

# 电工与电子技术实验教程

张廷锋 主编

蓝慕云 肖君 李振豪 崔瀛 廖中熙 编写

## 目录

前言 .....	错误!未定义书签。
综述 .....	错误!未定义书签。
第一章 实验基础知识.....	错误!未定义书签。
第一节 基本电量的测量.....	错误!未定义书签。
第二节 基本测量方法.....	错误!未定义书签。
第三节 测量误差及其分析.....	错误!未定义书签。
第四节 测量结果的处理.....	错误!未定义书签。
第五节 电路调试和常见故障的分析与检查 .....	错误!未定义书签。
第二章 电工技术实验 .....	错误!未定义书签。
实验一 电路元件伏安特性的测试 .....	错误!未定义书签。
实验二 基尔霍夫定律和叠加原理的验证 .....	错误!未定义书签。
实验三 戴维南定理的验证 .....	
——有源二端网络等效参数的测定 .....	错误!未定义书签。
实验四 受控源特性研究 .....	错误!未定义书签。
实验五 一阶 $RC$ 电路暂态过程的研究 .....	错误!未定义书签。
实验六 $RLC$ 串联谐振电路的研究 .....	4
实验七 交流电路中元件等效参数的测量 .....	8
实验八 $RL$ 串联电路及其功率因数的提高 .....	12
实验九 三相电路 .....	错误!未定义书签。
实验十 电动机的基本控制电路 .....	错误!未定义书签。
实验十一 电动机的顺序控制与时间控制电路 .....	错误!未定义书签。
实验十二 可编程控制器 (PLC) 实验 .....	错误!未定义书签。
第三章 模拟电子技术实验 .....	16
实验十三 晶体管共射极放大电路 .....	16
实验十四 多级阻容耦合放大电路与射极跟随器 .....	22
实验十五 集成运算放大器的基本运算电路 .....	25
实验十六 集成运算放大器的非线性应用 .....	29
实验十七 整流、滤波、稳压电路 .....	33

实验十八	晶闸管的应用 .....	错误!未定义书签。
第四章	数字电子技术实验 .....	错误!未定义书签。
实验十九	TTL 与 CMOS 集成门电路的参数及功能测试 .....	错误!未定义书签。
实验二十	组合逻辑电路的设计 .....	错误!未定义书签。
实验二十一	双稳态触发器逻辑功能测试和转换 .....	错误!未定义书签。
实验二十二	基于 PLD 的触发器电路应用 .....	错误!未定义书签。
实验二十三	计数、译码、显示电路 .....	错误!未定义书签。
实验二十四	555 集成定时器的应用 .....	错误!未定义书签。
第五章	综合设计实验 .....	错误!未定义书签。
实验二十五	温度测量与控制电路设计 .....	错误!未定义书签。
实验二十六	函数信号发生器设计 .....	错误!未定义书签。
实验二十七	可调压串联反馈型直流稳压电源 .....	错误!未定义书签。
实验二十八	随机数发生器应用电路 .....	错误!未定义书签。
实验二十九	猜数游戏电路设计 .....	错误!未定义书签。
实验三十	竞赛抢答器电路设计 .....	错误!未定义书签。
实验三十一	555 定时器构成的电机控制电路设计 .....	错误!未定义书签。
实验三十二	交通灯控制电路的 PLD 设计 .....	错误!未定义书签。
实验三十三	数字电容测试仪电路设计 .....	错误!未定义书签。
实验三十四	基于 Multisim 非正弦周期信号的研究 .....	错误!未定义书签。

## 实验六 $RLC$ 串联谐振电路的研究

### 一、实验目的

- (1) 观察  $RLC$  串联电路谐振现象，加深对串联谐振电路特点的理解，掌握电路参数对频率特性的影响。
- (2) 掌握测量谐振频率、品质因数和绘制频率特性曲线的方法。

### 二、实验原理

电路谐振是在特定条件下出现的一种现象。对一个含有电感和电容的二端网络，若出现了其端口电压与电流同相的现象，则说明电路发生了谐振。

#### 1. 串联谐振的条件

图 2-6-1 所示的  $RLC$  串联电路中，电路的复阻抗为

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) = R + j(X_L - X_C)$$

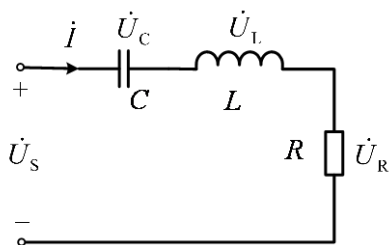


图 2-6-1  $RLC$  串联电路

阻抗模随频率变化的如图 2-6-2 所示，当电路发生谐振时， $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ ，即  $X_L = X_C$ ，由此可得谐振角频率和谐振频率分别为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

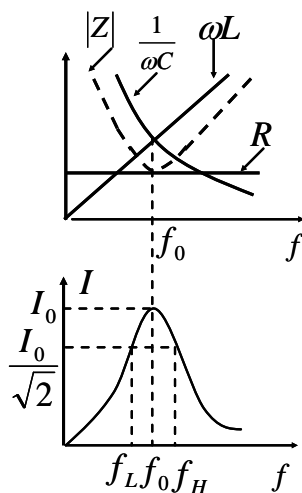


图 2-6-2 谐振曲线

## 2. $RLC$ 串联电路谐振时的特点

- (1) 谐振时，电路电抗为零，阻抗  $Z=R$ ，电路呈纯电阻性， $\dot{U}$  与  $\dot{I}$  同相。
- (2) 当信号源电压  $U_S$  不变时，电路的电流最大。谐振时电流为

$$I_0 = \frac{U_S}{R}$$

由于电阻的电压  $U_R$  与电流  $I$  满足  $U_R=RI$ ，在实验中就可以用交流毫伏表测量电阻电压  $U_R$ ，当  $U_R$  达到最大时对应的信号源频率就是电路的谐振频率  $f_0$ 。

(3) 电感电压  $u_L$  与电容电压  $u_C$  大小相等、方向相反，且电感电压  $u_L$  与电容电压  $u_C$  为信号源电压  $u_S$  的  $Q$  倍。其中  $Q$  称为电路的品质因数，即

$$Q = \frac{U_C}{U_S} = \frac{U_L}{U_S} = \frac{1}{\omega_0 RC} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

当  $L$ 、 $C$  不变，改变  $R$  时， $RLC$  串联电路的谐振频率  $f_0$  不变，但品质因数改变。

## 3. $RLC$ 串联电路的幅频特性

$RLC$  串联电路电流大小与信号源频率的关系，称为电流的幅频特性，其表达式为

$$I = \frac{U_S}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{U_S}{\sqrt{R^2 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}}$$

为了便于比较不同的串联谐振电路，通常使用归一化的通用频率特性，其表达式为

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2\left(\frac{f}{f_0}-\frac{f_0}{f}\right)^2}}$$

为了使频带信号能在允许的衰减范围内通过谐振电路，一般定义当电流幅值下降到峰值的 $1/\sqrt{2}$  倍时所对应的频率为截止频率。大于 $f_0$  的称为上限频率 $f_H$ ，小于 $f_0$  的称为下限频率 $f_L$ ，介于两者之间的频率范围称为通频带 $BW$ ，即

$$BW = f_H - f_L = \frac{f_0}{Q} \quad (2-6-1)$$

式(2-6-1)表明，通频带与品质因数成反比。

电流 $I$ 随频率 $f$ 变化的曲线如图 2-6-2 所示。当电路中的 $L$ 、 $C$  和信号源电压 $U_s$  不变时，改变 $R$  将得到不同 $Q$  值的谐振曲线， $Q$  值越大，特性曲线越尖锐，通频带越窄，电路的选择性越好。

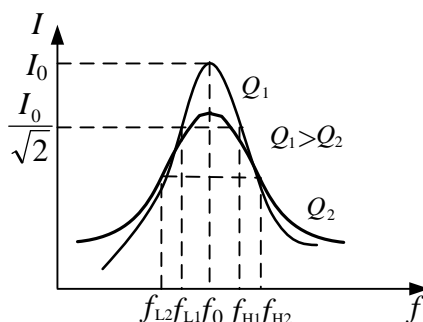


图 2-6-2 不同 $Q$  值时的电流幅频特

### 三、实验器材

函数信号发生器、电子实验箱、交流毫伏表、示波器、电感、电容、电阻等

### 四、实验预习要求

- (1) 按照实验要求给定的电路参数，计算出电路的谐振频率 $f_0$ =\_\_\_\_\_Hz。
- (2) 实验要求 3 中，保持 $L$  为 10mH、 $C$  为 0.01 $\mu$ F，要求品质因数 $Q=10$ ，则 $R$ =\_\_\_\_ $\Omega$ 。
- (3) 简述有哪些方法可以判别 $RLC$  串联电路发生谐振？

### 五、实验内容

(1) 按图 2-6-1 所示电路接线。取 $R$ 、 $L$ 、 $C$  分别为 200 $\Omega$ 、10mH、0.01 $\mu$ F。把函数信号发生器（正弦波）的输出频率调节到 $f_0$ ，有效值 $U_s$  为 1V。用交流毫伏表测量电阻上电

压  $U_R$ ，应有  $U_R \approx U_S$ ，否则再微调函数信号发生器的输出频率，使  $U_R$  达到最大值，所对应的频率即为该串联电路的谐振频率  $f_0$ ，测量谐振时电阻、电感、电容的电压值，记录于表 2-6-1 中。

表 2-6-1

RLC 串联电路谐振点测试

R (Ω)	测量数据				计算值		
	$f_0$ (kHz)	$U_R$ (V)	$U_L$ (V)	$U_C$ (V)	$f_0$ (kHz)	$Q$	BW (kHz)
200							

(2) 在  $f_0$  为中心，分别增大、减小函数信号发生器的频率，每隔一定频段测量一次  $U_R$ ，记录于表 2-6-2 中（注意测量过程中始终保持  $U_S=1V$ ）。

表 2-6-2

RLC 串联电路谐振曲线测试

R (Ω)	序号	$f_1$	$f_2$	$f_3$	$f_4$	$f_5$	$f_6$	$f_0$	$f_7$	$f_8$	$f_9$	$f_{10}$	$f_{11}$	$f_{12}$
	$f$ (kHz)													
200	$U_{R1}$ (mV)													
	$I_1=U_{R1}/R_1$													
	$U_{R2}$ (mV)													
	$I_2=U_{R2}/R_2$													

(3) 设计一个串联谐振电路，使其谐振频率  $f_0$  与步骤 1 保持不变，品质因数  $Q=10$ ，测量上述各项指标，记录于表 2-6-1、表 2-6-2 中。

(4)（扩展要求）用双踪示波器观测  $U_S$ 、 $U_R$  波形，调节  $U_S$  的频率，观察  $U_S$ 、 $U_R$  的幅度和相位关系。

## 六、实验注意事项

(1) 选择频率测试点时，靠近谐振频率点的频率间隔应小一些（如 500Hz），远离谐振频率点的频率间隔可取大一些（如 1000~2000Hz）。

(2) 注意在调节函数信号发生器频率的过程中保持其输出电压  $U_S$  不变。

## 七、实验报告要求

(1) 整理实验数据，用方格纸在同一坐标平面上画出不同  $Q$  值得两条电流谐振曲线。说明品质因数  $Q$  对谐振曲线的影响。

(2) 分析谐振时， $U_C$  和  $U_L$  有什么关系？ $U_C$ 、 $U_L$  与  $U_R$  有什么关系？

(3) 根据理论计算，电路发生谐振时，应有  $U_R = U_S$ ，实际测量中，总有  $U_R < U_S$ ，分析理论计算与实际测量不同的原因？

## 实验七 交流电路中元件等效参数的测量

### 一、实验目的

- (1) 学习用电压表、电流表、功率表测量交流电路中元件的等效参数。
- (2) 学习用三电压表法测量交流电路中元件的等效参数。
- (3) 学习功率表、自耦调压器的使用方法。

### 二、实验原理

在正弦交流电路中，负载常常是由电阻、电容、电感组合而成的。在工作中我们常常需要分析负载的大小、性质，即测量负载的等效参数。测量交流电路元件等效参数的方法通常有三种，即电表法、谐振法和电桥法。当工作频率较低时（例如工频），采用电表法测量较为方便；当工作频率较高时，采用谐振法测量；当测量准确度要求较高时，采用电桥法测量。

#### 1. 三表法

用三表法（电流表、电压表、功率表）测量交流电路中元件的等效参数，三表法原理如图 2-7-1 所示。

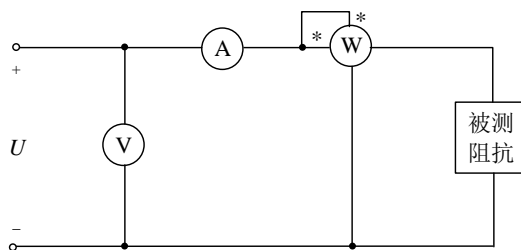


图 2-7-1 三表法原理图

由电路原理可知，一端口网络的端口电压  $U$ 、端口电流  $I$  及其有功功率  $P$  有以下关系：

$$\text{阻抗模} \quad |Z| = \frac{U}{I}$$

$$\text{功率因数} \quad \cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

$$\text{等效电阻} \quad R = |Z| \cos \varphi$$



$$\text{等效电抗} \quad X = |Z| \sin \varphi = \pm \sqrt{|Z|^2 - R^2}$$

当判断出负载的性质后，才可确定  $X$  的正负号。负载性质的判别方法可采用：

(1) 示波器法：用双踪示波器分别观察被测阻抗的电压、电流波形，如果电压超前于电流，则为感性负载， $X > 0$ ；如果电压滞后于电流，则为容性负载， $X < 0$ 。

(2) 并联电容器法：将一个适当的电容器与被测阻抗并联（ $X_C$  约等于被测阻抗的一半）。保持电源电压不变，如果电流表读数减小，则被测阻抗为感性负载；如果电流表读数增大，则被测阻抗为容性负载。

(3) 功率因数表直接测量：用数字式功率因数表可直接测量负载的  $\cos \varphi$ 。感性负载，其  $\cos \varphi$  为正；容性负载，其  $\cos \varphi$  为负。

用以上的方法判断出被测阻抗的性质后，则被测阻抗的等效电感和等效电容分别为

$$L = \frac{X}{2\pi f} \quad \text{或} \quad C = \frac{1}{2\pi f X}$$

(4) 当测量条件（如元件端电压或电流）改变时，某些元件的等效参数也随之改变，如测量非线性电阻时，若流经电阻的电流不同，则测得的等效电阻也不同。

## 2. 三电压表法

用三电压表法可测量已知负载性质的阻抗的等效参数。实验原理如图 2-7-2 所示。

电路中  $r$  为已知电阻，且假定被测阻抗为感性，其等效电阻为  $R$ 、等效电感为  $L$ ，则三个电压的关系可以用相量图来分析，设  $\dot{U}_2$  为参考相量，画出电路的相量图，如图 2-7-3

所示。其中  $\dot{U}_R$ 、 $\dot{U}_L$  为被测阻抗的等效电阻电压和等效电感电压。由电路原理可知：

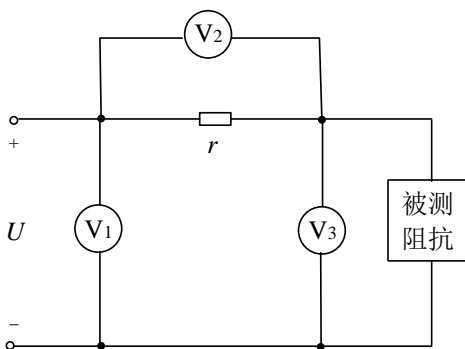


图 2-7-2 三电压表法原理图

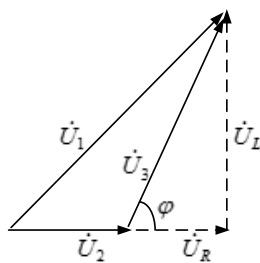


图 2-7-3 相量图

$$\text{电路中的电流有效值: } I = \frac{U_2}{r}$$

$$\text{被测阻抗的模: } |Z| = \frac{U_3}{I}$$

$$\text{阻抗角: } \varphi = \arccos\left(\frac{U_1^2 - U_2^2 - U_3^2}{2U_2U_3}\right)$$

$$\text{等效电阻: } R = |Z|\cos\varphi$$

$$\text{等效电感: } L = \frac{|Z|\sin}{2\pi f}$$

$$\text{等效电容: } C = \frac{1}{2\pi f|Z|\sin}$$

### 三、实验器材

电感（镇流器）、电容、电阻、交流电压表、交流电流表、功率表、自耦调压器。

### 四、实验预习要求

在三表法测量等效阻抗时，为什么并联电容可以判断阻抗的性质？

### 五、实验内容

#### 1. 用三表法测量负载的等效参数

三表法测量电路如图 2-7-4 所示。

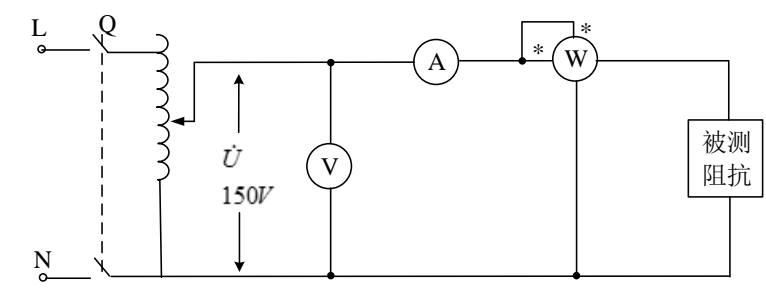


图 2-7-4 三表法测量电路

被测负载分别为白炽灯、荧光灯镇流器、电容器（4.7μF）。先将自耦调压器调节到输出为零，启动电源后，将自耦调压器的输出电压调到 150V。测量数据记录于表 2-7-1 中。

表 7-1 三表法测量数据

被 测 负 载	测量值			计算值		等效参数		
	$U$ (V)	$I$ (A)	$P$ (W)	$Z$ (Ω)	$\cos\varphi$	$R$ (Ω)	$L$ (H)	$C$ (μF)
白炽灯	150						—	—
镇流器	150							—

电容器	150					—	—	
-----	-----	--	--	--	--	---	---	--

### 2. 三电压表法测量负载等效参数

三电压表法测量电路如图 2-7-5 所示。

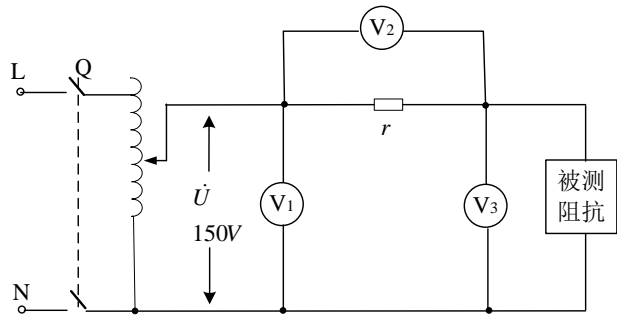


图 2-7-5 三电压表法测量电路

图中  $r$  为  $1\text{k}\Omega$  电阻，被测负载分别为白炽灯、荧光灯镇流器、电容器 ( $4.7\text{ }\mu\text{F}$ )。测量方法同步骤 1。测量数据记录于表 2-7-2 中。

表 2-7-2 三电压表法测量数据

被测负载	测量值			计算值		等效参数		
	$U_1$ (V)	$U_2$ (V)	$U_3$ (V)	$Z$ ( $\Omega$ )	$\cos \phi$	$R$ ( $\Omega$ )	$L$ (H)	$C$ ( $\mu\text{F}$ )
白炽灯	150						—	—
镇流器	150							—
电容器	150					—	—	

## 六、实验注意事项

- (1) 本实验属于强电实验，一定要注意安全，身体不要接触电路的裸露带电部分。
- (2) 启动电源之前，先将自耦调压器调节到输出为零，实验过程中，注意负载不要过电压和过电流。

## 七、实验报告要求

- (1) 完成表 2-7-1，2-7-2 的测量数据、参数计算。
- (2) 比较三表法和三电压表法测得的元件参数的差别，分析其原因。

## 实验八 $RL$ 串联电路及其功率因数的提高

### 一、实验目的

- (1) 通过实验，深刻理解交流电路中电压电流的相量关系。
- (2) 学习提高交流电路功率因数的方法。
- (3) 了解荧光灯电路的工作原理及安装方法。
- (4) 学习自耦变压器和单相功率表的使用。

### 二、实验原理

#### 1. 荧光灯电路的组成及工作原理

荧光灯电路由荧光灯管、镇流器、启辉器及开关组成，如图 2-8-1 所示。

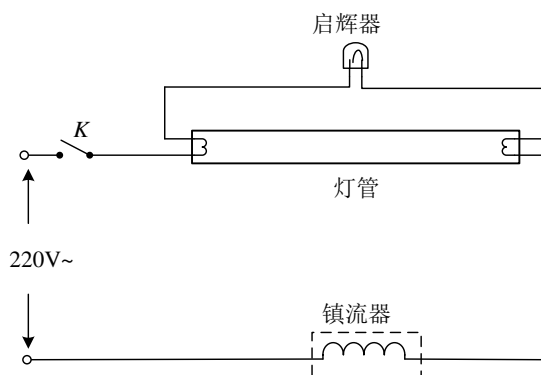


图 2-8-1 日光灯电路图

(1) 荧光灯管。荧光灯管是内壁涂有荧光粉的玻璃管，两端各有一组灯丝，管内填充有氙气和少量水银。灯管工作时，可认为是电阻性负载。

(2) 镇流器。镇流器是一个带铁芯的线圈。在荧光灯启动时，它和启辉器配合产生瞬间高压促使灯管导通，管壁荧光粉发光。灯管发光后在电路中起限流作用。工作时镇流器是电感性负载。

(3) 启辉器。启辉器的外壳由铝或塑料制成，壳内有一个充有氙气的小玻璃泡和一个纸质电容器。玻璃泡内有两个电极，其中弯曲的电极是由热膨胀系数不同的双金属片制成。电容器的作用是防止启辉器触片断开时产生的火花将触片烧坏，也防止管内气体放电时产生的电磁波对电视机等电器的干扰。

(4) 荧光灯电路的启动过程。如图 2-8-1 示电路，电源开关  $K$  接通瞬间，220V 交流电压通过灯管两端灯丝及镇流器作用于启辉器两电极，使启辉器的电极间产生辉光放电，

放电产生的热量使双金属电极伸直，两电极的触点闭合，这时荧光灯的灯丝通过电极触点以及镇流器与电源形成通路，辉光放电停止，双金属电极因温度下降复原，两电极断开，电路断开瞬间，由于电流突降，镇流器将产生一个自感高电势，这个自感高电势与电源电压串联叠加后加在灯管两端，形成一个很强的电场，使灯管中的气体电离而产生弧光放电，弧光放电所产生的紫外线激发了灯管壁上的荧光粉发光。在荧光灯进入正常的工作状态后，电源电压的一部分降落在镇流器上，使灯管与启辉器两端的电压较低，启辉器因电压不足而不会再次动作。

## 2. 感性负载功率因数的提高

荧光灯工作时，灯管和镇流器可等效为一个  $RL$  串联电路，其中  $R$  为灯管的等效电阻与镇流器的线圈电阻之和，是一种感性负载， $RL$  串联电路的功率因数为

$$\cos\varphi = \frac{P}{UI} \quad (2-8-1)$$

由于感性负载有较大的感抗，因而功率因数较低。当负载功率  $P$  和供电电压  $U$  一定时，功率因数  $\cos\varphi$  越低，则从式 (2-8-1) 可知，线路电流  $I$  就越大，从而增大了输电线路的电压降和线路功率损耗，若输电线路的总电阻为  $R_l$ ，则线路电压降和线路功率损耗分别为  $\Delta U = IR_l$  和  $\Delta P = I^2 R_l$ ，另外，电路的功率因数越低，表明无功功率就越大，电源就必须用较大的容量和负载电感进行能量交换，电源向负载提供有功功率的能力就必然下降，从而降低了电源容量的利用率。因而，要减少输电线路的损耗，提高供电设备的利用率，就必须采取措施提高用电设备的功率因数。

提高电感性负载功率因数的方法通常是在负载两端并联容量适当的电容器，使负载的无功总功率  $Q = Q_L - Q_C$  减小，这样，在传送的有功功率不变时，输电线路电流减小，当并联电容器的  $Q_C = Q_L$  时，总无功功率  $Q = 0$ ，此时功率因数  $\cos\varphi = 1$ ，线路电流  $I$  最小。若继续并联电容器，等效负载变为容性，将导致功率因数下降，线路电流增大，这种现象称为过补偿。

## 三、实验器材

荧光灯管、镇流器、启辉器、交流电压表、交流电流表、功率表、电容器、自耦变压器、测电流插座盒及插头

## 四、实验预习要求

- (1) 熟悉荧光灯电路的工作原理。
- (2) 了解功率表的工作原理和使用方法。

## 五、实验内容

(1) 按图 2-8-2 接线，将电容器全部断开，自耦变压器调到输出为 0V 位置。检查线路无误后，合上电源开关  $Q$ ，调节自耦变压器使其输出电压为 220V（输出端接交流电压

表校准)，此时荧光灯管应启动工作。

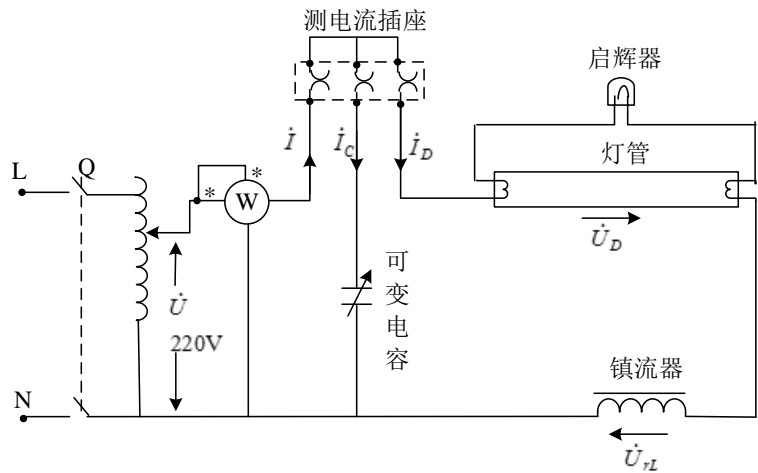


图 2-8-2 日光灯电路接线图

(2) 测量荧光灯电路的端电压  $U$ 、灯管端电压  $U_D$ 、镇流器端电压  $U_{rL}$ 、灯管电流  $I_D$  及功率表读数  $P$ ，记录于表 2-8-1 中。

表 2-8-1 电压及功率测量

$U/V$	$U_D (V)$	$U_{rL} (V)$	$I_D (A)$	$P (W)$

(3) 提高功率因数。按表 2-8-2 要求，分别接入不同容量的电容器，测量各参数，记录于表 2-8-2 中。

表 2-8-2 功率因数的提高

测量次序	$C (\mu F)$	$P (W)$	$I (A)$	$I_D (A)$	$I_C (A)$	$\cos \phi$
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

六、实验注意事项

(1) 本实验电路的额定输入电压为 220V。应接到三相自耦调压器输出的一相相线及零线上，接通电源前应把三相自耦调压器的输出调到零，在输出端接入电压表监控，接通电源后再把电压调到 220V。

(2) 本实验采用 220V 交流电压，在操作过程中，要注意人身和设备安全，身体不要接触电路的裸露带电部分。接拆线路前必须断电，线路接好后，必须仔细检查无误后方可接通电源。

## 七、实验报告要求

- (1) 整理实验数据，并用坐标纸画出  $I = f(C)$  曲线和  $\cos \varphi = f(C)$  曲线。
- (2) 根据表 2-8-1、表 2-8-2 数据说明为什么  $U \neq U_D + U_{rL}$ ； $I \neq I_D + I_C$ ？
- (3) 并联电容器提高了电路的功率因数，能否改变感性负载本身的功率因数？为什么？
- (4) 要使电路的功率因数  $\cos \varphi = 1$ ，应并联多大容量的电容？
- (5) 提高功率因数的补偿电容器为什么要在负载端就近连接，而不在发电端集中补偿？

## 第三章 模拟电子技术实验

### 实验十三 晶体管共射极放大电路

#### 一、实验目的

- (1) 掌握放大电路静态工作点的调整和测试方法。
- (2) 掌握放大电路的交流电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、幅频特性曲线的测量方法。
- (3) 观察静态工作点对放大电路输出波形的影响。
- (4) 熟悉常用电子仪器仪表及模拟电子实验设备的使用。

#### 二、实验原理

图 3-13-1 为电阻分压式稳定静态工作点的共射极单级晶体管放大电路，其基极偏置电路由  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  分压电路构成。当在放大器输入端接入交流信号  $u_s$  后，其输出端便可得到一个与之相位相反、不失真的交流放大输出信号  $u_o$ ，从而实现了电压的正常放大。如果静态工作点选择得过高或过低，或者输入信号过大，都会使输出波形失真。为获得合适的静态工作点，一般采用调节上偏置电阻  $R_p$  的方法，在发射极接有电阻  $R_E$ ，以稳定静态工作点  $Q$ 。

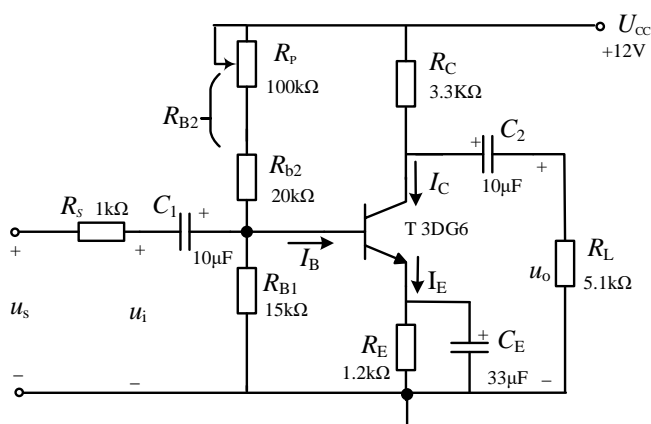




图 3-13-1 共射极放大电路

### 1. 静态参数分析

在图 3-13-1 电路中,当流过偏置电阻  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  的电流远大于晶体管 T 的基极电流  $I_B$  时 (一般 5~10 倍), 则其静态工作点可用下式估算。

$$U_B \approx \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$$I_E \approx \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx (1 + \beta) I_B$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E)$$

### 2. 动态参数分析

(1) 电压放大倍数  $A_u$  图 13-1 共射极放大电路 :在输出波形不失真的情况下输出电压与输入电压有效值 (或最大值) 的比值  $A_u$ , 即

$$A_u = u_o / u_i \approx -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$$

#### (2) 输入电阻 $r_i$

$$r_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} = u_i / i_i = R_S u_i / (u_s - u_i)$$

式中:  $u_s$  为信号源电压的有效值;  $u_i$  为放大电路输入电压的有效值;  $r_i$  的大小直接关系到信号源的工作情况。

#### (4) 输出电阻 $r_o$

$$r_o = R_L (u_{oc} - u_{oL}) / u_{oL} = R_C$$

式中:  $u_{oc}$  为放大电路开路时输出电压的有效值;  $u_{oL}$  为放大电路接负载  $R_L$  时输出电压的有效值。

(4) 幅频特性的测量。放大电路的频率特性是指放大器的电压放大倍数  $A_u$  与输入信号频率之间的关系曲线。单级阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 3-13-2 所示,  $A_{um}$  为中频电压放大倍数。通常规定, 电压放大倍数随频率变化下降到中频电压放大倍数的  $1/\sqrt{2}$ , 即  $0.707A_{um}$  所对应的频率分别称为下限频率  $f_L$  和上限频率  $f_H$ , 则通频带为

$$BW = f_H - f_L$$

放大器的幅频特性测量方法是: 测量不同信号频率时的电压放大倍数  $A_u$ , 通过“逐点法”得到放大器的幅频特性曲线。测量时, 可采用前述测  $A_u$  的方法, 每改变一次信号频率 (注意: 保持输入信号的幅度不变且输出波形不失真), 测量一个输出电压值, 计算电压放大倍数。测量时, 取点要恰当, 在低频段与高频段多测几点, 并找出  $f_L$  和  $f_H$  频点, 在

中频段可以少测几点，将测试结果在幅频坐标系中画出来，连接成曲线。

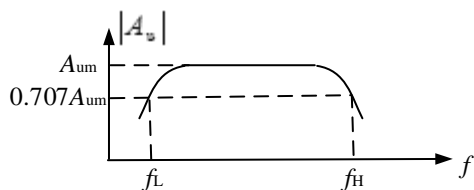


图 3-13-2 幅频特性曲线

### 三、实验器材

直流稳压电源、函数信号发生器、双踪示波器、万用表、交流毫伏表、晶体三极管、电位器、电阻器、电容器。

### 四、实验预习要求

- (1) 理解分压式偏置放大电路的工作原理及电路中各元件的作用。
- (2) 估算图 3-13-1 实验电路的性能指标：假设晶体管  $\beta=100$ ， $R_{B1}=15k\Omega$ ， $R_{B2}=40k\Omega$ ， $R_C=3.3k\Omega$ ， $R_L=5.1k\Omega$ ， $U_{CC}=+12V$ ，估算放大电路的静态工作点  $Q$ ，电压放大倍数  $A_u$ ，输入电阻  $r_i$  和输出电阻  $r_o$ 。
- (3) 了解饱和失真、截止失真或因信号过大引起的失真波形。
- (4) 掌握有关输入电阻、输出电阻及频率特性的测试方法。

### 五、实验内容

按实验原理图接好电路。以稳压电源负端为接地参考点，按照图 3-13-3 所示各仪器与实验电路的连接方式接入  $U_{CC}=+12V$  的直流电压，其他仪器根据需要接入相应端。其中实验所用型号为 3DG6 的晶体管管脚如图 3-13-4。

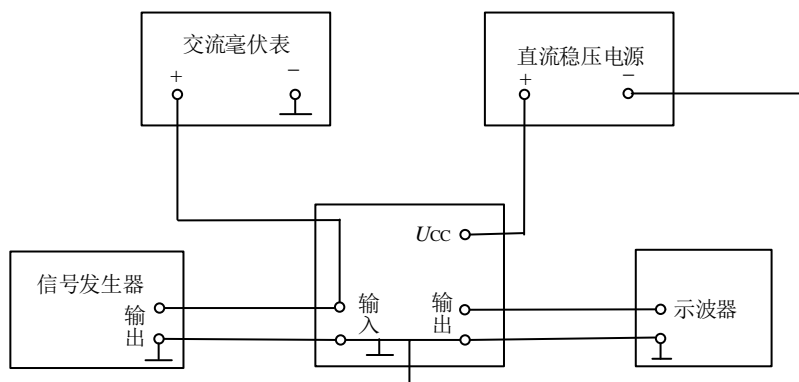


图 3-13-3 实验仪器与放大电路的连接方式

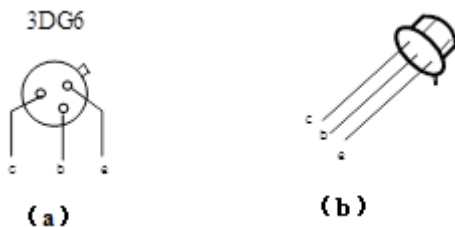


图 13-4 3DG6 晶体管的管脚图

(a) 管脚排列; (b) 外形图

### 1. 静态工作点的调试与测量

输入端不输入交流信号, 即  $u_i = 0$ , 接通直流稳压电源  $U_{CC} = 12V$ , 调节上偏置电阻 (通过调节  $R_p$ ) 使  $U_C = 7V$ , 以保证  $Q$  点在负载线的中间位置, 测量相应的  $U_B$ 、 $U_E$  并记入表 3-13-1 中。

表 3-13-1 静态工作点 ( $V_C = 7V$ )

测 量 值	$U_B$ (V)	$U_E$ (V)	$U_C$ (V)	$R_{B2}$ (k $\Omega$ )
计 算 值	$U_{BE}$ (V)	$U_{CE}$ (V)	$I_C$ (mA)	

### 2. 输入电阻 $r_i$ 、输出电阻 $r_o$ 的确定

在放大电路图 3-13-1 输入端接入频率为 1kHz、有效值为 5mV 的正弦交流信号  $u_s$ , 在输出电压  $u_o$  不失真的情况下, 用交流毫伏表测出  $u_s$  和  $u_i$  的有效值, 计算输入电阻  $r_i$  并记入表 3-13-2 中。

保持  $u_s$  不变, 在输出电压  $u_o$  不失真的情况下, 断开  $R_L$ , 测量放大器空载时的输出电压  $u_{OC}$ ; 接入负载电阻  $R_L = 5.1k\Omega$ , 测量放大器带负载时的输出电压  $u_{OL}$ , 计算输出电阻  $r_o$  并记入表 3-13-2 中。

表 3-13-2 输入 / 输出电阻

负载电阻	测 量 值 (mV)		计 算 值 (k $\Omega$ )
$R_s$	$u_s$	$u_i$	$r_i = R_s u_i / (u_s - u_i)$
1k $\Omega$			
$R_L$	$u_{OC}$	$u_{OL}$	$r_o = R_L (u_{OC} - u_{OL}) / u_{OL}$
5.1 k $\Omega$			

### 3. 测量输出电压, 并计算电压放大倍数

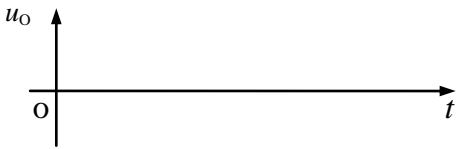
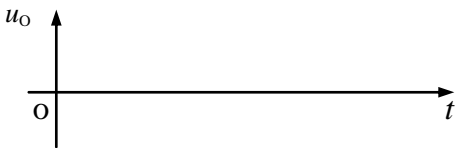
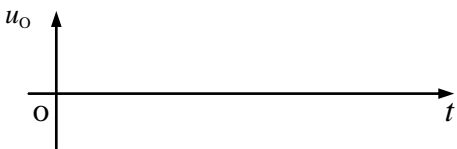
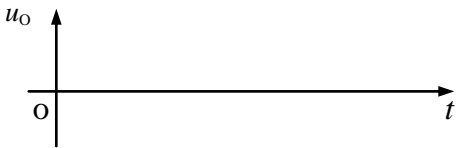
在放大电路输入端接入频率为 1kHz 正弦交流信号, 并使  $u_s = 5mV$ , 同时用示波器观察

输出电压  $u_o$  的波形,在输出波形不失真情况下,按表 13-3 给定条件测量  $u_i$  和  $u_o$ , 计算  $A_u=u_o/u_i$ , 并记入表 3-13-3 中。

电压放大倍数			
测试条件	测 $u_i$ /mV	测 $u_o$ /mV	$A_u$
$R_L=5.1k\ \Omega$			
$R_L=10k\ \Omega$			
$R_L=\infty$			

4. 静态工作点 Q 变化对输出波形的的影响

在给定条件下,用示波器观察输出波形,并记入表 3-14-4 中。

静态工作点 Q 变化对输出波形的的影响		
测 试 条 件	输 出 波 形	失真类型
$R_P$ 适中, Q 点合适, 输出波形无失真		
$R_P$ 太小, Q 点偏高		
$R_P$ 太大, Q 点偏低		
$R_P$ 适中, Q 点合适, 输入信号幅值太大		

5. (扩展要求) 幅频特性的测量 ( $R_L=10k\ \Omega$ )

保持放大器的输入信号  $u_s=5mV$  不变,放大器的输出信号幅度将随输入信号频率的改变而改变,改变输入信号  $u_s$  的频率,用交流毫伏表测量对应的输出电压  $u_o$ , 记录于表格 3-14-5 中,并画出放大器的幅频特性曲线。

表 3-14-5

幅频特性测量表

$f$ (Hz)					1000				
$u_o$ (mV)	$0.5U_o$	$0.7U_o$	$0.8U_o$	$0.9U_o$	$U_o$	$0.9U_o$	$0.8U_o$	$0.7U_o$	$0.5U_o$
$A_o$									

## 六、实验注意事项

- (1) 为使放大电路正常工作，切记接入工作直流电源。
- (2) 函数信号发生器、示波器等仪器应与实验电路共地。
- (3) 放大电路的输入电压  $u_i$  和输出电压  $u_o$  不属于同数量级，测量时要特别注意仪表量程及示数单位。

## 七、实验总结

- (1) 画出实验电路原理图，列表整理测试结果，并把实测的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻值、输出电阻值与它们的理论计算值（取一组相关数据）进行比较，分析产生误差的原因。
- (2) 总结集电极电阻  $R_C$ 、负载电阻  $R_L$  值及静态工作点对电压放大倍数、输入电阻、输出电阻的影响。
- (3) 讨论静态工作点变化对输出波形的影响。
- (4) 放大电路的测试中，输入信号频率一般选择 1kHz，为何不选择 100kHz 或更高的频率？
- (5) 分析并讨论在调试过程中出现的问题。

## 实验十四 多级阻容耦合放大电路与射极跟随器

### 一、实验目的

- (1) 理解多级阻容耦合放大电路总电压放大倍数与各级电压放大倍数的关系。
- (2) 熟悉多级放大电路性能的测试方法。
- (3) 学习多级放大电路输入电阻和输出电阻的测试方法。
- (4) 熟悉射极跟随器的特点及应用。
- (5) 观察输入、输出电压波形，比较其相位关系。

### 二、实验原理

图 3-14-1 为三级阻容耦合放大电路。阻容耦合的优点：前级和后级直流通路彼此隔开，各级静态工作点互不影响，便于分析和计算。它在多级放大电路中得到了广泛应用。但由于耦合电容的存在，它对直流信号（缓变信号）的传输较弱；在集成电路中制造大电容很困难，不便于集成化。所以，阻容耦合只适用于分立元件组合电路。图中前两级为实验“晶体管共射极放大电路”所做的电阻分压式稳定静态工作点的共射极放大电路；第三级为共集电极连接的射极跟随器。因为它具有电压放大倍数接近于 1（但略小于 1），输出电压与输入电压同相位，输入电阻值大，输出电阻值小等特点，既可做为多级放大电路的输入级，也可做为输出级或中间缓冲级，灵活方便，应用广泛。

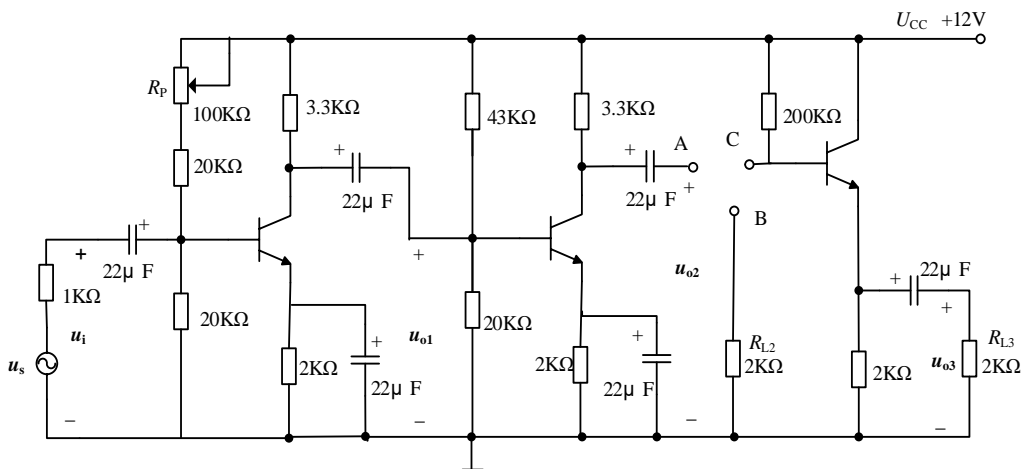


图 3-14-1 三级阻容耦合放大电路

### 三、实验器材

直流稳压电源、函数信号发生器、双踪示波器、万用表、交流毫伏表、晶体三极管、电位器、电阻器、电容器。

### 四、实验预习要求

- (1) 复习射极跟随器的特点及应用。
- (2) 了解多级放大电路的工作原理及电路中各元件的作用。
- (3) 熟悉多级放大电路总电压放大倍数与各级电压放大倍数的关系。
- (4) 熟悉本实验所用仪器仪表的使用方法及仿真测试技术。
- (5) 熟悉输入电阻及输出电阻的测试方法。

### 五、实验内容

按照图 3-14-1 原理图正确连接阻容耦合放大电路。以稳压电源负端为接地参考点，按照图 3-13-2 所示各仪器与实验电路的连接方式接入  $U_{CC}=+12V$  的直流电压，其他仪器根据需要接入相应端。

#### 1. 静态工作点的调试

输入端不接入交流信号，即  $u_i=0$ ，接通直流稳压电源  $U_{CC}=+12V$ ，通过调节  $R_P$  使  $U_{C1}=7V$ ，以保证各级  $Q$  点在其负载线的中间位置。

#### 2. 测量电压放大倍数。

1) 连接 A、B 两点，即第二级放大电路接负载电阻  $R_{L2}$ ，输入  $f=1kHz$ ， $U_s=0.1mV$  的正弦波信号，观察输入信号  $u_i$ 、输出信号  $u_{o2}$  波形，在输出信号不失真的情况下测量各级输入、输出电压，算出各级电压放大倍数及总电压放大倍数 ( $U_{o2}/U_i$ ) 并填表 12-1。

2) 断开 A、B，连接 A、C 两点，即把第三级射极跟随器接入，观察输入信号  $u_i$ 、输出信号  $u_{o3}$  波形，测量各级输入、输出电压，算出各级电压放大倍数及总电压放大倍数 ( $U_{o3}/U_i$ ) 并填表 3-14-1。

表 3-14-1 各级输入/输出电压和电压放大倍数

$u_i$ (mV)	$u_{o1}$ (V)	$A_{u1}$	$u_{i2}$ (V)	$u_{o2}$ (V)	$A_{u2}$	$u_{i3}$ (V)	$u_{o3}$ (V)	$A_{u3}$	$A_u$
						—	—	—	

3) 测量多级放大电路的输入/输出电阻值。用交流电压/电流表测量输入电压和输入电流，然后计算

$$r_i = r_{i1} = u_i / i_i$$

分别测出两级、三级放大电路的空载输出电压、负载输出电压，然后由下式计算  $r_o$  (两

级放大电路输出电阻  $r_{O2}$ ，三级放大电路输出电阻  $r_{O3}$ )

$$r_o = R_L(u_{oC} - u_{oL}) / u_{oL}$$

式中： $u_{oC}$  为开路时输出电压的有效值； $u_{oL}$  为接负载  $R_L$  时输出电压的有效值。

## 六、实验注意事项

- (1) 为使放大电路正常工作，切记接入工作直流电源。
- (2) 函数信号发生器、示波器等仪器应与实验电路共地。
- (3) 放大电路的输入电压  $u_i$  和输出电压  $u_o$  不属于同数量级，测量时要特别注意仪表量程及示数单位。
- (4) 用示波器观测输出波形时，为了避免电路静态电压的影响，示波器输入耦合方式应选交流 (AC)。

## 七、实验总结

- (1) 观察各级输入、输出电压波形，写出输入电压与各级输出电压的相位关系。
- (2) 写出  $A_u$  与  $A_{u1}$ 、 $A_{u2}$ 、 $A_{u3}$  的关系及  $r_i$  与  $r_{i1}$ 、 $r_o$  与  $r_{o3}$  关系。
- (3) 射极跟随器的电压放大倍数接近 1 (略小于 1)，为何接上射极跟随器后，电路总的电压放大倍数提高了不少，即实验中三级放大电路比两级放大电路的总电压放大倍数提高了？
- (4) 对实验过程中出现的问题进行分析和讨论。



## 实验十五 集成运算放大器的基本运算电路

### 一、实验目的

- (1) 理解集成运算放大电路线性工作区的条件与特点。
- (2) 掌握由集成运算放大器设计比例放大、加法、减法、积分电路等放大电路的方法。
- (3) 了解运算放大电路在实际应用时应考虑的一些问题。

### 二、实验原理

集成运算放大器是一种具有高电压增益的直接耦合多级放大器件，集成运算放大器种类很多，按用途可分为专用型和通用型。本实验选用通用型  $\mu A741$ ，它是一种具有内部频率补偿和短路保护等特点的高性能集成运算放大器。集成运算放大器在线性应用时，均构成深度负反馈，其输入、输出关系决定于外接电路。外接不同的反馈网络，可以构成不同功能的运算电路。本实验着重讨论比例、加法、差分、积分等信号运算电路。为简化分析，假设运算放大器工作在理想状态，其线性分析依据为： $u_+ = u_-$ ； $i_+ = i_- = 0$ 。

#### 1. 反相比例运算电路

反相比例运算电路如图 3-15-1 (a) 所示，其输入输出关系为

$$u_o = -(R_f/R_1)u_i$$

为了减小输入级偏置电流引起的运算误差，在同相输入端应接平衡电阻  $R' = R_f//R_1$ 。

#### 2. 同相比例运算电路

同相比例运算电路如图 3-15-1 (b) 所示，其输入输出关系为

$$u_o = (1 + R_f/R_1) u_i$$
$$R' = R_f//R_1$$

#### 3. 反相加法运算电路

反相加法运算电路如图 3-15-1 (c) 所示，其输入输出关系为

$$u_o = -(u_{i1} R_f/R_1 + u_{i2} R_f/R_2)$$
$$R' = R_f//R_1//R_2$$

#### 4. 差分放大电路（减法器）

差分放大电路如图 15-1 (d) 所示，其输入输出关系为

$$u_o = \left(1 + \frac{R_f}{R_1}\right) \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{i2} - \frac{R_f}{R_1} u_{i1}$$

当  $R_1 = R_2$ ， $R_3 = R_f$  时

$$u_o = R_f/R_1 (u_{i2} - u_{i1})$$

## 5. 积分运算电路

反相积分运算电路如图 3-15-1 (e) 所示，其输入输出关系为

$$u_o = -(1/C_f R_1) \int u_i dt$$

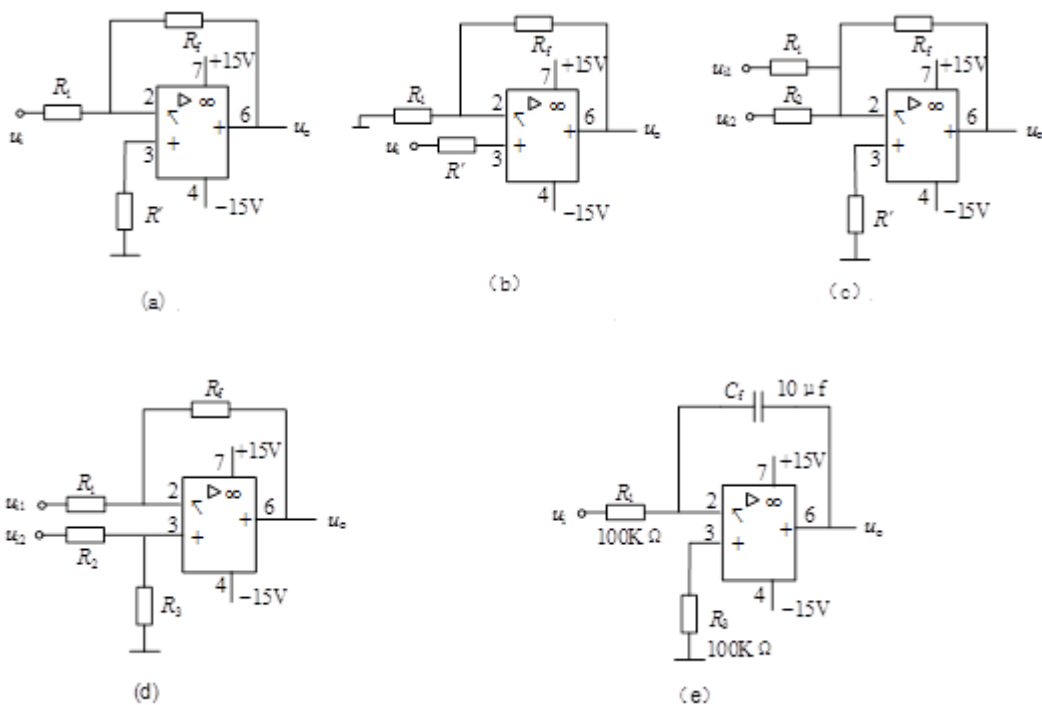


图 3-15-1 运放的基本运算电

(a) 反相比例运算电路；(b) 同相比例运算电路；(c) 反相加法运算电路；(d) 差分运算电路；(e) 反相积分运算电路

## 三、实验器材

函数信号发生器、示波器、万用表、交流毫伏表、直流稳压电源、运算放大器、电阻、电容等元器件。

## 四、实验预习要求

- (1) 熟悉集成运算放大器及其有关线性应用电路的工作原理。
- (2) 熟悉集成运算放大器的引脚排列及功能。
- (3) 按实验内容的设计要求，计算各运算电路的电阻参数并标注于电路图中。

## 五、实验内容

实验前，要先了解运算放大器组件各引脚的位置和功能， $\mu A741$  外引脚排列如图

3-15-2 (b) 所示。其中引脚 1、5 接调零电位器，4 引脚接负电源，7 引脚接正电源，6 引脚为输出端。按实验原理图接好线路并仔细检查，确保电路的连接正确。每个运算放大器电路都要接正、负电源，切不可把正、负电源极性接反或将输出端短路，否则会损坏集成电路。调节直流稳压电源，使两路的输出电压均为 15V，然后按图 3-15-2 (a) 接成共地的  $\pm 15\text{V}$  电源，并接到实验电路。参照图 3-15-2 (c) 连好电路，输入端接地短接调零。对于精度要求不是很高的实验，一般可以省略调零步骤，即不接调零电位器，1、5 引脚始终保持悬空状态。

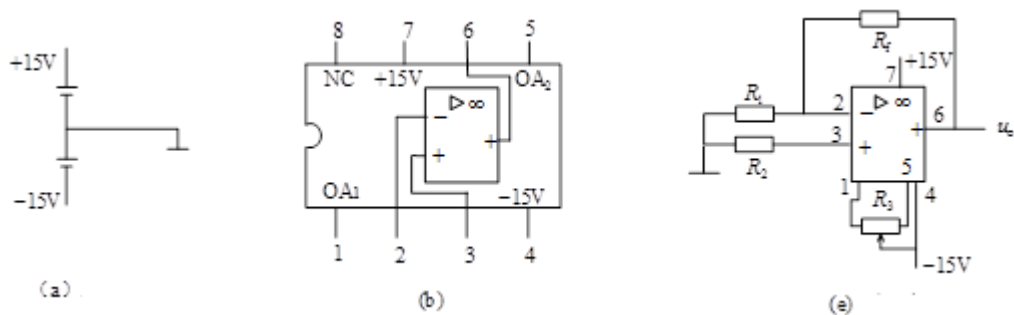


图 3-15-2  $\mu\text{A741}$  引脚及调零电路

(a) 正负电源的连接；(b)  $\mu\text{A741}$  引脚图；(c) 调零

(1) 分别按下列要求设计相应的运算电路，要求反馈电阻  $R_f=100\text{k}\Omega$ 。

反相比例运算电路  $u_o = -10u_i$

同相比例运算电路  $u_o = 11u_i$

反相加法运算电路  $u_o = -(2u_{i1} + 5u_{i2})$

差分运算电路（减法器）  $u_o = 10(u_{i2}-u_{i1})$

(2) 画出相应的电路图，并标注元件参数。

(3) 按图 3-15-1 连接相应的电路，对于反相比例运算、同相比例运算电路、加法运算电路、减法运算电路，各输入 3 组直流电压信号，测量输入、输出电压。反相比例运算测试结果记录于表 3-15-1 中，其他电路自拟表格及输入电压，注意运算放大器的线性工作区间。

表 3-15-1

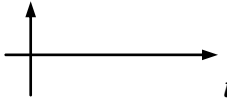
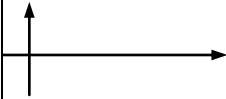
反相比例运算电路测量

$U_i$ (V)	0.5	-1	1
$U_o$ (V) 测量值			
$U_o$ (V) 理论值			

(4) (扩展要求) 反相积分运算电路。按图 3-15-1 (e) 连接电路，输入信号采用幅值为 2V、频率为 1kHz 的正弦波信号，用双踪示波器同时观察  $u_i$  和  $u_o$  的波形，并记录  $u_o$  的幅值。

(5) (扩展要求) 反相比例运算电路输入正弦波信号。  $u_i=0.3V$ ，  $f=1kHz$ ， 测量相应的输入输出电压， 并用双踪示波器观察波形， 注意两者的相位关系， 记录表 3-15-2 中，

表 3-15-2 同相比例运算电路测量表 (输入正弦信号  $u_i=0.3V$ ，  $f=1kHz$ )

$u_i$ (V)	$u_o$ (V)	$u_i$ 波形	$u_o$ 波形	$A_u$	
				实测值	理论值
					

### 六、实验注意事项

- (1) 为使放大电路正常工作， 不要忘记接入工作直流电源。 切不可把正、 负电源极性接反或将输出端短路， 以免损坏集成电路。
- (2) 函数信号发生器、 示波器、 直流信号源等应与实验电路共地。
- (3) 每次换接电路前都必须关掉电源！

### 七、实验总结

- (1) 画出实验电路原理图， 并标注参数。 绘制表格， 填写、 整理测试数据。
- (2) 基本运算电路， 输出端电压接近饱和， 原因有哪些？
- (3) 分析  $u_o$  的测量值与计算值之间的误差， 并说明产生误差的原因。
- \* (4) 在反相积分运算电路中， 当输入方波信号时，  $u_o$  的波形如何？ 若增大电容值， 则  $u_o$  的波形如何变化？

## 实验十六 集成运算放大器的非线性应用

### 一、实验目的

- (1) 熟悉电压比较器的功能、电路结构及其特点。
- (2) 学会电压比较器的测试方法。
- (3) 学会用运算放大器构成方波信号发生器的方法。

### 二、实验原理简述

电压比较器是对电压幅值进行比较的电路，它将一个模拟量电压信号  $u_i$  与一个参考电压  $U_R$  值比较，在二者相近时输出跃变电压信号  $u_o$ 。电压比较器是集成运算放大器非线性应用的基础。本实验选用通用型  $\mu A741$ ，其管脚排列可参考实验十五内容。图 3-16-1 所示为处于开环工作状态的电压比较器，由理想运算放大器的传输特性可知，集成运算放大器处于开环工作状态时，其输出处于饱和区（非线性区）。当  $u_i < U_R$  时， $u_o = U_{o(sat)}$ ；当  $u_i > U_R$  时， $u_o = -U_{o(sat)}$ 。本实验涉及过零电压比较器和迟滞电压比较器两种电压比较器。

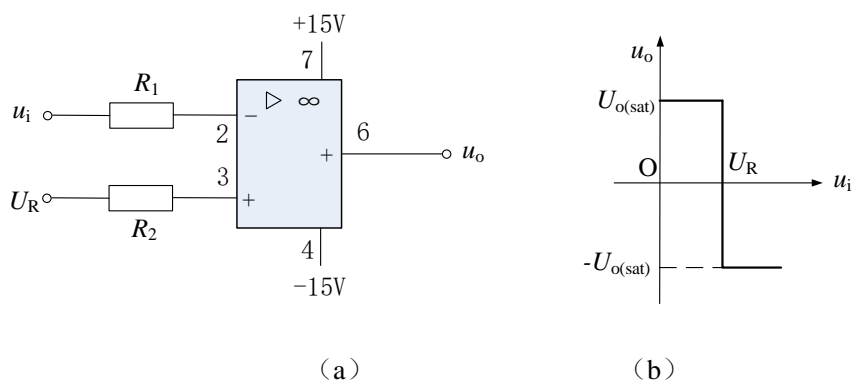


图 3-16-1 电压比较器

(a) 电路图；(b) 电压传输特性

#### 1. 过零电压比较器

图 3-16-2(a)为加限幅电路的过零电压比较器， $D_Z$ 为双向限幅稳压二极管。输入信号加在运算放大器的反相输入端，当  $u_i < 0$  时， $u_o = +(U_Z + U_D)$ ；当  $u_i > 0$  时， $u_o = -(U_Z + U_D)$ 。其电压传输特性如图 3-16-2 (b) 所示。实际应用中，由于运算放大器的电压放大倍数不可能无穷大，所以，在  $u_i = 0$  附近，存在一个小的线性区间。放大过零电压比较器虽然结构简单，灵敏度高，但抗干扰能力差。

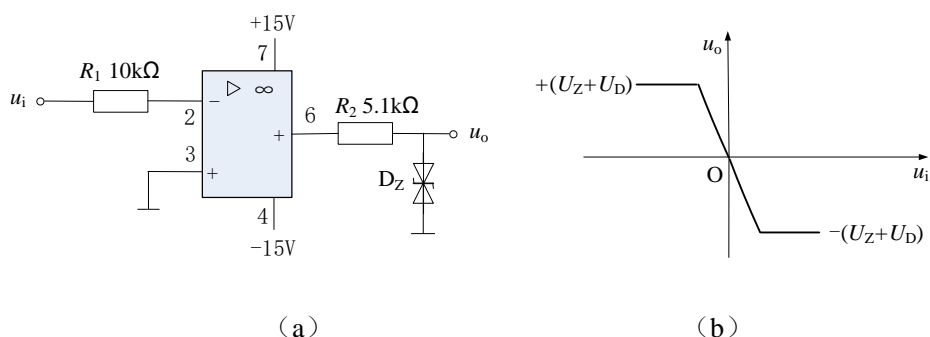


图 16-2 过零电压比较器

(a) 电路图; (b) 电压传输特性

## 2. 迟滞电压比较器

过零电压比较器在实际工作时, 若  $u_i$  恰好在零值附近, 则由于零点漂移的存在,  $u_o$  将不断从一个极限值转换到另一个极限值, 在控制系统中, 这种不稳定性对执行机构是很不利的。为此, 需要输出信号具有迟滞特性。图 3-16-3(a) 从运算放大器的输出端引一个分压电阻正反馈支路到同相输入端, 当  $u_o$  改变状态时, A 点电位也随之改变, 使得过零点离开原来位置。当  $u_o$  为正 (记作  $U_+$ ) 时,  $U_A = U_+ R_2 / (R_2 + R_f)$ , 则当  $u_i > U_A$  后,  $u_o$  即由正变负 (记作  $U_-$ ), 此时  $U_A$  变为  $-U_A$ 。故只有当  $u_i$  下降到  $-U_A$  以下时, 才能使得  $u_o$  再回升到  $U_+$ , 如图 3-16-3 (b) 所示迟滞特性回线。 $U_A$  与  $-U_A$  之差称为回差。改变  $R_2$  的数值, 回差大小也随之改变。

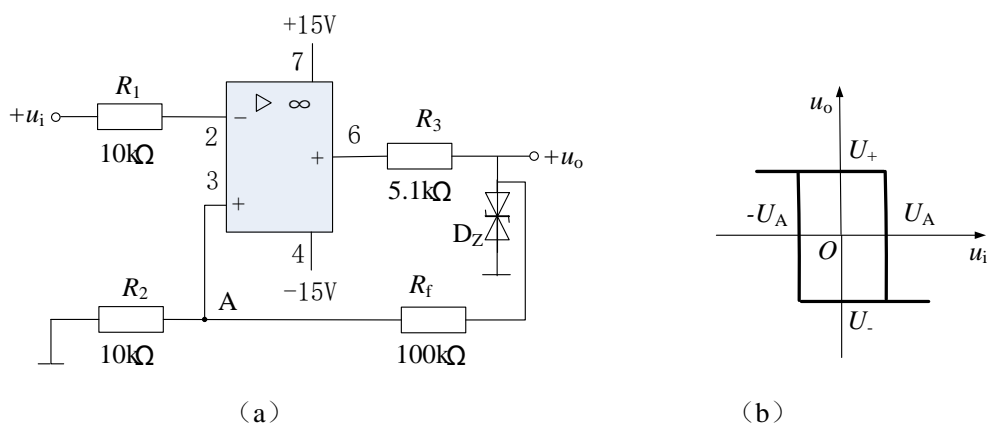


图 3-16-3 迟滞电压比较器

(a) 电路图; (b) 电压传输特性

## 3. (扩展要求) 方波发生器

方波发生器又称多谐振荡器, 其电路如图 3-16-4 所示, 它是在迟滞电压比较器的基础

上, 增加了一个由  $R_{f2}$ 、 $C$  组成的积分电路, 把输出电压经  $R_{f2}$ 、 $C$  反馈到集成运算放大器的反相端, 电路的正反馈系数为

$$F \approx \frac{R_{f1}}{R_1 + R_{f1}}$$

$R_{f2}$ 、 $C$  组成一个负反馈电路, 电容  $C$  根据输出电平  $U_o$  的高低进行充电或放电, 所以电容  $C$  上的电压  $U_C$  是变化的。当  $U_o > 0$  时, 电容  $C$  充电,  $U_C$  按指数升高; 当  $U_o < 0$  时, 电容  $C$  放电,  $U_C$  按指数降低。当  $U_C = FU_o$  或  $U_C = -FU_o$  时, 电路产生一次翻转, 在  $-FU_o < U_C < FU_o$  时, 输出电压  $U_o$  保持恒值  $U_Z$  或  $-U_Z$ 。如此循环, 形成如图 3-16-5 所示的方波, 方波周期为

$$T = t_1 + t_2 = 2R_{f2}C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_{f1}}\right)$$

式中:  $T_1$  为充电时间;  $T_2$  为放电时间。

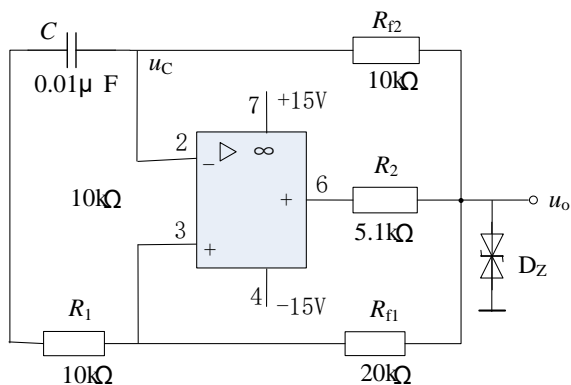


图 3-16-4 方波发生器

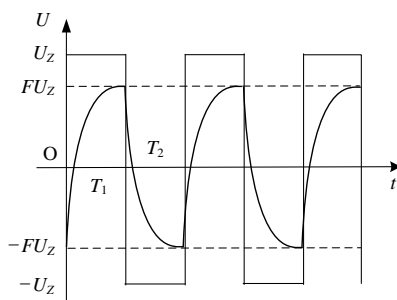


图 3-16-5 方波发生器波形

其中, 频率为

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2R_{f2}C \ln\left(1 + \frac{2R_1}{R_{f1}}\right)}$$

根据上式可知, 改变  $R_{f1}$ 、 $C$ 、 $R_1$ 、 $R_{f2}$  可实现频率调节。方波的幅度取决于稳压二极管的稳压值, 改变稳压二极管的稳压值可改变方波的幅度。

### 三、实验器材

信号发生器、双踪示波器、万用表、直流稳压电源、集成运算放大器、电阻器、电容器等。

## 四、实验预习要求

- (1) 熟悉电压比较器的工作原理。
- (2) 根据给定的电路参数计算方波发生器的频率。

## 五、实验内容

按实验原理图接好线路并仔细检查，确保电路的连接正确。

### 1. 过零电压比较器

实验电路如图 3-16-2 所示。

- (1) 确定电路连接正确，接通 $\pm 15\text{V}$ 直流电源。
- (2) 输入  $1000\text{Hz}$ 、 $1\text{V}$  的正弦信号  $u_i$ ，用双通道示波器同时观察记录  $u_i$ 、 $u_o$  波形。
- (3) 将  $u_i$ 、 $u_o$  对应接入双通道示波器的 CH1 和 CH2，并把示波器的显示模式设置为 X-Y 模式。观察并记录过零电压比较器的电压传输特性曲线。

### 2. 反相迟滞电压比较器

实验电路如图 3-16-3 所示。测试方法与过零电压比较器相同。观察并记录迟滞电压比较器的  $u_i$ 、 $u_o$  波形和电压传输特性曲线。

### 3. (扩展要求) 方波发生器

按图 3-16-4 接线，用示波器观察  $U_o$  和  $U_C$  的波形，测量  $U_o$  的频率，与预习的结果比较。更换  $R_{12}$ ，使  $R_{12}=30\text{k}\Omega$ ，重复上述内容，记录  $U_o$  和  $U_C$  的频率、波形。

## 六、实验注意事项

- (1) 放大电路需接入 $\pm 15\text{V}$ 工作直流电源方可正常工作。切不可把正、负电源极性接反或将输出端短路，否则会损坏集成电路。
- (2) 函数信号发生器、示波器应与实验电路共地。
- (3) 每次换接电路前都必须关掉电源。

## 七、实验总结

(1) 根据实验结果绘制过零电压比较器和迟滞电压比较器的输入输出波形及电压传输特性曲线。比较两者的差别。

\* (2) 绘制方波发生器的输出波形  $u_o$  和电容波形  $u_C$ 。



## 实验十七 整流、滤波、稳压电路

### 一、实验目的

- (1) 熟悉整流、滤波及稳压电路的功能，加深对直流稳压电源原理的理解。
- (2) 学会测量直流稳压电源的各项技术指标。
- (3) 通过数据测量和波形观察进一步了解直流稳压电源的性能。

### 二、实验原理简述

直流稳压电源是把交流电压变成直流电压的设备。小功率线性直流稳压电源一般由交流电源、变压器、整流、滤波和稳压电路几部分组成，如图 3-17-1 所示。在电路中，变压器将常规的交流电压（220V、50Hz）变换成合适的交流电压；整流电路将交流电压变换成单方向脉动的直流电，如图 3-17-2 所示；滤波电路再将单方向脉动的直流电中所含的大部分交流成分滤掉，得到一个较平滑的直流电，如图 3-17-3 所示；图 3-17-4 所示的稳压电路用来消除由于电网电压波动、负载改变对其产生的影响，从而使输出电压稳定。

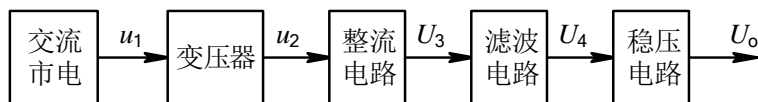


图 3-17-1 直流稳压电源框图

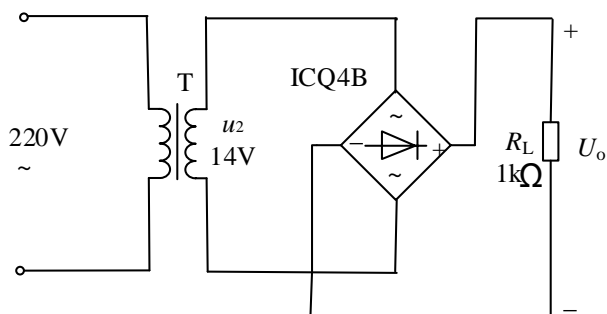


图 3-17-2 整流电路

图 3-17-2 中，交流电压  $u_2$  经过整流后，负载电阻  $R_L$  上在  $u_2$  的整个周期都有电流通过，而且方向不变，其输出电压

$$u_o = |\sqrt{2}U_2 \sin \omega t|$$

可知输出电压的平均值

$$U_o = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t d(\omega t)$$

可得

$$U_o = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} \approx 0.9U_2$$

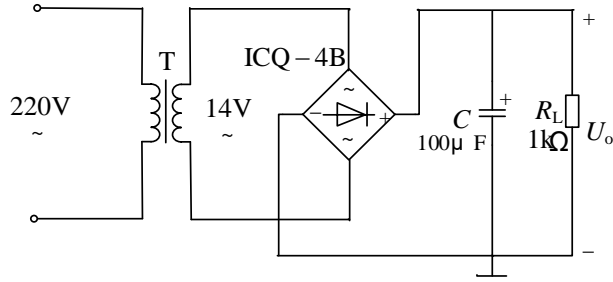


图 3-17-3 整流滤波电路

图 3-17-3 整流滤波电路中，输出电压难于用解析式描述，采用近似估算时，输出电压

$$U_o = \sqrt{2}U_2 \left(1 - \frac{T}{4R_L C}\right)$$

当  $R_L C = (3 \sim 5) T/2$  时

$$U_o \approx 1.2U_2$$

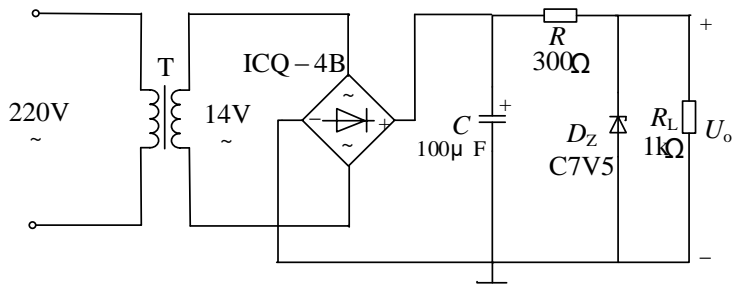


图 3-17-4 整流滤波稳压电路

图 3-17-4 中，由限流电阻  $R$  和稳压二极管  $D_Z$  构成稳压电路，其中稳压二极管工作在反向稳压区，由于负载与稳压二极管并联，称为并联型稳压电源。在整流滤波稳压电路中，只要使稳压二极管始终工作在稳压区，则输出电压就基本稳定， $U_o$  就等于稳压二极管的稳定电压。

随着半导体工艺的发展,稳压电路也制成了集成器件。由于集成稳压器具有体积小、外接线路简单、使用方便、工作可靠和通用性等优点,因此在各种电子设备中应用十分普遍,基本上取代了由分立元件构成的稳压电路。集成稳压器的种类很多,选用时应根据设备对直流电源的要求来进行选择。对于大多数小功率电子仪器、设备和电子电路来说,通常选用串联线性集成稳压器,而在这种类型的器件中,又以三端式稳压器应用最为广泛。图 3-17-5 所示为用三端式稳压器 W7805 构成的单电源电压输出串联型稳压电源的实验电路图。其中  $C_1$ 、 $C_2$  为滤波电容,  $C_1$  一般选取几百至几千微法,  $C_2$  一般取零点几微法。当稳压器距离整流滤波电路比较远时,在输入端必须接入电容器  $C_3$ ,以抵消线路的电感效应,防止产生自激振荡。输出端电容  $C_4$  ( $0.1\mu\text{F}$ ) 用以滤除输出端的高频信号,改善电路的暂态响应。

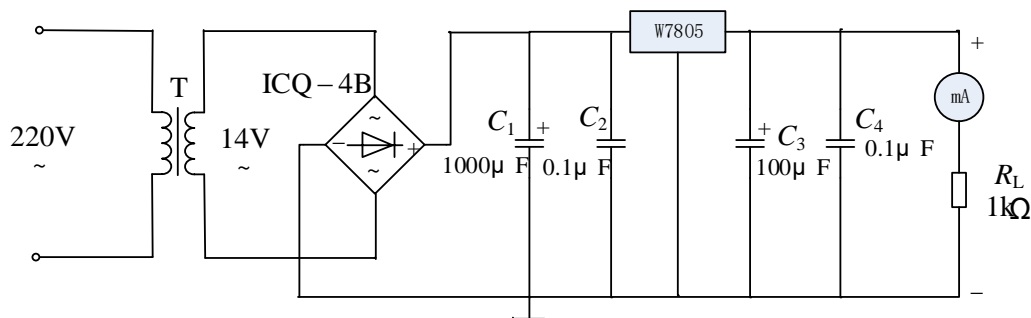


图 3-17-5 集成稳压电源原理图

### 三、实验器材

双踪示波器、万用表、交流毫伏表、直流毫安表、电阻器、电容器、整流桥、稳压二极管、稳压集成等。

### 四、实验预习要求

- (1) 了解二极管和稳压二极管的结构及工作原理。
- (2) 熟悉直流稳压电源的组成和工作原理。
- (3) 在桥式整流电路中,如果某个二极管短路、开路或接反将会出现什么问题?
- (4) 能用双踪示波器同时观察交流输入、直流输出波形吗?为什么?

### 五、实验内容

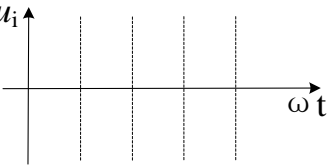
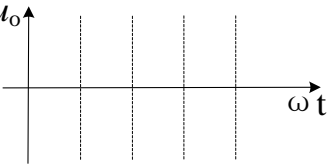
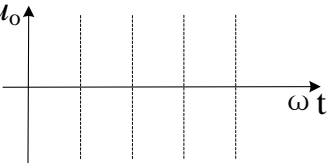
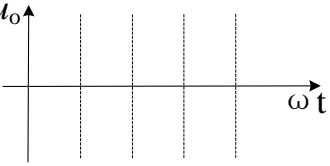
- (1) 按实验原理图 5-17-2 接好线路并仔细检查,确保电路的连接正确。
- (2) 测量输入电压和输入波形。
- (3) 测量整流电路的输出电压和波形。
- (4) 测量整流桥加滤波电容电路的输出电压和波形(注意电解电容的极性)。
- (5) 测量整流桥加滤波电容加稳压二极管电路的输出电压和波形。
- (6) 测量直流稳压电源的开路输出电压  $U_{OC}$  与带负载输出电压  $U_L$ , 算出其等效

内阻  $R_o$ 。

$$R_o = R_L (U_{OC} - U_L) / U_L$$

将上述测得数据填入表 3-17-1，并与理论计算值比较，进行误差分析。

表 3-17-1 测量输入输出电压及波形

测量对象	输入电压	输出电压			输入输出波形（对齐画）
	实测值	实测负载电压	计算负载电压	误差/%	
整流					
整流滤波					
整流滤波稳压					

（7）测量直流稳压电源的外特性。改变  $R_L$  值，测量对应的  $U_L$  和  $I_L$  值，分别填入表 3-17-2 中，根据测定值逐点描出  $U_L$ - $I_L$  曲线，即为直流稳压电源的外特性。

表 3-17-2 直流稳压电源的外特性

$R_L(k\ \Omega)$	$\infty$	3	2	1
$U_L(V)$				
$I_L(mA)$				

（8）（扩展要求）集成稳压器性能测试。按图 3-17-5 连接电路。

1) 测量电路的输出电压  $U_o$  = \_\_\_\_\_ V。

2) 调节负载电阻  $R_L$ ，使  $I_o$  = 100mA，调节变压器副边电压，使其上升和下降 10%（即模拟电源电压波动  $\pm 10\%$ ）分别测出相应的输入电压  $U_i$  及输出电压  $U_o$ ，记入自拟表格中，计算电源的稳压系数  $S$ 。

3) 调节负载电阻  $R_L$ , 使  $I_o=100\text{mA}$ , 测量输出纹波电压  $U_L$  并记录。降低输出电流  $I_o$ , 观测纹波电压的变化情况。

## 六、实验注意事项

- (1) 正确连接线路, 检查无误后再接通交流电源。
- (2) 滤波电容和稳压二极管的极性不能接反, 否则会造成元件损坏甚至人员伤害。
- (3) 要特别注意整流桥 4 个端子的接入, 应根据具体实验装置辨别清楚两个交流端和两直流端, 不能接错。
- (4) 测量直流稳压电源的外特性时, 负载电阻不宜过大或过小, 要保证稳压二极管能正常工作 ( $I_{Z\min} \leq I_Z \leq I_{Z\max}$ )。
- (5) 整流电路输入端与输出端不共地, 不能同时用双踪示波器观察交流输入和整流输出波形, 以免造成短路。

## 七、实验总结

- (1) 引起稳压电源输出电压不稳定的主要原因是什么?
- (2) 整理实验数据, 计算直流稳压电源的等效内阻, 画出直流稳压电源的外特性曲线。