通道1观察输入信号,示波器通道2观察系统输出响应信号。

(3)将方波信号通过基本运算单元的积分器,其输出作为激励输入到系统2,再将响应通过通道2输入到示波器。

(4)观察并记录这两个响应信号的波形。

## 1.21 信号卷积积分运算实验

### 1.21.1 实验分析

#### 1.实验目的

- (1) 理解卷积的概念及物理意义;
- (2) 掌握卷积运算的图解方法;
- (3) 学会使用 MATLAB 软件做卷积积分运算。

#### 2.实验任务

使用 MATLAB 进行信号卷积积分运算,验证卷积积分过程及常用信号的卷积积分。

### 1.21.2 实验原理

#### 1.卷积积分

设有两个任意的时间函数,例如 $f(t) = U(t)$ 和 $h(t) = Ae^{-at}U(t)$  ( $a$ 为大于零的是常数),其波形分别如图 1.21.1 (a)、(b) 所示,利用图解法进行如下五个步骤的运算,从而引出卷积积分的定义。

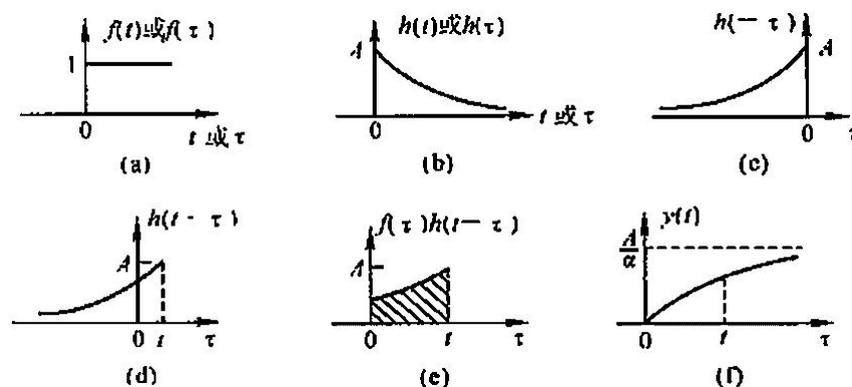


图 1.21.1 卷积积分图解

(1) 换元: 将函数 $f(t)$ 、 $h(t)$ 中的自变量 $t$ 改变为 $\tau$ ,从而得到 $f(\tau)$ 、 $h(\tau)$ ,这并不影响函数的图形,因为函数的性质和图形与自变量的字母符号无关,故其波形仍如图 1.21.1 (a)、(b) 所示。

(2) 反转(反折): 将函数 $h(\tau)$ 以纵坐标轴折叠,从而得到折叠信号 $h(-\tau)$ ,如图 1.21.1 (c) 所示。

(3) 平移: 将折叠信号 $h(-\tau)$ 沿 $\tau$ 轴平移 $t$ , $t$ 为参变量,从而得到平移信号 $h(-(\tau - t)) = h(t - \tau)$ ,如图 1.21.1 (d) 所示。 $t > 0$ 时为向右平移, $t < 0$ 时为向左平移。

(4) 相乘: 将 $f(\tau)$ 与 $h(t - \tau)$ 相乘,从而得到相乘信号 $f(\tau)h(t - \tau)$ ,其波形如图

1.21.1 (e) 所示。

(5) 求积分：将函数 $f(\tau)h(t - \tau)$ 在区间 $(-\infty, \infty)$ 上积分得：

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t - \tau) d\tau$$

由于积分变量为 $\tau$ ，其积分结果必为参变量 $t$ 得函数，故用 $y(t)$ 表示。该积分就是相乘函数 $f(\tau)h(t - \tau)$ 曲线下面积（图 1.21.1 (e) 中画线的部分）。上式所表述的内容即称为函数 $f(t)$ 和 $h(t)$ 的卷积积分，用符号“\*”表示，即

$$y(t) = f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t - \tau) d\tau$$

读作 $f(t)$ 与 $h(t)$ 的卷积积分，简称卷积。卷积的重要的物理意义是：一个函数在另一个函数上的加权叠加，本质是两个序列/函数的平移，加权叠加。

对于线性时不变系统，如果知道该系统的单位响应，那么将单位响应和输入信号求卷积，就相当于把输入信号的各个时间点的单位响应 加权叠加，就直接得到了输出信号。

计算卷积积分的过程框图说明如图 1.21.2 所示。

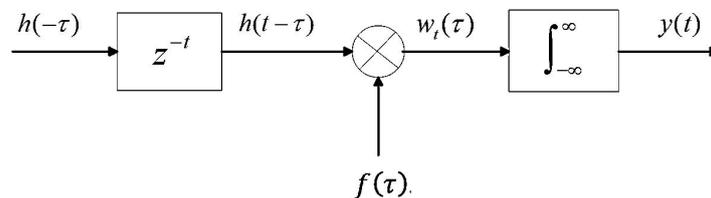


图 1.21.2 卷积积分计算过程

## 2.卷积积分的性质

卷积积分 $y(t) = f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t - \tau) d\tau$ 具有一些重要的性质。其中最常用的性质有交换律、结合律及分配律。

### (1) 交换律

函数 $f(t)$ 和 $h(t)$ 的卷积积分表达式作 $v = t - \tau$ 的变量代换，可以得到卷积积分的另一种表示形式：

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - v)h(v) dv$$

由此说明卷积积分满足交换律。如果用变量 $\tau$ 替换上式积分中的 $v$ ，则卷积积分还可表示为：

$$y(t) = f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} f(t - \tau)h(\tau) d\tau = h(t) * f(t)$$

可以看出卷积积分关于输入信号 $f(t)$ 和系统的单位冲激响应 $h(t)$ 是对称的, 这种对称性说明卷积积分满足交换律, 即

$$y(t) = f(t) * h(t) = h(t) * f(t)$$

卷积积分的对称性用框图说明如图 1.21.3 表示。

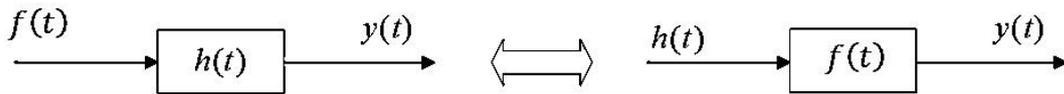


图 1.21.3 卷积积分的对称性

若系统的激励为单位冲激信号, 即当 $f(t) = \delta(t)$ 时,  $y(t) = \delta(t) * h(t)$ , 根据定义, 系统的输出等于冲激响应 $h(t)$ :

$$y(t) = \delta(t) * h(t) = h(t)$$

这个性质与 $h(t)$ 的形式无关。因此, 任意函数 $f(t)$ 与单位冲激函数卷积积分的结果仍然是函数 $f(t)$ 本身。利用系统的时不变特性, 上式可进一步表示为:

$$y(t - t_0) = \delta(t - t_0) * h(t) = h(t - t_0)$$

对于任意函数 $f(t)$ , 卷积积分的性质可描述为:

$$\delta(t) * f(t) = f(t)$$

和

$$\delta(t - t_0) * f(t) = f(t - t_0) * \delta(t) = f(t - t_0)$$

若设系统的输入信号为单位阶跃信号, 即 $f(t) = u(t)$ , 则系统 $u(t)$ 在作用下的响应就称之为单位阶跃响应, 用 $s(t)$ 表示。因此, 系统的单位阶跃响应 $s(t)$ 应为:

$$s(t) = u(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)h(t - \tau) d\tau$$

考虑到交换律, 有:

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau)h(t - \tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} u(t - \tau)h(\tau) d\tau$$

由于 $t - \tau < 0$  (或 $t < \tau$ ) 时,  $u(t - \tau) = 0$ , 故:

$$s(t) = \int_{-\infty}^t h(t - \tau) d\tau$$

由上式可以看出, 系统的单位阶跃响应 $s(t)$ 可以通过对单位冲激响应 $h(t)$ 的积分直接得到, 或者系统的单位冲激响应 $h(t)$ 是其单位阶跃响应 $s(t)$ 的一阶导数, 即:

$$h(t) = \frac{ds(t)}{dt}$$

(2) 结合律

结合律是指三个以上(含三个)函数的卷积积分与函数的卷积顺序无关。比如:

$$[f(t) * h_1(t)] * h_2(t) = f(t) * [h_1(t) * h_2(t)]$$

对于 LTI 级联系统而言, 改变子系统的级联顺序对系统的单位冲激响应(输入-输出特性)没有影响, 如图 1.21.4 所示。

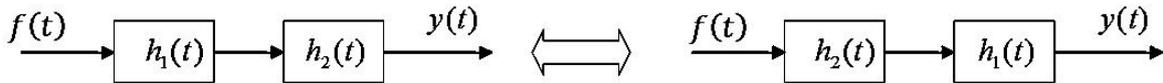


图 1.21.4 结合律与系统的级联

对于级联M个子系统的组合系统, 其组合系统的单位冲激响应为:

$$h(t) = h_1(t) * h_2(t) * \dots * h_M(t)$$

(3) 分配律

分配律是指三个以上(含三个)函数的组合卷积运算满足如下关系:

$$f(t) * [h_1(t) + h_2(t)] = f(t) * h_1(t) + f(t) * h_2(t)$$

分配律可用系统并联关系说明, 如图 1.21.5 所示。

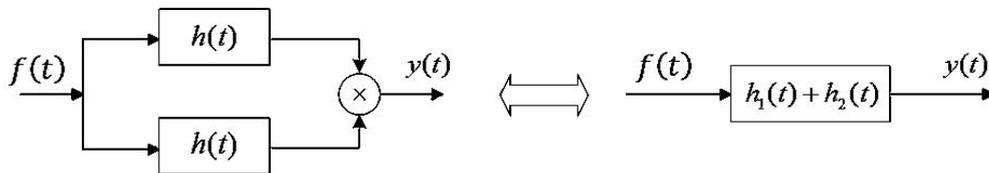


图 1.21.5 分配律与系统的并联

对于 LTI 并联系统而言, 并联M个子系统的组合系统, 其组合系统的单位冲激响应为各个子系统单位冲激响应之和, 即

$$h(t) = h_1(t) + h_2(t) + \dots + h_M(t) = \sum_{i=1}^M h_i(t)$$

3.常用信号卷积积分表

表 1.21.1 常用信号卷积积分表

$x_1(t)$	$x_2(t)$	$x_1(t) * x_2(t)$
$u(t)$	$u(t)$	$r(t)$

$$e^{-at}u(t) \quad u(t) \quad \frac{1}{a}(1 - e^{-at})u(t)$$

$$e^{-at}u(t) \quad e^{-\beta t}u(t) \quad \frac{1}{\alpha - \beta}(e^{-\beta t} - e^{-\alpha t})u(t), \alpha \neq \beta$$

$$e^{-at}u(t) \quad e^{-at}u(t) \quad te^{-at}u(t)$$

$$r(t) \quad u(t) \quad \frac{1}{2}t^2u(t)$$

#### 4. MATLAB 卷积运算

信号的卷积运算有符号算法和数值算法，此处采用数值算法，需调用 MATLAB 的 `conv()` 函数近似计算信号的卷积积分。其调用方式为：

$$c = \text{conv}(a, b)$$

式中， $a$ 、 $b$  为待卷积的两个序列的向量表示， $c$  为卷积结果，向量  $c$  的长度为向量  $a$ 、 $b$  长度之和减 1，即  $\text{length}(c) = \text{length}(a) + \text{length}(b) - 1$ 。

如果对连续信号  $f(t)$  和  $h(t)$  进行等时间间隔  $\Delta$  均匀抽样，则  $f(t)$  和  $h(t)$  分别变为离散时间信号  $f(m\Delta)$  和  $h(m\Delta)$ 。其中， $m$  为整数，当  $\Delta$  足够小时，号  $f(m\Delta)$  和  $h(m\Delta)$  既为连续时间信号  $f(t)$  和  $h(t)$ 。因此连续时间信号卷积积分可表示为：

$$\begin{aligned} y(t) &= f(t) * h(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(\tau)h(t - \tau) d\tau \\ &= \lim_{\Delta \rightarrow 0} \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(m\Delta)h(t - m\Delta) \cdot \Delta \end{aligned}$$

如果只求当  $t = n\Delta$  ( $n$  为整数) 时， $y(t)$  的值  $y(n\Delta)$ ，则由上式可得：

$$y(n\Delta) = \Delta \sum_{m=-\infty}^{\infty} f(m\Delta)h[(n - m)\Delta]$$

当时间间隔足够小时， $y(n\Delta)$  就是  $f(t)$  的是数值近似。

### 1. 21. 3 实验设备

安装有 MATLAB 2017b 软件的 PC1 台。

### 1. 21. 4 实验步骤

1. 验证卷积积分计算过程

打开 MATLAB 软件，新建“.m”文件，复制粘贴以下代码，验证卷积积分定义过程。

```

1. % 验证卷积积分计算过程
2. syms t ft ht ht1 ht2 yt y tao;
3. ft = heaviside(t); % 阶跃信号 f(t)
4. ht = exp(-t).*heaviside(t); % 原始函数信号 h(t)
5. ht1 = exp(-(-t)).*heaviside(-t); % h(t)反转 h1(t)
6. ht2 = exp(t-2).*heaviside(-t+2); % h1(t)平移 h2(t)
7.
8. y = ft.*ht2; % 相乘
9. yt = 1-exp(-tao); % 积分，化简结果
10.
11. dt = 0.0001;
12. t = -4:dt:4;
13. tao = 0:dt:4;
14.
15. % 绘制卷积积分过程图
16. subplot(321);ezplot(ft,t);title('阶跃 f(t)');
17. axis([-4.2 4.2 -0.5 1.2]);grid on;
18.
19. subplot(322);ezplot(ht,t);title('原函数 h(t)');
20. axis([-4.2 4.2 -0.5 1.2]);grid on;
21.
22. subplot(323);ezplot(ht1,t);title('反转 h1(t)');
23. axis([-4.2 4.2 -0.5 1.2]);grid on;
24.
25. subplot(324);ezplot(ht2,t);title('平移 h2(t)');
26. axis([-4.2 4.2 -0.5 1.2]);grid on;
27.
28. subplot(325);ezplot(y,t);title('相乘 y');
29. axis([-4.2 4.2 -0.5 1.2]);grid on
30.
31. subplot(326);ezplot(yt,t);title('积分 y(t)');
32. axis([-4.2 4.2 -0.5 1.2]);grid on;
    
```

其中，“ft = heaviside(t);”表示信号 $f(t) = U(t)$ ，“ht = exp(-t).\*heaviside(t);”表示信号 $h(t) = Ae^{-at}U(t)$ ，其中取 $A = \alpha = 1$ 。

## 2.使用函数验证卷积积分

编写卷积积分函数验证卷积积分，与步骤1的实验结果做对比。

卷积积分参考代码:

(1) 调用函数进行信号卷积。

```

1. % 利用卷积函数计算卷积积分
2. dt = 0.001;
3. t = -2:dt:2;
4. % 定义信号 f(t)、h(t)
5. ft = 'heaviside(t)';
6. ht = 'exp(-t).*heaviside(t)';
7.
8. figure(1);
9. Conv_test(ft, 0, 2, ht, 0, 2); % ft 和 ht 卷积
    
```

其中,“ft = heaviside(t);”表示信号 $f(t) = U(t)$ ,“ht = exp(-t).\*heaviside(t);”表示信号 $h(t) = Ae^{-at}U(t)$ ,其中取 $A = \alpha = 1$ 。

(2) 函数“Conv\_test()”。

```

1. function x = Conv_test(F1, t1_s, t1_e, F2, t2_s, t2_e)
2. % 计算有限时间Δt的范围
3. t0 = min([t1_s, t2_s])-1;
4. t1 = max([t1_e, t2_e])+1 ;
5. dt = 0.005;
6. t = t0 : dt : t1;
7. L = length(t);
8. tp = [2*t(1) : dt : 2*t(L)];
9.
10. % f1(t)、f2(t)转换成语句
11. f1 = eval(F1); f2 = eval(F2); % eval()表示将字符串转换为语句
12.
13. % 计算个信号的最大最小值
14. y = dt*conv(f1,f2); % 信号卷积, conv()表示卷积
15. y_max = max(y);y_min = min(y);
16. dy = (y_max-y_min)/10;
17. f1_max = max(f1);f1_min = min(f1);
18. df1 = (f1_max-f1_min)/10;
19. f2_max = max(f2);f2_min = min(f2);
20. df2 = (f2_max-f2_min)/10;
21.
22. % 绘制信号波形图
23. subplot(3, 1, 1), plot(t, f1) ;
    
```

```

24. title('信号 f1(t)的波形', 'color', 'b');
25. axis([t(1) t(L) f1_min-df1 f1_max+df1]);grid on;
26.
27. subplot(3, 1, 2), plot(t, f2) ;
28. title('信号 f2(t)的波形', 'color', 'b');
29. axis([t(1) t(L) f2_min-df1 f2_max+df1]);grid on;
30.
31. subplot(3, 1, 3), plot(tp, y) ;
32. title('信号 f(t)=f1(t)*f2(t)的波形', 'color', 'b');
33. axis([t(1), t(L), y_min-dy, y_max+dy]);grid on;

```

3.编写 MATLAB 程序，验证常用信号的卷积积分表中信号卷积。

### 1.21.5 实验结果

1.实验步骤 1，验证卷积积分结果。

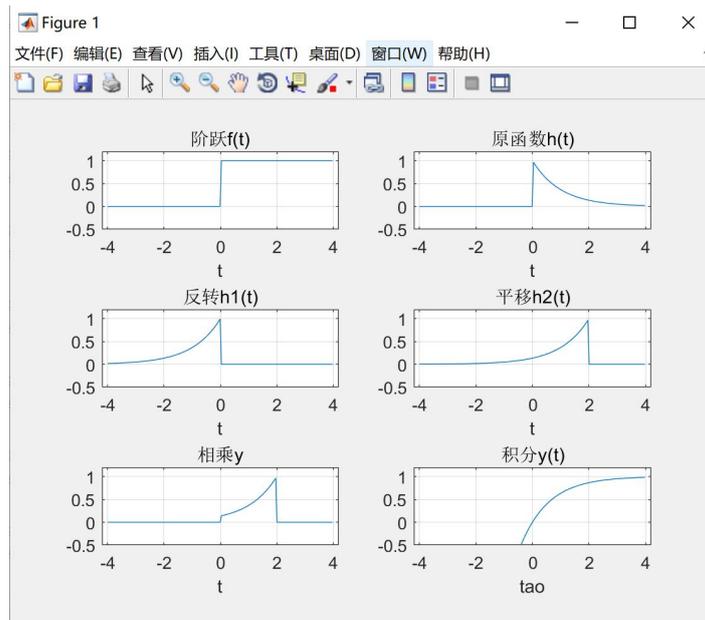


图 1.21.6 结果 1

2. 实验步骤 2, 验证卷积积分结果。

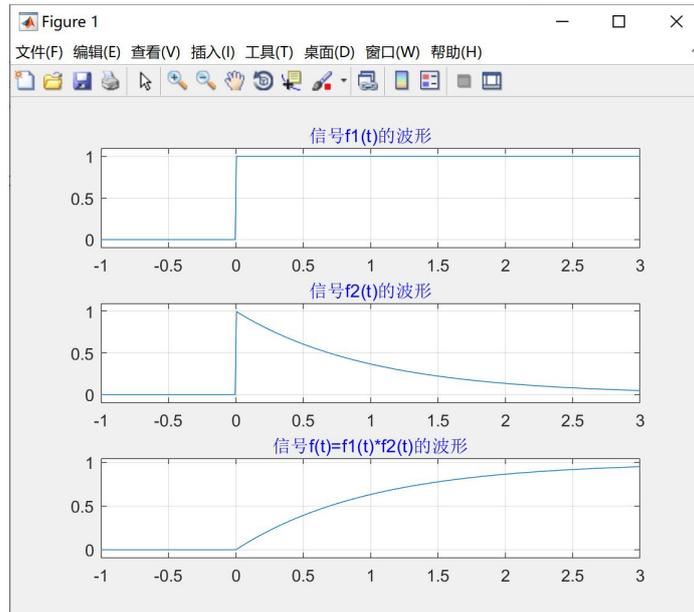


图 1.21.7 结果 2

对比图 1.21.6 和图 1.21.7, 两组卷积结果一致, 验证了函数conv()可求出f(t)和h(t)的卷积。