

3.1 无线电收发系统组装与调试

收音机是最常用的家用电器之一,也是一种典型的无线电收发系统,包含接收、放大、变频和检波等收发基本步骤。通过本次实验,我们不仅可以初步掌握焊接技术,而且可以在了解收音机的无线电收发基本工作原理的基础上,学会安装、调试、使用收音机,并学会排除一些常见故障。

以七管中波调幅袖珍式半导体收音机(HX108-2 AM)为例,它采用全硅管标准二级中放电路,用两个二极管正向压降稳压电路,稳定从变频、中频到低放阶段的工作电压,不会因为电池电压降低而影响接收灵敏度,使收音机仍能正常工作。

3.1.1 调幅工作原理

一、工作方框图

收音机的工作框图如图 3-1-1 所示。

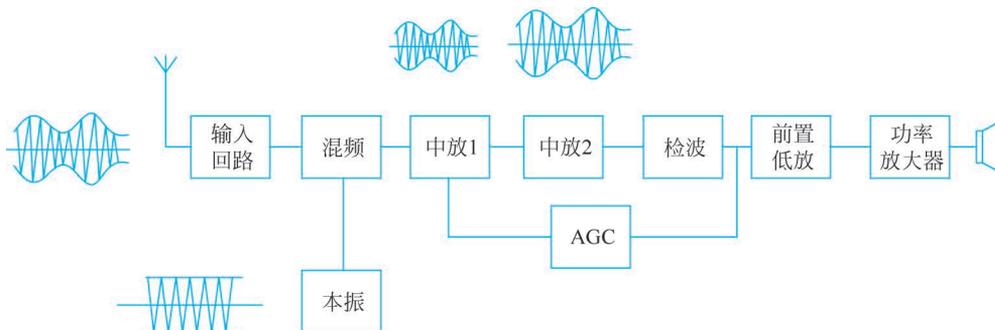
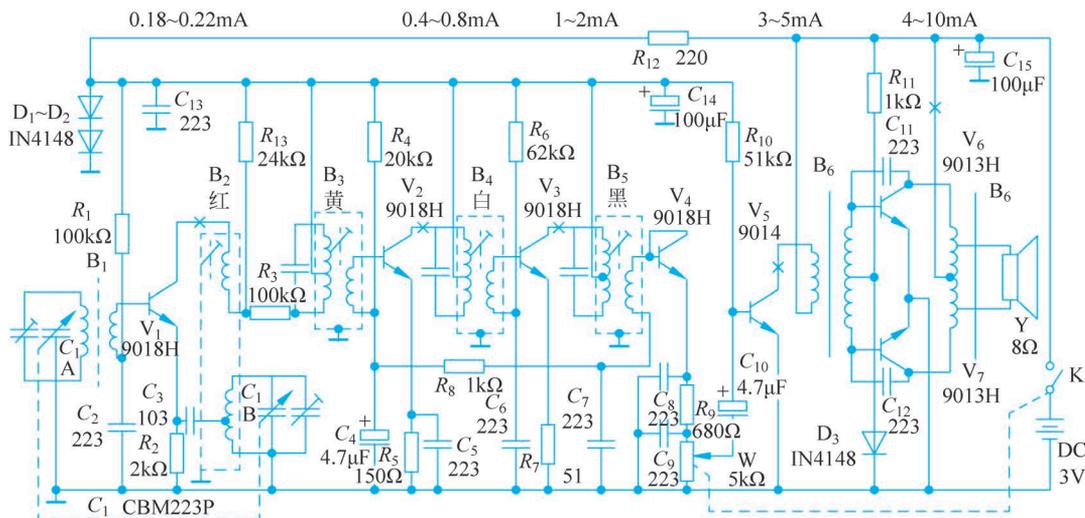


图 3-1-1 收音机的工作框图

二、工作原理

收音机的原理图如图 3-1-2 所示,当调幅信号感应到 B_1 及 C_1 组成的天线调谐回路,选出所需的电信号 f_1 进入 V_1 (9018H) 三极管基极;本振信号调谐在高出 f_1 频率一个中频

的 $f_2(f_1+465\text{kHz})$ 中, 例: $f_1=700\text{kHz}$ 则 $f_2=(700+465)\text{kHz}=1165\text{kHz}$ 进入 V_1 发射极, 由 V_1 三极管进行变频, 通过 B_3 选取出 465kHz 中频信号, 经 V_2 和 V_3 两级中频放大, 进入 V_4 检波管, 检出音频信号经 V_5 (9014) 低频放大和由 V_6 、 V_7 组成功率放大器进行功率放大, 推动扬声器发声。图中 D_1 、 D_2 (IN4148) 组成 $1.3\text{V}\pm 0.1\text{V}$ 稳压, 固定变频、一中放、二中放、低放的基极电压, 稳定各级工作电流, 以保持灵敏度。由 V_4 (9018H) 三极管 PN 结用作检波。 R_1 、 R_4 、 R_6 、 R_{10} 分别为 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_5 的工作点调整电阻, R_{11} 为 V_6 、 V_7 功放级的工作点调整电阻, R_8 为中放的 AGC 电阻, B_3 、 B_4 、 B_5 为中周 (内置谐振电容), 既是放大器的交流负载又是中频选频器, 该机的灵敏度、选择性等指标靠中频放大器保证。 B_6 、 B_7 为音频变压器, 起交流负载及阻抗匹配的作用。



(“×”为集电极电流测试点, 电流参考值见图上方)

图 3-1-2 收音机的原理图

三、工作电路

收音机的印制电路板如图 3-1-3 所示, 在电路板上, 黄色的部分表示覆了铜膜, 如果通孔之间覆了铜膜, 表示通孔是连接在一起的。

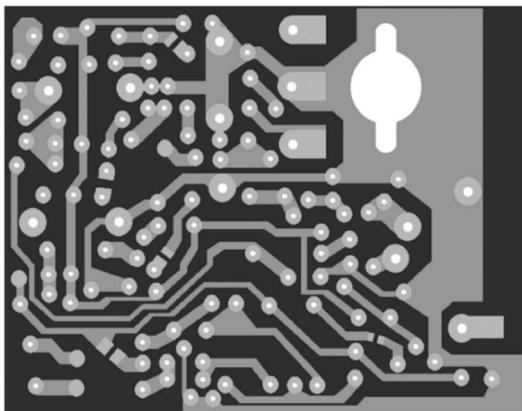


图 3-1-3 收音机的印制电路板



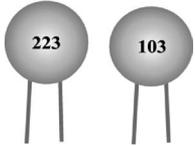
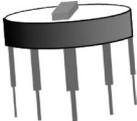
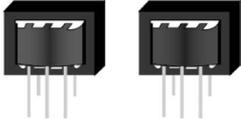
彩图

3.1.2 清点元器件

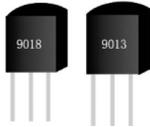
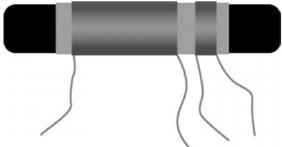
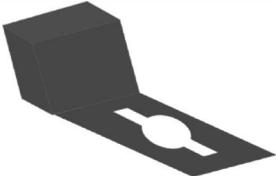
一、元器件清单

按元器件清单(表 3-1-1)清点元器件,记清每个元器件的名称与外形。清点时,可以将机壳后盖当容器,将所有的东西都放在里面,以免元器件丢失,清点完后请将材料分类放好备用。特别提醒,根据色环标志表确定电阻阻值,同时根据电容的标示方法确定电容容值;如色环或者标示不清楚可用万用表测定。

表 3-1-1 主要电子元器件清单

名 称	数量及种类	外 形
电阻	R_1 -100k Ω , R_2 -2k Ω , R_3 -100 Ω , R_4 -20k Ω , R_5 -150k Ω , R_6 -62k Ω , R_7 -51 Ω , R_8 -1k Ω , R_9 -680 Ω , R_{10} -51k Ω , R_{11} -1k Ω , R_{12} -220 Ω R_{13} -24k Ω	
二极管	3 个	
瓷片电容	9 个 0.022 μ F, 1 个 0.01 μ F	
电解电容	2 个 100 μ F, 2 个 4.7 μ F	
电位器	1 个 5k Ω	
双联 CBM223P	1 个	
中周	4 个	
变压器	2 个	

续表

名称	数量及种类	外形
三极管	4个 9018H, 3个 9013H	
线圈和磁棒	1套	
磁棒支架	1个	
扬声器	1个	

二、万用表检测

用万用表检测部分元器件好坏,如表 3-1-2 所示。

表 3-1-2 元器件测量内容

类别	测量内容	万用表量程
电阻 R	电阻值	$\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1k$
电容 C	电容绝缘电阻	$\times 10k$
三极管 h_{fe}	晶体管放大倍数 9018H(97~146) 9014C(200~600)、9013H(144~202)	h_{fe}
二极管	正、反向电阻	$\times 1k$
中周	<p>初次级为无穷大</p>	$\times 1$
输入变压器(蓝色)		$\times 1$
输出变压器(红色)	<p>自耦变压器无初次级</p>	$\times 1$

3.1.3 焊接组装的注意事项

- (1) 需要注意二极管、三极管的极性,不要焊反。
 - (2) 输入(绿色、蓝色),输出(黄色)变压器不能调换位置。
 - (3) 红中周 B_2 插件外壳应弯脚焊牢,否则会造成卡调谐盘。
 - (4) 中周外壳均应用锡焊牢,特别是 B_3 黄中周外壳一定要焊牢。
- 焊接和组装完成的收音机如图 3-1-4 所示。

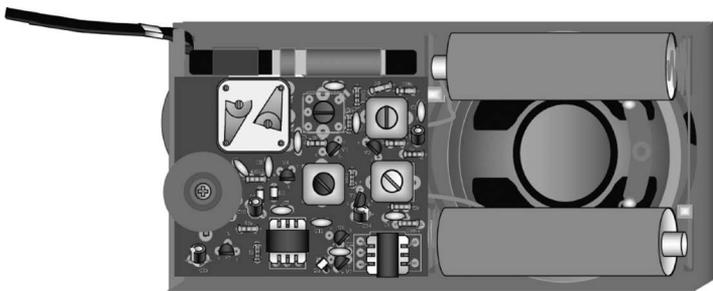


图 3-1-4 焊接和组装完成的收音机

3.1.4 调试说明

一、仪器设备

①稳压电源(3V/200mA 或 2 节 5 号电池); ②高频信号发生器; ③示波器; ④毫伏表(或同类仪器); ⑤圆环天线(调 AM 用); ⑥无感应螺丝刀。

二、仪器连接框图

仪器连接框图如图 3-1-5 所示。

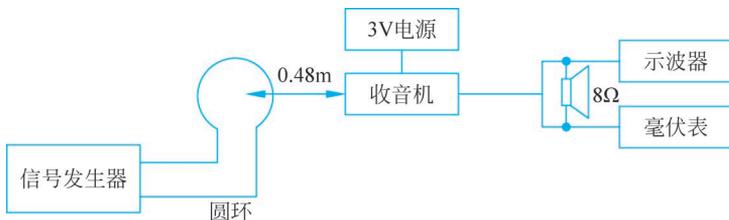


图 3-1-5 仪器连接框图

三、调试步骤

1. 通电调试

在元器件装配焊接无误及机壳装配好后,将机器接通电源,应在 AM 能收到本地电台后,即可进行调试工作。

2. 中频调试(仪器连接如图 3-1-5 所示)

首先将双联旋至最低频率点,信号发生器置于 465kHz 频率处,输出场强为 10mV/m,调制频率为 1000Hz,调幅度为 30%,收到信号后,示波器有 1000Hz 波形,用无感应螺丝刀依次调节黑-白-黄三个中周,且反复调节,使其输出最大,465kHz 中频即调好。

3. 覆盖及统调调试

(1) 覆盖将信号发生器置于 520kHz, 输出场强为 5mV/m, 调制频率为 1000Hz, 调制度为 30%, 双联调到低端, 用无感应螺丝刀调节红中周(振荡线圈), 收到信号后, 再将双联旋到最高端, 信号发生器置于 1620kHz 频率处, 调节双联振荡联微调左上角的电容, 收到信号后, 再重复双联旋至低端, 调红中周, 高低端反复调整, 直至低端频率为 520kHz, 高端频率为 1620kHz 为止。

(2) 统调: 将信号发生器置于 600kHz 频率处, 输出场强为 5mV/m 左右, 调节收音机调谐旋钮, 收到 600kHz 信号后, 调节中波磁棒线圈位置, 使输出最大然后将信号发生器旋至 1400kHz, 调节收音机, 直至收到 1400kHz 信号后, 调双联微调右下角的电容, 使输出为最大, 重复调节 600~1400kHz 统调点, 直至两点均为最大为止。

(3) 在中频, 覆盖、统调结束后, 机器即可收到高、中、低端电台, 且频率与刻度基本相符。

3.1.5 没有仪器情况下的调整方法

一、调整中频频率

本套件所提供的中频变压器(中周), 出厂时都已调整在 465kHz(一般调整范围在半圈左右), 因此调整工作较简单。打开收音机, 随便在高端找一个电台, 先从中周 B_5 开始, 然后 B_4 、 B_3 用无感应螺丝刀(可用塑料、竹条或者不锈钢制成)向前顺序调节, 调节到声音响亮为止, 由于自动增益控制作用, 人耳对音响变化不易分辨的缘故, 收听本地电台当声音已调节到很响时, 往往不易调精确, 这时, 可以改收较弱的外地电台或者转动磁性天线方向以减小输入信号, 再调到声音最响为止。按上述方法从后向前的次序反复细调两三遍至最佳即告完成。

二、调整频率范围(对刻度)

1. 调低端

在 550~700kHz 范围内选一下电台。例如中央人民广播电台在 640kHz, 参考调谐盘指针在 640kHz 的位置, 调整 B_2 , 便收到这个电台, 并调至声音较大。这样当双联全部旋出容量最大时的接收频率为 525~530kHz, 低端刻度就对准了。

2. 调高端

在 1400~1600kHz 范围内选一个已知频率的广播电台, 例如 1500kHz, 再将调谐盘指针指在周率板刻度 1500kHz 这个位置, 调节振荡回路中双联顶部左上角的微调电容, 使这个电台在这位置声音最响。这样, 当双联全旋出容量最小时, 接收频率必定为 1620~1640kHz, 高端就对准了。

以上两步需反复两三次, 频率刻度才能调准。

三、统调

利用最低端收到的电台, 调整天线线圈在磁棒上的位置, 使声音最响, 以达到低端统调。

利用最高端收听到的电台, 调节天线输入回路中双联顶部右下角的微调电容, 使声音最响, 以达到高端统调。

3.1.6 组装调整中易出现的问题

一、变频部分

判断变频级是否起振,用万用表直流 2.5V 挡正表笔接 V_1 发射级,负表笔接地,然后用手摸双联振荡联(即连接 B_2 端),万用表指针应向左摆动,说明电路工作正常,否则说明电路中有故障。变频级工作电流不宜太大,否则噪声大。红色振荡线圈外壳两脚均应焊牢,以防调谐盘卡盘。

二、中频部分

中频变压器序号位置搞错,结果是灵敏度和选择性降低,有时有自激。

三、低频部分

输入、输出位置搞错,虽然工作电流正常,但音量很低, V_6 、 V_7 集电极(c)和发射极(e)搞错,工作电流调不上,音量极低。

3.1.7 收音机检测修理方法

一、检测前提

安装正确,元器件无差错、无缺焊、无错焊及搭焊。

二、检查要领

一般由后级向前检测,先检查低功放级,再看中放和变频级。

三、检测修理方法

1. 整机静态总电流测量

本机静态总电流 $\leq 25\text{mA}$,无信号时,若大于 25mA,则该机出现短路或局部短路,无电流则电源没接上。

2. 工作电压测量,总电压 3V

正常情况下, D_1 、 D_2 两个二极管电压在 $1.3\text{V} \pm 0.1\text{V}$,此电压大于 1.4V 或小于 1.2V 时,此机均不能正常工作。此电压大于 1.4V 时,二极管 IN4148 可能极性接反或已坏,检查二极管。此电压小于 1.3V 或无电压应检查:

- (1) 电源 3V 有无接上。
- (2) R_{12} 电阻(220Ω)是否接对或接好。
- (3) 中周(特别是白中周和黄中周)初级与其外壳短路。

3. 变频级无工作电流

检查点:

- (1) 无线线圈次级未接好。
- (2) V_1 (9018H)三极管已坏或未按要求接好。
- (3) 本振线圈(红)次级不通, R_3 (100Ω)虚焊或错焊接了大阻值电阻。
- (4) 电阻 R_1 ($100\text{k}\Omega$)和 R_2 ($2\text{k}\Omega$)接错或虚焊。

4. 一中放无工作电流

检查点:

- (1) V_2 晶体管损坏或 V_2 引脚插错(e、b、c 脚)。
- (2) R_4 (20k Ω)电阻未接好。
- (3) 黄中周次级开路。
- (4) C_4 (4.7 μ F)电解电容短路。
- (5) R_5 (150 Ω)开路或虚焊。

5. 一中放工作电流大, 1.5~2mA(标准是 0.4~0.8mA)

检查点:

- (1) R_8 1k Ω 电阻未接好或连接 1k Ω 的铜箔有断裂现象。
- (2) C_5 (233)电容短路或 R_5 (150 Ω)电阻错接成 51 Ω 。
- (3) 电位器坏,测量不出阻值, R_9 (680 Ω)未接好。
- (4) 检波管 V_4 (9018H)损坏,或引脚插错。

6. 二中放无工作电流

检查点:

- (1) 黑中周初级开路。
- (2) 黄中周次级开路。
- (3) 晶体管损坏或引脚接错。
- (4) R_7 (51 Ω)电阻未接上。
- (5) R_6 (62k Ω)电阻未接上。

7. 二中放电流太大, 大于 2mA

检查点: R_6 (62k Ω)接错,阻值远小于 62k Ω 。

8. 低放级无工作电流

检查点:

- (1) 输入变压器(蓝)初级开路。
- (2) V_5 三极管损坏或接错引脚。
- (3) 电阻 R_{10} (51k Ω)未接好或三极管引脚错焊。

9. 低放级电流太大, 大于 6mA

检查点: R_{10} (51k Ω)装错,电阻太小。

10. 功放级无电流(V_6 、 V_7 管)

检查点:

- (1) 输入变压器次级不通。
- (2) 输出变压器不通。
- (3) V_6 、 V_7 三极管损坏或接错引脚。
- (4) R_{11} (1k Ω)电阻未接好。

11. 功放级电流太大, 大于 20mA

检查点:

- (1) 二极管 D_4 损坏或极性接反,引脚未焊好。
- (2) R_{11} (1k Ω)电阻装错了,用了小电阻(远小于 1k Ω 的电阻)。

12. 整机无声

检查点:

- (1) 检查电源有无加上。
- (2) 检查 D_1 、 D_2 (IN4148 两端是否是 $1.3V \pm 0.1V$)。
- (3) 有无静态电流 $\leq 25mA$ 。
- (4) 检查各级电流是否正常,变频级 $0.2mA \pm 0.02mA$; 一中放 $0.6mA \pm 0.2mA$; 二中放 $1.5mA \pm 0.5mA$; 低放 $3mA \pm 1mA$; 功率放大器 $4mA \pm 10mA$ (说明: $15mA$ 左右属正常)。
- (5) 用万用表 $\times 1$ 挡测查喇叭,应有 8Ω 左右的电阻,表笔接触扬声器引出接头时应有“喀喀”声,若无阻值或无“喀喀”声,说明扬声器已坏(测量时应将扬声器焊下,不可连机测量)。

(6) B_3 黄中周外壳未焊好。

(7) 音量电位器未打开。

用万用表 $Q \times 1$ 黑表笔接地,红表笔从后级往前寻找,对照原理图,从扬声器开始顺着信号传播方向逐级往前碰触,扬声器应发出“喀喀”声。当碰触到哪级无声时,则故障就在该级,可用测量工作点是否正常,并检查各元器件,有无接错、焊错、搭焊、虚焊等。若在整机上无法查出该元件好坏,则可拆下检查。

3.1.8 考核要点

- (1) 收音机是否正常工作。
- (2) 无错装、漏装。
- (3) 焊点大小合适、美观,无虚焊。
- (4) 器件无丢失损坏。
- (5) 调试符合要求。

思考题

1. 以有无极性分类 3.1 实验中使用的元器件。
2. 简述二极管和三极管极性的判断方法。
3. 简述调幅收音机和调频收音机的区别。
4. 简述收音机检查、测试及故障排除的基本方法。

3.2 常用电子仪器仪表的使用实验

一、实验目的

1. 熟悉实验环境和实验仪器。
2. 掌握常用电子仪器仪表的工作原理。
3. 掌握常用电子仪器仪表的使用方法。

二、实验仪器

1. 多功能混合域示波器 MDO-2202AG。
2. 多通道函数信号发生器 MFG-2220HM。

3. 双显测量万用表 GDM-8352。
4. 直流稳压电源 GPD-3303D。

三、实验原理

在电子技术实验中,经常需要对各种电子仪器进行综合使用,可按照电流流向,以接线简洁、调节顺手、观察与读数方便等原则进行合理布局。接线时注意,为防止外界干扰,各仪器的公共接地端应连接在一起,称为共地。

1. 函数信号发生器

多通道函数信号发生器 MFG-2220HM 如图 3-2-1 所示。



图 3-2-1 多通道函数信号发生器 MFG-2220HM

MFG-2220HM 面板介绍见 2.3 节。

函数信号发生器可以根据需要输出正弦波、方波、三角波、脉冲波及各种调制波等波形。输出信号参数均可调节。

操作要领如下。

- (1) 激活通道(按“CH1/CH2”或“Pulse”键)。
- (2) 根据屏幕右侧按键,选择按“Waveform”“FREQ/Rate”“AMPL”“DC Offset”等按键,分别进入波形选择、频率设置、幅值设置、直流偏置设置。
- (3) 进入参数设置界面后,位于参数窗口处的相应参数会变亮,使用数字键、方向键和可调旋钮,以及屏幕下方的功能键设置参数值和单位。
- (4) 通过屏幕右侧“MOD”键可产生调制波,编辑调制波参数。
- (5) 按通道输出键,输出波形。

2. 示波器

多功能混合域示波器 MDO-2202AG 如图 3-2-2 所示。

MDO-2202AG 面板介绍见 2.4 节。

示波器是用于观察和测量信号的波形及参数的设备。多功能混合域示波器 MDO-2202AG 可以同时两个输入信号进行观测和比较。

操作要领如下。

- (1) 激活通道,可单独激活 CH1 或 CH2,亦可同时激活 CH1 和 CH2。
- (2) 为了使波形达到最佳的观察状态,使用自动设置。按“Autoset”键,波形自动调整到面板最佳的视野位置,自动设置的参数包括水平刻度、垂直刻度、触发源通道。
- (3) 为了在屏幕上显示稳定的波形,可使用“Single”键改变触发模式为单次触发,也可

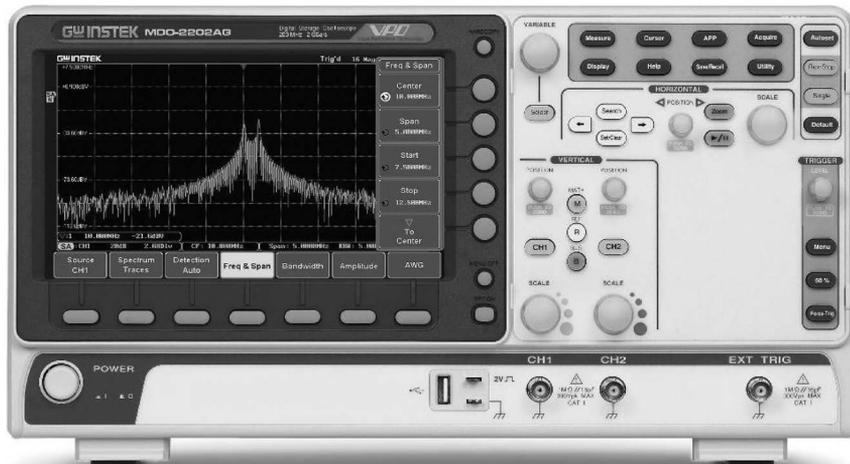


图 3-2-2 多功能混合域示波器 MDO-2202AG

以使用“RUN/STOP”键冻结波形。

(4) 通过水平系统(图 3-2-3)和垂直系统(图 3-2-4)可手动调节波形位置和刻度,以便观察。



图 3-2-3 水平系统

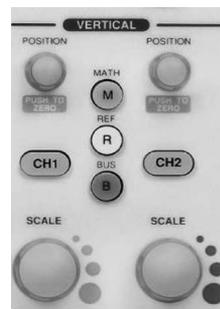


图 3-2-4 垂直系统

① 旋转水平系统“POSITION”旋钮可左右移动波形。

② 旋转水平系统“SCALE”旋钮可改变水平刻度(时基),水平方向上波形尺寸随刻度的变化而变化。时基为屏幕上横向每格代表的时间,根据波形一个周期在水平轴上占据的格数,即可得到信号周期 $T = \text{时基} \times \text{格数}$ 。

③ 旋转垂直系统“POSITION”旋钮可上下移动波形。两个“POSITION”旋钮分别控制 CH1、CH2 通道波形的垂直位置。

④ 旋转垂直系统“SCALE”旋钮可改变垂直刻度,即在垂直方向上拉伸或压缩波形。两个“SCALE”按钮分别控制 CH1、CH2 通道波形的垂直刻度。垂直刻度为屏幕上纵向每格代表的值,观察被测波形的高度(峰-峰)在屏幕中轴上占据的格数,即可得到信号的幅度 $V_{P-P} = \text{垂直刻度} \times \text{格数}$ (注意:被测信号若使用 10:1 挡探头输入,测得值应乘以 10)。

(5) 使用自动测量时,屏幕上可以读出频率、幅值等基本参数,其他参数可通“Measuer”键进行测量设置。

(6) 用示波器可以测量两个同频率信号之间的相位关系。

(7) 示波器亦可进行统计、FFT 运算、XY 模式、光标、两信号的数学运算等的测量。

3. 直流稳压电源

直流稳压电源 GPD-3303D 如图 3-2-5 所示。



图 3-2-5 直流稳压电源 GPD-3303D

GPD-3303D 面板介绍见 2.2 节。

GPD-3303D 和 GPD-4303S 均属于直流稳压电源 GPD-X303 系列型号,其操作要领基本相同。

GPD-4303 系列可提供 4 组独立的直流稳压电源;CH1、CH2 每个通道可独立输出 0~30V/0~3A 的电源,也可进行串联或并联输出,扩大输出范围;CH3 通道可输出 0~5V/0~3A 或者 5.001~10V/0~1A 的电源;CH4 通道输出电源的额定值为 5V/1A。

GPD-3303 系列可提供 3 组独立的直流稳压电源,CH3 可选电压为 2.5V、3.3V、5V,无 CH4 通道。

仪器可根据负载情况自动切换恒压(CV)源模式和恒流(CC)源模式。当输出电流低于设定值时,电压值保持设定值,电流值根据负载条件变动,是恒压源模式。当实际输出电流需求大于设定值时,电流维持在设定值,此时实际输出电压低于设定值,是恒流源模式。

操作要领如下。

- (1) 打开电源,确认“OUTPUT”开关置于关断状态。
- (2) 通过“PARA/INDEP”键和“SER/INDEP”键的亮灭确定输出模式。两个键都不亮属于独立输出模式;“PARA/INDEP”键亮属于并联输出模式;“SER/INDEP”键亮属于串联输出模式。
- (3) 通道键切换通道,进行通道输出设置。方法:使用电压调节旋钮“VOLTAGE”和电流调节旋钮“CURRENT”调节电压和电流值,按旋钮开关可将粗调模式转换为细调模式。
- (4) 根据输出模式和输出端口连接负载。
- (5) 打开输出开关。

4. 万用表

双显测量万用表 GDM-8352 如图 3-2-6 所示。

GDM-8352 面板介绍见 2.1 节。

GDM-8352 是一款便携式的双显数字万用表,适合广大应用领域。直流电压测量精度



图 3-2-6 双显测量万用表 GDM-8352

为 0.012%，电流测量范围为 10A，电压测量范围为 1000V，频率响应范围为 100kHz。

操作要领如下。

(1) 按相应的功能键，选择测量功能，包括 DCV/DCI、ACV/ACI、电阻/温度、二极管或连通性/电容、频率或周期/dB 等常用测量项目，以及其他高级测量项目。每个按键包括两种测量功能，直接按任一功能键，开启第一种测量功能，同时按“SHIFT”加功能键开启第二种测量功能。

(2) 按照测量项，选择相应的插孔进行测试线的连接。

(3) 可使用“Auto”键盘自动选择量程挡位，或使用“上/下”键手动选择量程挡位。若挡位不确定，可选择最大量程挡位。

(4) 显示屏分为主屏(左)和次屏(右)，单测量时，通常主屏显示测量结果，次屏显示量程挡位。

(5) GDM-8352 提供双测量模式，可同时测量和观察两个不同的测量结果，分别显示在主屏和次屏；通过长按“2ND”键开启和关闭双测量模式；通过短按“2ND”键切换主、次测量设置。

(6) 还可进行功率测量、数学运算测量、比较测量、Hold 测量等。

四、预习要求

结合第 2 章常用仪器仪表的使用预习实验内容，回答下列问题。

1. 总结各仪器仪表的用途。
2. 简述使用函数信号发生器产生一定频率、一定幅度的正弦波的步骤。
3. 简述实验中示波器的使用方法。
4. 简述实验中万用表的使用方法。
5. 简述实验中直流稳压电源的使用方法。

五、实验内容

1. 实验步骤

(1) 利用函数信号发生器和示波器，产生和测量 10kHz、5V_{pp} 的正弦波，测量其频率、振幅、最大值、最小值、均方根值。

(2) 利用函数信号发生器和示波器，同时产生两个同频率的正弦波(CH1: 10kHz、5V_{pp}; CH2: 10kHz、200mV_{pp}、相位 60°)，测量两个波形的相位差。

(3) 利用直流稳压电源和双显测量万用表,产生和测量 12V 的直流电压。

(4) 利用直流稳压电源和双显测量万用表,产生和测量 40V 的直流电压。

2. 注意事项

(1) 探头开关拨向 10X 挡时,信号衰减到 1/10 进入示波器,因此当使用探头的 10X 挡时,应当将示波器的读数扩大 10 倍。有的示波器可选择 10X 挡,以配合探头的使用,这样将示波器也设置为 10X 挡,即可直接读数。

(2) 在首次探头使用前应进行补偿调整,使探头与示波器匹配。

(3) 函数发生器的输出阻抗可以设置为高阻(High Z)或 50Ω 。高阻时幅度是 50Ω 时的 2 倍。

(4) 接线时注意,为防止外界干扰,各仪器的公共接地端应连接在一起,称共地。

3. 实验示例

1) 函数信号发生器和示波器的应用一

函数信号发生器和示波器的连接如图 3-2-7 所示。

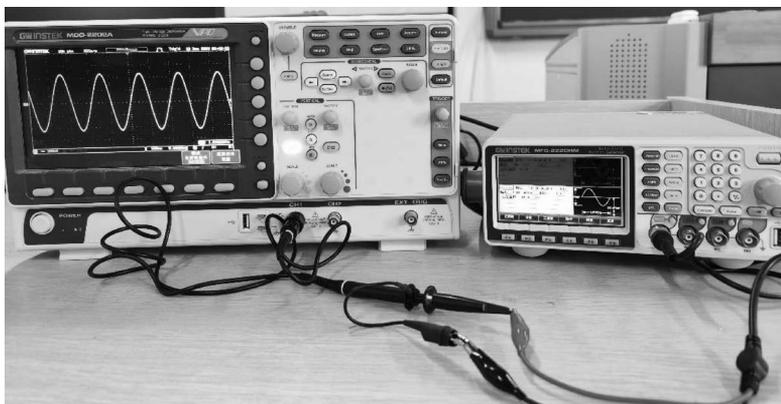


图 3-2-7 测试线连接

(1) 按函数信号发生器“CH1/CH2”键,切换至 CH1 通道;同时按下示波器“CH1”键,激活 CH1 通道。

(2) 按函数信号发生器显示屏右侧“Waveform”键,进入波形设置,如图 3-2-8 所示,按显示屏下方第 1 个功能键“F1”,选择正弦波“sine”。

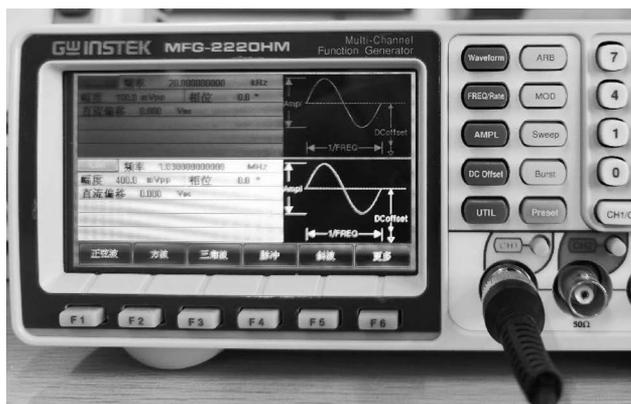


图 3-2-8 波形选择

(3) 按函数信号发生器显示屏右侧“FREQ/Rate”键,进入频率设置,如图 3-2-9 所示。按数字键【1】【0】,设置频率大小,按显示屏下方“kHz”对应的按键,选择“kHz”作为频率单位。

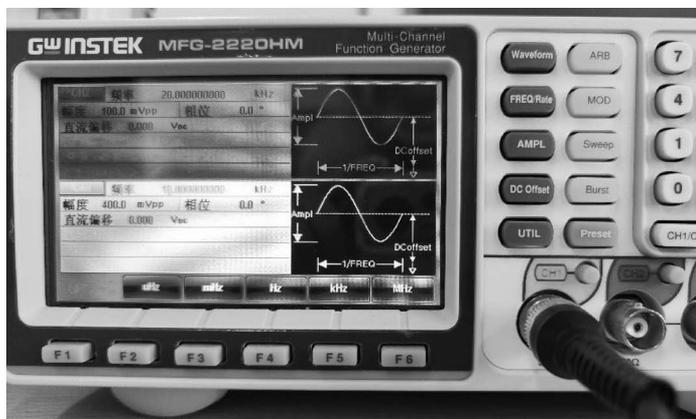


图 3-2-9 频率设置

(4) 按函数信号发生器显示屏右侧“AMPL”键,进入幅度设置,如图 3-2-10 所示,按数字键【5】,设置幅值大小,按显示屏下方“Vpp”对应的按键,选择“Vpp”作为幅值单位。



图 3-2-10 幅值设置

(5) 按函数信号发生器 CH1 输出键,再按示波器“Autoset”键,如图 3-2-11 所示,波形显示在屏幕中心。

(6) 使用示波器水平系统和垂直系统调节波形位置和刻度,以便观察,如图 3-2-12 所示。从示波器屏幕上读出频率为 10.0001kHz,峰-峰值约为 $1V \times 5$ (垂直刻度 \times 格数)。

(7) 示波器按“Measure”键,打开自动测量菜单。

(8) 按底部菜单“增加测量项”或者“选择测量项”,右侧菜单按“Source”按钮,设置信号源为 CH1,接着右侧菜单按“电压/电流”,再使用 Variable 可调旋钮从子菜单中选择“均方根值”,按“Select”键确认选择。可按此方法增加峰-峰值、最大值、最小值、振幅、频率等多个测量参数,再按“Measure”键,显示测量结果,如图 3-2-13 所示。

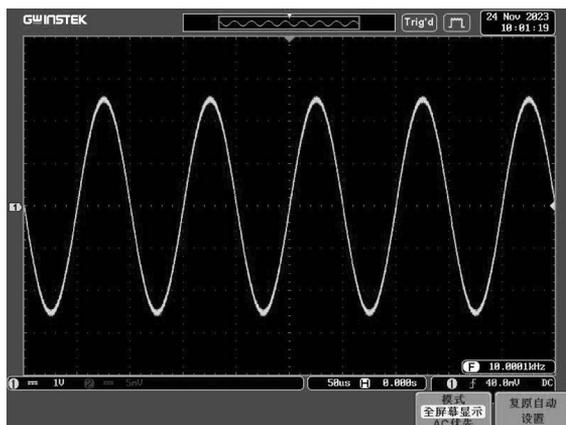


图 3-2-11 自动设置

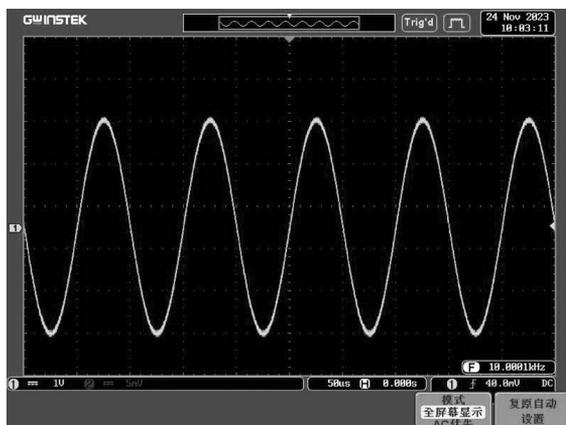


图 3-2-12 调节波形位置和刻度

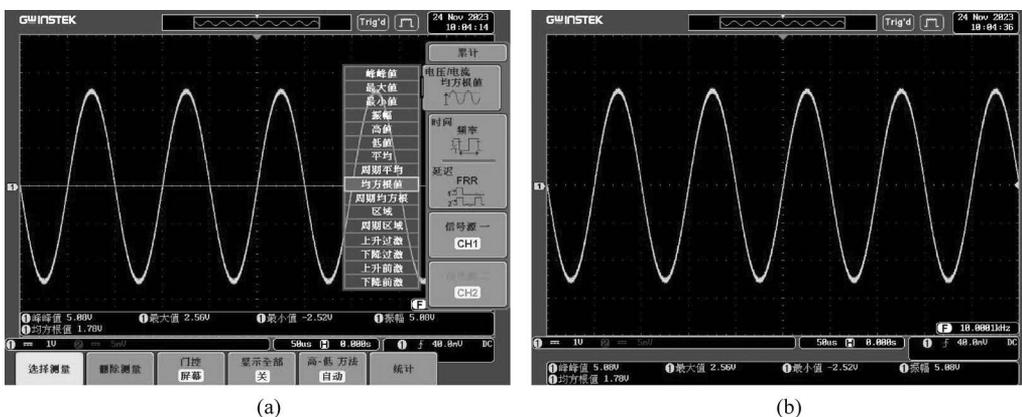


图 3-2-13 参数测量显示

2) 函数信号发生器和示波器的应用二

按图 3-2-14 所示的方式连接函数信号发生器和示波器。

- (1) 按函数信号发生器“CH1/CH2”键,切换至 CH1 通道,按上一个实验内容中步骤(2)~(5)的方法设置 CH1 参数。



图 3-2-14 测试线连接图

(2) 按函数信号发生器“CH1/CH2”键,切换至 CH2 通道,按显示屏下方“相位”键,进入相位设置,设置相位为 60° ,再按上一个实验内容中步骤(2)~(5)的方法设置 CH2 的波形、频率、幅值等参数,如图 3-2-15 所示。

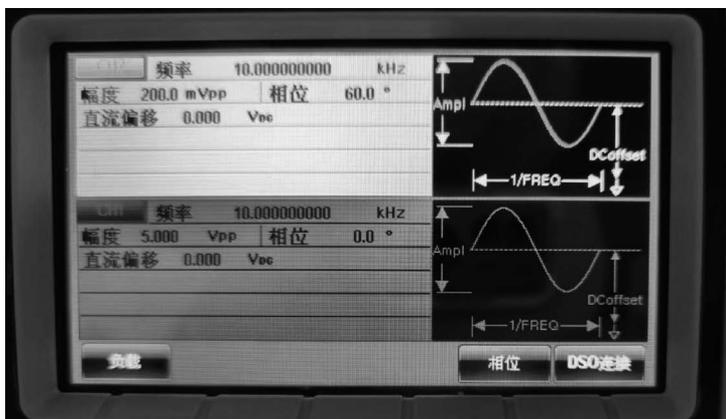


图 3-2-15 CH2 参数设置

(3) 按示波器“Autoset”键,波形显示在屏幕中心。

(4) 使用示波器水平系统和垂直系统调整波形位置和刻度,以便观察视野最佳。

(5) 使用光标测量相位差。方法:按“Cursor”键,进入水平光标设置;按屏幕下方“水平光标”按钮切换光标模式,并结合使用可调旋钮“Variable”把光标调到如图 3-2-16 所示的位置;按“水平单位”键,选择“°”为单位;按“设定光标”键,设置两光标间的相位差为 360° ;再次按屏幕下方“水平光标”按钮切换光标模式,并结合使用可调旋钮“Variable”把光标调到如图 3-2-17 所示的位置,从示波器上读出两信号的相位差为 60.5° 。

3) 直流稳压电源和双显测量万用表的应用一

(1) 确认直流稳压电源的“OUTPUT”开关置于关断状态(按键灯不亮),确定“SER/INDEP”键和“PARA/INDEP”键关闭(按键灯不亮)。

(2) 按直流稳压电源“CH1”键,打开 CH1 通道设置,使用电压调节旋钮设置电压为 12V,使用电流调节旋钮设置最大电流为 3A。

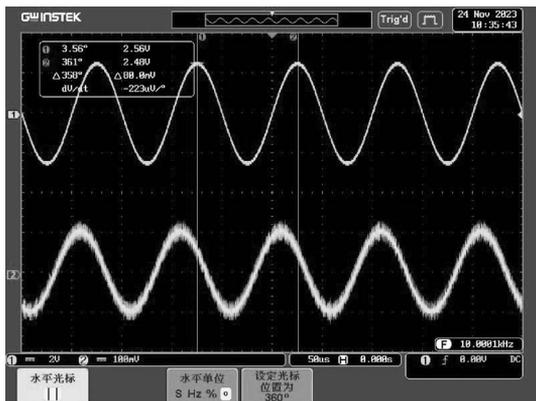


图 3-2-16 水平光标设置 1

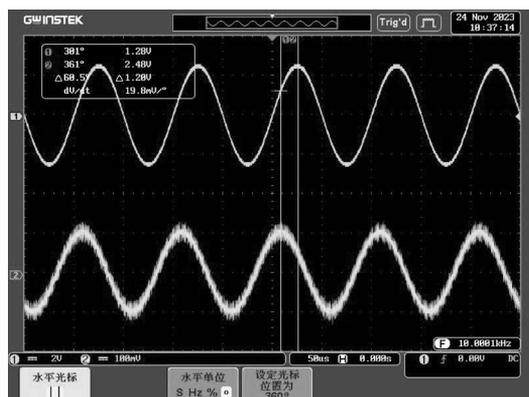


图 3-2-17 水平光标设置 2

(3) 按双显测量万用表“DCV”键,设置为直流电压测量模式。

(4) 按图 3-2-18 所示连接万用表和直流稳压电源。直流稳压电源的设置如图 3-2-18 所示,输出电压为 12V,输出电流限制在 2A,当电流大于 2A 时,变为恒流源输出。万用表测量模式为直流电压(DC)。

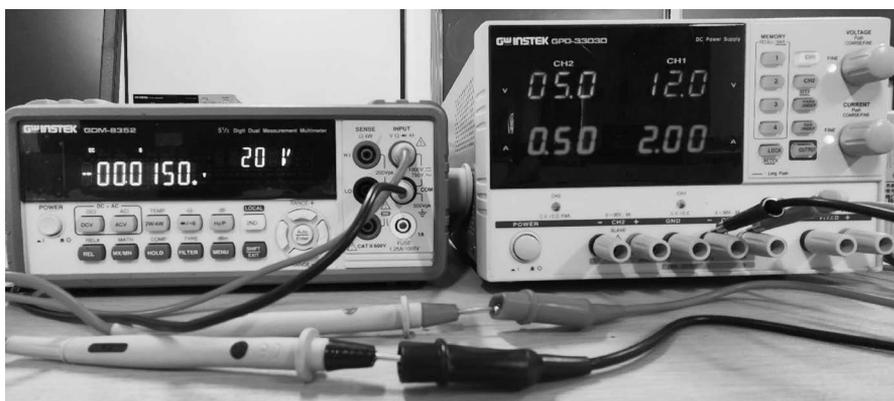


图 3-2-18 测试线连接图

(5) 打开直流稳压电源“OUTPUT”开关,CH1 指示灯显示 CV 模式(亮绿灯)。

(6) 按双显测量万用表“Auto”键,自动选定电压测量挡位,或者按上/下键手动选择挡位。

(7) 读值。万用表量程 20V、使用直流电压(DC)测量模式,屏幕刷新速度慢(S),测量值为 11.9492V。直流稳压电源输出电压为 11.9V,电流为 0A,CH1 指示灯为绿灯,输出模式为恒压模式,如图 3-2-19 所示。

4) 直流稳压电源和双显测量万用表的应用二

(1) 确认直流稳压电源的“OUTPUT”开关置于关断状态(按键灯不亮),打开“SER/INDEP”键(按键灯亮)。

(2) 按直流稳压电源的“CH2”键,使用电流调节旋钮设置 CH2 最大电流为 3A。

(3) 按直流稳压电源的“CH1”键,打开 CH1 通道设置,使用电压调节旋钮设置电压为 20V,使用电流调节旋钮设置电流为 2A。

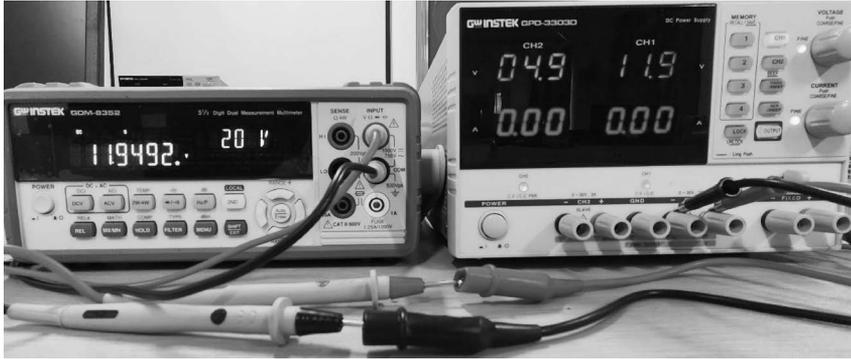


图 3-2-19 测量显示

- (4) 按双显测量万用表“DCV”键,设置为直流电压测量模式。
- (5) 测试线连接方式按图 3-2-20 所示连接直流稳压电源和万用表。



图 3-2-20 测试线连接图

- (6) 打开直流稳压电源“OUTPUT”开关,CH1 指示灯显示 CV 模式。
- (7) 按直流稳压电源“Auto”键,自动选定电压测量挡位,或者按上/下键,手动选择挡位。
- (8) 读值。万用表:量程自动设置值为 200V,测量结果为 39.928V,使用直流电压 (DC) 测量模式,屏幕刷新速度慢(S)。直流稳压电源:输出电压为 $20\text{V} \times 2$,电流为 0A,CH1 指示灯为绿灯,输出模式为恒压模式,如图 3-2-21 所示。

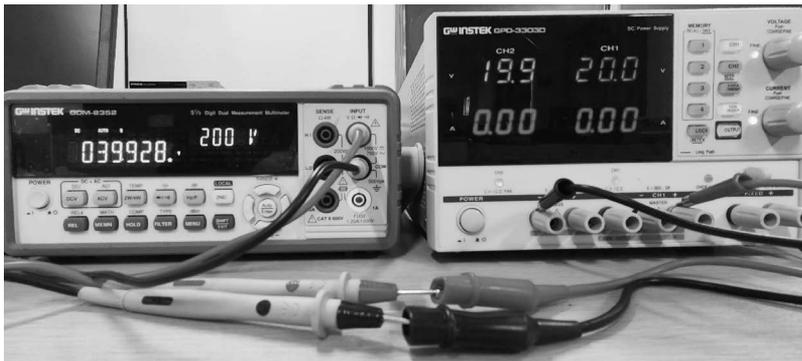


图 3-2-21 测量表显示



实验报告

六、实验报告

分别将实验数据填入表 3-2-1~表 3-2-4。

表 3-2-1 示波器测量 10kHz、5Vpp 正弦波的测量结果 1

示波器波形	频率	振幅	最大值	最小值	均方根

表 3-2-2 两同频正弦波相位差测量结果 2

示波器波形	频率	振幅	相位差
		CH1=	
		CH2=	

表 3-2-3 直流稳压电源输出

12V 直流稳压电源输出显示	40V 直流稳压电源输出显示

表 3-2-4 万用表测量结果

12V 电源被测结果(单位: V)	40V 电源被测结果

思考题

1. 简述示波器测量时光标测量参数的使用方法。
2. 简述直流稳压电源并联输出模式使用方法。

3. 简述使用双显测量万用表进行电流测量、电阻测量、二极管测量、短路测量的测量方法。

3.3 晶体管共射极放大电路

3.3.1 基础实验

一、实验目的

1. 熟悉单管共射极放大电路的调试方法,理解静态工作点对基本放大电路的影响。
2. 掌握放大电路电压放大倍数、输入电阻、输出电阻以及最大不失真输出电压的测量方法。
3. 熟悉常用电子测量仪器仪表的使用方法。
4. 掌握电子仿真软件 Multisim 的使用方法。
5. 了解晶体管放大电路的主要用途。

二、实验仪器

1. 多功能混合域示波器 MDO-2000A。
2. 多通道函数信号发生器 MFG-2220HM。
3. 双显测量万用表 GDM-8352。
4. 直流稳压电源 GPD-3303。

三、实验器材

拓展实验器件清单如表 3-3-1 所示。

表 3-3-1 拓展实验器件清单

编 号	名 称	型 号	数 量
R_{b1}	电阻	20k Ω	1
R_{b2}	电阻	15k Ω	1
R_3 、 R_{L2}	电阻	10k Ω	2
R_c	电阻	3k Ω	1
R_e	电阻	1.5k Ω	1
R_{f1}	电阻	100 Ω	1
R_{L1}	电阻	3k Ω	1
C_1 、 C_3	电解电容	10 μ F	2
C_2	电解电容	47 μ F	1
T	三极管	9013	1
R_{p2}	可调电阻	75k Ω	1
Q_1	面包板		1
	导线		若干

四、实验原理

1. 实验电路

实验电路如图 3-3-1 所示,这是一个基极分压式阻容耦合共发射极放大电路,其核心器

件是 NPN 型三极管 9013。 R_{b1} 、 R_{b2} 和 R_{p2} 组成基极分压式电路， R_{p2} 为滑动变阻器 3906，用无感应螺丝刀可以调节其阻值大小，从而实现调整电路静态工作点的目的。发射极对地之间有一电阻 R_e ，可以起到稳定静态工作点的作用。所有元器件参数如图 3-3-1 所示。

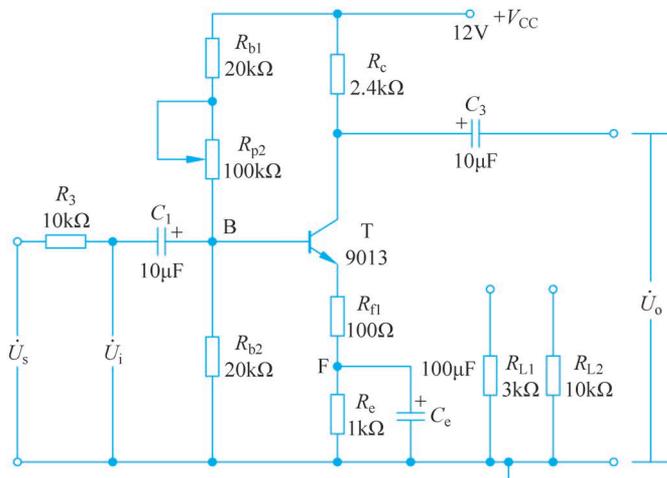


图 3-3-1 共发射极放大电路

2. 静态工作点

通过理论课程的学习可知，流过电阻 R_{b1} 、 R_{b2} 和 R_{p2} 的电流远大于晶体管的基极电流 I_B （一般为 5~10 倍），静态工作点的计算公式为

$$V_B \approx \frac{R_{b2}}{R_{b1} + R_{b2} + R_{p2}} V_{CC} \quad (3-3-1)$$

$$I_E = \frac{V_B - V_{BE}}{R_{f1} + R_e} \quad (3-3-2)$$

$$I_B = \frac{I_C}{\beta} \quad (3-3-3)$$

$$I_C \approx I_E \quad (3-3-4)$$

$$V_{CE} = V_{CC} - I_C (R_c + R_{f1} + R_e) \quad (3-3-5)$$

测量静态工作点的方法是，将输入信号端与地短接，即 $v_i = 0$ 。然后通过串接万用表，分别测量三极管各个电极对地电流来获得静态工作点数据。在测量静态电流过程中，为避免断开集电极，也可使用万用表电压挡测出三极管各个电极对地电位 V_E 、 V_C 和 V_B ，再分别计算静态工作点各个工作参数，可按照以下公式计算：

$$V_{BE} = V_B - V_E \quad (3-3-6)$$

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_c} \quad (3-3-7)$$

$$V_{CE} = V_C - V_E \quad (3-3-8)$$

3. 放大电路动态性能指标

放大电路动态性能指标包括电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、最大不失真输出电压及频率特性等，通过理论课的学习，我们已经知道微变等效电路的画法，下面分别介绍各个

参数的测量方法。

1) 电压放大倍数 A_v

放大电路的电压放大倍数是指输出电压和输入电压之比,即

$$A_v = \frac{v_o}{v_i} \quad (3-3-9)$$

实验中,将示波器两个探头同时测试输入信号 v_i 与输出信号 v_o ,观察波形,并同时记录数据,计算出电压放大倍数 A_v 。同时可根据式(3-3-8)及式(3-3-9),验证理论计算是否正确。

$$A_v = -\frac{\beta(R_c // R_L)}{r_{be} + (1 + \beta)R_{f1}} \quad (3-3-10)$$

$$r_{be} = 200\Omega + (1 + \beta)\frac{26\text{mV}}{I_E} \quad (3-3-11)$$

2) 输入电阻 R_i

输入电阻的大小决定着放大电路从前级获取信号的能力,输入电阻的计算公式为

$$R_i = R_{b2} // (R_{b1} + R_{p2}) // [r_{be} + (1 + \beta)R_{f1}] \quad (3-3-12)$$

为了测量放大电路的输入电阻,可以将放大电路等效为图 3-3-2 的形式。

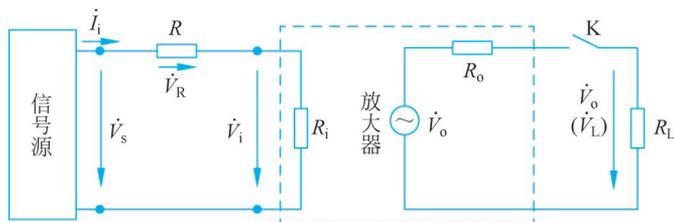


图 3-3-2 放大电路等效模型

通过测量 v_s 和 v_i 的值,可以计算出输入电阻为

$$R_i = \frac{v_i}{v_s - v_i} R_s \quad (3-3-13)$$

3) 输出电阻 R_o

输出电阻的大小决定了放大电路带负载的能力,输出电阻为

$$R_o \approx R_c \quad (3-3-14)$$

如图 3-3-2 所示,在实验中,当放大电路空载时,测得电压值为 v_{o1} ,接入负载 R_L 后,测得电压值为 v_{o2} ,则输出电阻的计算方法为

$$R_o = \left(\frac{v_{o1}}{v_{o2}} - 1\right) R_L \quad (3-3-15)$$

注意,两次测试时输入信号应保持不变。

4) 最大不失真输出电压 v_{opp}

放大电路的最大不失真输出电压是衡量放大电路动态性能的重要指标。在测量过程中,先将静态工作点调至交流负载线的中心处,再通过调整输入电压大小,观察输出波形是否失真,从而得到放大电路最大不失真输出电压。

5) 频率响应

频率响应包括幅频响应和相频响应。此处重点关注幅频响应,即放大电路放大倍数 A_v

的大小与输入信号频率 f 之间的关系曲线。设中频电压放大倍数为 A_{vm} ，改变输入信号的频率，当电压下降到 $0.707A_{vm}$ 时，对应的频率分别为上限频率 f_H 和下限频率 f_L ，其通频带为 $BW=f_H-f_L$ 。

五、预习要求

1. 理论计算

复习理论教材中晶体管共射极放大电路的工作原理，掌握放大电路静态工作点及动态性能参数指标的计算方法。根据图 3-3-1，当 $V_{CC}=12V$ 时，调节 R_{p2} 至中间位置， $\beta=150$ ，试计算以下参数，并填入表 3-3-2、表 3-3-3 中。

表 3-3-2 静态工作点计算

V_B/V	V_E/V	V_C/V	V_{CE}/V	I_B/mA	I_C/mA	I_E/mA

表 3-3-3 动态指标参数

$R_i/k\Omega$	$R_o/k\Omega$	A_v

2. 仿真验证

电路仿真使用仿真软件 Multisim，电路图如图 3-3-3 所示。注意输入和输出分别接示波器的 A、B 两端，同时观测输入和输出的波形。

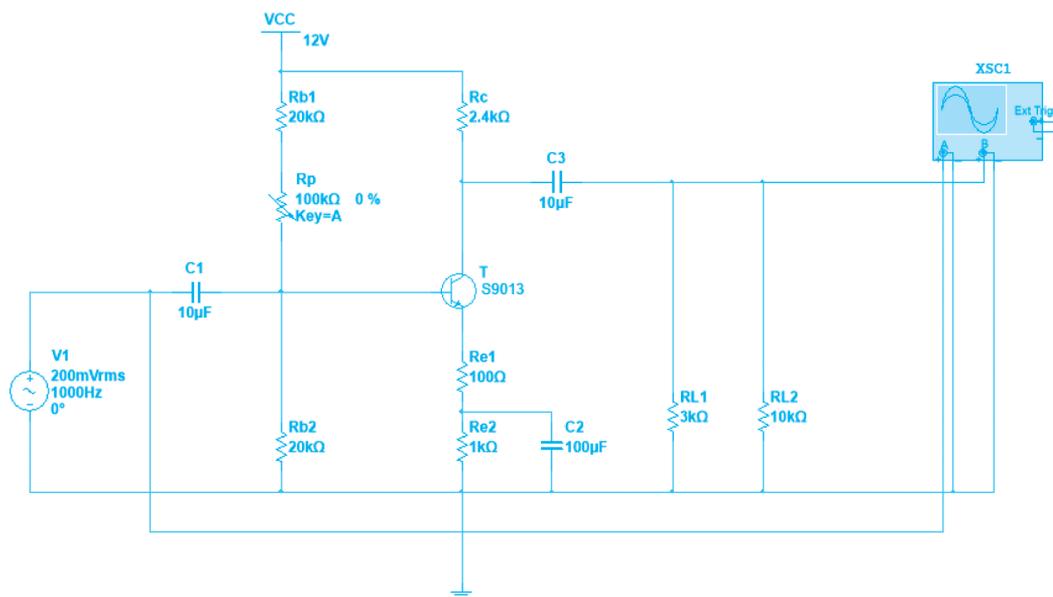
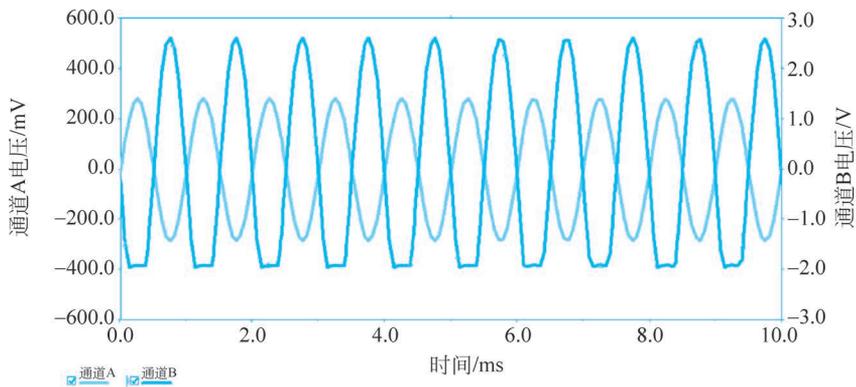
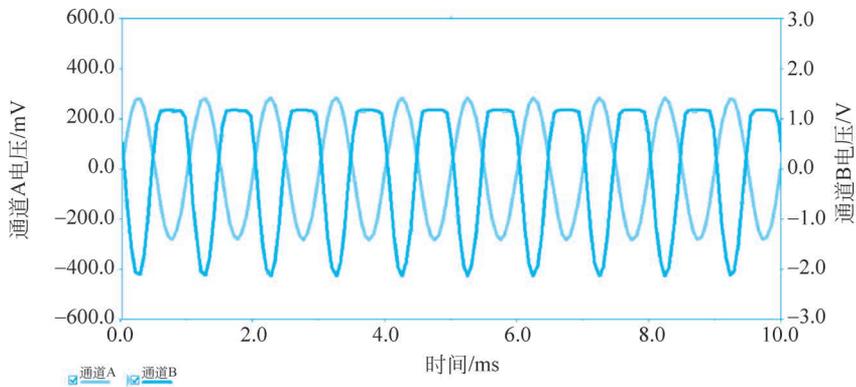


图 3-3-3 共射极放大电路仿真电路图

当调整 R_{p2} 的值时，可以观察仿真波形，分别出现饱和失真和截止失真，如图 3-3-4 和图 3-3-5 所示。

图 3-3-4 仿真波形-饱和失真(调整 R_{p2})图 3-3-5 仿真波形-截止失真(调整 R_{p2})

调整输入信号幅值大小,可发现输出波形发生失真,如图 3-3-6 所示。

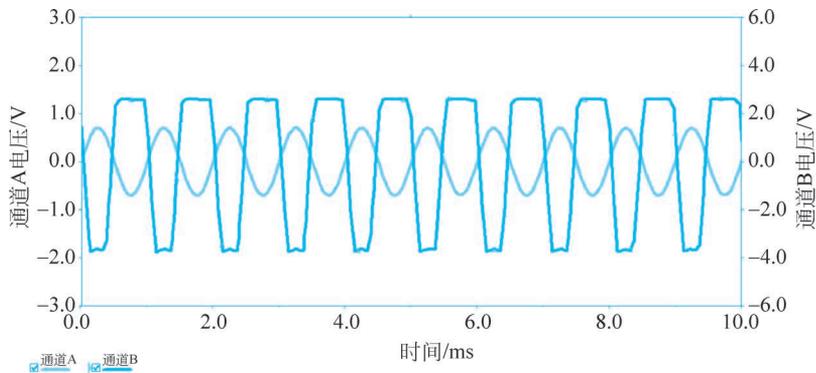


图 3-3-6 仿真波形-截止失真(调整输入信号幅值)

将图 3-3-3 中的 R_{L1} 和 R_{L2} 断开,即负载开路时,得到输出波形如图 3-3-7 所示。

当接入 R_{L1} 时,得到输出波形如图 3-3-8 所示。

当再接入 R_{L2} 时,即 $R_{L1} // R_{L2}$,得到的输出波形如图 3-3-9 所示。

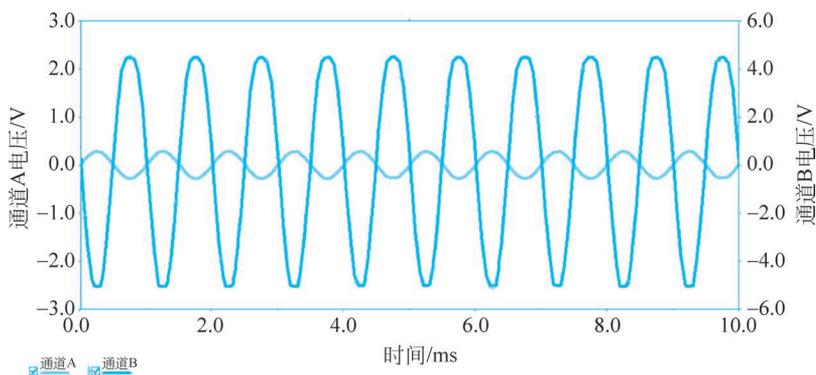
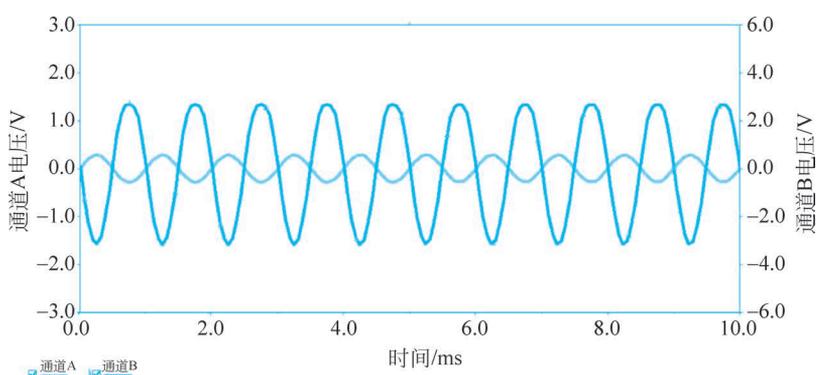
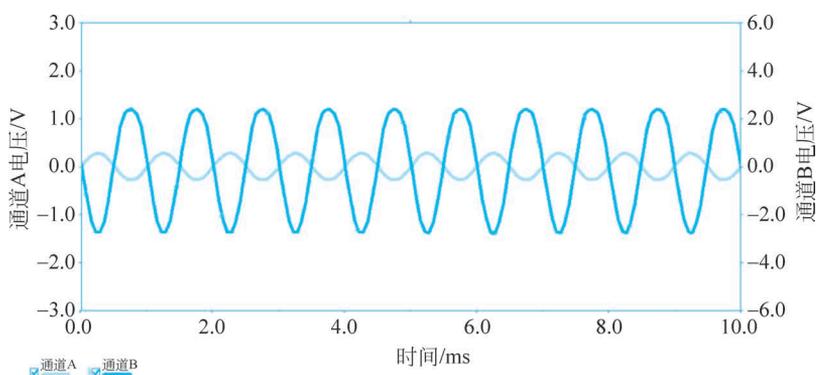


图 3-3-7 仿真波形-负载开路

图 3-3-8 仿真波形-接入负载 R_{L1} 图 3-3-9 仿真波形-接入负载 R_{L2}

六、实验内容

1. 实验步骤

(1) 对电路板进行供电 $V_{CC} = 12V$, 调节 R_{p2} , 使得 $V_C = 7V$, 按照前面所述方法, 测量电路静态工作点各参数值, 注意调节滑动变阻器要使用无感应螺丝刀。

(2) 使信号源输出峰-峰值 $V_{pp} = 200mV$, 频率 $f = 1kHz$ 的正弦波, 接入放大电路的输入端, 用示波器双通道同时显示输出和输入波形图, 注意示波器探头、信号源、直流稳压电源、万用表与电路板要共地。

- (3) 调节 R_{p2} , 观察静态工作点对电路输出波形的影响。
- (4) 测量放大电路动态参数。

2. 注意事项

- (1) 在测试过程中, 使用的所有测量仪器应与实验电路共地。
- (2) 在实际测量中, 应将所有信号和仪器连接完毕后, 再对电路板进行供电。

3. 实验示例

电路面包板整体布局图如图 3-3-10 所示。

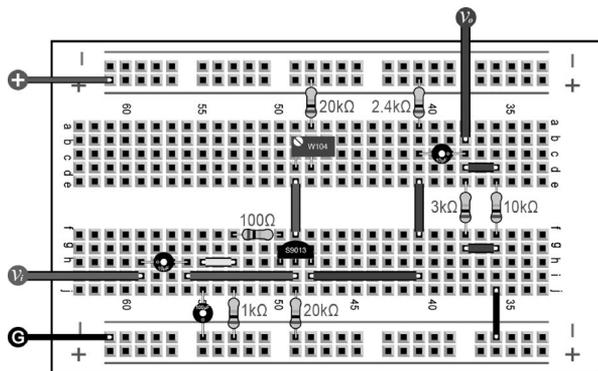


图 3-3-10 共射极放大电路面包板整体布局图(见彩插)

实验结果如图 3-3-11 所示, 通道 1 为输入信号波形, 通道 2 为输出信号波形, 可以发现信号放大约 10 倍, 相位相反。

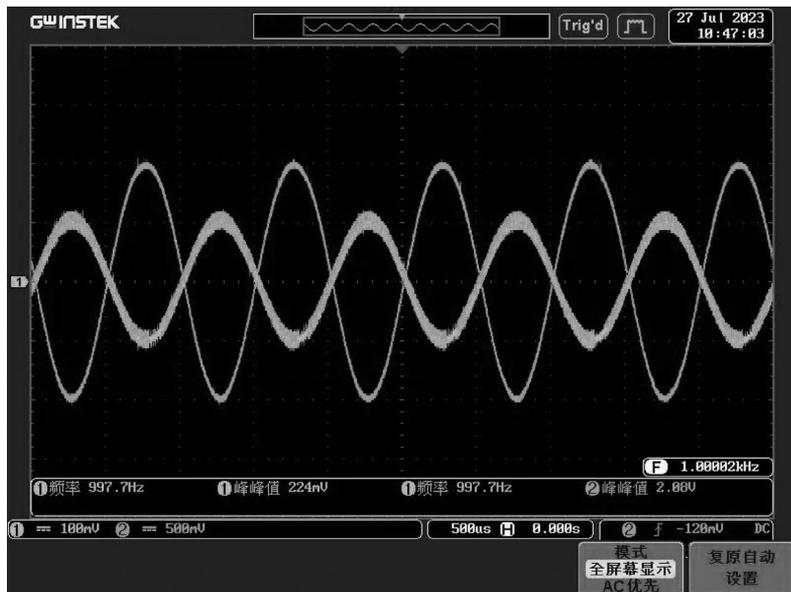


图 3-3-11 共射极放大电路输入输出测试结果

七、实验报告

将实验数据填入表 3-3-4 和表 3-3-5。



面包板布局图



演示视频

表 3-3-4 静态工作点测试

V_B/V	V_E/V	V_C/V	V_{CE}/V	I_B/mA	I_C/mA	I_E/mA

表 3-3-5 动态参数测量

$R_i/k\Omega$	$R_o/k\Omega$	v_o/V	A_v	同时画出 v_o 和 v_i 的波形

思考题

1. 简述静态工作点对输出波形的影响。
2. 如果电路的静态工作点正常,发现实际测得的电压增益比理论计算值低很多,试分析有可能是是什么原因。

3.3.2 拓展实验

一、基本原理

实验电路如图 3-3-12 所示,是一种模拟“知了”叫声的电路,在发出“知了”叫声的同时,发光二极管也能跟随叫声闪烁。



实验报告

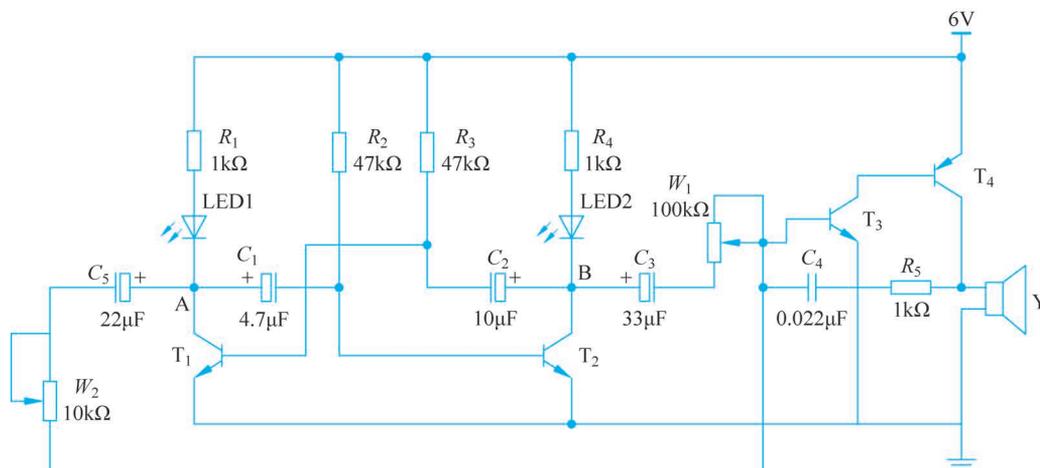


图 3-3-12 模拟“知了”叫声的电路

从图中可以看到,电路中的主要元器件为三极管, T_1 和 T_2 构成低频振荡器,其输出端 B 通过电容 C_3 和电位器 W_1 连接至 T_3 的基极。 T_3 和 T_4 组成一个音频振荡器,其振荡频

率由 R_5 、 C_4 的数值决定,并受低频振荡器输出电压的控制。当 T_2 由导通变为截止时, V_B 也由低电平迅速变为高电平,这一正跳变脉冲加至 T_3 的基极和发射极之间,使 T_3 正偏压增大,音频振荡频率增高;反之,当 T_2 由截止变为导通时,使 T_3 正偏压减小,音频振荡频率变低。于是,这一频率高低变化的音频信号经扬声器后,即可发出连续不断的“知了”叫声。

二、元器件选择

调整 R_3 、 C_2 的值可以改变“知了”叫声的长短, R_3 值的可选范围为 $50 \sim 100\text{k}\Omega$,其他元件参考表 3-3-6。注意, C_2 越大,频率越低, R_3 越大,频率越低。

表 3-3-6 拓展实验器件清单

编号	名称	型号	数量/
R_1 、 R_4 、 R_5	电阻	$1\text{k}\Omega$	3
R_2 、 R_3	电阻	$47\text{k}\Omega$	1
C_1	电解电容	$4.7\mu\text{F}$	1
C_2	电解电容	$10\mu\text{F}$	1
C_3 、 C_5	电解电容	$22\mu\text{F}$	2
C_4	瓷片电容	$0.022\mu\text{F}$	1
T_1 、 T_2 、 T_3	三极管	9014	3
T_4	三极管	9015	1
LED ₁ 、LED ₂	发光二极管	红色	2
W_1	可调电阻	$100\text{k}\Omega$	1
W_2	可调电阻	$10\text{k}\Omega$	1
Y	扬声器	8Ω	1

若从 T_1 的集电极 A 点通过电容 C_5 和电位器 W_2 后接到 T_2 的基极,电路可发出模拟小鸡的叫声,改变电位器 W_2 的值可以出现青蛙或救护车报警声等声音,感兴趣的同学可以自己动手完成这些实验。

三、电路示例

模拟“知了”叫声的电路面包板整体布局图如图 3-3-13 所示。

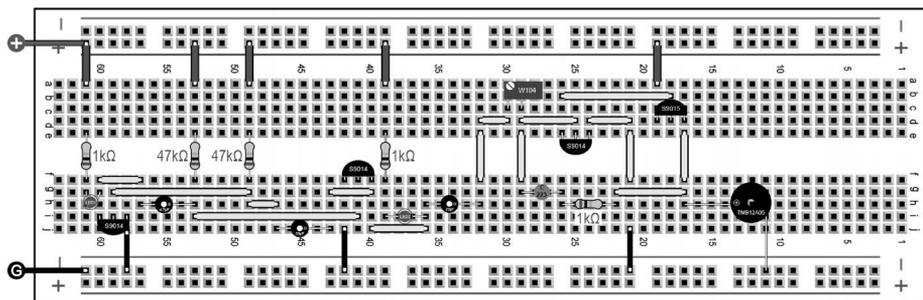


图 3-3-13 模拟“知了”叫声的电路面包板整体布局图(见彩插)

3.4 运算放大电路

3.4.1 基础实验

实验一 运算放大电路(放大)

一、实验目的

1. 掌握集成运算放大器的工作原理和基本特性。
2. 掌握由集成运算放大器构成的反相放大器和同相放大器的特点、性能及测量方法。
3. 熟悉常用电子测量仪器仪表的使用方法。
4. 掌握电子仿真软件 Multisim 的使用方法。

二、实验仪器

1. 多功能混合域示波器 MDO-2000A。
2. 多通道函数信号发生器 MFG-2220HM。
3. 双显测量万用表 GDM-8352。
4. 直流稳压电源 GPD-3303。

三、实验器材

器件清单如表 3-4-1 所示。

表 3-4-1 实验器件清单

编 号	名 称	型 号	数 量
R_1	电阻	10k Ω	1
R_f	电阻	100k Ω	1
R_p	电阻	9.1k Ω	1
A	运算放大器	μ A741	1

四、实验原理

1. 集成运算放大器的内部结构

运算放大器是一种高增益的多级直接耦合放大器,其内部结构框图如图 3-4-1 所示,主要由差动输入级、中间放大级、输出级及偏置电路四部分组成,各部分的作用如下。

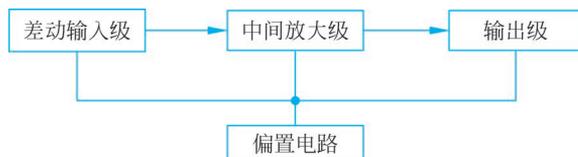


图 3-4-1 运算放大器的组成框图

差动输入级：使运算放大器具有尽可能高的输入电阻及尽可能高的共模抑制比。因此输入级电路一般为差动放大器。

中间放大级：该级电路由多级直接耦合放大器组成,以获得足够高的电压增益。

输出级：使运算放大器具有一定幅度的输出电压、输出电流和尽可能小的输出电阻。

输出过载时有自动保护作用以免损坏集成块。输出级电路一般为互补对称推挽电路。

偏置电路：为各级电路提供合适的工作点。为使工作点稳定，一般采用恒流源偏置电路。

运算放大器的种类很多，这里使用双列直插式的通用单运放 $\mu\text{A}741$ 。其内部结构和外引线排列如图 3-4-2 所示。在外部反馈网络的配合下，它的输入与输出之间可以灵活地实现各种特定的函数关系。在线性方面应用的有基本放大器、基本运算、有源滤波器等；在非线性方面应用的有函数发生器、比较器、精密交-直流变换器等。它具有对不同信号进行组合、运算和处理等多种功能。

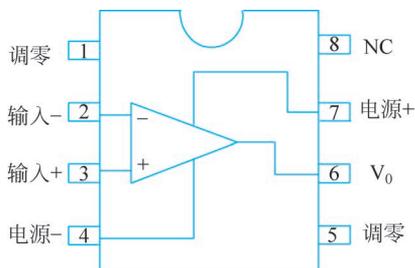


图 3-4-2 $\mu\text{A}741$ 内部结构和外引线排列图

2. 集成运算放大器构成的反相放大器

图 3-4-3 所示为运算放大器 $\mu\text{A}741$ 构成的反相放大器，信号从运算放大器反相端输入，输出信号通过反馈电阻 R_f 与运算放大器反相端相接，电路引入了负反馈，在理想条件下闭环电压增益为

$$A_{vf} = -\frac{R_f}{R_1} \quad (3-4-1)$$

输入电阻：

$$R_i = R_1$$

其中，反馈电阻 R_f 值不能太大，否则会产生较大的噪声及漂移，一般为几十至几百千欧， R_1 的取值应远大于信号源的内阻（注意：运算放大器的 7 脚和 4 脚分别接 $\pm 12\text{V}$ 电源）。

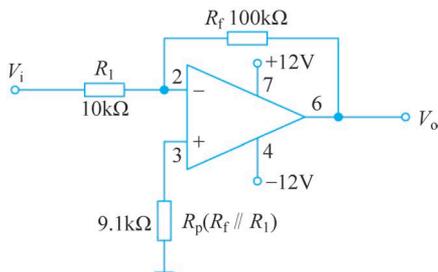


图 3-4-3 反相放大器

3. 集成运算放大器构成的同相放大器

由集成运算放大器构成的同相放大器如图 3-4-4 所示，信号从运算放大器反相端输入，输出信号通过反馈电阻 R_f 与运算放大器反相端相接，电路引入了负反馈，理想条件下的闭环电压增益为

$$A_{vf} = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \quad (3-4-2)$$

输入电阻：

$$R_i = r_{ic}$$

其中， r_{ic} 为运算放大器本身同相端对地的共模输入电阻，一般为 $10^8 \Omega$ 。

若 $R_f = 0$ 或 $R_1 = \infty$ (开路)，则电路变为电压跟随器(图 3-4-5)，输出电压与输入电压大小相等、方向相同。由于其输入阻抗很高，输出阻抗很小，是较理想的电路级间阻抗变换、匹

配电路,在电路中经常用作缓冲器。

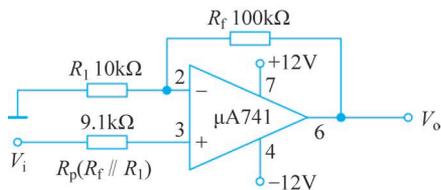


图 3-4-4 同相放大器

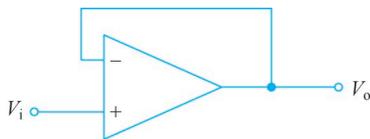


图 3-4-5 电压跟随器

五、预习要求

- (1) 查阅 $\mu A741$ 典型指标数据及引脚功能。
- (2) 理论计算。复习理论教材中反相放大器和同相放大器的工作原理,掌握用虚短和虚断进行分析计算的方法。根据图 3-4-3 和图 3-4-4 所示电路,分别计算反相放大器和同相放大器的闭环电压增益和输入电阻,填入表 3-4-2。

表 3-4-2 闭环电压增益和输入电阻计算

名称	反相放大器	同相放大器
A_{vf}		
R_i		

- (3) 仿真验证。电路仿真使用仿真软件 Multisim,反相放大器仿真电路图如图 3-4-6 所示。注意输出和输入分别接示波器的 A、B 两端,同时观测输入和输出的波形。

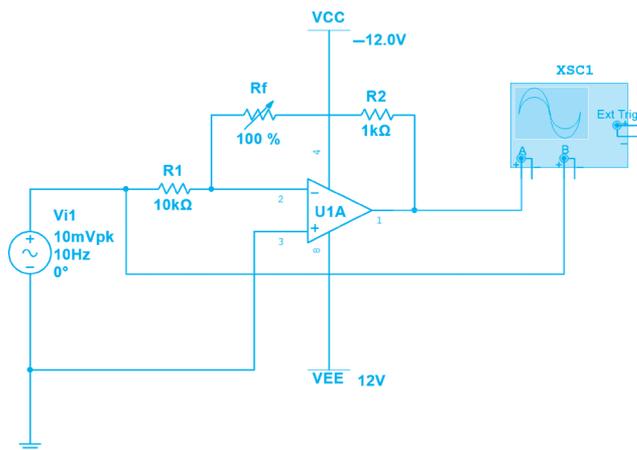


图 3-4-6 反相放大器仿真电路图

当 R_f 为最大值时,输出与输入波形如图 3-4-7 所示,观察可得输出信号与输入信号相比幅度放大了,相位相反。

若减小 R_f 使电压增益减小,输出与输入波形如图 3-4-8 所示,与图 3-4-7 相比,输出电压幅度减小,所以调节 R_f 的大小就可改变放大倍数。

同相放大器仿真电路图如图 3-4-9 所示。输出和输入分别接示波器的 A、B 两端,同时观测输入和输出的波形。

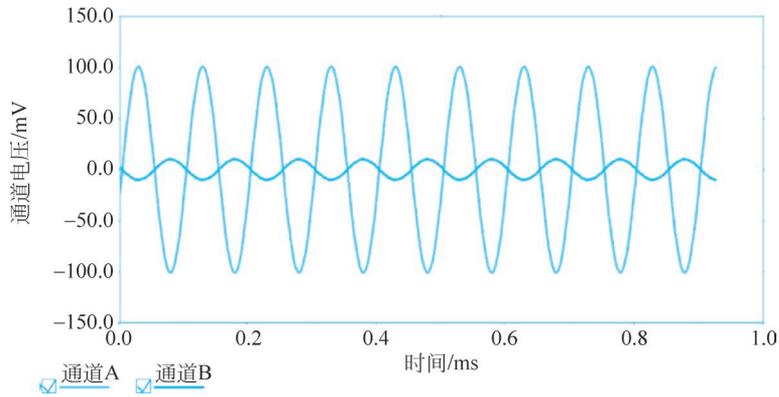
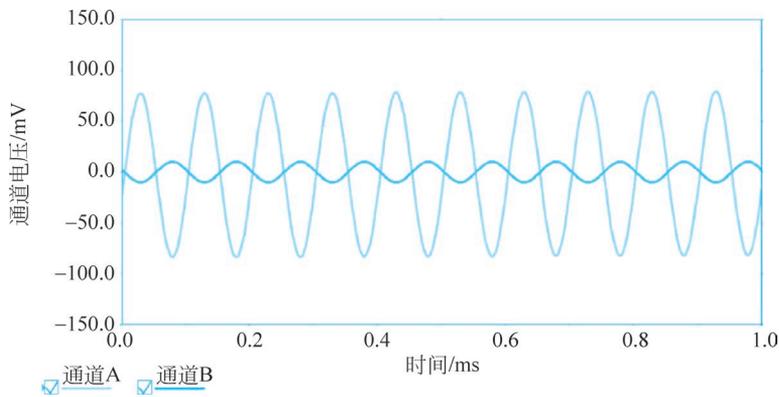
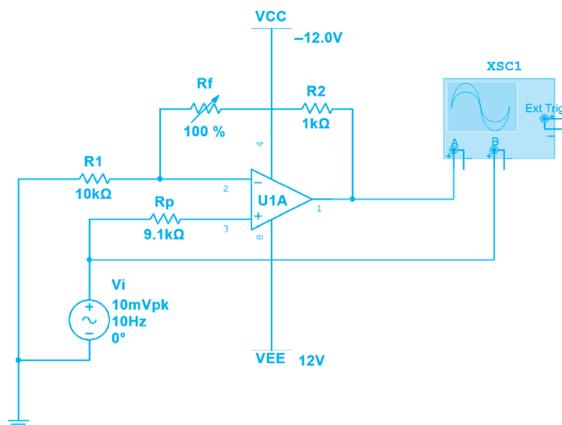
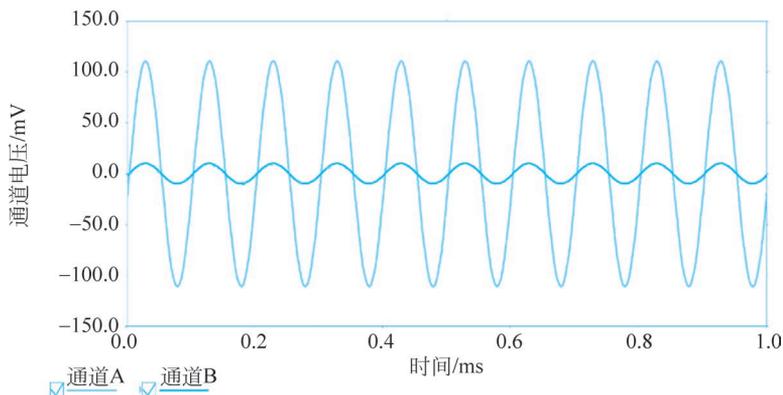
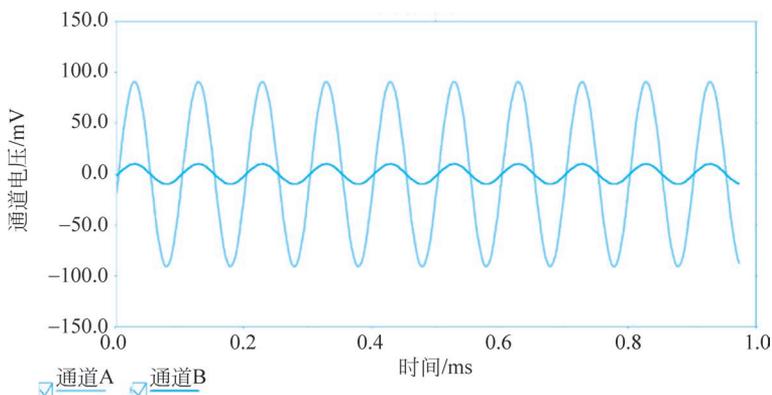
图 3-4-7 反相放大器仿真波形 ($R_f = 100k\Omega$)图 3-4-8 反相放大器仿真波形 ($R_f = 80k\Omega$)

图 3-4-9 同相放大器仿真电路图

当 R_f 为最大值时,输出与输入波形如图 3-4-10 所示,观察可得输出信号与输入信号相比幅度放大了,相位相同。

若减小 R_f 使电压增益减小,输出与输入波形如图 3-4-11 所示,与图 3-4-10 相比,输出电压幅度减小,所以调节 R_f 的大小就可改变放大倍数。

图 3-4-10 同相放大器仿真波形($R_f=100\text{k}\Omega$)图 3-4-11 同相放大器仿真波形($R_f=80\text{k}\Omega$)

六、实验内容

1. 实验步骤

- (1) 按图 3-4-3 设计一个反相放大器,要求输入阻抗 $R_i=10\text{k}\Omega$,闭环电压增益 $A_{vf}=-10$,输入峰-峰值 $V_{pp}=500\text{mV}$,频率 $f=1\text{kHz}$ 的正弦波,测量相应的输出电压 V_o 。
- (2) 按图 3-4-4 设计一个同相放大器,实现 $V_o=6V_i$ ($R_f=100\text{k}\Omega$)。
- (3) 按图 3-4-5 制作一个电压跟随器,自拟几个输入信号,由示波器观察和测量输入、输出电压。

2. 注意事项

- (1) 组装运算放大器实验电路时, $\pm 12\text{V}$ 电源线必须在最后接入,且一定不能接反;
- (2) 实验中运算放大器工作于线性状态,故输出信号的幅度不能超过或接近电源电压($\pm 12\text{V}$),若出现这种情况,可能是输入信号太大或运算放大器芯片损坏。

3. 实验示例

反相放大器电路面包板整体布局图如图 3-4-12 所示。

最终测试结果如图 3-4-13 所示,通道 1 为输入信号波形,通道 2 为输出信号波形,可以发现信号放大约 10 倍,相位相反。



面包板布局图

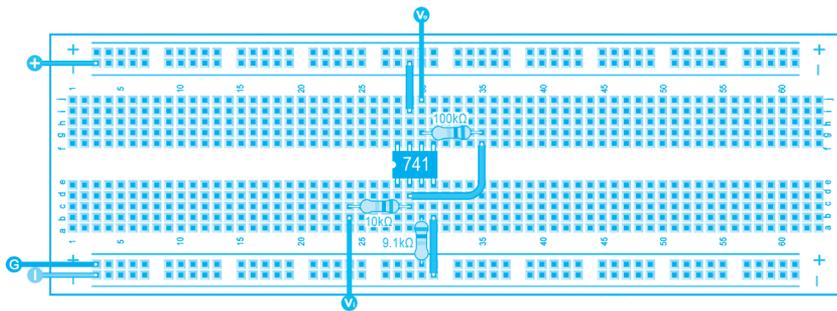


图 3-4-12 反相放大器电路面包板整体布局图(见彩插)



演示视频

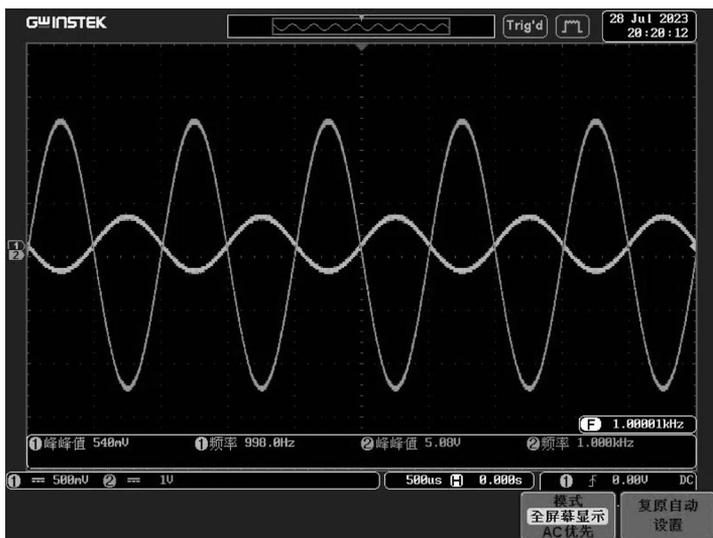


图 3-4-13 反相放大器测试结果



实验报告

七、实验报告

将实验数据填入表 3-4-3 中。

表 3-4-3 闭环电压增益测试

参 数	反相放大器	同相放大器	电压跟随器
V_i/V			
V_o/V			
A_{vf}			

思考题

1. 运算放大器组成的同相和反相放大器,输入阻抗是否一样?为什么?
2. 若实验中运算放大器电源电压为 $\pm 12V$,反相放大器电压增益为 10 倍,输入正弦信号 $V_i=2V$,输出波形是什么样的?为什么?不接 $\pm 12V$ 电源电压运算放大器能工作吗?为什么?

实验二 运算放大电路(运算)

一、实验目的

1. 学会用集成运算放大器构成加法、减法、积分和微分电路。
2. 掌握由集成运算放大器构成运算电路的特点、性能及测量方法。
3. 熟悉常用电子测量仪器仪表的使用方法。
4. 掌握电子仿真软件 Multisim 的使用方法。

二、实验仪器

1. 多功能混合域示波器 MDO-2000A。
2. 多通道函数信号发生器 MFG-2220HM。
3. 双显测量万用表 GDM-8352。
4. 直流稳压电源 GPD-3303。

三、实验器材

实验器件清单如表 3-4-4 所示。

表 3-4-4 实验器件清单

编 号	名 称	型 号	数 量
R_1	电阻	10k Ω	1
R_2	电阻	10k Ω	1
R_3	电阻	100k Ω	1
R_f	电阻	100k Ω	1
R_p	电阻	4.7k Ω	1
R_s	电阻	100 Ω	1
C	电容	0.01 μ F	1

四、实验原理

1. 集成运算放大器构成的反相比例加法器

图 3-4-14 所示为运算放大器 μ A741 构成的反相比例加法电路,输入信号 V_{i1} 和 V_{i2} 从运算放大器反相端输入,输出信号通过反馈电阻 R_f 与运算放大器反相端相接,电路引入了负反馈,利用叠加定理和虚短、虚断可求出在理想条件下的输出电压:

$$V_o = - \left(\frac{R_f}{R_1} V_{i1} + \frac{R_f}{R_2} V_{i2} \right) \quad (3-4-3)$$

2. 集成运算放大器构成的减法器

如图 3-4-15 所示,当运算放大器的反相端和同相端分别输入信号 V_1 和 V_2 时,则输出电压:

$$V_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1} \right) \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} \right) V_2 - \frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (3-4-4)$$

当 $\frac{R_f}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$ 时,输出电压与两输入电压的差值成正比,实现了对差模信号的放大,为差动放大器。

$$V_o = \frac{R_f}{R_1}(V_2 - V_1) \quad (3-4-5)$$

当 $R_1 = R_2 = R_3 = R_f$ 时, 输出电压 $V_o = V_2 - V_1$, 为减法器。

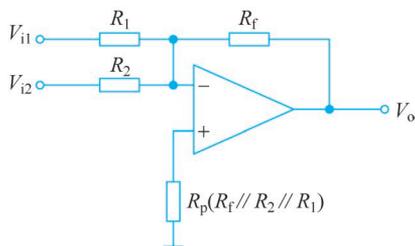


图 3-4-14 反相比例加法器

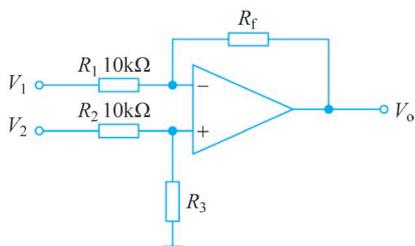


图 3-4-15 减法器

3. 集成运算放大器构成的积分器

积分器如图 3-4-16 所示, 输出电压:

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_i dt \quad (3-4-6)$$

式中, RC 为积分时间常数。

为限制电路的低频电压增益, 可将反馈电容 C 与一电阻 R_f 并联。当输入频率大于 $f_0 = \frac{1}{2\pi R_f C}$ 时, 电路为积分器; 若输入频率远低于 f_0 , 则电路近似一个反相器。

4. 集成运算放大器构成的微分器

微分器如图 3-4-17 所示, 输出电压:

$$V_o = -R_f C \frac{dV_i}{dt} \quad (3-4-7)$$

式中, $R_f C$ 为微分时间常数。

为限制电路的高频增益, 防止自激(高频), 通常在输入端与电容 C 之间接入一小电阻 R_s , 当输入频率低于 $f_0 = \frac{1}{2\pi R_f C}$ 时, 电路起微分作用; 若输入频率远高于 f_0 时, 则电路近似一个反相放大器。

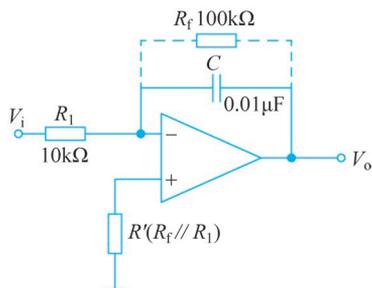


图 3-4-16 积分器

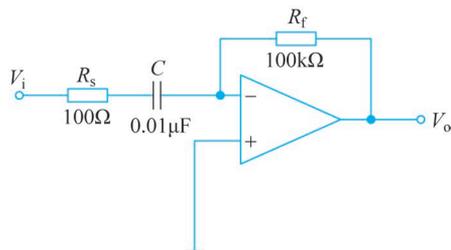


图 3-4-17 微分器

五、预习要求

1. 理论计算

复习理论教材中反相加法器、减法器、积分器和微分器的工作原理, 掌握用虚短和虚断

分析计算输出电压的方法。

2. 仿真验证

电路仿真使用仿真软件 Multisim, 反相加法器仿真电路图如图 3-4-18 所示。输入两路频率为 1kHz、峰-峰值分别为 400mV、600mV 的正弦信号, 用示波器观察输出电压, 结果如图 3-4-19 所示。

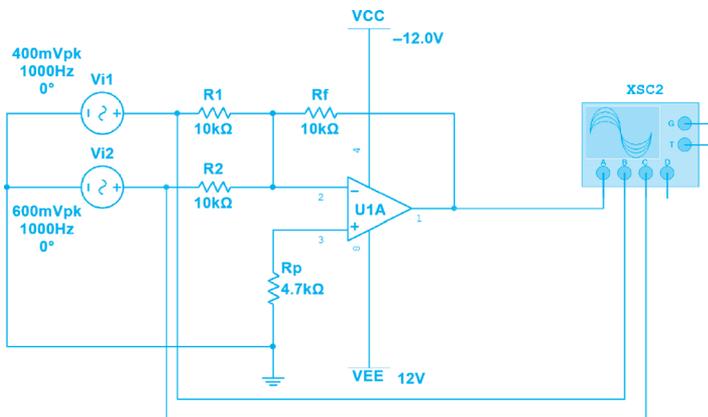


图 3-4-18 反相加法器仿真电路图

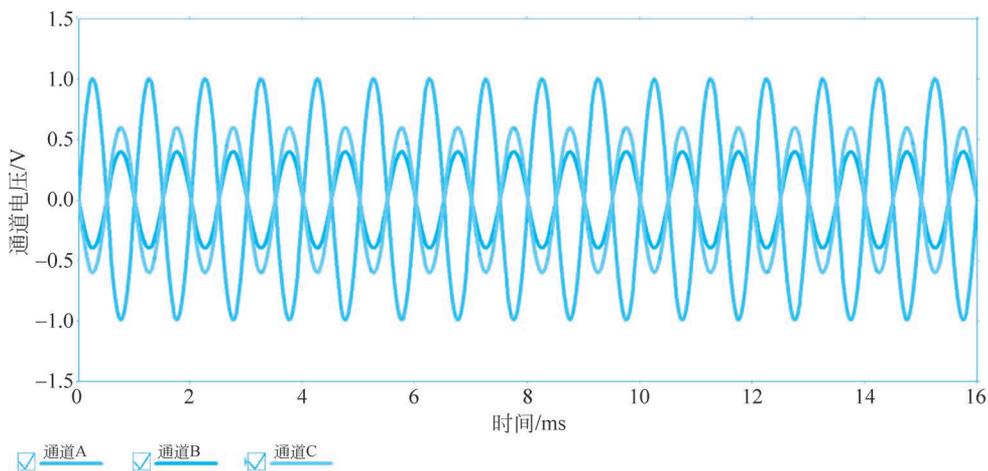


图 3-4-19 反相加法器仿真结果

减法器仿真电路如图 3-4-20 所示。输入两路频率为 1kHz、峰-峰值分别为 400mV、600mV 的正弦信号, 用示波器观察输出电压, 结果如图 3-4-21 所示。

积分器仿真电路图如图 3-4-22 所示, 给电路输入频率为 1kHz、幅值为 1V 的方波信号, 用示波器同时观察输入和输出波形, 结果如图 3-4-23 所示, 输出为三角波信号。

微分器仿真电路图如图 3-4-24 所示, 给电路输入频率为 1kHz、幅值为 1V 的方波信号, 用示波器同时观察输入和输出波形, 结果如图 3-4-25 所示, 输出为冲激信号。

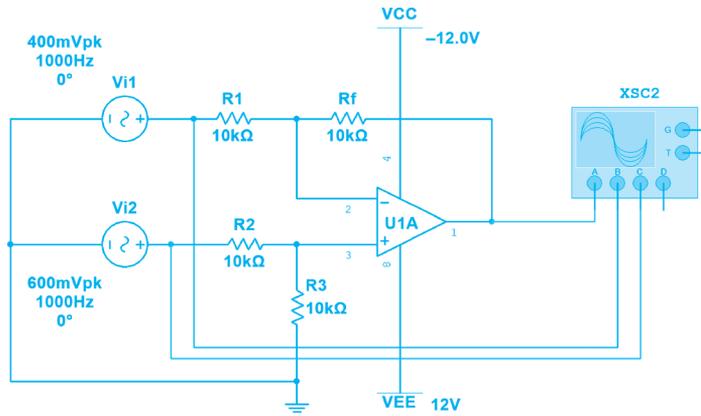


图 3-4-20 减法器仿真电路图

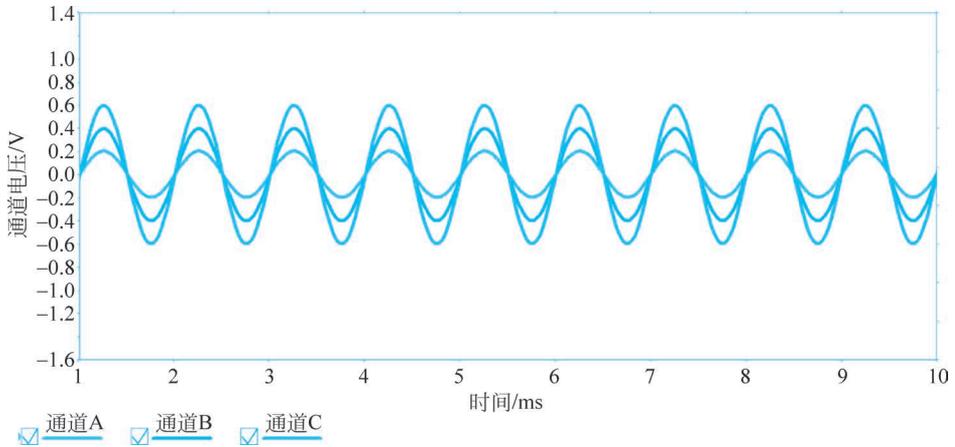


图 3-4-21 减法器仿真结果

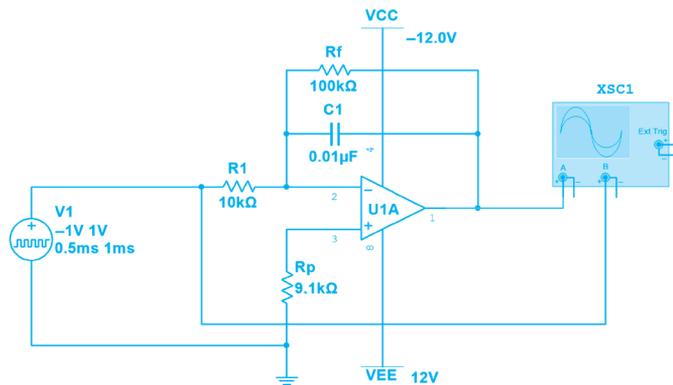


图 3-4-22 积分器仿真电路图

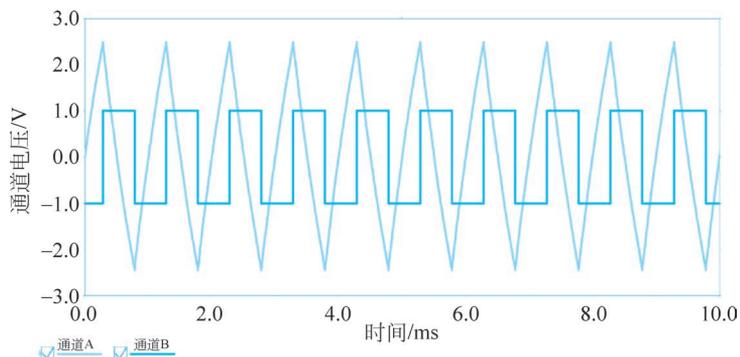


图 3-4-23 积分器仿真波形

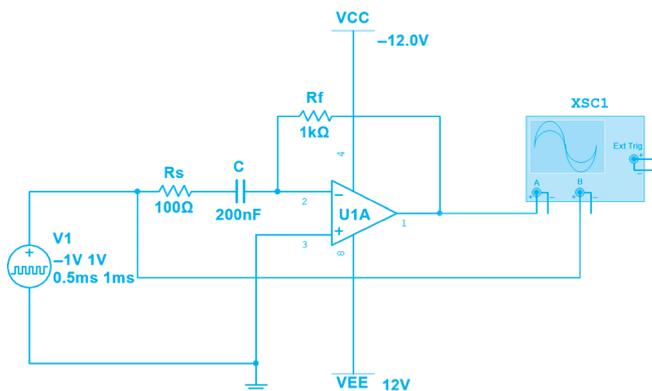


图 3-4-24 微分器仿真电路图

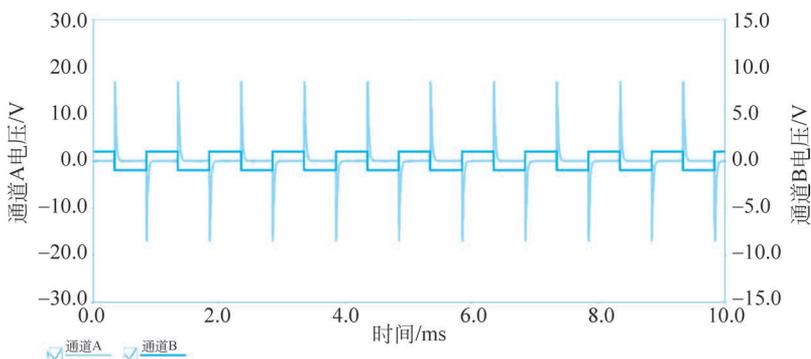


图 3-4-25 微分器仿真波形

六、实验内容

1. 实验步骤

(1) 按图 3-4-14 设计一个电路,要求实现 $V_o = -(V_{i1} + V_{i2})$ 。两路输入信号的频率为 1kHz,峰-峰值为 500mV,测量相应的输出电压 V_o 。

(2) 按图 3-4-15 设计一个电路,要求实现 $V_o = 2(V_{i2} - V_{i1})$ 。输入两路频率为 1kHz 的正弦信号, V_{i1} 峰-峰值为 200mV, V_{i2} 峰-峰值为 500mV,测量输出电压 V_o 。

(3) 按图 3-4-16 所示电路连接,输入端加入频率为 1kHz、幅值为 1V 的方波,用双踪示

波器同时观察 V_i 和 V_o 的波形(注意积分电阻和电容的选值)。

(4) 按图 3-4-17 所示电路连接,输入三角波或方波信号,自己根据原理确定信号幅度和频率,用示波器观察输入、输出波形。

2. 注意事项

(1) 组装运放实验电路时,±12V 电源线必须在最后接入,且一定不能接反。

(2) 集成运算放大器在使用时要注意两点:一是“调零”,二是“消振”。首先,在输出信号中有直流分量的应用场合下,在电源接通后,输入信号为零时,调节调零电位器,使运算放大器的输出为零。其次是在改变反馈网络时产生自激振荡,需采用 RC 网络补偿来消除,目前,许多运算放大器不需外部补偿。

3. 实验示例

反相加法器电路面包板整体布局图如图 3-4-26 所示。

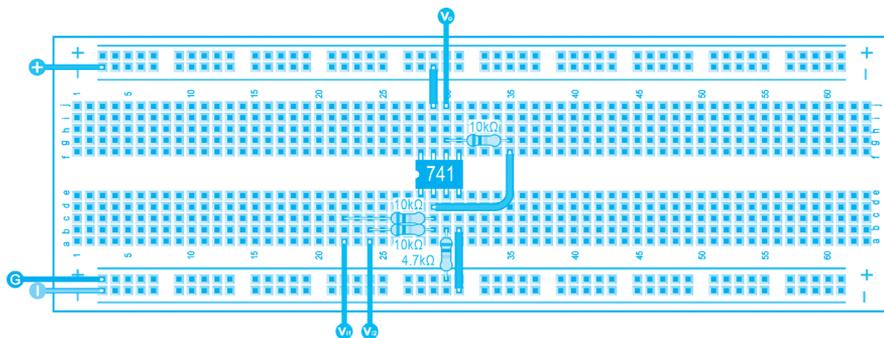


图 3-4-26 反相加法器电路面包板整体布局图(见彩插)

实验结果如图 3-4-27 所示,实现了对两输入信号的反相加法运算。

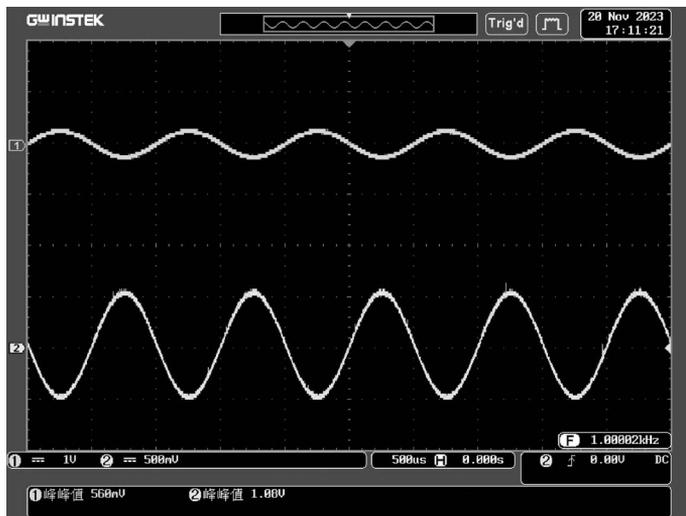


图 3-4-27 最终测试结果

七、实验报告

将实验数据分别填入表 3-4-5~表 3-4-8 中并与预习计算值进行对比。



面包板布局图



演示视频



实验报告

表 3-4-5 反相加法器测试

V_{i1} (峰-峰值)/V	V_{i2} (峰-峰值)/V	V_o (峰-峰值)/V

表 3-4-6 减法器测试

V_{i1} (峰-峰值)/V	V_{i2} (峰-峰值)/V	V_o (峰-峰值)/V

表 3-4-7 积分器测试

画出 V_i 与 V_o 波形

表 3-4-8 微分器测试

画出 V_i 与 V_o 波形

思考题

1. 运算放大器组成的积分电路,输入信号频率为什么不能太低?
2. 运算放大器组成的微分电路,输入信号频率为什么不能太高?

3.4.2 拓展实验

一、基本原理

湿度检测报警电路如图 3-4-28 所示,主要由检测电路、同相放大器、电压比较器、报警电路构成。湿度信号通过湿敏电阻 R_p 转换为电信号,转换得到的电信号通过由运算放大器 A_1 构成的同相放大器进行放大,放大后的信号经过由运算放大器 A_2 构成的电压比较器

与阈值电压进行比较,当 A_2 同相端电位高于反相端时,电压比较器输出高电平,三极管 T_1 导通,扬声器发声报警,发光二极管 LED_2 亮;反之,电压比较器输出低电平,无报警信号。调节电位器 W_1 的大小可调整电压比较器的门限电压即湿度报警阈值。

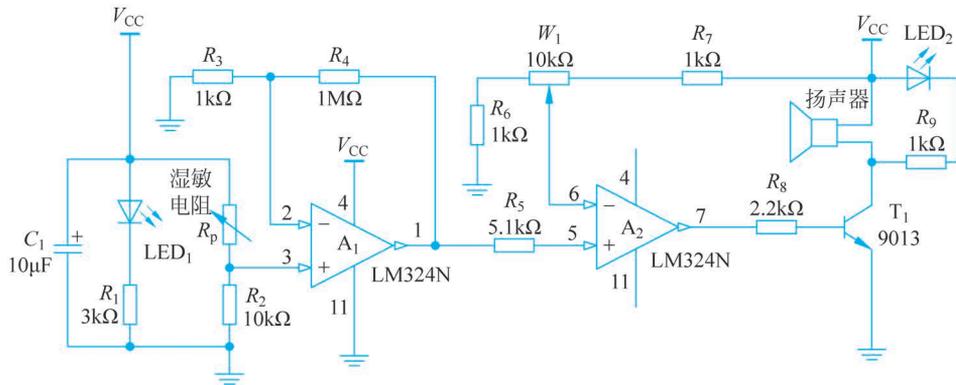


图 3-4-28 湿度检测报警电路

二、元器件选择

拓展实验器件清单如表 3-4-9 所示。

表 3-4-9 拓展实验器件清单

编 号	名 称	型 号	数 量
R_1	电阻	3k Ω	1
R_2	电阻	10k Ω	1
R_3 、 R_6 、 R_7 、 R_9	电阻	1k Ω	4
R_4	电阻	1M Ω	1
R_5	电阻	5.1k Ω	1
R_8	电阻	2.2k Ω	1
R_p	湿敏电阻	AM1001	1
W_1	电位器	10k Ω	1
T_1	三极管	9013	1
LED_1 、 LED_2	发光二极管	绿色、红色	2
A_1 、 A_2	运算放大器	LM324	1

三、电路示例

湿度检测报警电路面包板整体布局图如图 3-4-29 所示。

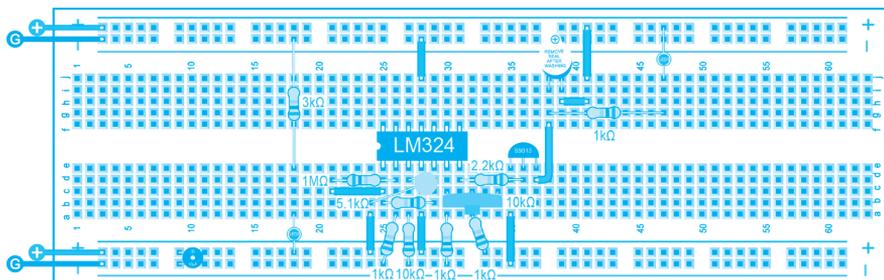


图 3-4-29 湿度检测报警电路面包板整体布局图(见彩插)



面包板布局图



演示视频

3.5 有源滤波器

3.5.1 基础实验

一、实验目的

1. 熟悉有源滤波器的电路构成及其特性。
2. 掌握点频法测量有源滤波器的幅频特性曲线方法。
3. 熟悉常用电子测量仪器仪表的使用方法。
4. 掌握电子仿真软件 Multisim 的使用方法。
5. 了解有源滤波器电路的主要用途。

二、实验仪器

1. 多功能混合域示波器 MDO-2000A。
2. 多通道函数信号发生器 MFG-2220HM。
3. 双显测量万用表 GDM-8352。
4. 直流稳压电源 GPD-3303。

三、实验器材

实验器件清单如表 3-5-1 所示。

表 3-5-1 实验器件清单

编 号	名 称	型 号	数 量
R	电阻	20k Ω	2
R_f	电阻	56k Ω	1
R_1	电阻	100k Ω	1
C	电解电容	0.01 μ F	2
A	集成运算放大器	741	1
Q_1	面包板		1
	导线		若干

四、实验原理

由 RC 元件与运算放大器组成的滤波器称为 RC 有源滤波器,其功能是让一定频率范围内的信号通过,抑制或急剧衰减此频率范围以外的信号。可用在信息处理、数据传输、抑制干扰等方面,但因受运算放大器频带限制,这类滤波器主要用于低频范围。根据对频率范围的选择不同,可分为低通(LP)、高通(HP)、带通(BP)与带阻(BE)四种滤波器,它们的幅频特性如图 3-5-1 所示。具有理想幅频特性的滤波器是很难实现的,只能用实际的幅频特性去逼近理想的。一般来说,滤波器的幅频特性越好,其相频特性越差,反之亦然。滤波器的阶数越高,幅频特性衰减的速率越快,但 RC 网络的节数越多,元件参数计算越烦琐,电路调试越困难。任何高阶滤波器均可以用较低的二阶 RC 有源滤波器级联实现。

1. 低通滤波器

实验电路如图 3-5-2 所示,从反馈放大电路角度看,同相比例放大电路属电压控制的电压源,所以这是一个压控电压源型二阶低通滤波电路。

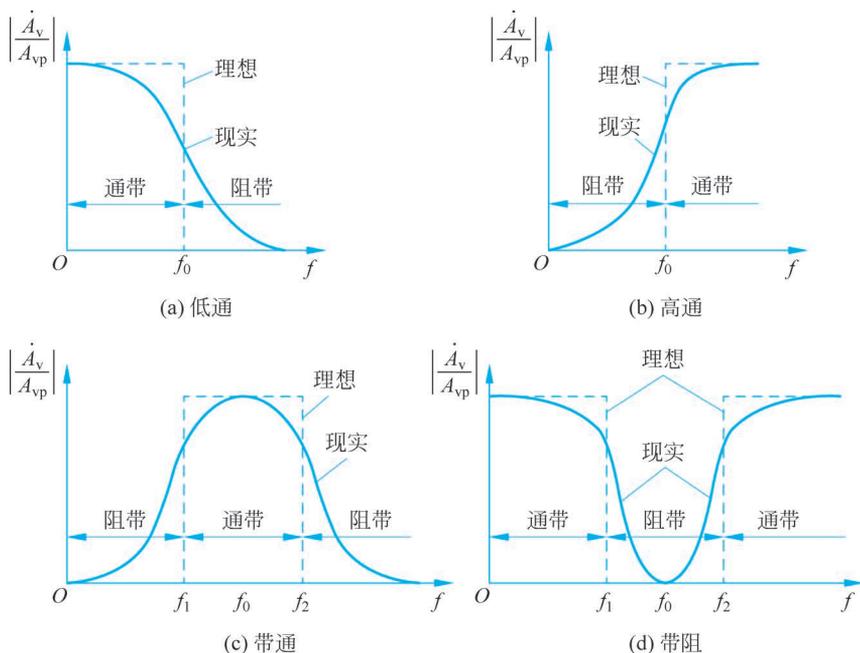


图 3-5-1 四种滤波电路的幅频特性示意图

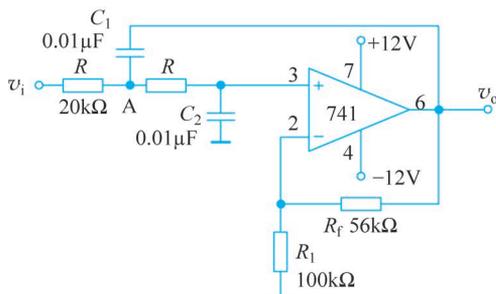


图 3-5-2 二阶低通滤波器

图 3-5-2 中 C_1 的另外一端接到输出端, 形成运算放大器的另一个反馈。尽管它可能会引入正反馈, 但当信号频率趋于零时, C_1 的容抗趋于无穷大, 反馈很弱; 而当信号频率趋于无穷大时, C_2 的容抗趋于零, 即 v_o 也几乎为零。也就是说, 在两种极端频率情况下, 正反馈都很弱。因此, 只要参数选择合适, 就可以在全频域控制正反馈的强度, 不致使电路自激振荡; 而在截止频率附近引入正反馈, 可以使 ω_c 附近的电压增益得到提高, 改善 ω_c 附近的幅频响应。所以, 电路中的运算放大器同时引入了正反馈和负反馈(由 R_f 引入的)。

有源滤波电路的性能指标主要包括传递函数、幅频响应和通带截止角频率, 下面分别介绍各个参数的测量方法。

1) 传递函数 $A(s)$

滤波电路的传递函数是指输出电压和输入电压之比, 即

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} \quad (3-5-1)$$

根据之前的描述可知, 同相放大器的电压增益 A_{vf} 就是低通滤波器的通带电压增益

A_0 , 即

$$A_0 = A_{vf} = \frac{V_o(s)}{V_p(s)} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad (3-5-2)$$

考虑运算放大器的同相输入端电压为

$$V_p(s) = \frac{V_o(s)}{A_{vf}} \quad (3-5-3)$$

对于节点 A, 应用 KCL 可得

$$\frac{V_i(s) - V_a(s)}{R} - [V_a(s) - V_o(s)]sC - \frac{V_a(s) - V_p(s)}{R} = 0 \quad (3-5-4)$$

联立求解, 可得电路的传递函数为

$$A(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{A_{vf}}{1 + (3 - A_{vf})sCR + (sCR)^2} \quad (3-5-5)$$

令

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (3-5-6)$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{vf}} \quad (3-5-7)$$

$$A(s) = \frac{A_{vf}}{1 + \frac{1}{Q\omega_c}s + \frac{1}{\omega_c^2}s^2} = \frac{A_0}{1 + \frac{1}{Q}\left(\frac{s}{\omega_c}\right) + \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2} \quad (3-5-8)$$

其中, ω_c 称为特征角频率, Q 称为等效品质因数。

实验中, 用示波器的两个探头同时测试输入信号 v_i 与输出信号 v_o , 观察波形, 并同时记录数据, 计算出电压放大倍数 A_v 。同时可根据理论课学习的计算公式(3-5-2), 验证理论计算是否正确。

2) 幅频响应

将 $s = j\omega$ 代入, 得到实际的频率响应表达式

$$\dot{A}(j\omega) = \frac{A_0}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^2 + j\frac{1}{Q}\frac{\omega}{\omega_c}} \quad (3-5-9)$$

当 $\omega = \omega_c$ 时, 上式可以化简为

$$\dot{A}(j\omega) \Big|_{\omega=\omega_c} = -jQA_0 \quad (3-5-10)$$

3) 通带截止角频率(ω_p)

通带截止角频率是指幅频响应曲线在通带内下降到误差范围以外的频率点。通常定义 $|A/A_0| = 1/\sqrt{2}$ 对应的频率点为通带截止角频率或者 3dB 截止频率。由于该频率点输出信号的功率正好等于通带增益下输出信号功率的一半, 所以也称半功率点。

注意: 只有当 $Q = 0.707$ 时, ω_c 才与通带截止角频率相等。

2. 高通滤波器

高通滤波电路与低通滤波电路有对偶关系, 如果将 RC 低通电路中滤波元件 R 和 C 的位置互换, 就可得到 RC 高通滤波电路。将图 3-5-2 电路中 R 和 C 的位置互换, 即可得到二

阶压控电压源高通滤波电路,如图 3-5-3 所示。

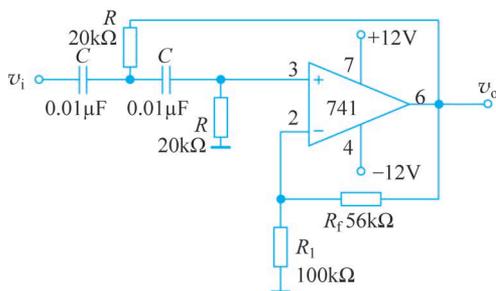


图 3-5-3 二阶高通滤波器

传递函数:

$$A(s) = \frac{A_{vf}s^2}{s^2 + \frac{\omega_c}{Q}s + \omega_c^2} = \frac{A_0 \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2}{1 + \frac{1}{Q} \left(\frac{s}{\omega_c}\right) + \left(\frac{s}{\omega_c}\right)^2} \quad (3-5-11)$$

式中

$$\omega_c = \frac{1}{RC} \quad (3-5-12)$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{vf}} \quad (3-5-13)$$

$$A_0 = A_{vf} \quad (3-5-14)$$

将 $s = j\omega$ 代入,整理得到实际的二阶高通电路频率响应表达式:

$$\dot{A}(j\omega) = \frac{A_0}{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2 - j\frac{1}{Q} \frac{\omega_c}{\omega}} \quad (3-5-15)$$

同理,为了保证电路稳定工作,要求 $A_{vf} < 3$ 。当 $Q = 0.707$ 时,幅频响应曲线最平坦,此时下限截止角频率与特征角频率相等,即 $\omega_L = \omega_c$ 。

3. 带通滤波器

将低通和高通滤波电路串联,且使低通滤波电路的截止角频率 ω_H 大于高通滤波器的截止角频率 ω_L ,则在 $\omega_L \sim \omega_H$ 之间形成一个通带,其他频率范围内为阻带,从而构成带通滤波器,电路如图 3-5-4 所示。

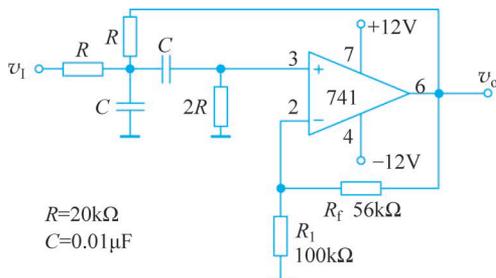


图 3-5-4 二阶带通滤波器

通过列写电路方程,可导出带通滤波电路的传递函数。

$$A(s) = \frac{A_{vf}sCR}{1 + (3 - A_{vf})sCR + (sCR)^2} \quad (3-5-16)$$

式中:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad (3-5-17)$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{vf}} \quad (3-5-18)$$

$$A_0 = \frac{A_{vf}}{3 - A_{vf}} \quad (3-5-19)$$

$$A(s) = \frac{A_0 \frac{s}{Q\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q} \frac{s}{\omega_0} + \left(\frac{s}{\omega_0}\right)^2} \quad (3-5-20)$$

将 $s = j\omega$ 代入,整理得到实际的二阶带通电路频率响应表达式:

$$\dot{A}(j\omega) = \frac{A_0 \frac{1j\omega}{Q\omega_0}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2 + j\frac{1\omega}{Q\omega_0}} = \frac{A_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad (3-5-21)$$

式(3-5-21)表明,当 $\omega = \omega_0$ 时,带通滤波电路具有最大电压增益,且有 $\dot{A}(j\omega) = A_0 = A_{vf}/(3 - A_{vf})$,这就是带通滤波电路的通带电压增益。

带通滤波电路的两个截止频率分别为

$$\omega_L = \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{4 + \frac{1}{Q^2}} - \frac{1}{Q} \right) \quad (3-5-22)$$

$$\omega_H = \frac{\omega_0}{2} \left(\sqrt{4 + \frac{1}{Q^2}} + \frac{1}{Q} \right) \quad (3-5-23)$$

五、预习要求

1. 理论计算

复习理论教材中有源滤波器的工作原理,掌握滤波器的通带电压增益 A_0 和通带截止角频率 ω_p 的计算方法。根据图 3-5-2 和图 3-5-3,试计算以下参数,并填入表 3-5-2。

表 3-5-2 指标参数

名称	A_0	ω_p
低通滤波器		
高通滤波器		

根据图 3-5-4,试计算带通滤波电路的通带电压增益 A_0 、中心角频率 ω_0 、两个截止角频率 ω_L 和 ω_H ,并填入表 3-5-3。

表 3-5-3 指标参数

名称	A_0	ω_0	ω_L	ω_H
带通滤波器				

按照图 3-5-2 所示电路连线,测试二阶低通滤波器的幅频响应,测得截止频率,将结果填入表 3-5-4。

表 3-5-4 低通滤波器测试

f/Hz	50	200	400	600	800	900	1k	5k	10k
V_o/V_i									

按照图 3-5-3 所示电路连线,测试二阶高通滤波器的幅频响应,测得截止频率,将结果填入表 3-5-5。

表 3-5-5 高通滤波器测试

f/Hz	50	300	500	700	900	1k	2k	5k	10k
V_o/V_i									

按照图 3-5-4 所示电路连线,测试二阶带通滤波器的幅频响应,测得截止频率,将结果填入表 3-5-6。

表 3-5-6 带通滤波器测试

f/Hz	50	200	400	600	800	1k	1.5k	2k	5k
V_o/V_i									

2. 仿真实验

电路仿真使用仿真软件 Multisim,二阶有源低通滤波仿真电路图如图 3-5-5 所示。注意输入和输出分别接示波器的 A、B 两端,同时观测输入和输出的波形。

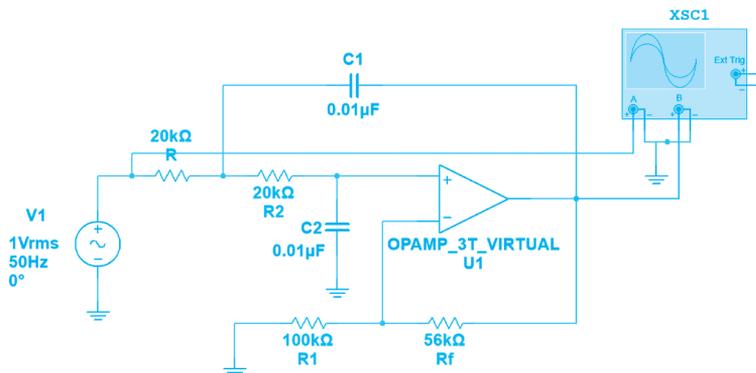


图 3-5-5 二阶有源低通滤波仿真电路图

当调整输入信号的频率时,可以观察仿真波形,当频率为 50Hz 时,输出信号的幅值约为输入信号幅值的 1.56 倍,如图 3-5-6 所示;当频率增大到 5kHz 时,输出信号幅值几乎为零,如图 3-5-7 所示。

二阶有源高通滤波仿真电路如图 3-5-8 所示。注意输入和输出分别接示波器的 A、B 两

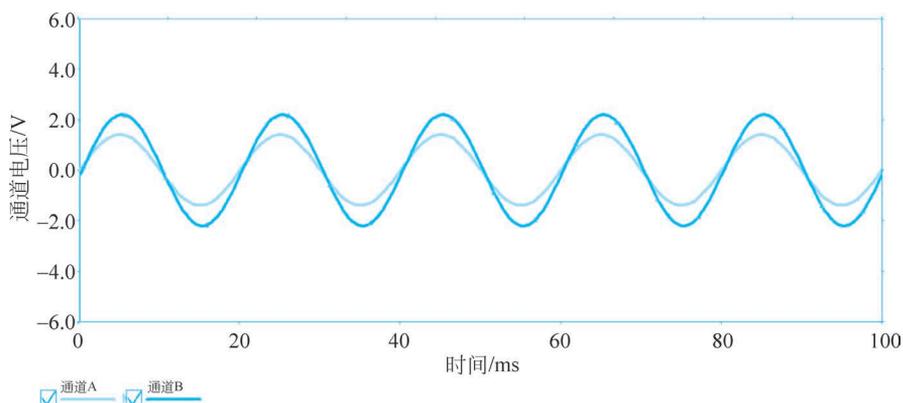


图 3-5-6 50Hz 仿真波形

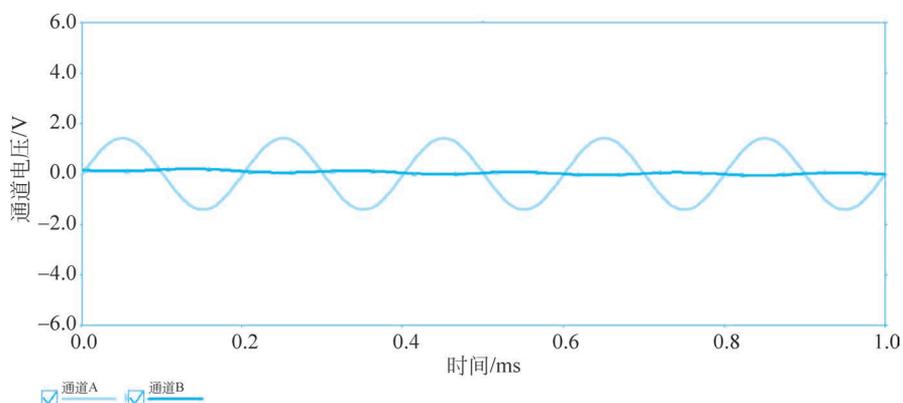


图 3-5-7 5kHz 仿真波形

端,同时观测输入和输出的波形。

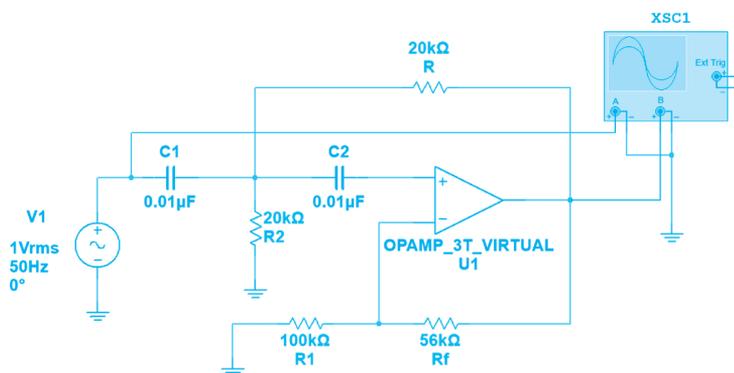


图 3-5-8 二阶有源高通滤波仿真电路图

高通滤波器的仿真效果与低通正好相反,调整输入信号的频率,当频率为 50Hz 时,输出信号的幅值明显衰减,如图 3-5-9 所示;当频率增大到 5kHz 时,输出信号得到放大,如图 3-5-10 所示。

二阶有源带通滤波仿真电路图如图 3-5-11 所示。注意输入和输出分别接示波器的 A、B 两端,同时观测输入和输出的波形。

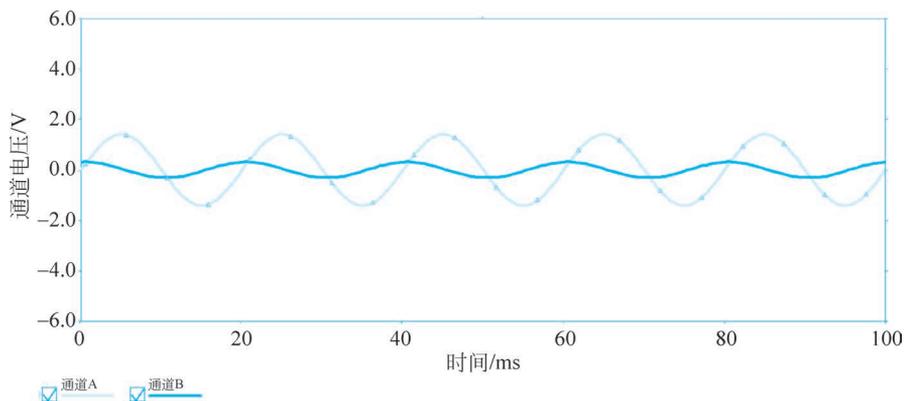


图 3-5-9 50Hz 仿真波形

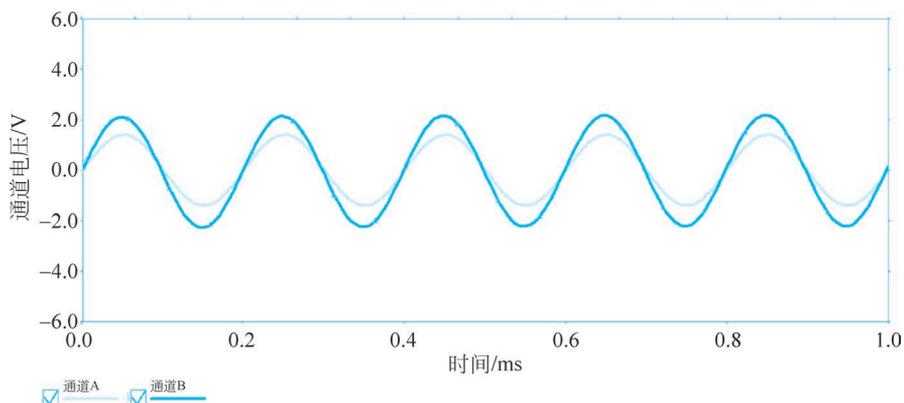


图 3-5-10 5kHz 仿真波形

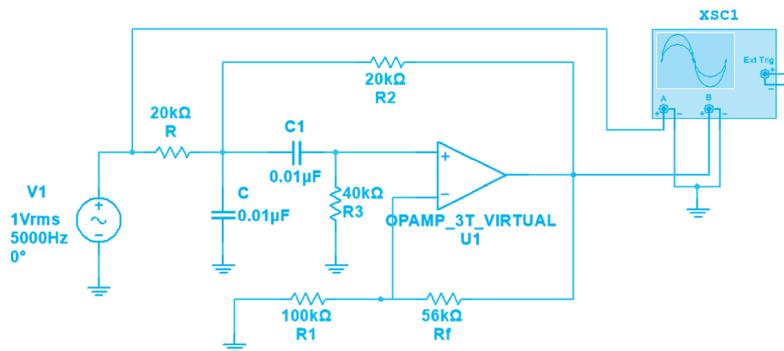


图 3-5-11 二阶有源带通滤波仿真电路图

调整输入信号的频率,当频率为 800Hz 时,输出信号的幅值最大,如图 3-5-12 所示;当频率增大到 5kHz 或衰减到 50Hz 时,输出信号得到衰减,如图 3-5-13 和图 3-5-14 所示。

六、实验内容

1. 实验步骤

- (1) 按照电路图在面包板上搭建电路,对芯片进行 $\pm 12\text{V}$ 供电。
- (2) 将信号源输出峰-峰值 $V_{\text{pp}} = 1\text{V}$, 频率 $f = 50\text{Hz}$ 的正弦波,接入滤波电路的输入端,

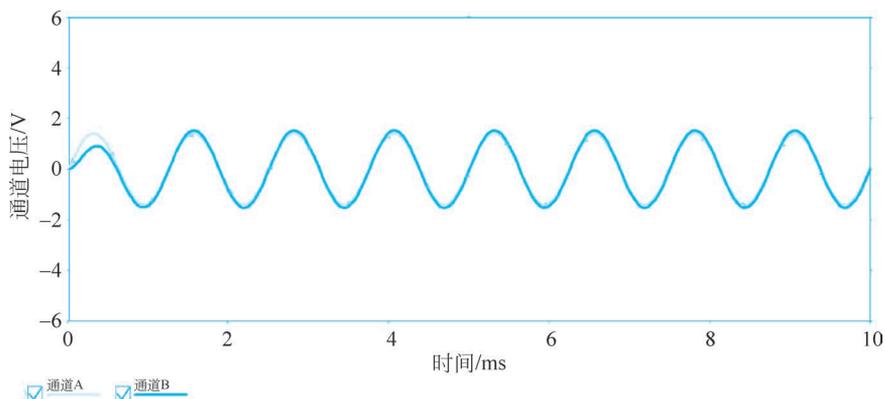


图 3-5-12 800Hz 仿真波形

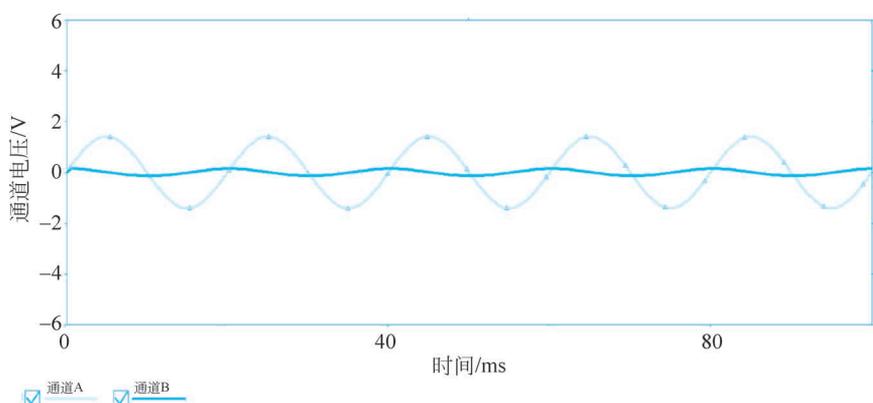


图 3-5-13 50Hz 仿真波形

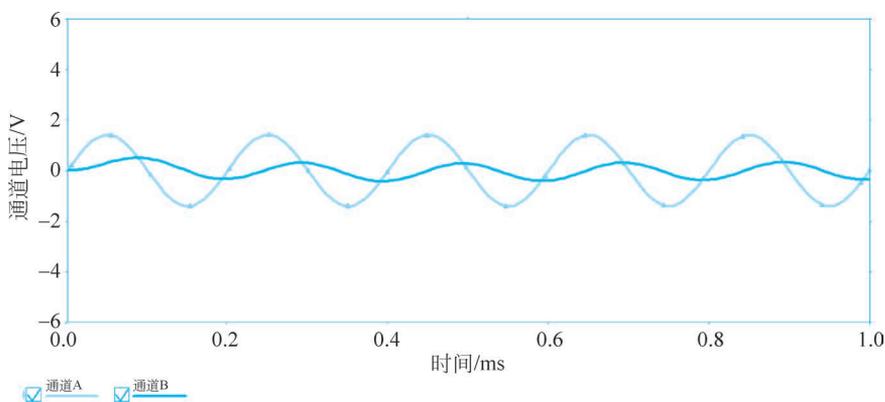


图 3-5-14 5kHz 仿真波形

同时用示波器双通道同时显示输出和输入波形图。

(3) 调节信号源的输出频率, 观察电路输出波形的频率和幅值, 并将数据填写在表格中, 利用点频法画出滤波器的幅频特性曲线。

(4) 测量滤波电路的截止频率, 并截取波形图。

2. 注意事项

- (1) 在测试过程中,使用的所有测量仪器应与实验电路共地。
- (2) 在实际测量中,应将所有信号和仪器连接完毕后,再对电路板进行供电。

3. 实验示例

低通滤波器电路面包板整体布局图如图 3-5-15 所示。



面包板布局图

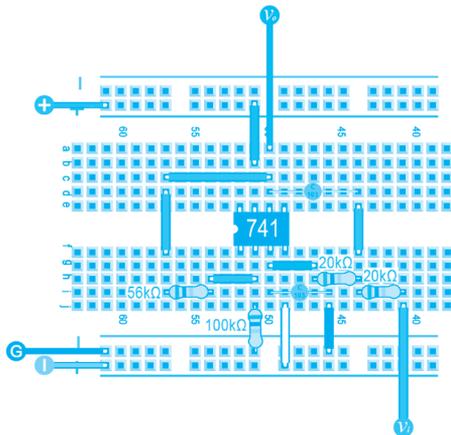


图 3-5-15 低通滤波器电路面包板整体布局图(见彩插)

低通滤波器实验结果如图 3-5-16 和图 3-5-17 所示,通道 1 为输入信号波形,通道 2 为输出信号波形。图 3-5-16 是低通滤波器通带内输入输出波形图。可以发现,输出信号幅值为输入信号幅值的 1.56 倍。图 3-5-17 是低通滤波器截止频率对应输入输出的波形图。可以发现,输出信号幅值是最大输出电压幅值的 0.707 倍,此时截止频率约为 600Hz。

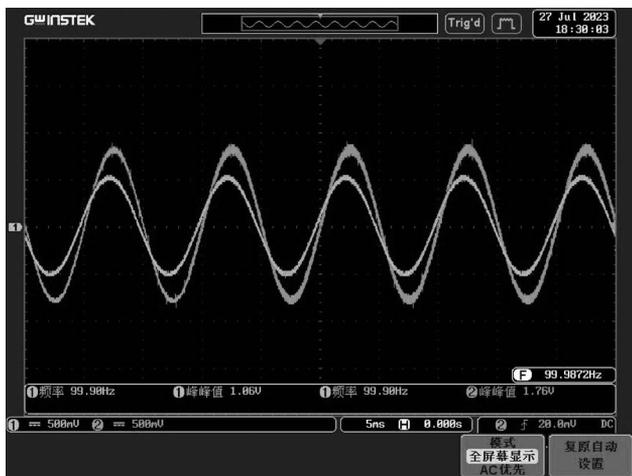


图 3-5-16 低通滤波器通带内输入输出测试结果

高通滤波器实验结果如图 3-5-18 所示,通道 1 为输入信号波形,通道 2 为输出信号波形,可以发现输出信号幅值是最大输出电压幅值的 0.707 倍,此时截止频率约为 760Hz。

带通滤波器实验结果如图 3-5-19 和图 3-5-20 所示,通道 1 为输入信号波形,通道 2 为输出信号波形。可以发现,输出信号幅值是最大输出电压幅值的 0.707 倍,此时截止频率约为 280Hz 和 1.6kHz。

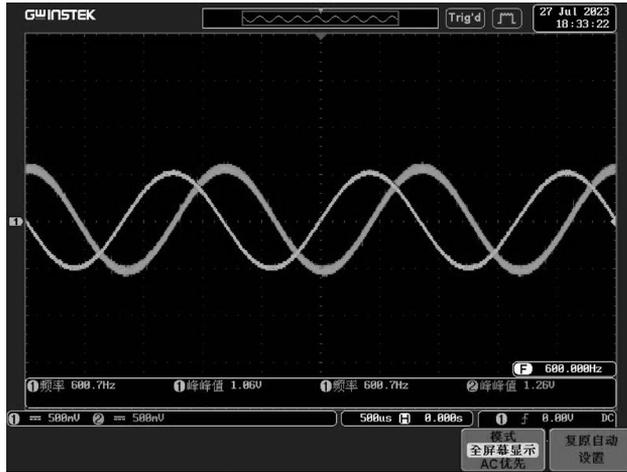


图 3-5-17 低通滤波器截止频率对应输入输出测试结果

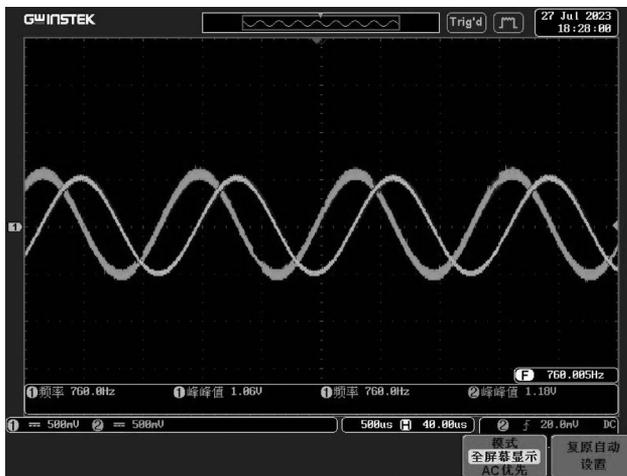


图 3-5-18 高通滤波器截止频率对应输入输出测试结果

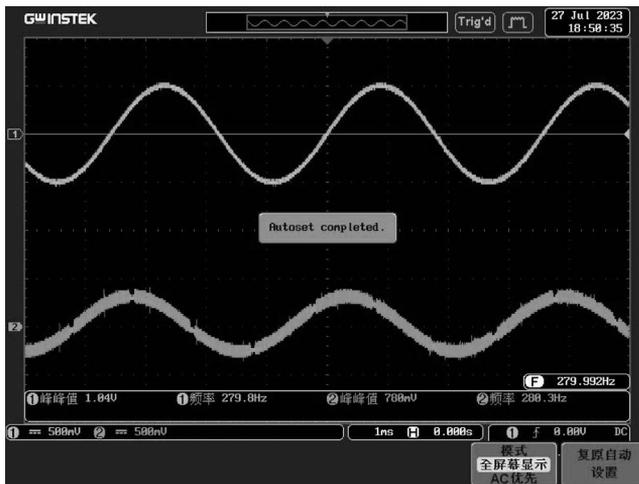


图 3-5-19 带通滤波器低频截止频率输入输出测试结果



演示视频

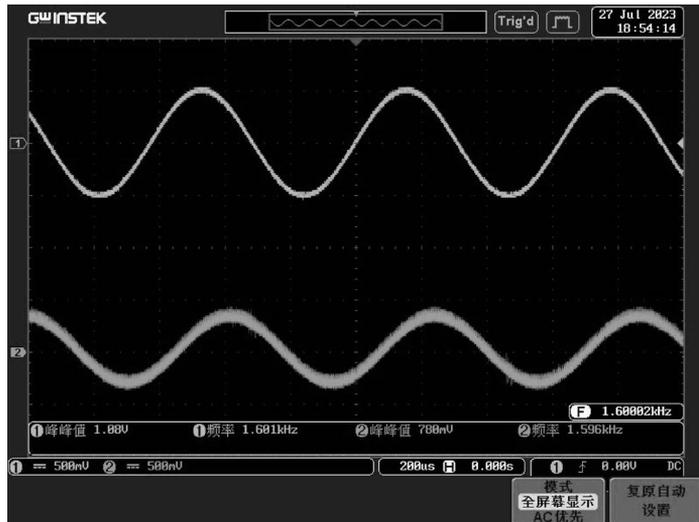


图 3-5-20 带通滤波器高频截止频率输入输出测试结果



实验报告

七、实验报告

将实验数据填入表 3-5-7~表 3-5-11。

表 3-5-7 指标参数 1

名称	A_0	ω_c	ω_p
低通滤波器			
高通滤波器			

表 3-5-8 指标参数 2

名称	A_0	ω_0	ω_L	ω_H
带通滤波器				

表 3-5-9 低通滤波器测试

f/Hz	50	200	400	600	800	900	1k	5k	10k
V_o/V_i									

表 3-5-10 高通滤波器测试

f/Hz	100	300	500	700	900	1k	2k	5k	10k
V_o/V_i									

表 3-5-11 带通滤波器测试

f/Hz	50	200	400	600	800	1k	1.5k	2k	5k
V_o/V_i									

思考题

1. 简述等效品质因数 Q 对幅频特性曲线的影响。

2. 实验测试得到的截止频率和理论计算的有偏差,请分析是什么原因导致的。

3.5.2 拓展实验

一、基本原理

图 3-5-21 所示的实验电路是一种温度报警器电路,当温度达到一定值时,扬声器报警。

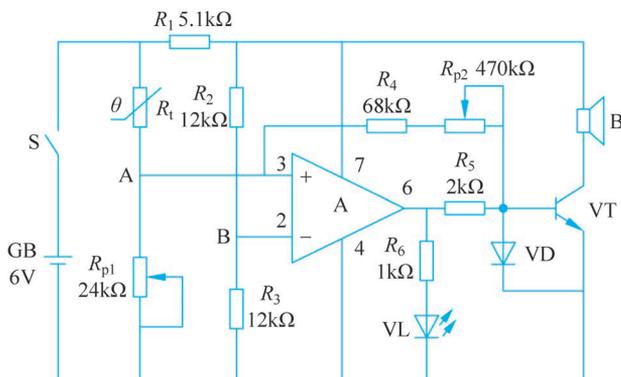


图 3-5-21 温度报警器电路

从图 3-5-21 中可以看到,运算放大器 A 作比较电路,由扬声器 B 作报警信号,发光二极管 VL 作显示信号。合上开关 S,由电阻 R_2 和 R_3 提供基准电压,调节电位器 R_p 使正常时 A 点电压小于 B 点电压,即 $U_A < U_B$,运算放大器 A 的 6 脚输出低电平(约 0V),发光二极管 VL 不亮,扬声器不响。当温度超过设定值时,负电阻系数热敏电阻 R_t 阻值变小,使 $U_A > U_B$,运算放大器 A 的 6 脚输出高电平(约 6V),VL 点亮,同时该输出电压经电阻 R_5 降压,输出信号经三极管 VT 放大,由扬声器 B 发出报警声。

二、元器件选择

拓展实验器件清单如表 3-5-12 所示。

表 3-5-12 拓展实验器件清单

编号	名称	型号	数量
R_1	电阻	5.1kΩ	1
R_2, R_3	电阻	12kΩ	2
R_4	电阻	68kΩ	1
R_5	电阻	2kΩ	1
R_6	电阻	1kΩ	1
R_{p1}	可调电阻	24kΩ	1
R_{p2}	可调电阻	470kΩ	1
R_t	负电阻系数热敏电阻	50kΩ	1
VT	三极管	9013	1
VL	发光二极管	红色	1
VD	二极管	1N4148	1
B	扬声器	8Ω	1

三、电路示例

温度报警器电路面包板整体布局图如图 3-5-22 所示。

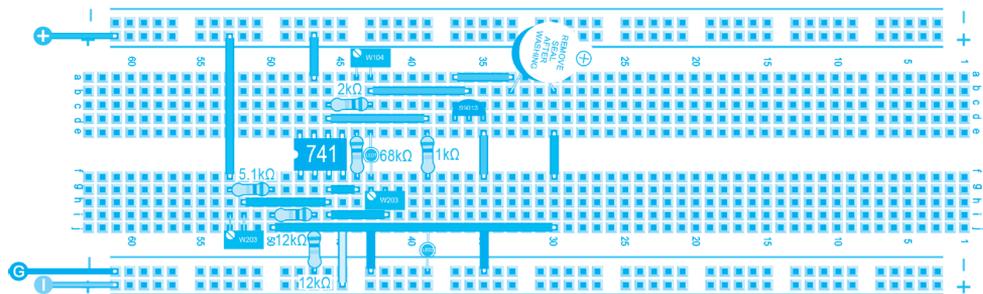


图 3-5-22 温度报警器电路面包板整体布局图(见彩插)

3.6 RC 正弦波振荡电路

3.6.1 基础实验

一、实验目的

1. 熟悉用运算放大器构成正弦波振荡电路。
2. 掌握 RC 桥式正弦波振荡电路的组成、工作原理及其振荡条件。
3. 熟悉常用电子测量仪器仪表的使用方法。
4. 掌握电子仿真软件 Multisim 的使用方法。
5. 了解 RC 桥式正弦波振荡电路的主要用途。

二、实验仪器

1. 多功能混合域示波器 MDO-2000A。
2. 多通道函数信号发生器 MFG-2220HM。
3. 双显测量万用表 GDM-8352。
4. 直流稳压电源 GPD-3303。

三、实验器材

实验器件清单如表 3-6-1 所示。

表 3-6-1 实验器件清单

编号	名称	型号	数量
R	电阻	15kΩ	2
C	电容	10nF	2
R ₁	电阻	15kΩ	1
R ₂	电阻	15kΩ	1
R ₃	可调电阻	50kΩ	1
U ₁	运算放大器	741	1
D ₁	二极管	1N4148	1

续表

编 号	名 称	型 号	数 量
D ₂	二极管	1N4148	1
Q ₁	面包板		1
	导线		若干

四、实验原理

1. 实验电路

实验电路如图 3-6-1 所示,这是一个集成运算放大器组成的 RC 串并联桥式正弦波振荡电路(也叫文氏振荡电路),无须外部激励,便能自动输出幅度和频率一定的正弦波信号。其中,两个 R、C 组成串并联选频网络,与运算放大器 U₁ 的同相输入端和输出端构成正反馈,由此产生正弦自激振荡; R₁、R₂ 和 R₃ 组成同相放大器的负反馈网络;为了稳定振荡幅度,在 R₂ 两端并联非线性元件,这里由两个二极管 D₁ 和 D₂ 反并联组成,用以自动调整负反馈放大电路的增益,从而维持输出电压的稳定。

通常情况下,用 RC 串并联桥式正弦波振荡电路产生 1Hz~1MHz 的低频信号。

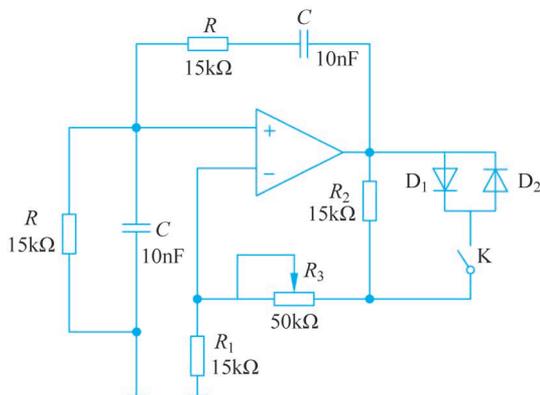


图 3-6-1 RC 串并联桥式正弦波振荡电路

2. RC 串并联选频网络的频率特性

如图 3-6-2 所示,RC 串并联选频网络由一组 R、C 串联和一组 R、C 并联组成,其中 R、C 一般取值相同,正反馈的反馈系数为

$$F_V = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}_o} = \frac{R // \frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C} + R // \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} \quad (3-6-1)$$

因此,RC 串并联选频网络的幅频特性和相频特性分别为

$$|F_V| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}} \quad (3-6-2)$$

$$\varphi_f(\omega) = -\arctan \frac{\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}}{3} \quad (3-6-3)$$

令 $\omega_0 = 1/RC$, 当 $\omega = \omega_0$ 时, RC 串并联选频网络的频率特性如图 3-6-3 所示。此时的幅频响应有最大值 $|F_V| = 1/3$, 相频响应 $\varphi_f(\omega) = 0^\circ$, 满足振荡的相位平衡条件, 振荡频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3-6-4)$$

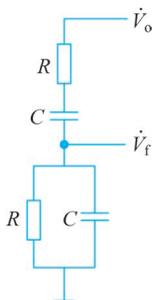


图 3-6-2 RC 串并联选频网络

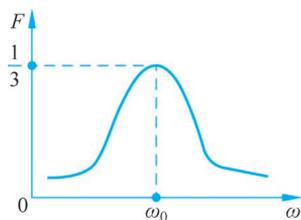
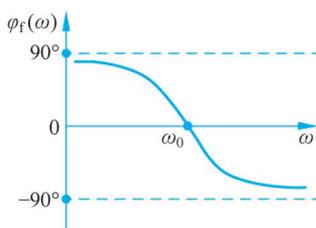


图 3-6-3 RC 串并联选频网络的频率特性



3. 起振条件

由以上分析可知, 只有在 $f = f_0 = 1/2\pi RC$ 时, 才能使经选频网络反馈到运算放大器同相输入端的电压 \dot{V}_f 与输出电压 \dot{V}_o 同相, 满足自激振荡的相位条件, 当幅值条件也能满足 $|A_V F_V| > 1$ 时, 电路可以起振。由上述分析可知, $|F_V| = 1/3$, 而同相比例放大电路的放大增益为 $A_V = 1 + R_f/R_1$, 因此, 当 $A_V > 3$ 时, 有 $R_f/R_1 > 2$ 。只有同时满足相位和幅值两个条件时, 电路才能自激起振。

振荡条件建立之后, 当电路一接上直流电源, 由于电冲激或噪声或干扰等信号的存在, 它们都含有丰富的谐波, 总有与振荡频率 f_0 相同的谐波, 这个信号虽然很微弱, 但经过放大电路和反馈网络的作用, 使输出信号的幅值越来越大, 受限于运算放大器的性能指标, 当输出信号的幅值增大到一定程度时, 就会产生波形失真, 因此需要引入稳幅环节。

4. 稳幅措施

为了稳定振荡幅度, 通常在负反馈的回路里加入非线性元件, 用以自动调整负反馈放大电路的增益 A_V , 从而维持输出电压 V_o 的稳定。该电路引入的非线性元件为二极管, 从二极管伏安特性曲线可以看出, 当二极管电压很小时, 二极管处于截止状态, 此时二极管内阻很大; 当二极管电压增大到一定程度时, 二极管导通, 此时二极管内阻又很小。由图 3-6-1 可知, 该电路的稳幅措施是在电阻 R_2 两端并联两个二极管 D_1 和 D_2 , 令二极管内阻为 r_D , 此时的 $R_f = R_2 // r_D + R'_3$ (R'_3 为可变电阻 R_3 接入电路的部分), 由此可知, 加入稳幅环节后, 负反馈放大电路的增益为

$$A_V = 1 + \frac{R_f}{R_1} = 1 + \frac{R_2 // r_D + R'_3}{R_1} \quad (3-6-5)$$

当输出电压幅值很小时, 二极管两端电压小, 二极管内阻 r_D 很大, 反馈电阻 R_f 较大, A_V 也较大, 有利于起振; 当输出电压幅值增大到一定程度时, 二极管导通, 二极管内阻 r_D 开始减小, 反馈电阻 R_f 也减小, A_V 也随之下降, 使得输出电压的幅值趋于稳定, A_V 稍大于 3。

五、预习要求

1. 理论计算

复习理论教材中有关 RC 振荡电路的结构和工作原理,掌握原理图中满足振荡条件的 R'_3 (R'_3 为可变电阻 R_3 接入电路的部分) 及其振荡频率 f_0 的计算方法。根据图 3-6-1,当运算放大器的直流电源为 $\pm 12\text{V}$, $R=15\text{k}\Omega$, $C=10\text{nF}$, $R_1=R_2=15\text{k}\Omega$, $R_3=50\text{k}\Omega$, 试计算以下参数,并填入表 3-6-2 中。

表 3-6-2 满足振荡条件的振荡频率 f_0 和电阻 R'_3

已知条件					求解	
$R/\text{k}\Omega$	C/nF	$R_1/\text{k}\Omega$	$R_2/\text{k}\Omega$	$R_3/\text{k}\Omega$	f_0/Hz	$R'_3/\text{k}\Omega$
15	10	15	15	50		

2. 仿真验证

电路仿真使用仿真软件 Multisim, 电路图如图 3-6-4 所示。注意 \dot{V}_f 和 \dot{V}_o 分别接示波器的 A、B 两端, \dot{V}_f 的输出波形用浅色表示, \dot{V}_o 的输出波形用深色表示, 同时观测两路波形。

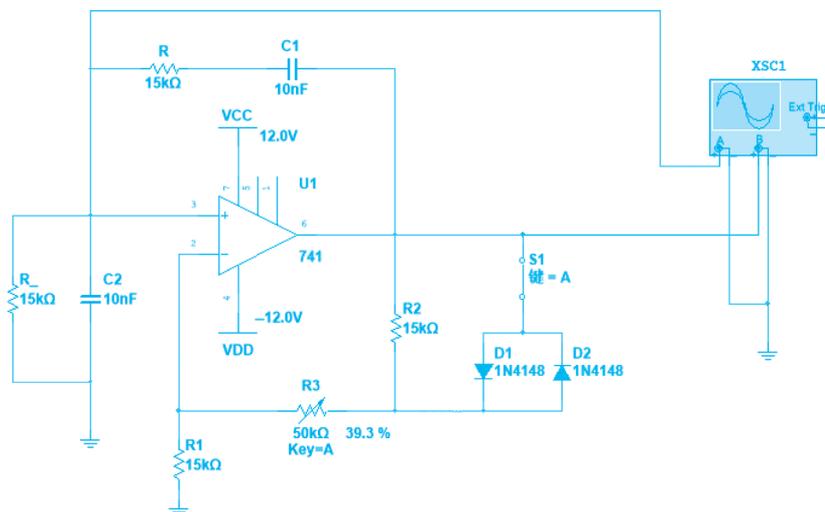


图 3-6-4 RC 串并联振荡电路仿真电路图

(1) 闭合开关 S_1 , 当调整 R_3 的值时, 可以观察输出电压从无到有的仿真波形, 如图 3-6-5 所示。记录此时的 R'_3 (R'_3 为可变电阻 R_3 接入电路的部分) 的值, 分析 R'_3 的值对起振条件和输出波形的影响。

(2) 继续调整 R_3 , 使电路输出稳定的不失真波形, 如图 3-6-6 所示。记录此时的 R'_3 (R'_3 为可变电阻 R_3 接入电路的部分) 的值, 测量输出波形的幅度和频率, 分析电路的振荡条件。

从图 3-6-6 中可以看出, 振荡周期为 $T_0 = 0.95\text{ms}$, 换算频率 $f_0 = 1/T_0$, f_0 约为 1060Hz , \dot{V}_f 与 \dot{V}_o 同相, $F_V = \dot{V}_f/\dot{V}_o \approx 1/3$, 与图 3-6-1 原理图计算出的理论值相符。

(3) 继续增大 R_3 的值, 使 A_V 远大于 3, 此时的放大电路工作于非线性区, 输出波形出现失真, 如图 3-6-7 所示。

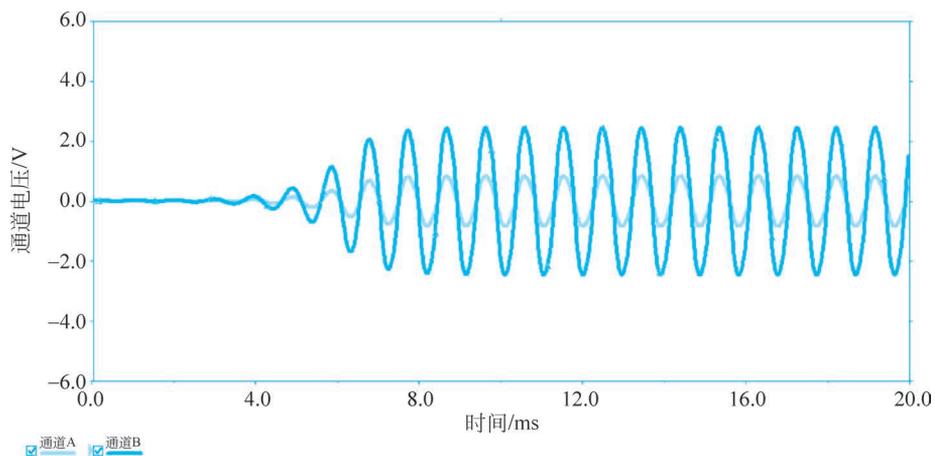


图 3-6-5 闭合 S_1 开关, 输出电压从无到有的仿真波形

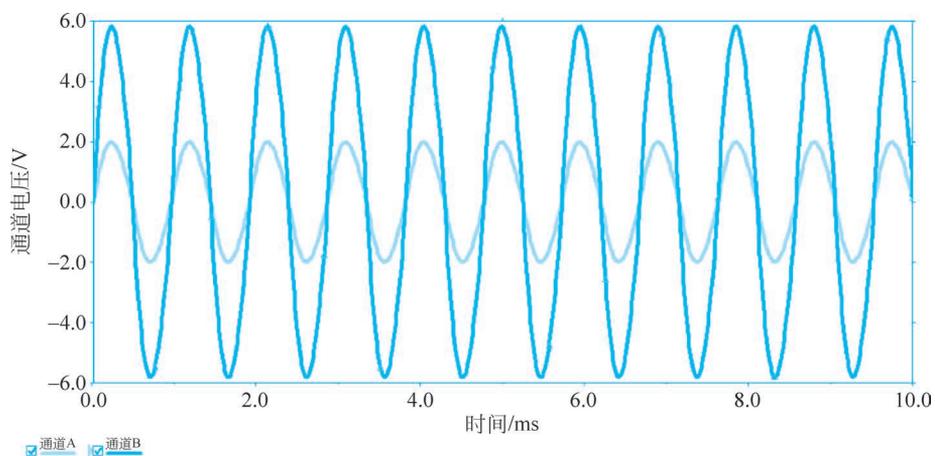


图 3-6-6 输出电压稳定不失真波形

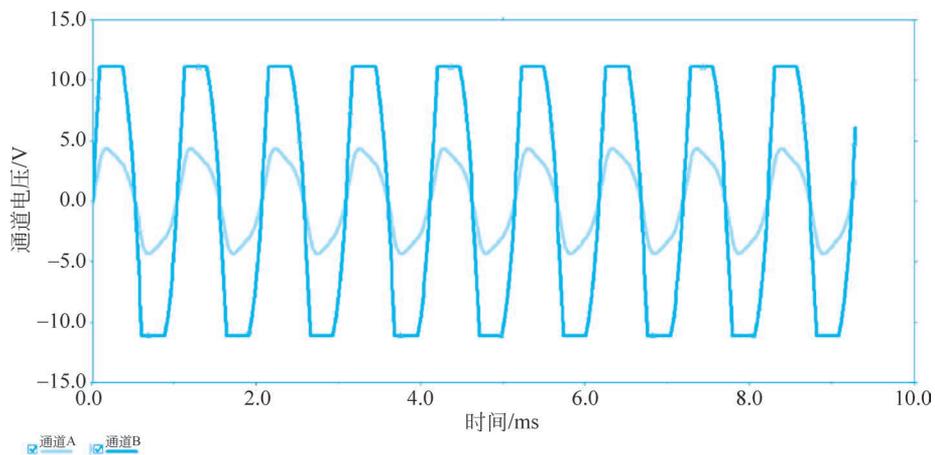


图 3-6-7 负反馈增益 A_V 远大于 3 时的失真波形

(4) 断开开关 S_1 , 调整 R_3 的值时, 观察输出电压从无到有再到稳定的仿真波形, 如图 3-6-8 所示。记录各临界点的 R'_3 (R'_3 为可变电阻 R_3 接入电路的部分) 的值, 分析 R'_3 的值和开关 S_1 对起振条件和输出波形的影响。

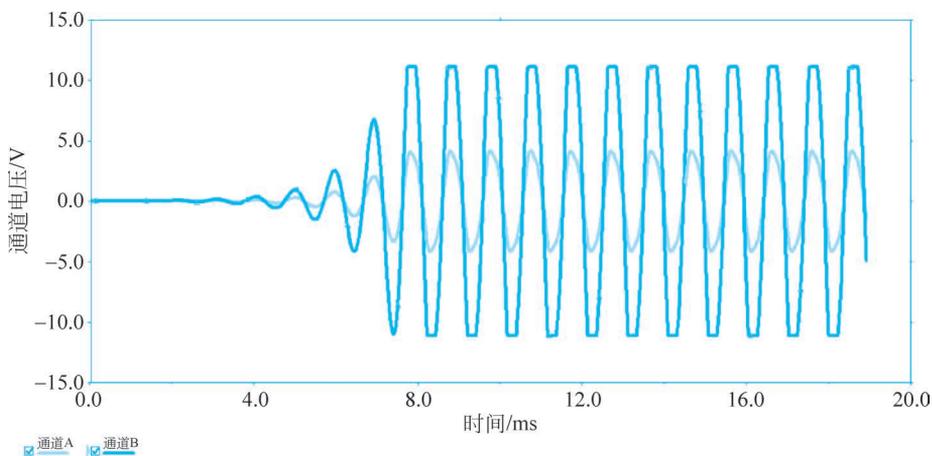


图 3-6-8 断开 S_1 开关, 输出电压从无到有的仿真波形

(5) 改变 RC 串并联选频网络中 R 、 C 的值, 观察输出波形有哪些参数发生变化, 并与理论计算值对比分析。

六、实验内容

1. 实验步骤

(1) 按照图 3-6-1 进行电路连接, 为运算放大器提供 $\pm 12V$ 电源, 闭合开关 S , 调节可变电阻 R_3 , 使得 R'_3 略大于 $30k\Omega$, 按照前面仿真所述方法, 观察输出波形从无到有的变化过程, 记录输出波形稳定不失真时的输出电压值和振荡频率值。

(2) 改变选频网络 R 、 C 的值, 观察振荡频率的变化情况。

(3) 断开开关 K , 重新调节可变电阻 R_3 , 观察输出波形有何变化。

(4) 断开 RC 串并联选频网络与放大器同相输入端的连接, 使用函数信号发生器为 RC 选频网络提供输入信号, 保持函数信号发生器的幅值不变, 调整其输出频率, 观察并测量 RC 选频网络的幅频特性。

2. 注意事项

(1) 在测试过程中, 使用的所有测量仪器应与实验电路共地。

(2) 在实际测量中, 应将所有信号和仪器连接完毕后, 再对电路板进行供电。

(3) 注意运算放大器的正负电源极性不得接反。

3. 实验示例

RC 串并联振荡电路面包板整体布局图如图 3-6-9 所示。

电路板中采用 741 运算放大器, 其引脚图如图 3-6-10 所示。

741 芯片供电电源选取 $\pm 12V$, 由直流稳压电源供电。选取 $R = 15k\Omega$, $C = 10nF$, $R_1 = R_2 = 15k\Omega$, $R_3 = 50k\Omega$, 调节可变电阻 R_3 , 使得 A_V 略大于 3, 输出波形稳定不失真。示波器中上方波形代表同相输入端 V_i 电压, 下方波形代表输出电压 V_o , 如图 3-6-11 所示。

继续调节可变电阻 R_3 , 使得 A_V 远大于 3, 输出波形出现失真, 如图 3-6-12 所示。



面包板布局图

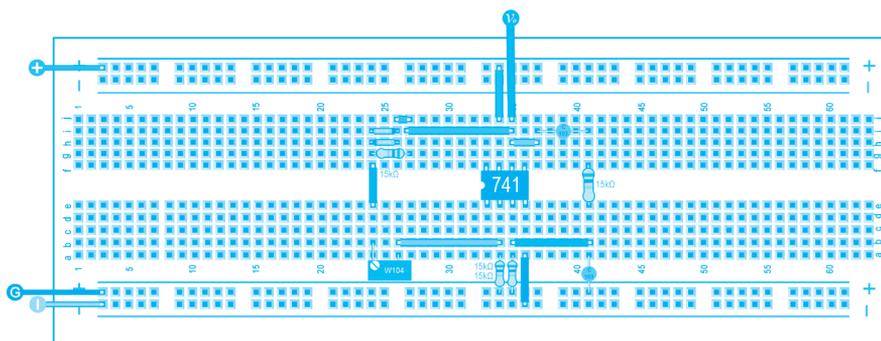


图 3-6-9 RC 串并联振荡电路面包板整体布局图(见彩插)

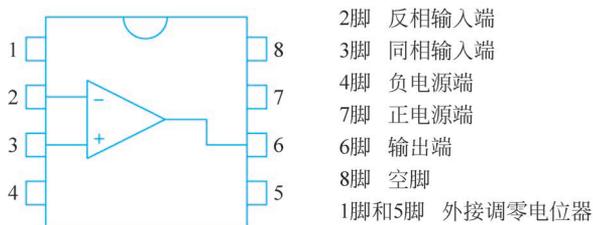


图 3-6-10 741 芯片引脚图



演示视频

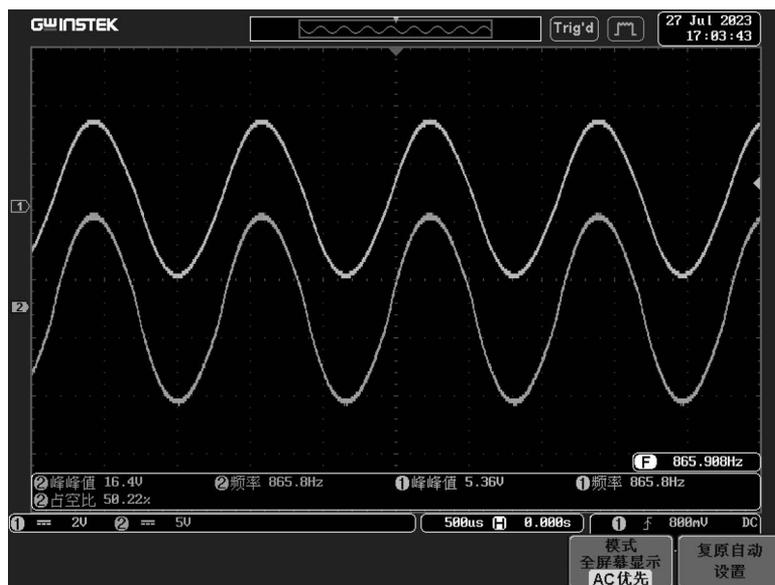


图 3-6-11 稳定不失真输出波形

七、实验报告

当运算放大器的直流电源为 $\pm 12V$, $R = 15k\Omega$, $C = 10nF$, $R_1 = R_2 = 15k\Omega$, $R_3 = 50k\Omega$ 时,将实验数据填入表 3-6-3。



实验报告

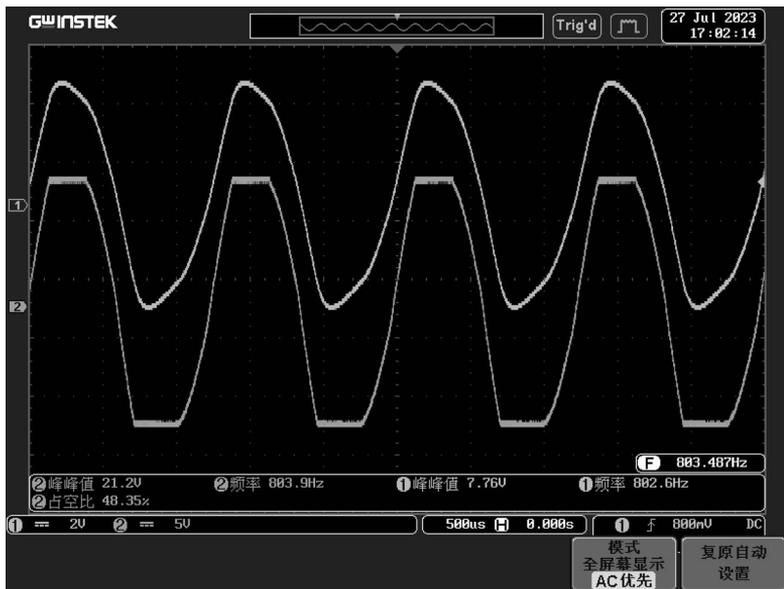


图 3-6-12 输出波形出现失真

表 3-6-3 RC 串并联振荡电路的相关参数

$R'_3/k\Omega$	f_0/Hz	A_V	画出 \dot{V}_f 和 \dot{V}_o 的电压波形

思考题

1. 简述振荡电路的振荡条件和稳幅措施的作用。
2. 如果电路不起振,应该如何调整参数?
3. 要改变电路的振荡频率,又该调整什么参数?
4. 稳幅环节除了用二极管实现,是否还有其他方案,若有请描述原理。

3.6.2 拓展实验

一、基本原理

实验电路如图 3-6-13 所示,是通过 RC 振荡电路实现简易电子琴,本实验合理设置各参数,通过改变电阻 R_2 的阻值产生不同的频率信号,通过功率放大器进行信号放大,由扬声器发出不同的声音。

从图中可以看到,电路主要由 RC 振荡电路和功率放大电路两部分组成。RC 振荡电路不同于图 3-6-1 所示, $R_1 \neq R_2$,由此可推导出,此时电路的频率计算公式为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{R_1 R_2} C} \tag{3-6-6}$$

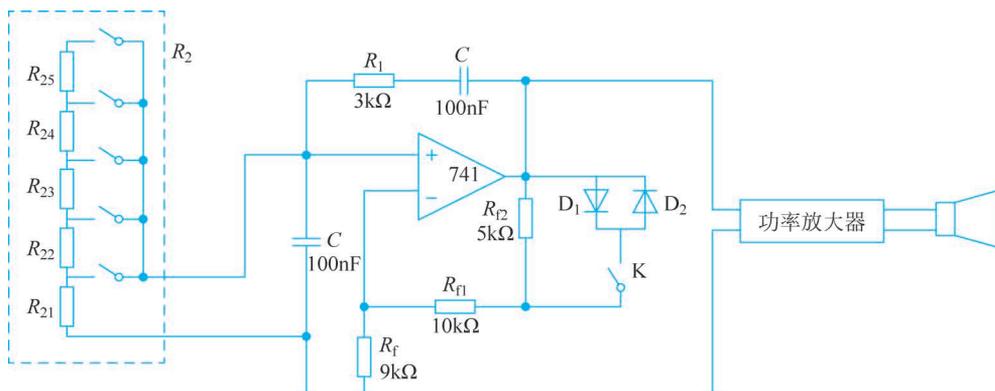


图 3-6-13 RC 振荡电路实现的简易电子琴电路图

经查阅资料,国际标准以 C 调为基准音的音阶对应的频率如表 3-6-4 所示,再通过频率公式进行理论计算,将对应的 R_2 的阻值也填入表 3-6-4。功率放大电路设计为甲类功率放大,放大信号完整不失真。

表 3-6-4 C 调音阶对应基本频率 f_0 和电阻 R_2

名称	dou	ruai	mi	fa	sou
频率/Hz	264	297	330	352	396
对应 R_2 阻值	R_{25}	R_{24}	R_{23}	R_{22}	R_{21}
R_1/Ω	2545	1820	940	1432	1024

二、元器件选择

从工作原理可以分析出,改变选频网络 R_2 的阻值可以实现不同的频率输出,对应产生不同的音阶,然而,实验过程中发现,当选频网络中的 R 、 C 取值不一样时, F 不恒等于 $1/3$, 为了达到振荡平衡的条件,放大倍数 A 要随着 F 不断调整,保证电路可以正常工作,因此可通过改变 R_{f1} 的阻值来调整 A 的大小。感兴趣的读者可以自己动手拓展更多音阶的电子琴电路,拓展实验器件清单如表 3-6-5 所示;甲类功率放大器虽然放大信号完整不失真,但同时存在效率低的问题,读者也可以自行设计其他功率放大器。

表 3-6-5 拓展实验器件清单

编号	名称	型号	数量
R_1	电阻	$3k\Omega$	1
C	电容	$100nF$	4
R_{f1} 、 R_b	电阻	$10k\Omega$	2
$R_{21} \sim R_{25}$	电阻	$0 \sim 5k\Omega$	5
R_{f2}	电阻	$5k\Omega$	1
R_f	电阻	$9k\Omega$	1
R_c	电阻	$1k\Omega$	2
U_1	运算放大器	741	1
D_1	二极管	1N4148	1
D_2	二极管	1N4148	1
BJT	三极管	S9013	1

续表

编 号	名 称	型 号	数 量
Q ₁	面包板		1
K	开关		5
Y	扬声器	8Ω, 0.5W	1
	导线		若干

三、电路示例及效果演示

RC 振荡电路实现简易电子琴的电路如图 3-6-14 所示。

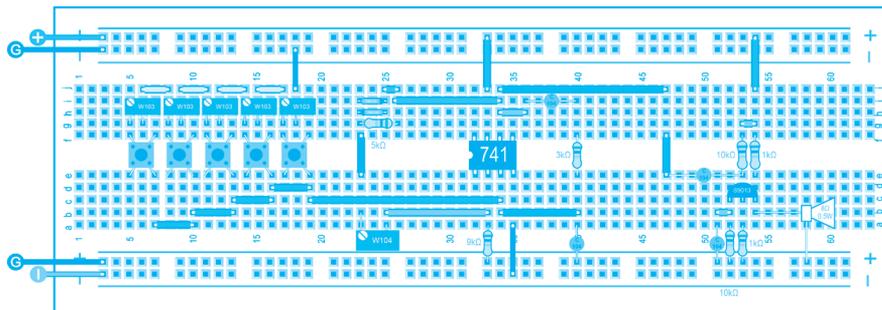


图 3-6-14 RC 振荡电路实现简易电子琴电路面包板整体布局图(见彩插)



面包板布局图



演示视频