

# 模拟电子技术部分

Fundamental of Analog Electronics Technology

# 目 录

实验一	常用电子仪器的使用 .....	1
实验二	晶体管共射极单管放大器 .....	9
实验三	场效应管放大器 .....	20
实验四	负反馈放大器 .....	26
实验五	射极跟随器 .....	32
实验六	差动放大器 .....	38
实验七	集成运算放大器指标测试 .....	44
实验八	集成运算放大器的基本应用 ( I ) ——模拟运算电路—— .....	52
实验九	集成运算放大器的基本应用 ( II ) ——有源滤波器—— .....	59
实验十	集成运算放大器的基本应用 ( III ) ——电压比较器—— .....	66
实验十一	集成运算放大器的基本应用 ( IV ) ——波形发生器—— .....	71
实验十二	RC 正弦波振荡器 .....	77
实验十三	LC 正弦波振荡器 .....	82
实验十四	函数信号发生器的组装与调试 .....	86
实验十七	压控振荡器 .....	90
实验十六	低频功率放大器 ( I ) —— OTL 功率放大器—— .....	93
实验十七	低频功率放大器 ( II ) ——集成功率放大器—— .....	99

实验十八	直流稳压电源（I）	
	——串联型晶体管稳压电源——	105
实验十九	直流稳压电源（II）	
	——集成稳压器——	112
实验二十	晶闸管可控整流电路	118
实验二十一	应用实验	
	——温度监测及控制电路——	123
实验二十二	综合实验	
	——万用电表的设计与调试——	130
附录 I	示波器原理及使用	137
附录 II	用万用电表对常用电子元件检测	149
附录 III	电阻器的标称值及精度色环标志法	154
附录 IV	放大器干扰、噪声抑制和自激振荡的消除	156

# 实验一 常用电子仪器的使用

## 一、实验目的

- 1、学习电子电路实验中常用的电子仪器——示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表、频率计等的主要技术指标、性能及正确使用方法。
- 2、初步掌握用双踪示波器观察正弦信号波形和读取波形参数的方法。

## 二、实验原理

在模拟电子电路实验中，经常使用的电子仪器有示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表及频率计等。它们和万用电表一起，可以完成对模拟电子电路的静态和动态工作情况的测试。

实验中要对各种电子仪器进行综合使用，可按照信号流向，以连线简捷，调节顺手，观察与读数方便等原则进行合理布局，各仪器与被测实验装置之间的布局与连接如图1-1所示。接线时应注意，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。信号源和交流毫伏表的引线通常用屏蔽线或专用电缆线，示波器接线使用专用电缆线，直流电源的接线用普通导线。

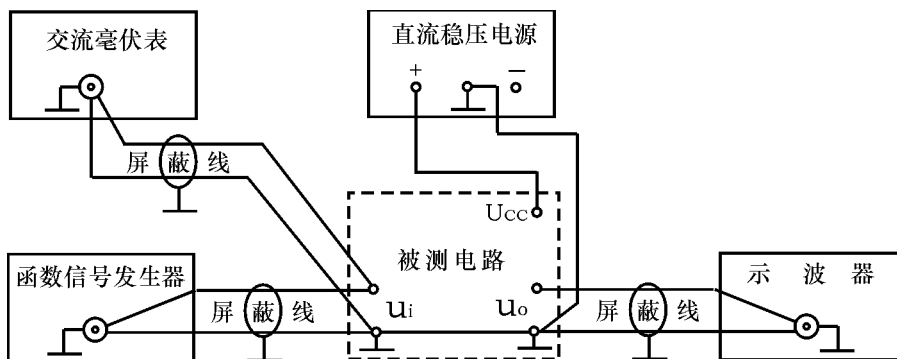


图1-1 模拟电子电路中常用电子仪器布局图

### 1、示波器

示波器是一种用途很广的电子测量仪器，它既能直接显示电信号的波形，

又能对电信号进行各种参数的测量。现着重指出下列几点：

### 1)、寻找扫描光迹

将示波器 Y 轴显示方式置“Y<sub>1</sub>”或“Y<sub>2</sub>”，输入耦合方式置“GND”，开机预热后，若在显示屏上不出现光点和扫描基线，可按下列操作去找到扫描线：

①适当调节亮度旋钮。②触发方式开关置“自动”。③适当调节垂直（↑↓）、水平（←→）“位移”旋钮，使扫描光迹位于屏幕中央。（若示波器设有“寻迹”按键，可按下“寻迹”按键，判断光迹偏移基线的方向。）

2)、双踪示波器一般有五种显示方式，即“Y<sub>1</sub>”、“Y<sub>2</sub>”、“Y<sub>1</sub>+Y<sub>2</sub>”三种单踪显示方式和“交替”“断续”二种双踪显示方式。“交替”显示一般适宜于输入信号频率较高时使用。“断续”显示一般适宜于输入信号频率较低时使用。

3)、为了显示稳定的被测信号波形，“触发源选择”开关一般选为“内”触发，使扫描触发信号取自示波器内部的 Y 通道。

4)、触发方式开关通常先置于“自动”调出波形后，若被显示的波形不稳定，可置触发方式开关于“常态”，通过调节“触发电平”旋钮找到合适的触发电压，使被测试的波形稳定地显示在示波器屏幕上。

有时，由于选择了较慢的扫描速率，显示屏上将会出现闪烁的光迹，但被测信号的波形不在 X 轴方向左右移动，这样的现象仍属于稳定显示。

5)、适当调节“扫描速率”开关及“Y 轴灵敏度”开关使屏幕上显示一~二个周期的被测信号波形。在测量幅值时，应注意将“Y 轴灵敏度微调”旋钮置于“校准”位置，即顺时针旋到底，且听到关的声音。在测量周期时，应注意将“X 轴扫速微调”旋钮置于“校准”位置，即顺时针旋到底，且听到关的声音。还要注意“扩展”旋钮的位置。

根据被测波形在屏幕坐标刻度上垂直方向所占的格数（div 或 cm）与“Y 轴灵敏度”开关指示值（v/div）的乘积，即可算得信号幅值的实测值。

根据被测信号波形一个周期在屏幕坐标刻度水平方向所占的格数（div 或 cm）与“扫速”开关指示值（t/div）的乘积，即可算得信号频率的实测值。

## 2、函数信号发生器

函数信号发生器按需要输出正弦波、方波、三角波三种信号波形。输出电压最大可达 $20V_{p-p}$ 。通过输出衰减开关和输出幅度调节旋钮，可使输出电压在毫伏级到伏级范围内连续调节。函数信号发生器的输出信号频率可以通过频率分档开关进行调节。

函数信号发生器作为信号源，它的输出端不允许短路。

## 3、交流毫伏表

交流毫伏表只能在其工作频率范围之内，用来测量正弦交流电压的有效值。

为了防止过载而损坏，测量前一般先把量程开关置于量程较大位置上，然后在测量中逐档减小量程。

## 三、实验设备与器件

1、 函数信号发生器

2、 双踪示波器

3、 交流毫伏表

## 四、实验内容

1、用机内校正信号对示波器进行自检。

1) 扫描基线调节

将示波器的显示方式开关置于“单踪”显示 ( $Y_1$ 或 $Y_2$ )，输入耦合方式开关置“GND”，触发方式开关置于“自动”。开启电源开关后，调节“辉度”、“聚焦”、“辅助聚焦”等旋钮，使荧光屏上显示一条细而且亮度适中的扫描基线。然后调节“X轴位移” ( $\rightleftarrows$ ) 和“Y轴位移” ( $\updownarrow$ ) 旋钮，使扫描线位于屏幕中央，并且能上下左右移动自如。

2) 测试“校正信号”波形的幅度、频率

将示波器的“校正信号”通过专用电缆线引入选定的Y通道 ( $Y_1$ 或 $Y_2$ )，将Y轴输入耦合方式开关置于“AC”或“DC”，触发源选择开关置“内”，内触

发源选择开关置“Y<sub>1</sub>”或“Y<sub>2</sub>”。调节X轴“扫描速率”开关(t/div)和Y轴“输入灵敏度”开关(V/div)，使示波器显示屏上显示出一个或数个周期稳定的方波波形。

a. 校准“校正信号”幅度

将“y轴灵敏度微调”旋钮置“校准”位置，“y轴灵敏度”开关置适当位置，读取校正信号幅度，记入表1-1。

表1-1

	标准值	实测值
幅度 U <sub>p-p</sub> (V)		
频率 f(KHz)		
上升沿时间 μS		
下降沿时间 μS		

注：不同型号示波器标准值有所不同，请按所使用示波器将标准值填入表格中。

b. 校准“校正信号”频率

将“扫速微调”旋钮置“校准”位置，“扫速”开关置适当位置，读取校正信号周期，记入表1-1。

c. 测量“校正信号”的上升时间和下降时间

调节“y轴灵敏度”开关及微调旋钮，并移动波形，使方波波形在垂直方向上正好占据中心轴上，且上、下对称，便于阅读。通过扫速开关逐级提高扫描速度，使波形在X轴方向扩展（必要时可以利用“扫速扩展”开关将波形再扩展10倍），并同时调节触发电平旋钮，从显示屏上清楚的读出上升时间和下降时间，记入表1-1。

## 2、用示波器和交流毫伏表测量信号参数

调节函数信号发生器有关旋钮，使输出频率分别为100Hz、1KHz、10KHz、100KHz，有效值均为1V（交流毫伏表测量值）的正弦波信号。

改变示波器“扫速”开关及“Y轴灵敏度”开关等位置，测量信号源输出电压频率及峰峰值，记入表1-2。

表1-2

信号电压频率	示波器测量值		信号电压毫伏表读数(V)	示波器测量值	
	周期(ms)	频率(Hz)		峰峰值(V)	有效值(V)
100Hz					
1KHz					
10KHz					
100KHz					

## 3、测量两波形间相位差

### 1) 观察双踪显示波形“交替”与“断续”两种显示方式的特点

$Y_1$ 、 $Y_2$ 均不加输入信号，输入耦合方式置“GND”，扫速开关置扫速较低挡位（如0.5s/div挡）和扫速较高挡位（如5 $\mu$ S/div挡），把显示方式开关分别置“交替”和“断续”位置，观察两条扫描基线的显示特点，记录之。

### 2) 用双踪显示测量两波形间相位差

① 按图 1-2 连接实验电路，将函数信号发生器的输出电压调至频率为1KHz，幅值为2V的正弦波，经RC移相网络获得频率相同但相位不同的两路信号  $u_i$  和  $u_r$ ，分别加到双踪示波器的  $Y_1$  和  $Y_2$  输入端。

为便于稳定波形，比较两波形相位差，应使内触发信号取自被设定作为测量基准的一路信号。



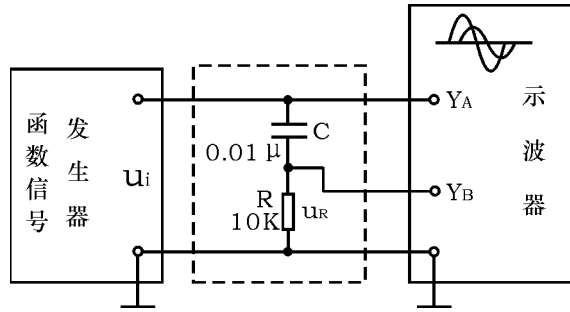


图 1-2 两波形间相位差测量电路

② 把显示方式开关置“交替”挡位，将  $Y_1$  和  $Y_2$  输入耦合方式开关置“ $\perp$ ”挡位，调节  $Y_1$ 、 $Y_2$  的 ( $\updownarrow$ ) 移位旋钮，使两条扫描基线重合。

③ 将  $Y_1$ 、 $Y_2$  输入耦合方式开关置“AC”挡位，调节触发电平、扫速开关及  $Y_1$ 、 $Y_2$  灵敏度开关位置，使在荧屏上显示出易于观察的两个相位不同的正弦波形  $u_i$  及  $u_R$ ，如图 1-3 所示。根据两波形在水平方向差距  $X$ ，及信号周期  $X_T$ ，则可求得两波形相位差。

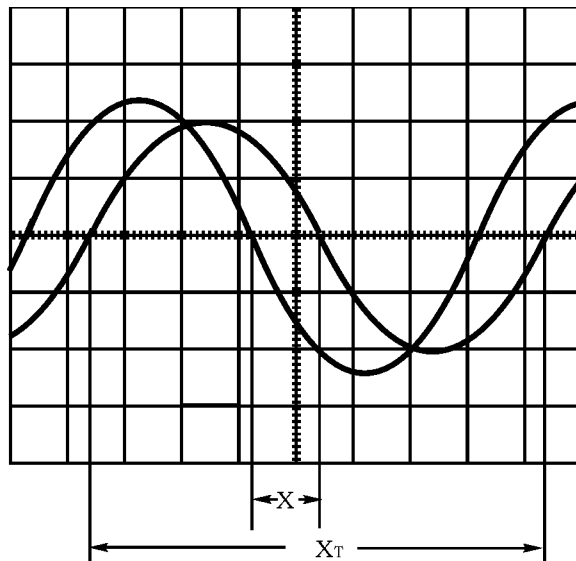


图 1-3 双踪示波器显示两相位不同的正弦波

$$\theta = \frac{X(\text{div})}{X_T(\text{div})} \times 360^\circ$$

式中：  $X_T$ —— 一周期所占格数

$X$ —— 两波形在 X 轴方向差距格数

记录两波形相位差于表 1-3。

表 1-3

一周期格数	两波形 X 轴差距格数	相 位 差	
		实 测 值	计 算 值
$X_T =$	$X =$	$\theta =$	$\theta =$

为数读和计算方便，可适当调节扫速开关及微调旋钮，使波形一周期占整数格。

## 五、实验总结

1、 整理实验数据，并进行分析。

2、 问题讨论

1) 如何操纵示波器有关旋钮，以便从示波器显示屏上观察到稳定、清晰的波形？

2) 用双踪显示波形，并要求比较相位时，为在显示屏上得到稳定波形，应怎样选择下列开关的位置？

a) 显示方式选择 ( $Y_1$ ;  $Y_2$ ;  $Y_1+Y_2$ ; 交替; 断续)

b) 触发方式 (常态; 自动)

c) 触发源选择 (内; 外)

d) 内触发源选择 ( $Y_1$ 、 $Y_2$ 、交替)

3、函数信号发生器有哪几种输出波形？它的输出端能否短接，如用屏蔽线作为输出引线，则屏蔽层一端应该接在哪个接线柱上？

4、交流毫伏表是用来测量正弦波电压还是非正弦波电压？它的表头指示

值是被测信号的什么数值？它是否可以用来测量直流电压的大小？

## 六、预习要求

- 1、 阅读实验附录中有关示波器部分内容。
- 2、 已知  $C=0.01\ \mu\text{f}$ 、 $R=10\text{K}$ ，计算图 1-2 RC 移相网络的阻抗角  $\theta$ 。

## 实验二 晶体管共射极单管放大器

### 一、实验目的

- 1、学会放大器静态工作点的调试方法，分析静态工作点对放大器性能的影响。
- 2、掌握放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻及最大不失真输出电压的测试方法。
- 3、熟悉常用电子仪器及模拟电路实验设备的使用。

### 二、实验原理

图 2-1 为电阻分压式工作点稳定单管放大器实验电路图。它的偏置电路采用  $R_{B1}$  和  $R_{B2}$  组成的分压电路，并在发射极中接有电阻  $R_E$ ，以稳定放大器的静态工作点。当在放大器的输入端加入输入信号  $u_i$  后，在放大器的输出端便可得到一个与  $u_i$  相位相反，幅值被放大的输出信号  $u_o$ ，从而实现了电压放大。

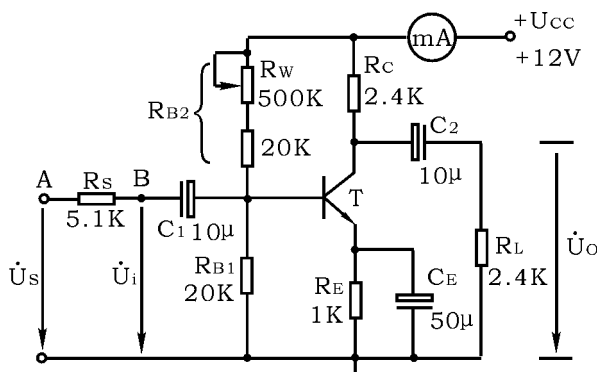


图 2-1 共射极单管放大器实验电路

在图 2-1 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），则它的静态工作点可用下式估算

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

$$I_E \approx \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_C$$

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

电压放大倍数

$$A_V = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$$

输入电阻

$$R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

输出电阻

$$R_o \approx R_C$$

由于电子器件性能的分散性比较大，因此在设计和制作晶体管放大电路时，离不开测量和调试技术。在设计前应测量所用元器件的参数，为电路设计提供必要的依据，在完成设计和装配以后，还必须测量和调试放大器的静态工作点和各项性能指标。一个优质放大器，必定是理论设计与实验调整相结合的产物。因此，除了学习放大器的理论知识和设计方法外，还必须掌握必要的测量和调试技术。

放大器的测量和调试一般包括：放大器静态工作点的测量与调试，消除干扰与自激振荡及放大器各项动态参数的测量与调试等。

## 1、 放大器静态工作点的测量与调试

### 1) 静态工作点的测量

测量放大器的静态工作点，应在输入信号  $u_i = 0$  的情况下进行，即将放大器输入端与地端短接，然后选用量程合适的直流毫安表和直流电压表，分别测量晶体管的集电极电流  $I_C$  以及各电极对地的电位  $U_B$ 、 $U_C$  和  $U_E$ 。一般实验中，为了避免断开集电极，所以采用测量电压  $U_E$  或  $U_C$ ，然后算出  $I_C$  的方法，例如，只要测出  $U_E$ ，即可用

$$I_C \approx I_E = \frac{U_E}{R_E} \text{ 算出 } I_C \text{ (也可根据 } I_C = \frac{U_{CC} - U_C}{R_C}, \text{ 由 } U_C \text{ 确定 } I_C),$$

同时也能算出  $U_{BE} = U_B - U_E$ ,  $U_{CE} = U_C - U_E$ 。

为了减小误差, 提高测量精度, 应选用内阻较高的直流电压表。

## 2) 静态工作点的调试

放大器静态工作点的调试是指对管子集电极电流  $I_C$  (或  $U_{CE}$ ) 的调整与测试。

静态工作点是否合适, 对放大器的性能和输出波形都有很大影响。如工作点偏高, 放大器在加入交流信号以后易产生饱和失真, 此时  $u_o$  的负半周将被削底, 如图 2-2(a) 所示; 如工作点偏低则易产生截止失真, 即  $u_o$  的正半周被缩顶 (一般截止失真不如饱和失真明显), 如图 2-2(b) 所示。这些情况都不符合不失真放大的要求。所以在选定工作点以后还必须进行动态调试, 即在放大器的输入端加入一定的输入电压  $u_i$ , 检查输出电压  $u_o$  的大小和波形是否满足要求。如不满足, 则应调节静态工作点的位置。

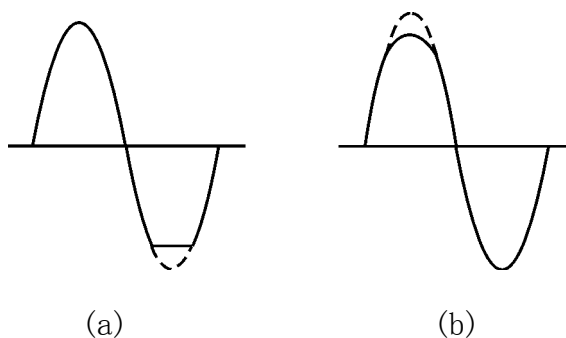


图 2-2 静态工作点对  $u_o$  波形失真的影响

改变电路参数  $U_{CC}$ 、 $R_C$ 、 $R_B$  ( $R_{B1}$ 、 $R_{B2}$ ) 都会引起静态工作点的变化, 如图 2-3 所示。但通常多采用调节偏置电阻  $R_{B2}$  的方法来改变静态工作点, 如减小  $R_{B2}$ , 则可使静态工作点提高等。

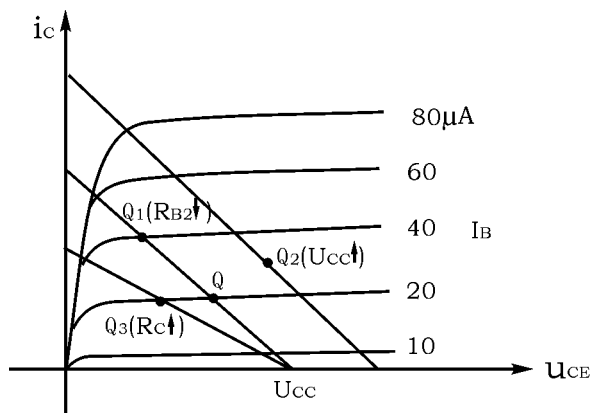


图 2-3 电路参数对静态工作点的影响

最后还要说明的是，上面所说的工作点“偏高”或“偏低”不是绝对的，应该是相对信号的幅度而言，如输入信号幅度很小，即使工作点较高或较低也不一定会出现失真。所以确切地说，产生波形失真是信号幅度与静态工作点设置配合不当所致。如需满足较大信号幅度的要求，静态工作点最好尽量靠近交流负载线的中点。

## 2、放大器动态指标测试

放大器动态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（动态范围）和通频带等。

### 1) 电压放大倍数 $A_v$ 的测量

调整放大器到合适的静态工作点，然后加入输入电压  $u_i$ ，在输出电压  $u_o$  不失真的情况下，用交流毫伏表测出  $u_i$  和  $u_o$  的有效值  $U_i$  和  $U_o$ ，则

$$A_v = \frac{U_o}{U_i}$$

### 2) 输入电阻 $R_i$ 的测量

为了测量放大器的输入电阻，按图 2-4 电路在被测放大器的输入端与信号源之间串入一已知电阻  $R$ ，在放大器正常工作的情况下，用交流毫伏表测出  $U_s$  和  $U_i$ ，则根据输入电阻的定义可得

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_R}{R}} = \frac{U_i}{U_S - U_i} R$$

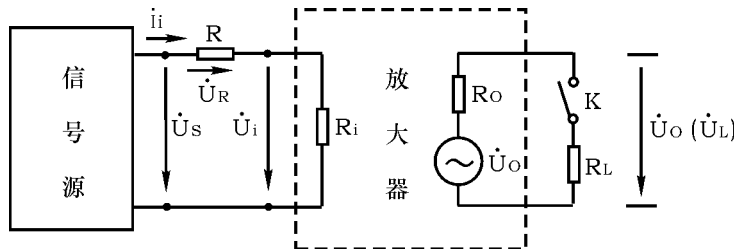


图 2-4 输入、输出电阻测量电路

测量时应注意下列几点：

① 由于电阻 R 两端没有电路公共接地点，所以测量 R 两端电压  $U_R$  时必须分别测出  $U_S$  和  $U_i$ ，然后按  $U_R = U_S - U_i$  求出  $U_R$  值。

② 电阻 R 的值不宜取得过大或过小，以免产生较大的测量误差，通常取 R 与  $R_i$  为同一数量级为好，本实验可取  $R = 1 \sim 2K \Omega$ 。

3) 输出电阻  $R_o$  的测量

按图 2-4 电路，在放大器正常工作条件下，测出输出端不接负载  $R_L$  的输出电压  $U_o$  和接入负载后的输出电压  $U_L$ ，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$$

即可求出

$$R_o = \left( \frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L$$

在测试中应注意，必须保持  $R_L$  接入前后输入信号的大小不变。

4) 最大不失真输出电压  $U_{opp}$  的测量（最大动态范围）

如上所述，为了得到最大动态范围，应将静态工作点调在交流负载线的中



点。为此在放大器正常工作情况下，逐步增大输入信号的幅度，并同时调节  $R_w$ （改变静态工作点），用示波器观察  $u_o$ ，当输出波形同时出现削底和缩顶现象（如图 2-5）时，说明静态工作点已调在交流负载线的中点。然后反复调整输入信号，使波形输出幅度最大，且无明显失真时，用交流毫伏表测出  $U_o$ （有效值），则动态范围等于  $2\sqrt{2}U_o$ 。或用示波器直接读出  $U_{opp}$  来。

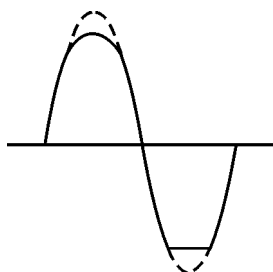


图 2-5 静态工作点正常，输入信号太大引起的失真

#### 5) 放大器幅频特性的测量

放大器的幅频特性是指放大器的电压放大倍数  $A_u$  与输入信号频率  $f$  之间的关系曲线。单管阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 2-6 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放大倍数的  $1/\sqrt{2}$  倍，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  $f_{BW} = f_H - f_L$

放大器的幅率特性就是测量不同频率信号时的电压放大倍数  $A_u$ 。为此，可采用前述测  $A_u$  的方法，每改变一个信号频率，测量其相应的电压放大倍数，测量时应注意取点要恰当，在低频段与高频段应多测几点，在中频段可以少测几点。此外，在改变频率时，要保持输入信号的幅度不变，且输出波形不得失真。

#### 6) 干扰和自激振荡的消除

#### 参考实验附录

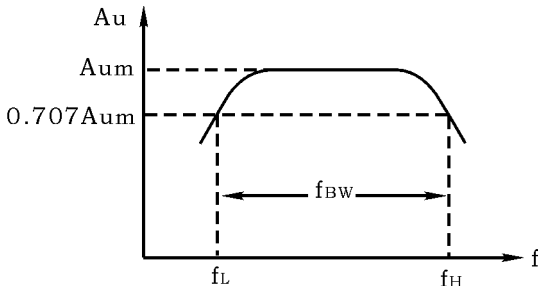


图 2-6 幅频特性曲线

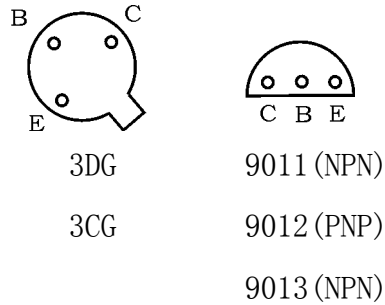


图 2-7 晶体三极管管脚排列

### 三、实验设备与器件

- |             |           |
|-------------|-----------|
| 1、+12V 直流电源 | 2、函数信号发生器 |
| 3、双踪示波器     | 4、交流毫伏表   |
| 5、直流电压表     | 6、直流毫安表   |
| 7、频率计       | 8、万用电表    |
- 9、晶体三极管 3DG6×1 ( $\beta = 50 \sim 100$ ) 或 9011×1 (管脚排列如图 2-7 所示)

电阻器、电容器若干

### 四、实验内容

实验电路如图 2-1 所示。各电子仪器可按实验一中图 1-1 所示方式连接，为防止干扰，各仪器的公共端必须连在一起，同时信号源、交流毫伏表和示波器的引线应采用专用电缆线或屏蔽线，如使用屏蔽线，则屏蔽线的外包金属网应接在公共接地端上。

#### 1、调试静态工作点

接通直流电源前，先将  $R_w$  调至最大，函数信号发生器输出旋钮旋至零。接通 +12V 电源、调节  $R_w$ ，使  $I_c = 2.0\text{mA}$  (即  $U_E = 2.0\text{V}$ )，用直流电压表测量  $U_B$ 、 $U_E$ 、 $U_C$  及用万用电表测量  $R_{B2}$  值。记入表 2-1。

表 2-1

$I_c = 2\text{mA}$

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

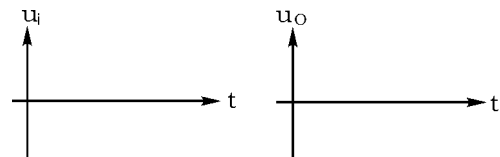
## 2、测量电压放大倍数

在放大器输入端加入频率为 1KHz 的正弦信号  $u_s$ ，调节函数信号发生器的输出旋钮使放大器输入电压  $U_i \approx 10\text{mV}$ ，同时用示波器观察放大器输出电压  $u_o$  波形，在波形不失真的条件下用交流毫伏表测量下述三种情况下的  $U_o$  值，并用双踪示波器观察  $u_o$  和  $u_i$  的相位关系，记入表 2-2。

表 2-2

$I_c = 2.0\text{mA}$

$U_i = \quad \text{mV}$

$R_C$ (K $\Omega$ )	$R_L$ (K $\Omega$ )	$U_o$ (V)	$A_v$	观察记录一组 $u_o$ 和 $u_i$ 波形
2.4	$\infty$			
1.2	$\infty$			
2.4	2.4			

## 3、观察静态工作点对电压放大倍数的影响

置  $R_C = 2.4\text{K}\Omega$ ， $R_L = \infty$ ， $U_i$  适量，调节  $R_w$ ，用示波器监视输出电压波形，在  $u_o$  不失真的条件下，测量数组  $I_c$  和  $U_o$  值，记入表 2-3。

表 2-3

$R_C = 2.4\text{K}\Omega$

$R_L = \infty$

$U_i = \quad \text{mV}$

$I_c$ (mA)			2.0		
$U_o$ (V)					
$A_v$					

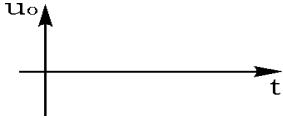
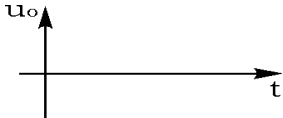
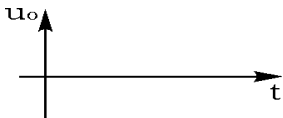
测量  $I_c$  时，要先将信号源输出旋钮旋至零（即使  $U_i = 0$ ）。

## 4、观察静态工作点对输出波形失真的影响

置  $R_C = 2.4\text{K}\Omega$ ， $R_L = 2.4\text{K}\Omega$ ， $u_i = 0$ ，调节  $R_w$  使  $I_c = 2.0\text{mA}$ ，测出  $U_{CE}$  值，

再逐步加大输入信号，使输出电压  $u_0$  足够大但不失真。然后保持输入信号不变，分别增大和减小  $R_w$ ，使波形出现失真，绘出  $u_0$  的波形，并测出失真情况下的  $I_c$  和  $U_{ce}$  值，记入表 2-4 中。每次测  $I_c$  和  $U_{ce}$  值时都要将信号源的输出旋钮旋至零。

表 2-4  $R_c=2.4K\Omega$   $R_L=\infty$   $U_i=$  mV

$I_c$ (mA)	$U_{ce}$ (V)	$u_0$ 波形	失真情况	管子工作状态
				
2.0				
				

### 5、测量最大不失真输出电压

置  $R_c=2.4K\Omega$ ， $R_L=2.4K\Omega$ ，按照实验原理 2.4) 中所述方法，同时调节输入信号的幅度和电位器  $R_w$ ，用示波器和交流毫伏表测量  $U_{opp}$  及  $U_0$  值，记入表 2-5。

表 2-5  $R_c=2.4K$   $R_L=2.4K$

$I_c$ (mA)	$U_{im}$ (mV)	$U_{om}$ (V)	$U_{opp}$ (V)

### \*6、测量输入电阻和输出电阻

置  $R_c=2.4K\Omega$ ， $R_L=2.4K\Omega$ ， $I_c=2.0mA$ 。输入  $f=1KHz$  的正弦信号，在输出电压  $u_0$  不失真的情况下，用交流毫伏表测出  $U_s$ ， $U_i$  和  $U_L$  记入表 2-6。

保持  $U_s$  不变，断开  $R_L$ ，测量输出电压  $U_0$ ，记入表 2-6。

表 2-6  $I_c=2\text{mA}$   $R_c=2.4\text{K}\Omega$   $R_L=2.4\text{K}\Omega$

$U_s$ (mv)	$U_i$ (mv)	$R_i$ (K $\Omega$ )		$U_L$ (V)	$U_o$ (V)	$R_o$ (K $\Omega$ )	
		测量值	计算值			测量值	计算值

### \*7、测量幅频特性曲线

取  $I_c=2.0\text{mA}$ ,  $R_c=2.4\text{K}\Omega$ ,  $R_L=2.4\text{K}\Omega$ 。保持输入信号  $u_i$  的幅度不变, 改变信号源频率  $f$ , 逐点测出相应的输出电压  $U_o$ , 记入表 2-7。

表 2-7  $U_i=$  mV

	$f_i$	$f_o$	$f_n$
$f$ (KHz)			
$U_o$ (V)			
$A_v=U_o/U_i$			

为了信号源频率  $f$  取值合适, 可先粗测一下, 找出中频范围, 然后再仔细读数。

说明: 本实验内容较多, 其中 6、7 可作为选作内容。

## 五、实验总结

1、列表整理测量结果, 并把实测的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻、输出电阻之值与理论计算值比较 (取一组数据进行比较), 分析产生误差原因。

2、总结  $R_c$ ,  $R_L$  及静态工作点对放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻的影响。

3、讨论静态工作点变化对放大器输出波形的影响。

4、分析讨论在调试过程中出现的问题。

## 六、预习要求

1、阅读教材中有关单管放大电路的内容并估算实验电路的性能指标。

假设：3DG6 的  $\beta = 100$ ， $R_{B1} = 20K\Omega$ ， $R_{B2} = 60K\Omega$ ， $R_C = 2.4K\Omega$ ， $R_L = 2.4K\Omega$ 。  
估算放大器的静态工作点，电压放大倍数  $A_v$ ，输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$

2、阅读实验附录中有关放大器干扰和自激振荡消除内容。

3、能否用直流电压表直接测量晶体管的  $U_{BE}$ ？为什么实验中要采用测  $U_B$ 、 $U_E$ ，再间接算出  $U_{BE}$  的方法？

4、怎样测量  $R_{B2}$  阻值？

5、当调节偏置电阻  $R_{B2}$ ，使放大器输出波形出现饱和或截止失真时，晶体管的管压降  $U_{CE}$  怎样变化？

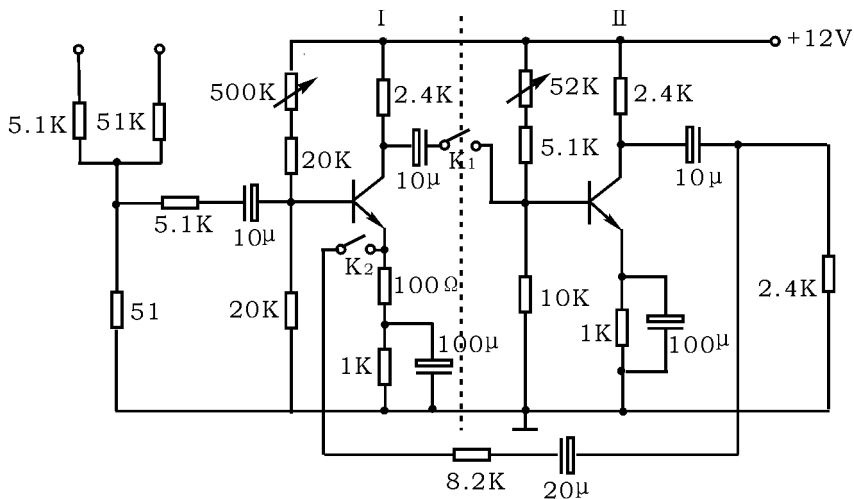
6、改变静态工作点对放大器的输入电阻  $R_i$  有否影响？改变外接电阻  $R_L$  对输出电阻  $R_o$  有否影响？

7、在测试  $A_v$ ， $R_i$  和  $R_o$  时怎样选择输入信号的大小和频率？

为什么信号频率一般选 1KHz，而不选 100KHz 或更高？

8、测试中，如果将函数信号发生器、交流毫伏表、示波器中任一仪器的二个测试端子接线换位（即各仪器的接地端不再连在一起），将会出现什么问题？

注：附图 2-1 所示为共射极单管放大器与带有负反馈的两级放大器共用实验模块。如将  $K_1$ 、 $K_2$  断开，则前级（I）为典型电阻分压式单管放大器；如将  $K_1$ 、 $K_2$  接通，则前级（I）与后级（II）接通，组成带有电压串联负反馈两级放大器。



附图 2-1

## 实验三 场效应管放大器

### 一、实验目的

- 1、了解结型场效应管的性能和特点
- 2、进一步熟悉放大器动态参数的测试方法

### 二、实验原理

场效应管是一种电压控制型器件。按结构可分为结型和绝缘栅型两种类型。由于场效应管栅源之间处于绝缘或反向偏置，所以输入电阻很高（一般可达上百兆欧）又由于场效应管是一种多数载流子控制器件，因此热稳定性好，抗辐射能力强，噪声系数小。加之制造工艺较简单，便于大规模集成，因此得到越来越广泛的应用。

#### 1、结型场效应管的特性和参数

场效应管的特性主要有输出特性和转移特性。图 3-1 所示为 N 沟道结

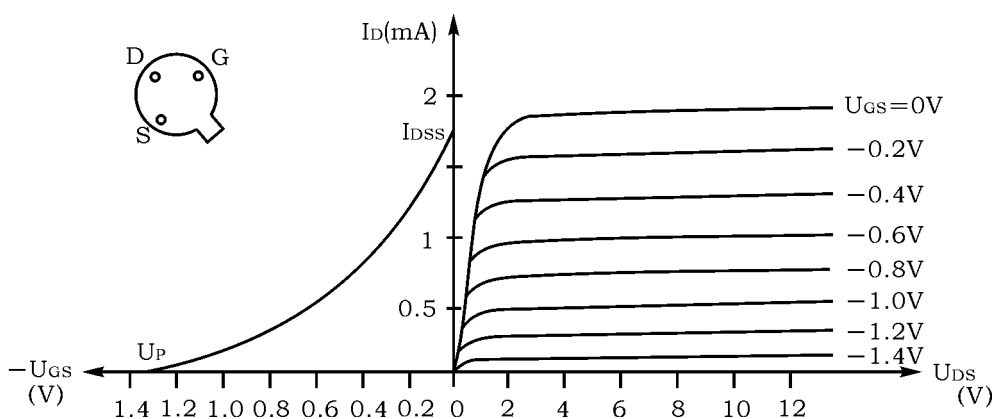


图 3-1 3DJ6F 的输出特性和转移特性曲线

型场效应管 3DJ6F 的输出特性和转移特性曲线。其直流参数主要有饱和漏极电流  $I_{DSS}$ ，夹断电压  $U_P$  等；交流参数主要有低频跨导

$$g_m = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS}} \Big|_{U_{DS} = \text{常数}}$$

表 3-1 列出了 3DJ6F 的典型参数值及测试条件。

表 3-1

参数名称	饱和漏极电流 $I_{DSS}$ (mA)	夹断电压 $U_P$ (V)	跨 导 $g_m$ ( $\mu\text{A}/\text{V}$ )
测试条件	$U_{DS} = 10\text{V}$ $U_{GS} = 0\text{V}$	$U_{DS} = 10\text{V}$ $I_{DS} = 50\mu\text{A}$	$U_{DS} = 10\text{V}$ $I_{DS} = 3\text{mA}$ $f = 1\text{KHz}$
参数值	1~3.5	$<   -9  $	$> 100$

## 2、场效应管放大器性能分析

图 3-2 为结型场效应管组成的共源级放大电路。其静态工作点

$$U_{GS} = U_G - U_S = \frac{R_{g1}}{R_{g1} + R_{g2}} U_{DD} - I_D R_S$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

中频电压放大倍数  $A_v = -g_m R_L' = -g_m R_D // R_L$

输入电阻  $R_i = R_G + R_{g1} // R_{g2}$

输出电阻  $R_o \approx R_D$

式中跨导  $g_m$  可由特性曲线用作图法求得，或用公式

$$g_m = -\frac{2I_{DSS}}{U_P} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)$$

计算。但要注意，计算时  $U_{GS}$  要用静态工作点处之数值。



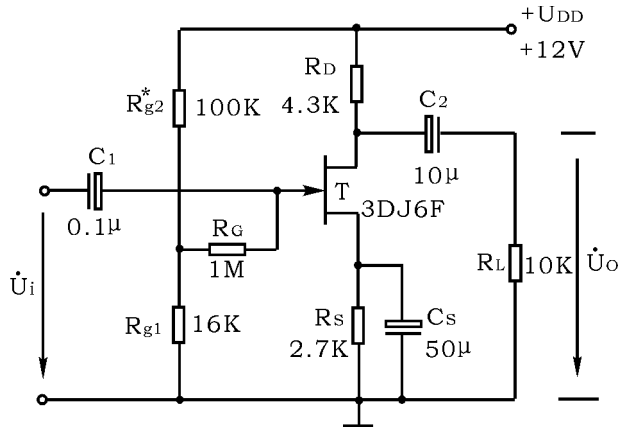


图 3-2 结型场效应管共源级放大器

### 3、输入电阻的测量方法

场效应管放大器的静态工作点、电压放大倍数和输出电阻的测量方法，与实验二中晶体管放大器的测量方法相同。其输入电阻的测量，从原理上讲，也可采用实验二中所述方法，但由于场效应管的  $R_i$  比较大，如直接测输入电压  $U_s$  和  $U_i$ ，则限于测量仪器的输入电阻有限，必然会带来较大的误差。因此为了减小误差，常利用被测放大器的隔离作用，通过测量输出电压  $U_o$  来计算输入电阻。测量电路如图 3-3 所示。

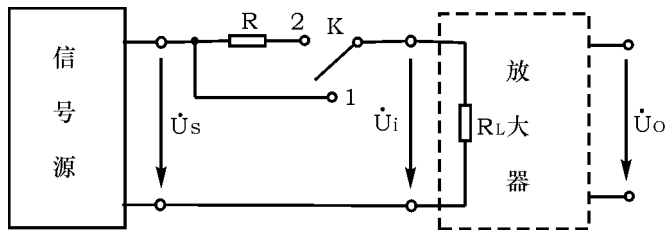


图 3-3 输入电阻测量电路

在放大器的输入端串入电阻  $R$ ，把开关  $K$  掷向位置 1（即使  $R=0$ ），测量放大器的输出电压  $U_{o1}=A_v U_s$ ；保持  $U_s$  不变，再把  $K$  掷向 2（即接入  $R$ ），测量放大器的输出电压  $U_{o2}$ 。由于两次测量中  $A_v$  和  $U_s$  保持不变，故

$$U_{02} = A_v U_i = \frac{R_i}{R + R_i} U_s A_v \quad \text{由此可以求出}$$

$$R_i = \frac{U_{02}}{U_{01} - U_{02}} R$$

式中  $R$  和  $R_i$  不要相差太大，本实验可取  $R = 100 \sim 200 \text{K} \Omega$ 。

### 三、实验设备与器件

- |             |                  |
|-------------|------------------|
| 1、+12V 直流电源 | 2、函数信号发生器        |
| 3、双踪示波器     | 4、交流毫伏表          |
| 5、直流电压表     | 6、结型场效应管 3DJ6F×1 |
- 电阻器、电容器若干。

### 四、实验内容

#### 1、静态工作点的测量和调整

- 1) 接图 3-2 连接电路，令  $u_i = 0$ ，接通 +12V 电源，用直流电压表测量  $U_G$ 、 $U_S$  和  $U_D$ 。检查静态工作点是否在特性曲线放大区的中间部分。如合适则把结果记入表 3-2。
- 2) 若不合适，则适当调整  $R_{g2}$  和  $R_S$ ，调好后，再测量  $U_G$ 、 $U_S$  和  $U_D$  记入表 3-2。

表 3-2

测量值						计算值		
$U_G$ (V)	$U_S$ (V)	$U_D$ (V)	$U_{DS}$ (V)	$U_{GS}$ (V)	$I_D$ (mA)	$U_{DS}$ (V)	$U_{GS}$ (V)	$I_D$ (mA)

#### 2、电压放大倍数 $A_v$ 、输入电阻 $R_i$ 和输出电阻 $R_o$ 的测量

##### 1) $A_v$ 和 $R_o$ 的测量

在放大器的输入端加入  $f = 1 \text{KHz}$  的正弦信号  $U_i$  ( $\approx 50 \sim 100 \text{mV}$ )，并用示波器监视输出电压  $u_o$  的波形。在输出电压  $u_o$  没有失真的条件下，用交流毫伏表分

别测量  $R_L = \infty$  和  $R_L = 10K \Omega$  时的输出电压  $U_0$  (注意: 保持  $U_i$  幅值不变), 记入表 3-3。

表 3-3

测 量 值				计 算 值		u <sub>i</sub> 和 u <sub>o</sub> 波形
U <sub>i</sub> (V)	U <sub>o</sub> (V)	A <sub>v</sub>	R <sub>o</sub> (KΩ)	A <sub>v</sub>	R <sub>o</sub> (KΩ)	
R <sub>L</sub> = ∞						
R <sub>L</sub> = 10K						

用示波器同时观察  $u_i$  和  $u_o$  的波形, 描绘出来并分析它们的相位关系。

## 2) $R_i$ 的测量

按图 3-3 改接实验电路, 选择合适大小的输入电压  $U_s$  (约 50—100mV), 将开关 K 掷向 “1”, 测出  $R=0$  时的输出电压  $U_{01}$ , 然后将开关掷向 “2”, (接入 R), 保持  $U_s$  不变, 再测出  $U_{02}$ , 根据公式

$$R_i = \frac{U_{02}}{U_{01} - U_{02}} R \quad \text{求出 } R_i, \text{ 记入表 3-4。}$$

表 3-4

测 量 值			计 算 值
U <sub>01</sub> (V)	U <sub>02</sub> (V)	R <sub>i</sub> (KΩ)	R <sub>i</sub> (KΩ)

## 五、实验总结

- 1、整理实验数据, 将测得的  $A_v$ 、 $R_i$ 、 $R_o$  和理论计算值进行比较。
- 2、把场效应管放大器与晶体管放大器进行比较, 总结场效应管放大器的特点。
- 3、分析测试中的问题, 总结实验收获。

## 六、预习要求

1、复习有关场效应管部分内容，并分别用图解法与计算法估算管子的静态工作点（根据实验电路参数），求出工作点处的跨导  $g_m$ 。

2、场效应管放大器输入回路的电容  $C_1$  为什么可以取得小一些（可以取  $C_1=0.1 \mu F$ ）？

3、在测量场效应管静态工作电压  $U_{GS}$  时，能否用直流电压表直接并在 G、S 两端测量？为什么？

4、为什么测量场效应管输入电阻时要用测量输出电压的方法？

## 实验四 负反馈放大器

### 一、实验目的

加深理解放大电路中引入负反馈的方法和负反馈对放大器各项性能指标的影响。

### 二、实验原理

负反馈在电子电路中有着非常广泛的应用,虽然它使放大器的放大倍数降低,但能在多方面改善放大器的动态指标,如稳定放大倍数,改变输入、输出电阻,减小非线性失真和展宽通频带等。因此,几乎所有的实用放大器都带有负反馈。

负反馈放大器有四种组态,即电压串联,电压并联,电流串联,电流并联。本实验以电压串联负反馈为例,分析负反馈对放大器各项性能指标的影响。

1、图 4—1 为带有负反馈的两级阻容耦合放大电路,在电路中通过  $R_f$  把输出电压  $u_o$  引回到输入端,加在晶体管  $T_1$  的发射极上,在发射极电阻  $R_{F1}$  上形成反馈电压  $u_f$ 。根据反馈的判断法可知,它属于电压串联负反馈。

主要性能指标如下

#### 1) 闭环电压放大倍数

$$A_{vf} = \frac{A_v}{1 + A_v F_v}$$

其中  $A_v = U_o / U_i$  — 基本放大器(无反馈)的电压放大倍数,即开环电压放大倍数。

$1 + A_v F_v$  — 反馈深度,它的大小决定了负反馈对放大器性能改善的程度。

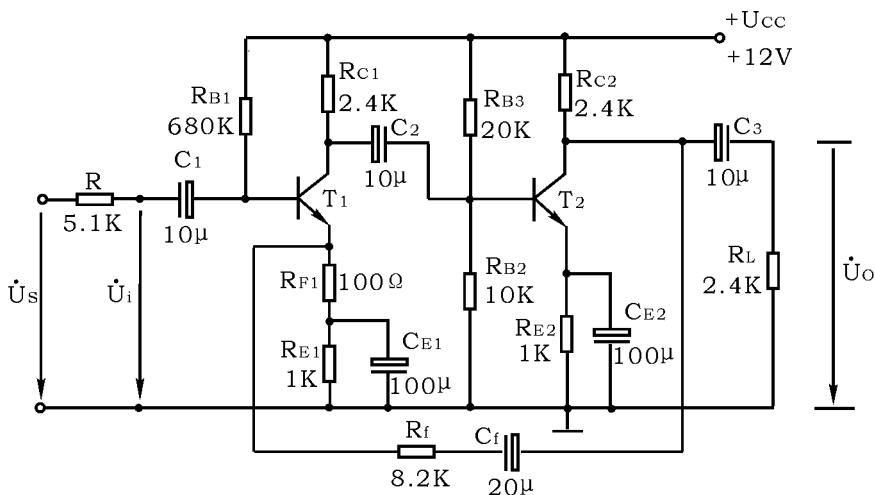


图 4-1 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大器

2) 反馈系数

$$F_V = \frac{R_{F1}}{R_f + R_{F1}}$$

3) 输入电阻

$$R_{if} = (1 + A_v F_V) R_i$$

$R_i$  — 基本放大器的输入电阻

4) 输出电阻

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_{v0} F_V}$$

$R_o$  — 基本放大器的输出电阻

$A_{v0}$  — 基本放大器  $R_i = \infty$  时的电压放大倍数

2、本实验还需要测量基本放大器的动态参数，怎样实现无反馈而得到基本放大器呢？不能简单地断开反馈支路，而是要去掉反馈作用，但又要把反馈网络的影响（负载效应）考虑到基本放大器中去。为此：

1) 在画基本放大器的输入回路时，因为是电压负反馈，所以可将负反馈放大器的输出端交流短路，即令  $u_o = 0$ ，此时  $R_f$  相当于并联在  $R_{F1}$  上。

2) 在画基本放大器的输出回路时, 由于输入端是串联负反馈, 因此需将反馈放大器的输入端 ( $T_1$  管的射极) 开路, 此时  $(R_f + R_{F1})$  相当于并接在输出端。可近似认为  $R_f$  并接在输出端。

根据上述规律, 就可得到所要求的如图 4-2 所示的基本放大器。

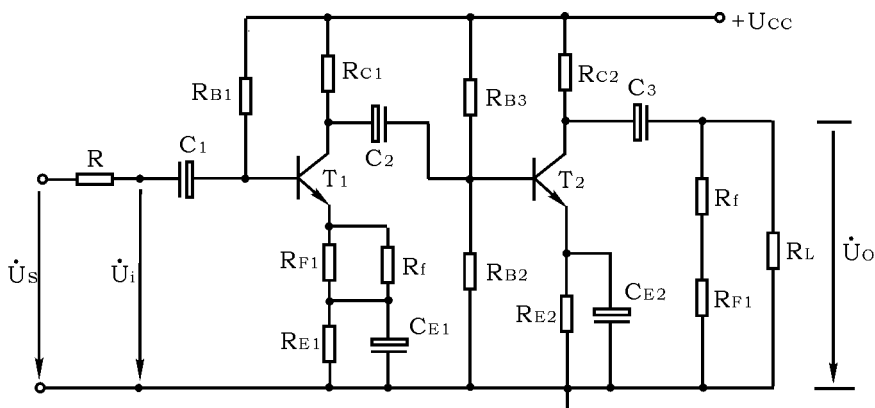


图 4-2 基本放大器

### 三、实验设备与器件

- |  |            |
|--|------------|
| 1、 +12V 直流电源                                       | 2、 函数信号发生器 |
| 3、 双踪示波器   | 4、 频率计     |
| 5、 交流毫伏表   | 6、 直流电压表   |
| 7、 晶体三极管 3DG6×2 ( $\beta = 50 \sim 100$ ) 或 9011×2 |            |
- 电阻器、电容器若干。

### 四、实验内容

- 1、 测量静态工作点

按图 4-1 连接实验电路, 取  $U_{CC} = +12V$ ,  $U_i = 0$ , 用直流电压表分别测量第一级、第二级的静态工作点, 记入表 4-1。

表 4-1

	$U_B$ (V)	$U_E$ (V)	$U_C$ (V)	$I_C$ (mA)
第一级				
第二级				

## 2、测试基本放大器的各项性能指标

将实验电路按图 4-2 改接，即把  $R_f$  断开后分别并在  $R_{f1}$  和  $R_L$  上，其它连线不动。

1) 测量中频电压放大倍数  $A_v$ ，输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$ 。

① 以  $f=1\text{KHZ}$ ， $U_s$  约 5mV 正弦信号输入放大器，用示波器监视输出波形  $u_o$ ，在  $u_o$  不失真的情况下，用交流毫伏表测量  $U_s$ 、 $U_i$ 、 $U_L$ ，记入表 4-2。

表 4-2

基本放大器	$U_s$ (mv)	$U_i$ (mv)	$U_L$ (V)	$U_o$ (V)	$A_v$	$R_i$ (K $\Omega$ )	$R_o$ (K $\Omega$ )
负反馈放大器	$U_s$ (mv)	$U_i$ (mv)	$U_L$ (V)	$U_o$ (V)	$A_{vf}$	$R_{if}$ (K $\Omega$ )	$R_{of}$ (K $\Omega$ )

②保持  $U_s$  不变，断开负载电阻  $R_L$ （注意， $R_f$  不要断开），测量空载时的输出电压  $U_o$ ，记入表 4-2。

2) 测量通频带

接上  $R_L$ ，保持 1) 中的  $U_s$  不变，然后增加和减小输入信号的频率，找出上、下限频率  $f_h$  和  $f_l$ ，记入表 4-3。

## 3、测试负反馈放大器的各项性能指标

将实验电路恢复为图 4-1 的负反馈放大电路。适当加大  $U_s$ （约 10mV），在输出波形不失真的条件下，测量负反馈放大器的  $A_{vf}$ 、 $R_{if}$  和  $R_{of}$ ，记入表 4-2；测量  $f_{hf}$  和  $f_{lf}$ ，记入表 4-3。



表 4—3

基本放大器	$f_L$ (KHz)	$f_H$ (KHz)	$\Delta f$ (KHz)
负反馈放大器	$f_{Lf}$ (KHz)	$f_{Hf}$ (KHz)	$\Delta f_f$ (KHz)

#### \*4、观察负反馈对非线性失真的改善

1) 实验电路改接成基本放大器形式，在输入端加入  $f=1\text{KHz}$  的正弦信号，输出端接示波器，逐渐增大输入信号的幅度，使输出波形开始出现失真，记下此时的波形和输出电压的幅度。

2) 再将实验电路改接成负反馈放大器形式，增大输入信号幅度，使输出电压幅度的大小与 1) 相同，比较有负反馈时，输出波形的变化。

### 五、实验总结

1、将基本放大器和负反馈放大器动态参数的实测值和理论估算值列表进行比较。

2、根据实验结果，总结电压串联负反馈对放大器性能的影响。

### 六、预习要求

1、复习教材中有关负反馈放大器的内容。

2、按实验电路 4—1 估算放大器的静态工作点（取  $\beta_1 = \beta_2 = 100$ ）。

3、怎样把负反馈放大器改接成基本放大器？为什么要把  $R_f$  并接在输入和输出端？

4、估算基本放大器的  $A_v$ 、 $R_i$  和  $R_o$ ；估算负反馈放大器的  $A_{vf}$ 、 $R_{if}$  和  $R_{of}$ ，并验算它们之间的关系。

5、如按深负反馈估算，则闭环电压放大倍数  $A_{vf} = ?$  和测量值是否一致？为什么？

6、如输入信号存在失真，能否用负反馈来改善？

7、怎样判断放大器是否存在自激振荡？如何进行消振？

注：如果实验装置上有放大器的固定实验模块，则可参考实验二附图 2—1 进行实验。

## 实验五 射极跟随器

### 一、实验目的

- 1、掌握射极跟随器的特性及测试方法
- 2、进一步学习放大器各项参数测试方法

### 二、实验原理

射极跟随器的原理图如图 5-1 所示。它是一个电压串联负反馈放大电路，它具有输入电阻高，输出电阻低，电压放大倍数接近于 1，输出电压能够在较大范围内跟随输入电压作线性变化以及输入、输出信号同相等特点。

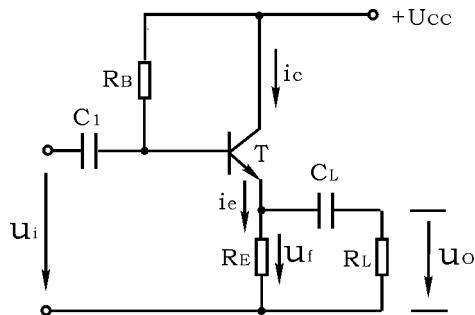


图 5-1 射极跟随器

射极跟随器的输出取自发射极，故称其为射极输出器。

#### 1、输入电阻 $R_i$

图 5-1 电路

$$R_i = r_{be} + (1 + \beta) R_E$$

如考虑偏置电阻  $R_B$  和负载  $R_L$  的影响，则

$$R_i = R_B // [r_{be} + (1 + \beta) (R_E // R_L)]$$

由上式可知射极跟随器的输入电阻  $R_i$  比共射极单管放大器的输入电阻  $R_i = R_B // r_{be}$  要高得多，但由于偏置电阻  $R_B$  的分流作用，输入电阻难以进一步提高。

输入电阻的测试方法同单管放大器，实验线路如图 5-2 所示。

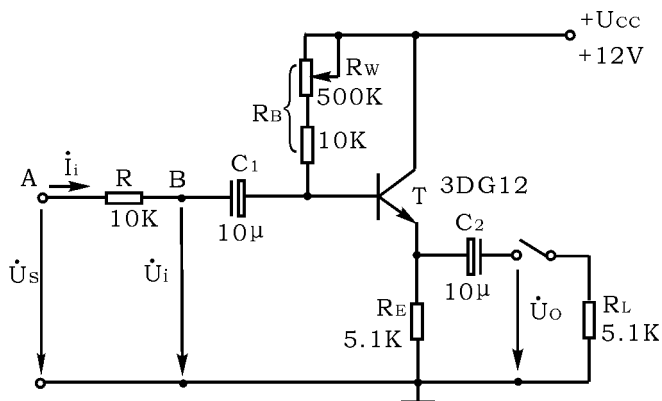


图 5-2 射极跟随器实验电路

$$R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R$$

即只要测得 A、B 两点的对地电位即可计算出  $R_i$ 。

## 2、输出电阻 $R_o$

图 5-1 电路

$$R_o = \frac{r_{be}}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be}}{\beta}$$

如考虑信号源内阻  $R_s$ ，则

$$R_o = \frac{r_{be} + (R_s // R_B)}{\beta} // R_E \approx \frac{r_{be} + (R_s // R_B)}{\beta}$$

由上式可知射极跟随器的输出电阻  $R_o$  比共射极单管放大器的输出电阻  $R_o \approx R_c$  低得多。三极管的  $\beta$  愈高，输出电阻愈小。

输出电阻  $R_o$  的测试方法亦同单管放大器，即先测出空载输出电压  $U_o$ ，再测接入负载  $R_L$  后的输出电压  $U_L$ ，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$$

即可求出  $R_o$

$$R_o = \left( \frac{U_o}{U_L} - 1 \right) R_L$$

### 3、电压放大倍数

图 5-1 电路

$$A_v = \frac{(1+\beta)(R_E // R_L)}{r_{be} + (1+\beta)(R_E // R_L)} \leq 1$$

上式说明射极跟随器的电压放大倍数小于近于 1，且为正值。这是深度电压负反馈的结果。但它的射极电流仍比基流大  $(1+\beta)$  倍，所以它具有一定的电流和功率放大作用。

### 4、电压跟随范围

电压跟随范围是指射极跟随器输出电压  $u_o$  跟随输入电压  $u_i$  作线性变化的区域。当  $u_i$  超过一定范围时， $u_o$  便不能跟随  $u_i$  作线性变化，即  $u_o$  波形产生了失真。为了使输出电压  $u_o$  正、负半周对称，并充分利用电压跟随范围，静态工作点应选在交流负载线中点，测量时可直接用示波器读取  $u_o$  的峰峰值，即电压跟随范围；或用交流毫伏表读取  $u_o$  的有效值，则电压跟随范围

$$U_{op-p} = 2\sqrt{2} U_o$$

## 三、实验设备与器件

- |  |           |
|--|-----------|
| 1、+12V 直流电源                                | 2、函数信号发生器 |
| 3、双踪示波器                                    | 4、交流毫伏表   |
| 5、直流电压表                                    | 6、频率计     |
| 7、3DG12×1 ( $\beta = 50 \sim 100$ ) 或 9013 |           |

电阻器、电容器若干。

## 四、实验内容

按图 5-2 组接电路

### 1、静态工作点的调整

接通 +12V 直流电源，在 B 点加入  $f=1\text{KHz}$  正弦信号  $u_i$ ，输出端用示波器

监视输出波形，反复调整  $R_w$  及信号源的输出幅度，使在示波器的屏幕上得到一个最大不失真输出波形，然后置  $u_i=0$ ，用直流电压表测量晶体管各电极对地电位，将测得数据记入表 5-1。

表 5-1

$U_E$ (V)	$U_B$ (V)	$U_C$ (V)	$I_E$ (mA)

在下面整个测试过程中应保持  $R_w$  值不变（即保持静工作点  $I_E$  不变）。

## 2、测量电压放大倍数 $A_v$

接入负载  $R_L=1K\Omega$ ，在 B 点加  $f=1KHz$  正弦信号  $u_i$ ，调节输入信号幅度，用示波器观察输出波形  $u_o$ ，在输出最大不失真情况下，用交流毫伏表测  $U_i$ 、 $U_L$  值。记入表 5-2。

表 5-2

$U_i$ (V)	$U_L$ (V)	$A_v$

## 3、测量输出电阻 $R_o$

接上负载  $R_L=1K$ ，在 B 点加  $f=1KHz$  正弦信号  $u_i$ ，用示波器监视输出波形，测空载输出电压  $U_0$ ，有负载时输出电压  $U_L$ ，记入表 5-3。

表 5-3

$U_0$ (V)	$U_L$ (V)	$R_o$ (K $\Omega$ )

## 4、测量输入电阻 $R_i$

在 A 点加  $f=1KHz$  的正弦信号  $u_s$ ，用示波器监视输出波形，用交流毫伏表

分别测出 A、B 点对地的电位  $U_s$ 、 $U_i$ ，记入表 5-4。

表 5-4

$U_s$ (V)	$U_i$ (V)	$R_i$ (K $\Omega$ )

### 5、测试跟随特性

接入负载  $R_L=1K\Omega$ ，在 B 点加入  $f=1KHz$  正弦信号  $u_i$ ，逐渐增大信号  $u_i$  幅度，用示波器监视输出波形直至输出波形达最大不失真，测量对应的  $U_L$  值，记入表 5-5。

表 5-5

$U_i$ (V)	
$U_L$ (V)	

### 6、测试频率响应特性

保持输入信号  $u_i$  幅度不变，改变信号源频率，用示波器监视输出波形，用交流毫伏表测量不同频率下的输出电压  $U_L$  值，记入表 5-6。

表 5-6

$f$ (KHz)	
$U_L$ (V)	

## 五、预习要求

- 1、复习射极跟随器的工作原理。
- 2、根据图 5-2 的元件参数值估算静态工作点，并画出交、直流负载线。

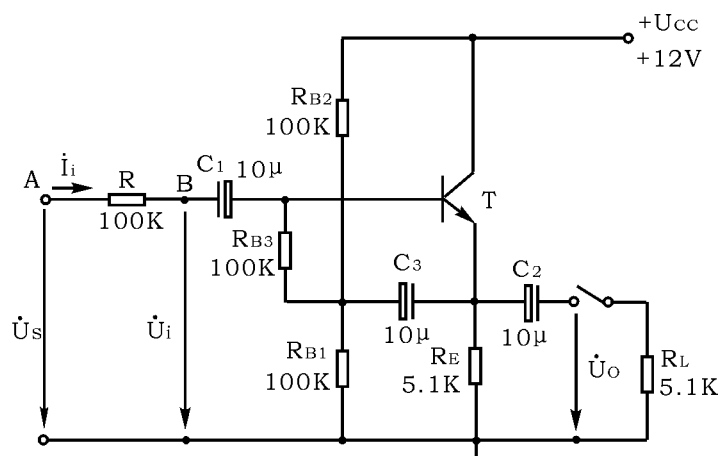
## 六、实验报告

- 1、整理实验数据，并画出曲线  $U_L=f(U_i)$  及  $U_L=f(f)$  曲线。

## 2、分析射极跟随器的性能和特点。

附：采用自举电路的射极跟随器

在一些电子测量仪器中，为了减轻仪器对信号源所取用的电流，以提高测量精度，通常采用附图 5-1 所示带有自举电路的射极跟随器，以提高偏置电路的等效电阻，从而保证射极跟随器有足够高的输入电阻。



附图 5-1 有自举电路的射极跟随器



## 实验六 差动放大器

### 一、实验目的

- 1、加深对差动放大器性能及特点的理解
- 2、学习差动放大器主要性能指标的测试方法

### 二、实验原理

图 6-1 是差动放大器的基本结构。它由两个元件参数相同的基本共射放大电路组成。当开关 K 拨向左边时，构成典型的差动放大器。调零电位器  $R_p$  用来调节  $T_1$ 、 $T_2$  管的静态工作点，使得输入信号  $U_i=0$  时，双端输出电压  $U_o=0$ 。 $R_e$  为两管共用的发射极电阻，它对差模信号无负反馈作用，因而不影响差模电压放大倍数，但对共模信号有较强的负反馈作用，故可以有效地抑制零漂，稳定静态工作点。

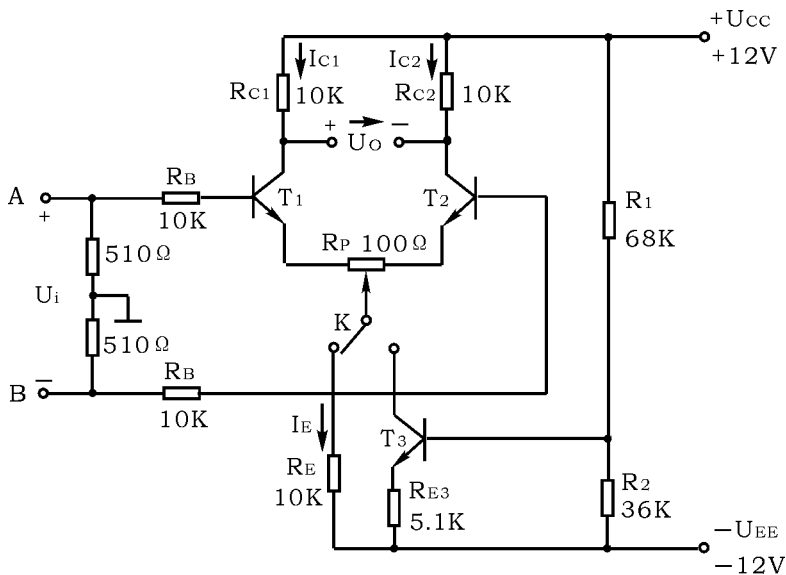


图 6-1 差动放大器实验电路

当开关 K 拨向右边时，构成具有恒流源的差动放大器。它用晶体管恒流源代替发射极电阻  $R_E$ ，可以进一步提高差动放大器抑制共模信号的能力。

### 1、静态工作点的估算

典型电路

$$I_E \approx \frac{|U_{EE}| - U_{BE}}{R_E} \quad (\text{认为 } U_{B1} = U_{B2} \approx 0)$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_E$$

恒流源电路

$$I_{C3} \approx I_{E3} \approx \frac{\frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{CC} + |U_{EE}|) - U_{BE}}{R_{E3}}$$

$$I_{C1} = I_{C2} = \frac{1}{2} I_{C3}$$

### 2、差模电压放大倍数和共模电压放大倍数

当差动放大器的射极电阻  $R_E$  足够大，或采用恒流源电路时，差模电压放大倍数  $A_d$  由输出端方式决定，而与输入方式无关。

双端输出：  $R_E = \infty$ ， $R_p$  在中心位置时，

$$A_d = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = - \frac{\beta R_C}{R_B + r_{be} + \frac{1}{2}(1 + \beta) R_p}$$

单端输出

$$A_{d1} = \frac{\Delta U_{C1}}{\Delta U_i} = \frac{1}{2} A_d$$

$$A_{d2} = \frac{\Delta U_{C2}}{\Delta U_i} = - \frac{1}{2} A_d$$

当输入共模信号时，若为单端输出，则有

$$A_{C1} = A_{C2} = \frac{\Delta U_{C1}}{\Delta U_i} = \frac{-\beta R_C}{R_B + r_{be} + (1 + \beta) \left( \frac{1}{2} R_p + 2R_E \right)} \approx - \frac{R_C}{2R_E}$$

若为双端输出，在理想情况下

$$A_c = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i} = 0$$

实际上由于元件不可能完全对称，因此  $A_c$  也不会绝对等于零。

### 3、 共模抑制比 CMRR

为了表征差动放大器对有用信号（差模信号）的放大作用和对共模信号的抑制能力，通常用一个综合指标来衡量，即共模抑制比

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{或} \quad CMRR = 20 \text{Log} \left| \frac{A_d}{A_c} \right| (\text{dB})$$

差动放大器的输入信号可采用直流信号也可采用交流信号。本实验由函数信号发生器提供频率  $f = 1\text{KHZ}$  的正弦信号作为输入信号。

## 三、实验设备与器件

- 1、 $\pm 12\text{V}$  直流电源
- 2、函数信号发生器
- 3、双踪示波器
- 4、交流毫伏表
- 5、直流电压表
- 6、晶体三极管 3DG6 $\times 3$ ，要求  $T_1$ 、 $T_2$  管特性参数一致。  
(或 9011 $\times 3$ )。

电阻器、电容器若干。

## 四、实验内容

### 1、典型差动放大器性能测试

按图 6-1 连接实验电路，开关 K 拨向左边构成典型差动放大器。

#### 1) 测量静态工作点

##### ① 调节放大器零点

信号源不接入。将放大器输入端 A、B 与地短接，接通  $\pm 12\text{V}$  直流电源，用直流电压表测量输出电压  $U_o$ ，调节调零电位器  $R_p$ ，使  $U_o = 0$ 。调节要仔细，力

求准确。

### ②测量静态工作点

零点调好以后，用直流电压表测量  $T_1$ 、 $T_2$  管各电极电位及射极电阻  $R_E$  两端电压  $U_{RE}$ ，记入表 6-1。

表 6-1

测量值	$U_{C1}$ (V)	$U_{B1}$ (V)	$U_{E1}$ (V)	$U_{C2}$ (V)	$U_{B2}$ (V)	$U_{E2}$ (V)	$U_{RE}$ (V)
计算值	$I_C$ (mA)		$I_B$ (mA)		$U_{CE}$ (V)		

### 2) 测量差模电压放大倍数

断开直流电源，将函数信号发生器的输出端接放大器输入 A 端，地端接放大器输入 B 端构成单端输入方式，调节输入信号为频率  $f=1\text{KHz}$  的正弦信号，并使输出旋钮旋至零，用示波器监视输出端（集电极  $C_1$  或  $C_2$  与地之间）。

接通  $\pm 12\text{V}$  直流电源，逐渐增大输入电压  $U_i$ （约  $100\text{mV}$ ），在输出波形无失真的情况下，用交流毫伏表测  $U_i$ ， $U_{C1}$ ， $U_{C2}$ ，记入表 6-2 中，并观察  $u_i$ ， $u_{C1}$ ， $u_{C2}$  之间的相位关系及  $U_{RE}$  随  $U_i$  改变而变化的情况。

### 3) 测量共模电压放大倍数

将放大器 A、B 短接，信号源接 A 端与地之间，构成共模输入方式，调节输入信号  $f=1\text{kHz}$ ， $U_i=1\text{V}$ ，在输出电压无失真的情况下，测量  $U_{C1}$ ， $U_{C2}$  之值记入表 6-2，并观察  $u_i$ ， $u_{C1}$ ， $u_{C2}$  之间的相位关系及  $U_{RE}$  随  $U_i$  改变而变化的情况。

表 6-2

	典型差动放大电路		具有恒流源差动放大电路	
	单端输入	共模输入	单端输入	共模输入
$U_i$	100mV	1V	100mV	1V
$U_{c1}(V)$				
$U_{c2}(V)$				
$A_{d1} = \frac{U_{c1}}{U_i}$		/		/
$A_d = \frac{U_o}{U_i}$		/		/
$A_{c1} = \frac{U_{c1}}{U_i}$	/		/	
$A_c = \frac{U_o}{U_i}$	/		/	
$CMRR = \left  \frac{A_{d1}}{A_{c1}} \right $				

## 2、具有恒流源的差动放大电路性能测试

将图 6-1 电路中开关 K 拨向右边，构成具有恒流源的差动放大电路。重复内容 1-2)、1-3) 的要求，记入表 6-2。

## 五、实验总结

1、整理实验数据，列表比较实验结果和理论估算值，分析误差原因。

- 1) 静态工作点和差模电压放大倍数。
- 2) 典型差动放大电路单端输出时的 CMRR 实测值与理论值比较

3) 典型差动放大电路单端输出时 CMRR 的实测值与具有恒流源的差动放大器 CMRR 实测值比较。

2、比较  $u_i$ ,  $u_{c1}$  和  $u_{c2}$  之间的相位关系。

3、根据实验结果, 总结电阻  $R_e$  和恒流源的作用。

## 六、预习要求

1、根据实验电路参数, 估算典型差动放大器和具有恒流源的差动放大器的静态工作点及差模电压放大倍数 (取  $\beta_1 = \beta_2 = 100$ )。

2、测量静态工作点时, 放大器输入端 A、B 与地应如何连接?

3、实验中怎样获得双端和单端输入差模信号? 怎样获得共模信号? 画出 A、B 端与信号源之间的连接图。

4、怎样进行静态调零点? 用什么仪表测  $U_o$  ?

5、怎样用交流毫伏表测双端输出电压  $U_o$  ?

## 实验七 集成运算放大器指标测试

### 一、实验目的

- 1、掌握运算放大器主要指标的测试方法。
- 2、通过对运算放大器  $\mu A741$  指标的测试，了解集成运算放大器组件的主要参数的定义和表示方法。

### 二、实验原理

集成运算放大器是一种线性集成电路，和其它半导体器件一样，它是用一些性能指标来衡量其质量的优劣。为了正确使用集成运放，就必须了解它的主要参数指标。集成运放组件的各项指标通常是由专用仪器进行测试的，这里介绍的是一种简易测试方法。

本实验采用的集成运放型号为  $\mu A741$  (或 F007)，引脚排列如图 7-1 所示，它是八脚双列直插式组件，②脚和③脚为反相和同相输入端，⑥脚为输出端，⑦脚和④脚为正、负电源端，①脚和⑤脚为失调调零端，①⑤脚之间可接入一只几十  $K\Omega$  的电位器并将滑动触头接到负电源端。⑧脚为空脚。

#### 1、 $\mu A741$ 主要指标测试

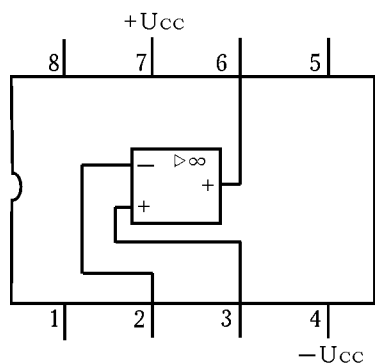


图 7-1  $\mu A741$  管脚图

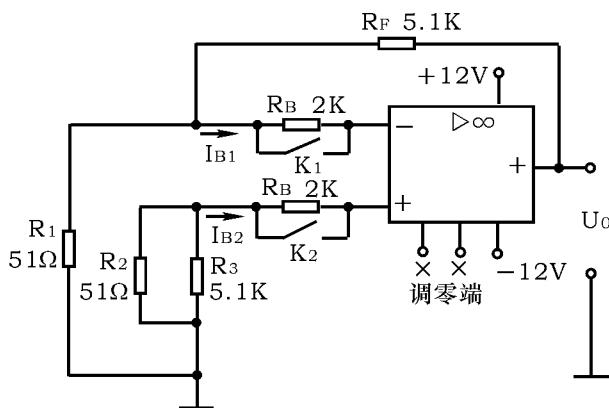


图 7-2  $U_{OS}$ 、 $I_{OS}$  测试电路

### 1) 输入失调电压 $U_{OS}$

理想运放组件，当输入信号为零时，其输出也为零。但是即使是最优质的集成组件，由于运放内部差动输入级参数的不完全对称，输出电压往往不为零。这种零输入时输出不为零的现象称为集成运放的失调。

输入失调电压  $U_{OS}$  是指输入信号为零时，输出端出现的电压折算到同相输入端的数值。

失调电压测试电路如图 7-2 所示。闭合开关  $K_1$  及  $K_2$ ，使电阻  $R_B$  短接，测量此时的输出电压  $U_{O1}$  即为输出失调电压，则输入失调电压

$$U_{OS} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} U_{O1}$$

实际测出的  $U_{O1}$  可能为正，也可能为负，一般在  $1 \sim 5\text{mV}$ ，对于高质量的运放  $U_{OS}$  在  $1\text{mV}$  以下。

测试中应注意：a、将运放调零端开路。

b、要求电阻  $R_1$  和  $R_2$ ， $R_3$  和  $R_F$  的参数严格对称。

### 2) 输入失调电流 $I_{OS}$

输入失调电流  $I_{OS}$  是指当输入信号为零时，运放的两个输入端的基极偏置电流之差，

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}|$$

输入失调电流的大小反映了运放内部差动输入级两个晶体管  $\beta$  的失配度，由于  $I_{B1}$ ， $I_{B2}$  本身的数值已很小（微安级），因此它们的差值通常不是直接测量的，测试电路如图 7-2 所示，测试分两步进行

a、闭合开关  $K_1$  及  $K_2$ ，在低输入电阻下，测出输出电压  $U_{O1}$ ，如前所述，这是由输入失调电压  $U_{OS}$  所引起的输出电压。

b、断开  $K_1$  及  $K_2$ ，两个输入电阻  $R_B$  接入，由于  $R_B$  阻值较大，流经它们的输入电流的差异，将变成输入电压的差异，因此，也会影响输出电压的大小，可见测出两个电阻  $R_B$  接入时的输出电压  $U_{O2}$ ，若从中扣除输入失调电压  $U_{OS}$  的影响，



则输入失调电流  $I_{OS}$  为

$$I_{OS} = |I_{B1} - I_{B2}| = |U_{02} - U_{01}| \frac{R_1}{R_1 + R_F} \frac{1}{R_B}$$

一般,  $I_{OS}$  约为几十~几百 nA ( $10^{-9}$ A), 高质量运放  $I_{OS}$  低于 1nA。

测试中应注意: a、将运放调零端开路。

b、两输入端电阻  $R_B$  必须精确配对。

### 3) 开环差模放大倍数 $A_{ud}$

集成运放在没有外部反馈时的直流差模放大倍数称为开环差模电压放大倍数, 用  $A_{ud}$  表示。它定义为开环输出电压  $U_0$  与两个差分输入端之间所加信号电压  $U_{id}$  之比

$$A_{ud} = \frac{U_0}{U_{id}}$$

按定义  $A_{ud}$  应是信号频率为零时的直流放大倍数, 但为了测试方便, 通常采用低频 (几十赫芝以下) 正弦交流信号进行测量。由于集成运放的开环电压放大倍数很高, 难以直接进行测量, 故一般采用闭环测量方法。  $A_{ud}$  的测试方法很多, 现采用交、直流同时闭环的测试方法, 如图 7-3 所示。

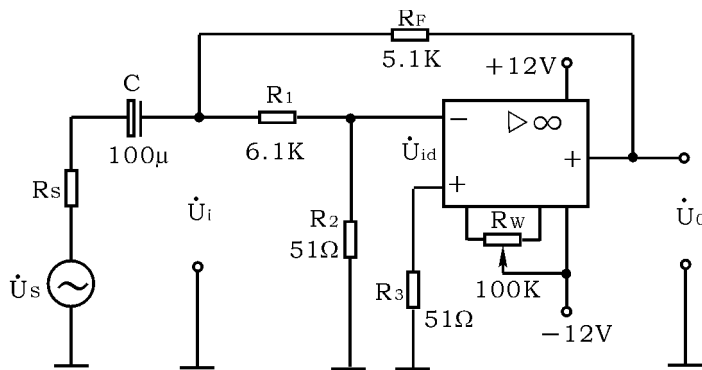


图 7-3  $A_{ud}$  测试电路

被测运放一方面通过  $R_F$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  完成直流闭环, 以抑制输出电压漂移, 另一方面通过  $R_F$  和  $R_S$  实现交流闭环, 外加信号  $u_s$  经  $R_1$ 、 $R_2$  分压, 使  $u_{id}$  足够小,

以保证运放工作在线性区，同相输入端电阻  $R_3$  应与反相输入端电阻  $R_2$  相匹配，以减小输入偏置电流的影响，电容  $C$  为隔直电容。被测运放的开环电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_0}{U_{id}} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \frac{U_0}{U_i}$$

通常低增益运放  $A_{ud}$  约为 60~70db，中增益运放约为 80db，高增益在 100db 以上，可达 120~140db。

测试中应注意：a、测试前电路应首先消振及调零。

b、被测运放要工作在线性区。

c、输入信号频率应较低，一般用 50~100HZ，输出信号幅度应较小，且无明显失真。

#### 4) 共模抑制比 CMRR

集成运放的差模电压放大倍数  $A_d$  与共模电压放大倍数  $A_c$  之比称为共模抑制比

$$CMRR = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{或} \quad CMRR = 20 \lg \left| \frac{A_d}{A_c} \right| (\text{db})$$

共模抑制比在应用中是一个很重要的参数，理想运放对输入的共模信号其输出为零，但在实际的集成运放中，其输出不可能没有共模信号的成分，输出端共模信号愈小，说明电路对称性愈好，也就是说运放对共模干扰信号的抑制能力愈强，即 CMRR 愈大。CMRR 的测试电路如图 7-4 所示。

集成运放工作在闭环状态下的差模电压放大倍数为

$$A_d = -\frac{R_F}{R_1}$$

当接入共模输入信号  $U_{ic}$  时，测得  $U_{oc}$ ，则共模电压放大倍数为

$$A_c = \frac{U_{oc}}{U_{ic}}$$

得共模抑制比

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right| = \frac{R_F}{R_1} \frac{U_{ic}}{U_{oc}}$$

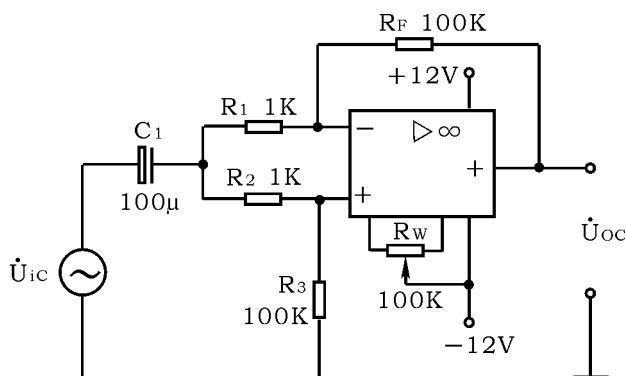


图 7-4 CMRR 测试电路

测试中应注意：a、消振与调零

b、 $R_1$  与  $R_2$ 、 $R_3$  与  $R_4$  之间阻值严格对称

c、输入信号  $U_{ic}$  幅度必须小于集成运放的最大共模输入电压范围  $U_{icm}$

5) 共模输入电压范围  $U_{icm}$

集成运放所能承受的最大共模电压称为共模输入电压范围，超出这个范围，运放的 CMRR 会大大下降，输出波形产生失真，有些运放还会出现“自锁”现象以及永久性的损坏。

$U_{icm}$  的测试电路如图 7-5 所示。

被测运放接成电压跟随器形式，输出端接示波器，观察最大不失真输出波形，从而确定  $U_{icm}$  值。

6) 输出电压最大动态范围  $U_{opp}$

集成运放的动态范围与电源电压、外接负载及信号源频率有关。测试电路如图 7-6 所示。

改变  $u_s$  幅度，观察  $u_o$  削顶失真开始时刻，从而确定  $u_o$  的不失真范围，这就

是运放在某一定电源电压下可能输出的电压峰峰值  $U_{OPP}$ 。

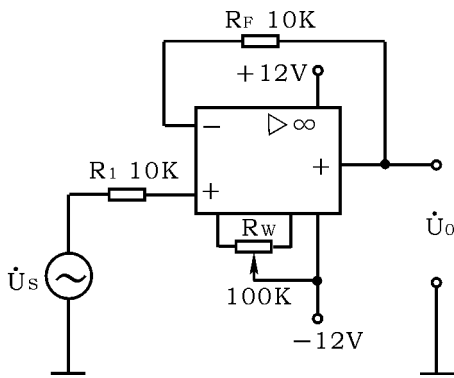


图 7-5  $U_{icm}$  测试电路

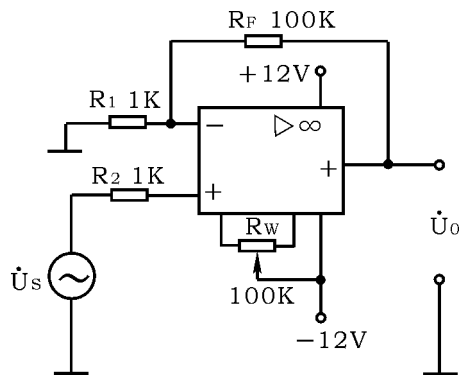


图 7-6  $U_{opp}$  测试电路

## 2、集成运放在使用时应考虑的一些问题

1) 输入信号选用交、直流量均可，但在选取信号的频率和幅度时，应考虑运放的频响特性和输出幅度的限制。

2) 调零。为提高运算精度，在运算前，应首先对直流输出电位进行调零，即保证输入为零时，输出也为零。当运放有外接调零端子时，可按组件要求接入调零电位器  $R_W$ ，调零时，将输入端接地，调零端接入电位器  $R_W$ ，用直流电压表测量输出电压  $U_o$ ，细心调节  $R_W$ ，使  $U_o$  为零（即失调电压为零）。如运放没有调零端子，若要调零，可按图 7-7 所示电路进行调零。

一个运放如不能调零，大致有如下原因：① 组件正常，接线有错误。② 组件正常，但负反馈不够强 ( $R_F / R_1$  太大)，为此可将  $R_F$  短路，观察是否能调零。③ 组件正常，但由于它所允许的共模输入电压太低，可能出现自锁现象，因而不能调零。为此可将电源断开后，再重新接通，如能恢复正常，则属于这种情况。④ 组件正常，但电路有自激现象，应进行消振。⑤ 组件内部损坏，应更换好的集成块。

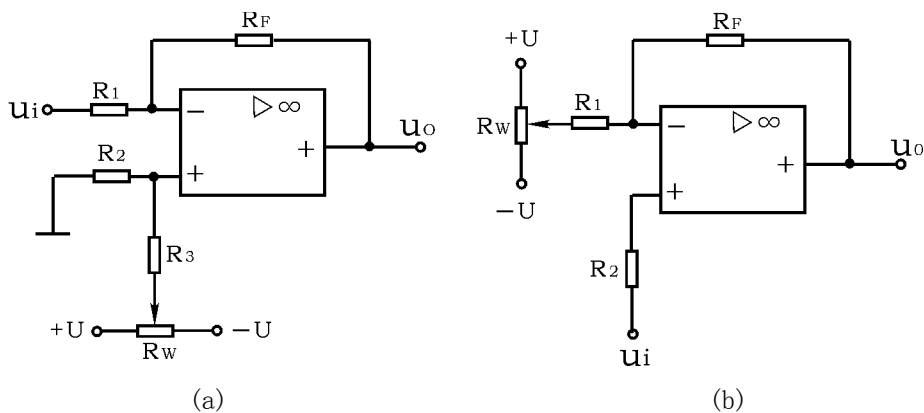


图 7-7 调零电路

3) 消振。一个集成运放自激时, 表现为即使输入信号为零, 亦会有输出, 使各种运算功能无法实现, 严重时还会损坏器件。在实验中, 可用示波器监视输出波形。为消除运放的自激, 常采用如下措施

①若运放有相位补偿端子, 可利用外接 RC 补偿电路, 产品手册中有补偿电路及元件参数提供。②电路布线、元、器件布局应尽量减少分布电容。③在正、负电源进线与地之间接上几十  $\mu\text{F}$  的电解电容和  $0.01\sim 0.1\ \mu\text{F}$  的陶瓷电容相并联以减小电源引线的影响。

注: 自激消除方法请参考实验附录。

### 三、实验设备与器件

- |                          |                                    |
|--------------------------|------------------------------------|
| 1、 $\pm 12\text{V}$ 直流电源 | 4、交流毫伏表                            |
| 2、函数信号发生器                | 5、直流电压表                            |
| 3、双踪示波器                  | 6、集成运算放大器 $\mu\text{A}741\times 1$ |
- 电阻器、电容器若干

### 四、实验内容

实验前看清运放管脚排列及电源电压极性及数值, 切忌正、负电源接反。

#### 1、测量输入失调电压 $U_{0s}$

按图 7-2 连接实验电路, 闭合开关  $K_1$ 、 $K_2$ , 用直流电压表测量输出端电压  $U_{01}$ , 并计算  $U_{0s}$ 。记入表 7-1。

## 2. 测量输入失调电流 $I_{OS}$

实验电路如图 7-2, 打开开关  $K_1$ 、 $K_2$ , 用直流电压表测量  $U_{O2}$ , 并计算  $I_{OS}$ 。记入表 7-1。

表 7-1

$U_{OS}$ (mV)		$I_{OS}$ (nA)		$A_{ud}$ (db)		CMRR (db)	
实测值	典型值	实测值	典型值	实测值	典型值	实测值	典型值
	2~10		50~100		100~106		80~86

## 3、测量开环差模电压放大倍数 $A_{ud}$

按图 7-3 连接实验电路, 运放输入端加频率 100Hz, 大小约 30~50mV 正弦信号, 用示波器监视输出波形。用交流毫伏表测量  $U_0$  和  $U_i$ , 并计算  $A_{ud}$ 。记入表 7-1。

## 4、测量共模抑制比 CMRR

按图 7-4 连接实验电路, 运放输入端加  $f=100\text{Hz}$ ,  $U_{ic}=1\sim 2\text{V}$  正弦信号, 监视输出波形。测量  $U_{oc}$  和  $U_{ic}$ , 计算  $A_c$  及 CMRR。记入表 7-1。

## 5、测量共模输入电压范围 $U_{icm}$ 及输出电压最大动态范围 $U_{opp}$ 。

自拟实验步骤及方法。

## 五、实验总结

- 1、将所测得的数据与典型值进行比较。
- 2、对实验结果及实验中碰到的问题进行分析、讨论。

## 六、预习要求

- 1、查阅  $\mu A741$  典型指标数据及管脚功能。
- 2、测量输入失调参数时, 为什么运放反相及同相输入端的电阻要精选, 以保证严格对称。
- 3、测量输入失调参数时, 为什么要将运放调零端开路, 而在进行其它测试时, 则要求对输出电压进行调零。
- 4、测试信号的频率选取的原则是什么?

# 实验八 集成运算放大器的基本应用(I)

## — 模拟运算电路 —

### 一、实验目的

1、研究由集成运算放大器组成的比例、加法、减法和积分等基本运算电路的功能。

2、了解运算放大器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放大倍数的直接耦合多级放大电路。当外部接入不同的线性或非线性元器件组成输入和负反馈电路时，可以灵活地实现各种特定的函数关系。在线性应用方面，可组成比例、加法、减法、积分、微分、对数等模拟运算电路。

#### 理想运算放大器特性

在大多数情况下，将运放视为理想运放，就是将运放的各项技术指标理想化，满足下列条件的运算放大器称为理想运放。

开环电压增益  $A_{ud}=\infty$

输入阻抗  $r_i=\infty$

输出阻抗  $r_o=0$

带宽  $f_{BW}=\infty$

失调与漂移均为零等。

理想运放在线性应用时的两个重要特性：

(1) 输出电压  $U_0$  与输入电压之间满足关系式

$$U_0=A_{ud}(U_+-U_-)$$

由于  $A_{ud}=\infty$ ，而  $U_0$  为有限值，因此， $U_+-U_-\approx 0$ 。即  $U_+\approx U_-$ ，称为“虚短”。

(2) 由于  $r_i=\infty$ ，故流进运放两个输入端的电流可视为零，即  $I_{IB}=0$ ，称为“虚断”。这说明运放对其前级吸取电流极小。

上述两个特性是分析理想运放应用电路的基本原则，可简化运放电路的计算。

### 基本运算电路

#### 1) 反相比例运算电路

电路如图 8-1 所示。对于理想运放，该电路的输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_0 = -\frac{R_F}{R_1} U_i$$

为了减小输入级偏置电流引起的运算误差，在同相输入端应接入平衡电阻  $R_2 = R_1 // R_F$ 。

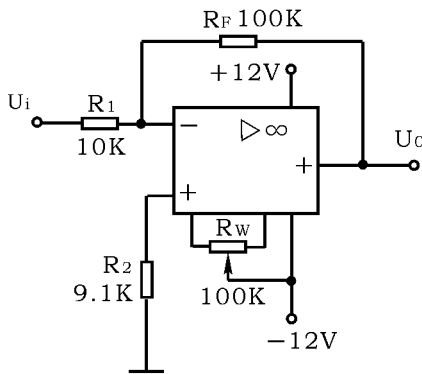


图 8-1 反相比例运算电路

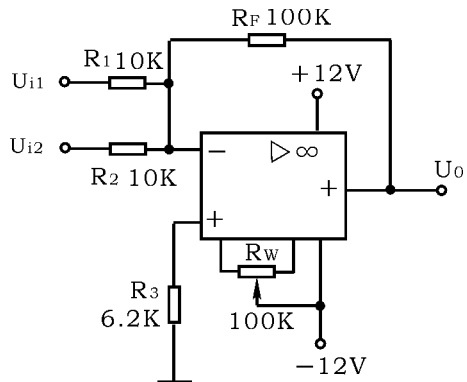


图 8-2 反相加法运算电路

#### 2) 反相加法电路

电路如图 8-2 所示，输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_0 = -\left(\frac{R_F}{R_1} U_{i1} + \frac{R_F}{R_2} U_{i2}\right) \quad R_3 = R_1 // R_2 // R_F$$

#### 3) 同相比例运算电路

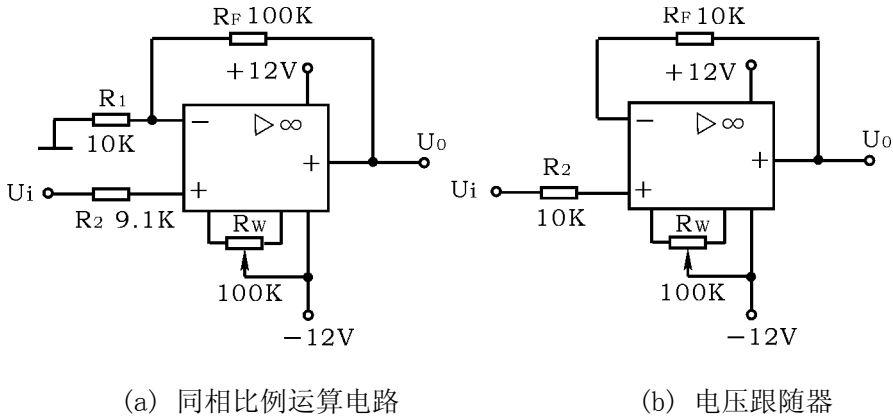
图 8-3(a) 是同相比例运算电路，它的输出电压与输入电压之间的关系为

$$U_0 = \left(1 + \frac{R_F}{R_1}\right) U_i \quad R_2 = R_1 // R_F$$

当  $R_1 \rightarrow \infty$  时， $U_0 = U_i$ ，即得到如图 8-3(b) 所示的电压跟随器。图中  $R_2 = R_F$ ，



用以减小漂移和起保护作用。一般  $R_F$  取  $10K\Omega$ ， $R_F$  太小起不到保护作用，太大则影响跟随性。



(a) 同相比例运算电路

(b) 电压跟随器

图 8-3 同相比例运算电路

#### 4) 差动放大电路（减法器）

对于图 8-4 所示的减法运算电路，当  $R_1=R_2$ ， $R_3=R_F$  时，有如下关系式

$$U_0 = \frac{R_F}{R_1}(U_{i2} - U_{i1})$$

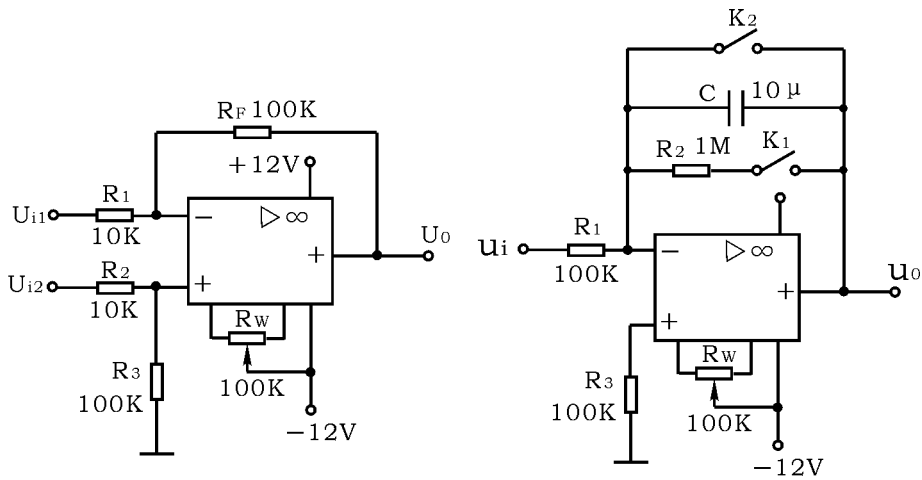
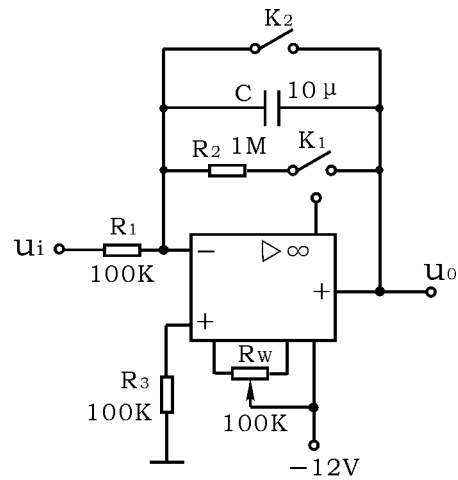


图 8-4 减法运算电路图



8-5 积分运算电路

#### 5) 积分运算电路

反相积分电路如图 8-5 所示。在理想化条件下，输出电压  $u_0$  等于

$$u_0(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t u_1 dt + u_c(0)$$

式中  $u_c(0)$  是  $t=0$  时刻电容  $C$  两端的电压值，即初始值。

如果  $u_1(t)$  是幅值为  $E$  的阶跃电压，并设  $u_c(0)=0$ ，则

$$u_0(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t E dt = -\frac{E}{R_1 C} t$$

即输出电压  $u_0(t)$  随时间增长而线性下降。显然  $RC$  的数值越大，达到给定的  $U_0$  值所需的时间就越长。积分输出电压所能达到的最大值受集成运放最大输出范围的限值。

在进行积分运算之前，首先应对运放调零。为了便于调节，将图中  $K_1$  闭合，即通过电阻  $R_2$  的负反馈作用帮助实现调零。但在完成调零后，应将  $K_1$  打开，以免因  $R_2$  的接入造成积分误差。 $K_2$  的设置一方面为积分电容放电提供通路，同时可实现积分电容初始电压  $u_c(0)=0$ ，另一方面，可控制积分起始点，即在加入信号  $u_1$  后，只要  $K_2$  一打开，电容就将被恒流充电，电路也就开始进行积分运算。

### 三、实验设备与器件

- 1、±12V 直流电源
- 2、函数信号发生器
- 3、交流毫伏表
- 4、直流电压表
- 5、集成运算放大器  $\mu A741 \times 1$

电阻器、电容器若干。

### 四、实验内容

实验前要看清运放组件各管脚的位置；切忌正、负电源极性接反和输出端短路，否则将会损坏集成块。

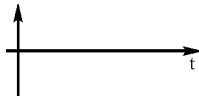
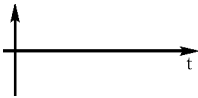
#### 1、反相比例运算电路

1) 按图 8-1 连接实验电路，接通 ±12V 电源，输入端对地短路，进行调零和消振。

2) 输入  $f=100\text{Hz}$ ， $U_1=0.5\text{V}$  的正弦交流信号，测量相应的  $U_0$ ，并用示波

器观察  $u_0$  和  $u_i$  的相位关系，记入表 8-1。

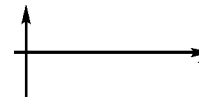
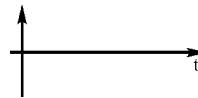
表 8-1  $U_i=0.5V$ ,  $f=100Hz$

$U_i$ (V)	$U_0$ (V)	$u_i$ 波形	$u_0$ 波形	$A_v$	
				实测值	计算值
					

## 2、同相比例运算电路

- 1) 按图 8-3(a) 连接实验电路。实验步骤同内容 1，将结果记入表 8-2。
- 2) 将图 8-3(a) 中的  $R_1$  断开，得图 8-3(b) 电路重复内容 1)。

表 8-2  $U_i=0.5V$   $f=100Hz$

$U_i$ (V)	$U_0$ (V)	$u_i$ 波形	$u_0$ 波形	$A_v$	
				实测值	计算值
					

## 3、反相加法运算电路

- 1) 按图 8-2 连接实验电路。调零和消振。
- 2) 输入信号采用直流信号，图 8-6 所示电路为简易直流信号源，由实验者自行完成。实验时要注意选择合适的直流信号幅度以确保集成运放工作在线性区。用直流电压表测量输入电压  $U_{i1}$ 、 $U_{i2}$  及输出电压  $U_0$ ，记入表 8-3。

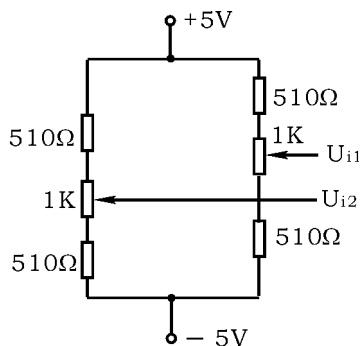


图 8-6 简易可调直流信号源

表 8-3

$U_{i1}$ (V)					
$U_{i2}$ (V)					
$U_o$ (V)					

#### 4、减法运算电路

- 1) 按图 8-4 连接实验电路。调零和消振。
- 2) 采用直流输入信号，实验步骤同内容 3，记入表 8-4。

表 8-4

$U_{i1}$ (V)					
$U_{i2}$ (V)					
$U_o$ (V)					

#### 5、积分运算电路

实验电路如图 8-5 所示。

- 1) 打开  $K_2$ ，闭合  $K_1$ ，对运放输出进行调零。
- 2) 调零完成后，再打开  $K_1$ ，闭合  $K_2$ ，使  $u_c(o) = 0$ 。
- 3) 预先调好直流输入电压  $U_i = 0.5V$ ，接入实验电路，再打开  $K_2$ ，然后用直流电压表测量输出电压  $U_o$ ，每隔 5 秒读一次  $U_o$ ，记入表 8-5，直到  $U_o$  不继续明显增大为止。

表 8-5

t (s)	0	5	10	15	20	25	30	.....
$U_o$ (V)								

### 五、实验总结

- 1、整理实验数据，画出波形图（注意波形间的相位关系）。
- 2、将理论计算结果和实测数据相比较，分析产生误差的原因。
- 3、分析讨论实验中出现的现象和问题。

## 六、预习要求

1、复习集成运放线性应用部分内容，并根据实验电路参数计算各电路输出电压的理论值。

2、在反相加法器中，如  $U_{i1}$  和  $U_{i2}$  均采用直流信号，并选定  $U_{i2} = -1V$ ，当考虑到运算放大器的最大输出幅度 ( $\pm 12V$ ) 时， $|U_{i1}|$  的大小不应超过多少伏？

3、在积分电路中，如  $R_1 = 100K\Omega$ ， $C = 4.7\mu F$ ，求时间常数。  
假设  $U_i = 0.5V$ ，问要使输出电压  $U_o$  达到  $5V$ ，需多长时间（设  $u_c(o) = 0$ ）？

4、为了不损坏集成块，实验中应注意什么问题？

## 实验九 集成运算放大器的基本应用（II）

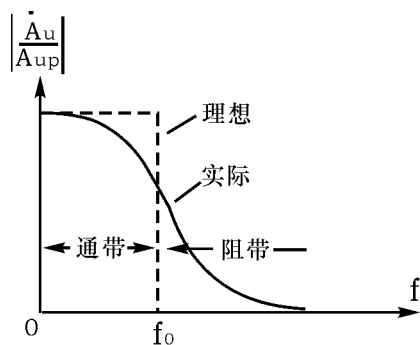
### — 有源滤波器 —

#### 一、实验目的

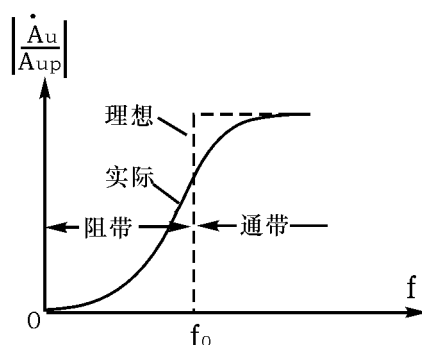
1、熟悉用运放、电阻和电容组成有源低通滤波、高通滤波和带通、带阻滤波器。

2、学会测量有源滤波器的幅频特性。

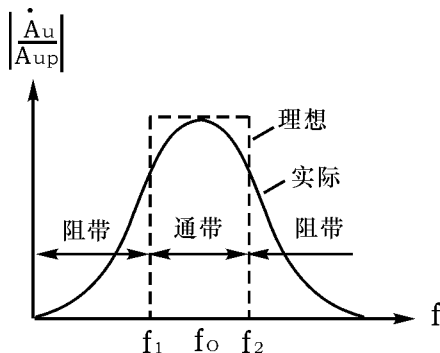
#### 二、实验原理



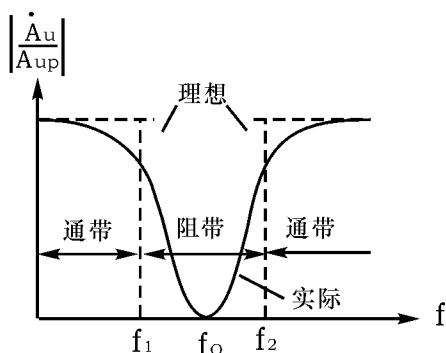
(a) 低通



(b) 高通



(c) 带通



(d) 带阻

图 9-1 四种滤波电路的幅频特性示意图

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 (LPF)、高通 (HPF)、带通 (BPF) 与带阻 (BEF) 等四种滤波器，它们的幅频特性如图 9—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，元件参数计算越繁琐，电路调试越困难。任何高阶滤波器均可以用较低的二阶 RC 有滤波器级联实现。

### 1、低通滤波器 (LPF)

低通滤波器是用来通过低频信号衰减或抑制高频信号。

如图 9—2 (a) 所示，为典型的二阶有源低通滤波器。它由两级 RC 滤波环节与同相比例运算电路组成，其中第一级电容 C 接至输出端，引入适量的正反馈，以改善幅频特性。

图 9—2 (b) 为二阶低通滤波器幅频特性曲线。

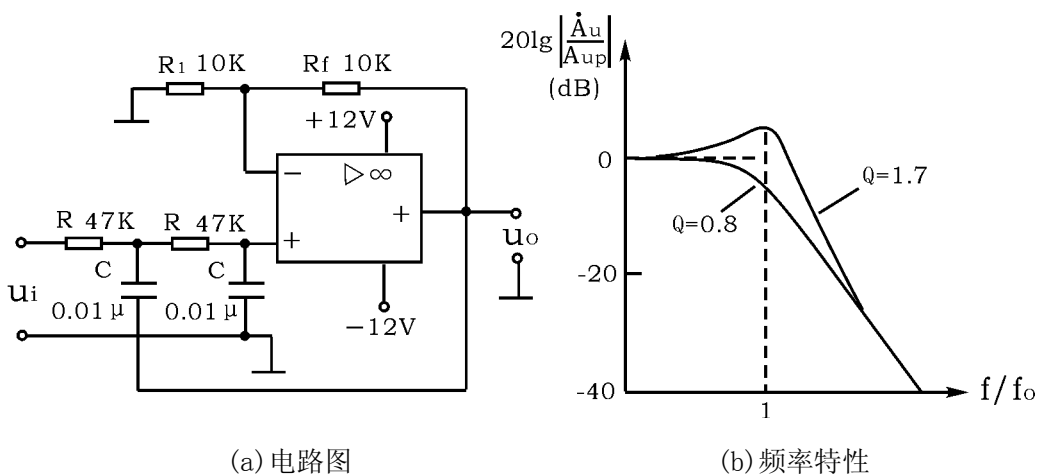


图 9—2 二阶低通滤波器

电路性能参数

$$A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1} \quad \text{二阶低通滤波器的通带增益}$$

$$f_o = \frac{1}{2\pi RC} \quad \text{截止频率，它是二阶低通滤波器通带与阻带的界限频率。}$$

$$Q = \frac{1}{3 - A_{up}} \quad \text{品质因数，它的大小影响低通滤波器在截止频率处幅频}$$

特性的形状。

## 2、高通滤波器 (HPF)

与低通滤波器相反，高通滤波器用来通过高频信号，衰减或抑制低频信号。

只要将图 9-2 低通滤波电路中起滤波作用的电阻、电容互换，即可变成二阶有源高通滤波器，如图 9-3(a) 所示。高通滤波器性能与低通滤波器相反，其频率响应和低通滤波器是“镜象”关系，仿照 LPH 分析方法，不难求得 HPF 的幅频特性。

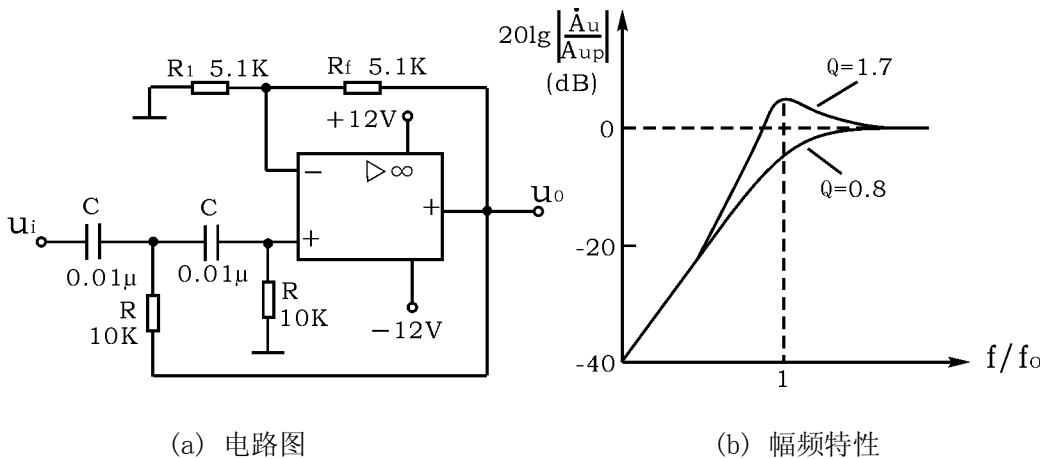


图 9-3 二阶高通滤波器

电路性能参数  $A_{up}$ 、 $f_o$ 、 $Q$  各量的函义同二阶低通滤波器。

图 9-3 (b) 为二阶高通滤波器的幅频特性曲线，可见，它与二阶低通滤



波器的幅频特性曲线有“镜像”关系。

### 3、带通滤波器 (BPF)

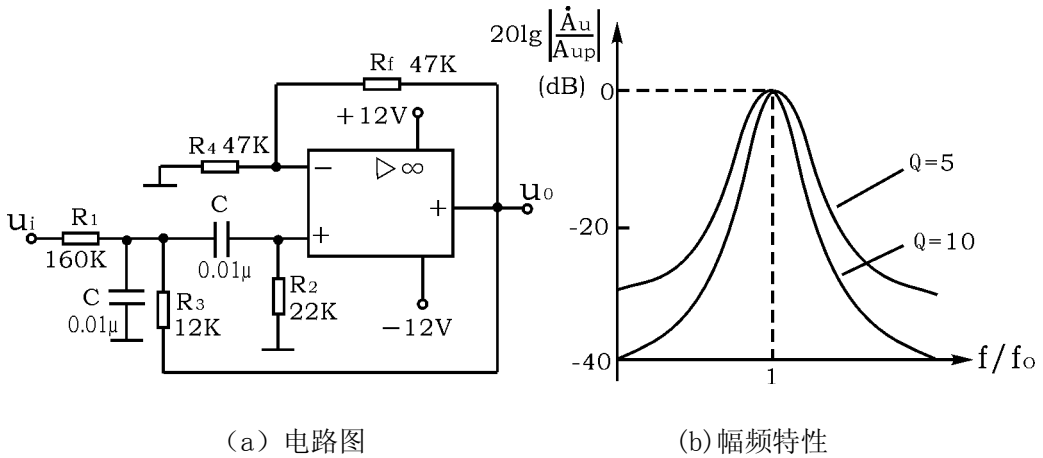


图 9-4 二阶带通滤波器

这种滤波器的作用是只允许在某一个通频带范围内的信号通过，而比通频带下限频率低和比上限频率高的信号均加以衰减或抑制。

典型的带通滤波器可以从二阶低通滤波器中将其中一级改成高通而成。如图 9-4 (a) 所示。

电路性能参数

通带增益 
$$A_{up} = \frac{R_4 + R_f}{R_4 R_1 C B}$$

中心频率 
$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_2 C^2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right)}$$

通带宽度 
$$B = \frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} - \frac{R_f}{R_3 R_4} \right)$$

选择性 
$$Q = \frac{\omega_0}{B}$$

此电路的优点是改变  $R_f$  和  $R_4$  的比例就可改变频宽而不影响中心频率。

### 4、带阻滤波器 (BEF)

如图 9-5 (a) 所示，这种电路的性能和带通滤波器相反，即在规定的频

带内，信号不能通过（或受到很大衰减或抑制），而在其余频率范围，信号则能顺利通过。

在双 T 网络后加一级同相比例运算电路就构成了基本的二阶有源 BEF。

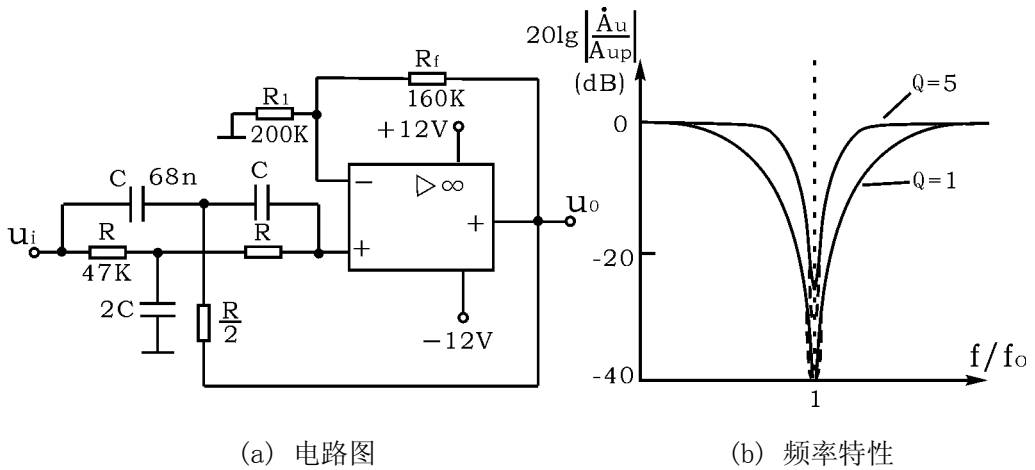


图 9—5 二阶带阻滤波器

### 电路性能参数

$$\text{通带增益} \quad A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$$

$$\text{中心频率} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$\text{带阻宽度} \quad B = 2(2 - A_{up}) f_0$$

$$\text{选择性} \quad Q = \frac{1}{2(2 - A_{up})}$$

### 三、实验设备与器件

- |              |             |
|--------------|-------------|
| 1、 ±12V 直流电源 | 4、 交流毫伏表    |
| 2、 函数信号发生器   | 5、 频率计      |
| 3、 双踪示波器     | 6、 μ A741×1 |

电阻器、电容器若干。

## 四、实验内容

### 1、二阶低通滤波器

实验电路如图 9-2(a)

(1) 粗测：接通  $\pm 12\text{V}$  电源。 $u_i$  接函数信号发生器，令其输出为  $U_i=1\text{V}$  的正弦波信号，在滤波器截止频率附近改变输入信号频率，用示波器或交流毫伏表观察输出电压幅度的变化是否具备低通特性，如不具备，应排除电路故障。

(2) 在输出波形不失真的条件下，选取适当幅度的正弦输入信号，在维持输入信号幅度不变的情况下，逐点改变输入信号频率。测量输出电压，记入表 9-1 中，描绘频率特性曲线。

表 9-1

f (Hz)	
$U_o$ (v)	

### 2、二阶高通滤波器

实验电路如图 9-3(a)

(1) 粗测：输入  $U_i=1\text{V}$  正弦波信号，在滤波器截止频率附近改变输入信号频率，观察电路是否具备高通特性。

(2) 测绘高通滤波器的幅频特性曲线，记入表 9-2。

表 9-2

f (Hz)	
$U_o$ (v)	

### 3、带通滤波器

实验电路如图 9-4(a)，测量其频率特性。记入表 9-3。

(1) 实测电路的中心频率  $f_0$

(2) 以实测中心频率为中心, 测绘电路的幅频特性

表 9-3

f (Hz)	
$U_0$ (v)	

#### 4、带阻滤波器

实验电路如图 9-5(a) 所示。

- (1) 实测电路的中心频率  $f_0$
- (2) 测绘电路的幅频特性, 记入表 9-4。

表 9-4

f (Hz)	
$U_0$ (v)	

### 五、实验总结

- 1、整理实验数据, 画出各电路实测的幅频特性。
- 2、根据实验曲线, 计算截止频率、中心频率, 带宽及品质因数。
- 3、总结有源滤波电路的特性。

### 六、预习要求

- 1、复习教材有关滤波器内容
- 2、分析图 9-2, 9-3, 9-4, 9-5 所示电路, 写出它们的增益特性表达式
- 3、计算图 9-2, 9-3 的截止频率, 9-4, 9-5 的中心频率
- 4、画出上述四种电路的幅频特性曲线



## 实验十 集成运算放大器的基本应用（Ⅲ）

### — 电压比较器 —

#### 一、实验目的

- 1、掌握电压比较器的电路构成及特点
- 2、学会测试比较器的方法

#### 二、实验原理

电压比较器是集成运放非线性应用电路，它将一个模拟量电压信号和一个参考电压相比较，在二者幅度相等的附近，输出电压将产生跃变，相应输出高电平或低电平。比较器可以组成非正弦波形变换电路及应用与模拟与数字信号转换等领域。

图 10-1 所示为一最简单的电压比较器， $U_R$  为参考电压，加在运放的同相输入端，输入电压  $u_i$  加在反相输入端。

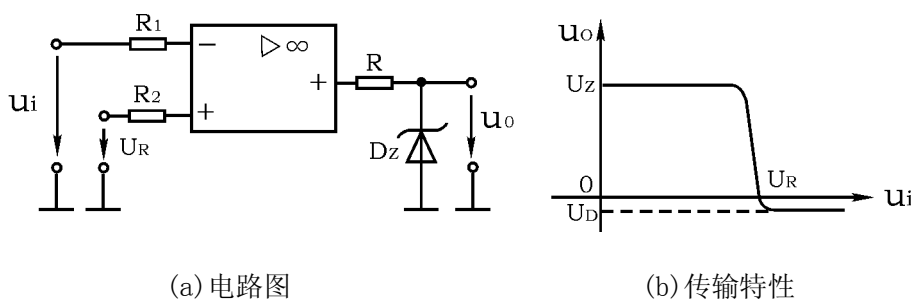


图 10-1 电压比较器

当  $u_i < U_R$  时，运放输出高电平，稳压管  $D_z$  反向稳压工作。输出端电位被其箝位在稳压管的稳定电压  $U_Z$ ，即  $u_o = U_Z$

当  $u_i > U_R$  时，运放输出低电平， $D_z$  正向导通，输出电压等于稳压管的正向压降  $U_D$ ，即  $u_o = -U_D$

因此，以  $U_R$  为界，当输入电压  $u_i$  变化时，输出端反映出两种状态。高电位和低电位。

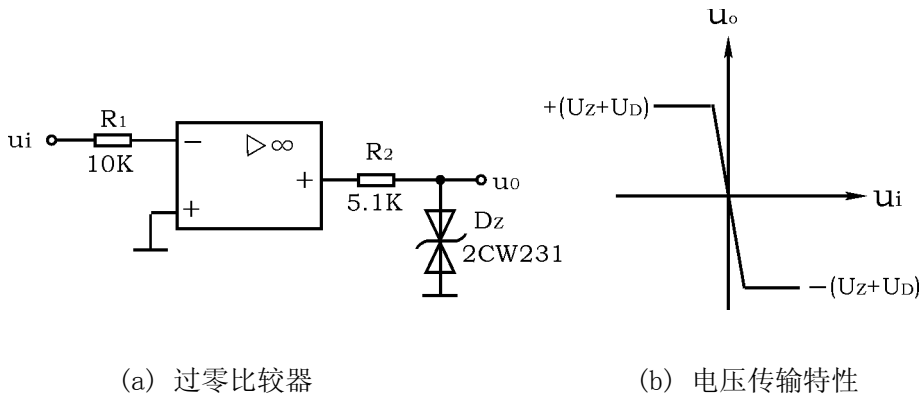
表示输出电压与输入电压之间关系的特性曲线，称为传输特性。图 11—1 (b) 为 (a) 图比较器的传输特性。

常用的电压比较器有过零比较器、具有滞回特性的过零比较器、双限比较器（又称窗口比较器）等。

### 1、过零比较器

电路如图 10—2 所示为加限幅电路的过零比较器， $D_z$  为限幅稳压管。信号从运放的反相输入端输入，参考电压为零，从同相端输入。当  $U_i > 0$  时，输出  $U_o = -(U_z + U_D)$ ，当  $U_i < 0$  时， $U_o = +(U_z + U_D)$ 。其电压传输特性如图 10—2 (b) 所示。

过零比较器结构简单，灵敏度高，但抗干扰能力差。



(a) 过零比较器

(b) 电压传输特性

图 10—2 过零比较器

### 2、滞回比较器

图 10—3 为具有滞回特性的过零比较器

过零比较器在实际工作时，如果  $u_i$  恰好在过零值附近，则由于零点漂移的存在， $u_o$  将不断由一个极限值转换到另一个极限值，这在控制系统中，对执行机构将是很不利的。为此，就需要输出特性具有滞回现象。如图 10—3 所示，从输出端引一个电阻分压正反馈支路到同相输入端，若  $u_o$  改变状态， $\Sigma$  点也随

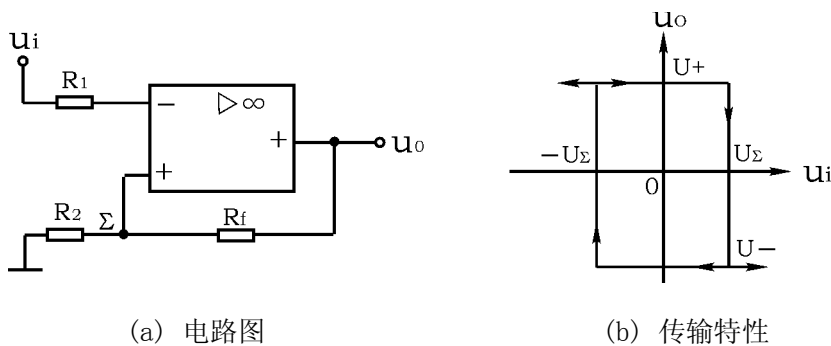


图 10-3 滞回比较器

着改变电位，使过零点离开原来位置。当  $u_o$  为正（记作  $U_+$ ） $U_\Sigma = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_+$ ，则当  $u_i > U_\Sigma$  后， $u_o$  即由正变负（记作  $U_-$ ），此时  $U_\Sigma$  变为  $-U_\Sigma$ 。故只有当  $u_i$  下降到  $-U_\Sigma$  以下，才能使  $u_o$  再度回升到  $U_+$ ，于是出现图 10-3(b) 中所示的滞回特性。 $-U_\Sigma$  与  $U_\Sigma$  的差别称为回差。改变  $R_2$  的数值可以改变回差的大小。

### 3、窗口（双限）比较器

简单的比较器仅能鉴别输入电压  $u_i$  比参考电压  $U_R$  高或低的情况，窗口比较电路是由两个简单比较器组成，如图 10-4 所示，它能指示出  $u_i$  值是否处于  $U_R^+$  和  $U_R^-$  之间。如  $U_R^- < u_i < U_R^+$ ，窗口比较器的输出电压  $U_o$  等于运放的正饱和输出电压 ( $+U_{Omax}$ )，如果  $u_i < U_R^-$  或  $u_i > U_R^+$ ，则输出电压  $U_o$  等于运放的负饱和输出电压 ( $-U_{Omax}$ )。

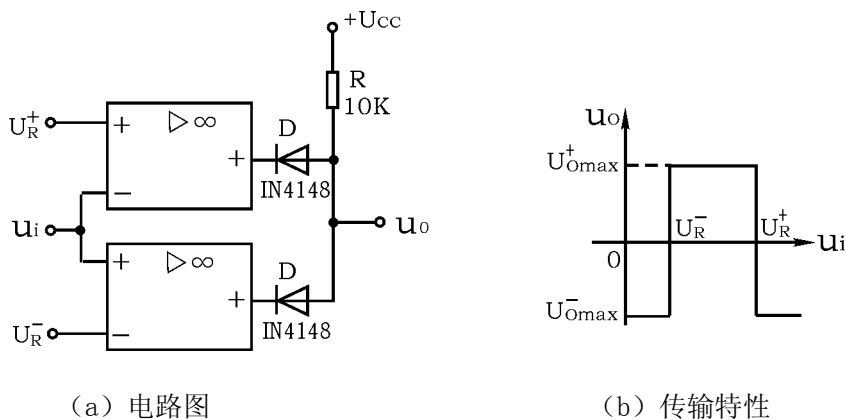


图 10-4 由两个简单比较器组成的窗口比较器



### 三、实验设备与器件

- |                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| 1、 ±12V 直流电源             | 4、 直流电压表                     |
| 2、 函数信号发生器               | 5、 交流毫伏表                     |
| 3、 双踪示波器                 | 6、 运算放大器 $\mu A741 \times 2$ |
| 7、 稳压管 2CW231 $\times 1$ | 8、 二极管 4148 $\times 2$       |
- 电阻器等

### 四、实验内容

#### 1、 过零比较器

实验电路如图 10-2 所示

- (1) 接通 ±12V 电源。
- (2) 测量  $u_i$  悬空时的  $U_0$  值。
- (3)  $u_i$  输入 500Hz、幅值为 2V 的正弦信号，观察  $u_i \rightarrow u_0$  波形并记录。
- (4) 改变  $u_i$  幅值，测量传输特性曲线。

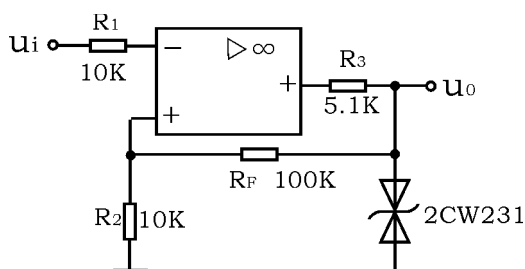


图 10-5 反相滞回比较器

#### 2、 反相滞回比较器

实验电路如图 10-5 所示

- (1) 按图接线， $u_i$  接 +5V 可调直流电源，测出  $u_0$  由  $+U_{omcx} \rightarrow -U_{omcx}$  时  $u_i$  的临界值。
- (2) 同上，测出  $u_0$  由  $-U_{omcx} \rightarrow +U_{omcx}$  时  $u_i$  的临界值。
- (3)  $u_i$  接 500Hz，峰值为 2V 的正弦信号，观察并记录  $u_i \rightarrow u_0$  波形。

(4) 将分压支路 100K 电阻改为 200K，重复上述实验，测定传输特性。

### 3、同相滞回比较器

实验线路如图 10-6 所示

(1) 参照 2，自拟实验步骤及方法

(2) 将结果与 2 进行比较

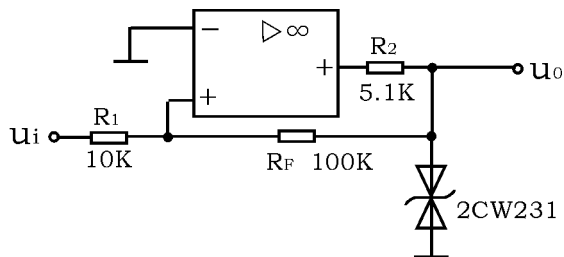


图 10-6 同相滞回比较器

### 4、窗口比较器

参照图 10-4 自拟实验步骤和方法测定其传输特性。

## 五、实验总结

1、整理实验数据，绘制各类比较器的传输特性曲线

2、总结几种比较器的特点，阐明它们的应用。

## 六、预习要求

1、复习教材有关比较器的内容

2、画出各类比较器的传输特性曲线。

3、若要将图 10-4 窗口比较器的电压传输曲线高、低电平对调，应如何改动比较器电路。

# 实验十一 集成运算放大器的基本应用（IV）

## — 波形发生器 —

### 一、实验目的

- 1、学习用集成运放构成正弦波、方波和三角波发生器。
- 2、学习波形发生器的调整和主要性能指标的测试方法。

### 二、实验原理

由集成运放构成的正弦波、方波和三角波发生器有多种形式，本实验选用最常用的，线路比较简单的几种电路加以分析。

#### 1、RC 桥式正弦波振荡器（文氏电桥振荡器）

图 11-1 为 RC 桥式正弦波振荡器。其中 RC 串、并联电路构成正反馈支路，同时兼作选频网络， $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_w$  及二极管等元件构成负反馈和稳幅环节。调节电位器  $R_w$ ，可以改变负反馈深度，以满足振荡的振幅条件和改善波形。利用两个反向并联二极管  $D_1$ 、 $D_2$  正向电阻的非线性特性来实现稳幅。 $D_1$ 、 $D_2$  采用硅管（温度稳定性好），且要求特性匹配，才能保证输出波形正、负半周对称。 $R_3$  的接入是为了削弱二极管非线性的影响，以改善波形失真。

电路的振荡频率

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

起振的幅值条件

$$\frac{R_f}{R_1} \geq 2$$

式中  $R_f = R_w + R_2 + (R_3 // r_D)$ ， $r_D$  — 二极管正向导通电阻。

调整反馈电阻  $R_f$ （调  $R_w$ ），使电路起振，且波形失真最小。如不能起振，则说明负反馈太强，应适当加大  $R_f$ 。如波形失真严重，则应适当减小  $R_f$ 。

改变选频网络的参数 C 或 R，即可调节振荡频率。一般采用改变电容 C 作频率量程切换，而调节 R 作量程内的频率细调。

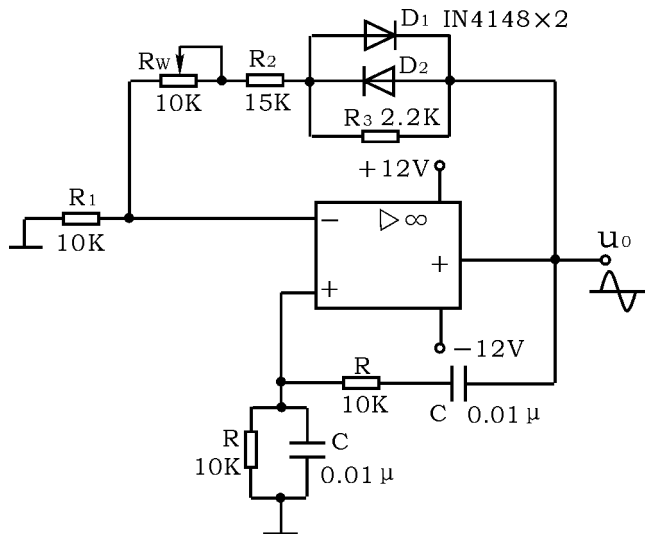


图 11-1 RC 桥式正弦波振荡器

## 2、方波发生器

由集成运放构成的方波发生器和三角波发生器，一般均包括比较器和 RC 积分器两大部分。图 11-2 所示为由滞回比较器及简单 RC 积分电路组成的方波—三角波发生器。它的特点是线路简单，但三角波的线性度较差。主要用于产生方波，或对三角波要求不高的场合。

$$\text{电路振荡频率} \quad f_o = \frac{1}{2R_f C_f \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)}$$

$$\text{式中} \quad R_1 = R_1' + R_w' \quad R_2 = R_2' + R_w''$$

$$\text{方波输出幅值} \quad U_{om} = \pm U_z$$

$$\text{三角波输出幅值} \quad U_{cm} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_z$$

调节电位器  $R_w$  (即改变  $R_2 / R_1$ )，可以改变振荡频率，但三角波的幅值也随之变化。如要互不影响，则可通过改变  $R_f$  (或  $C_f$ ) 来实现振荡频率的调节。

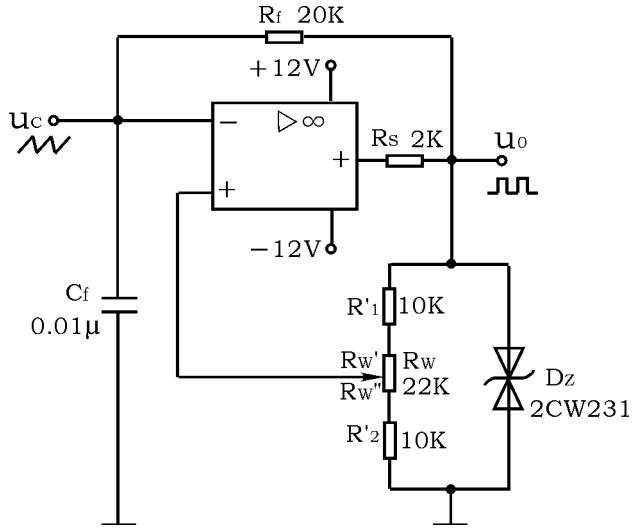


图 11-2 方波发生器

### 3、 三角波和方波发生器

如把滞回比较器和积分器首尾相接形成正反馈闭环系统，如图 11-3 所示，则比较器  $A_1$  输出的方波经积分器  $A_2$  积分可得到三角波，三角波又触发比较器自动翻转形成方波，这样即可构成三角波、方波发生器。图 11-4 为方波、三角波发生器输出波形图。由于采用运放组成的积分电路，因此可实现恒流充电，使三角波线性大大改善。

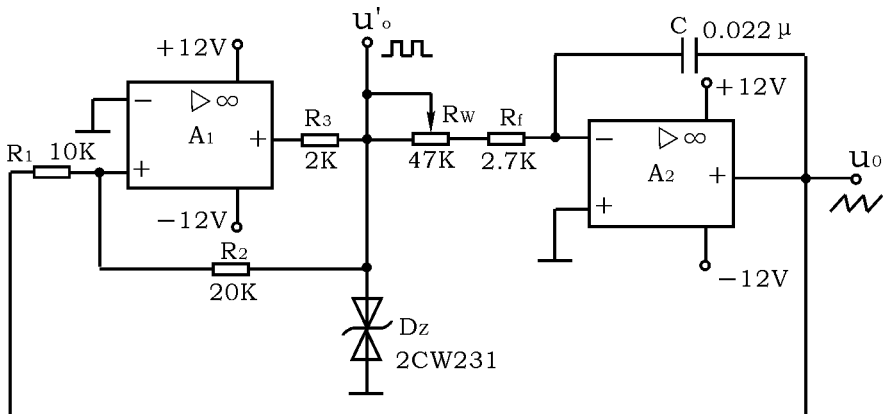


图 11-3 三角波、方波发生器

电路振荡频率  $f_0 = \frac{R_2}{4R_1(R_f + R_w)C_f}$

方波幅值  $U'_{om} = \pm U_z$

三角波幅值  $U_{om} = \frac{R_1}{R_2} U_z$

调节  $R_w$  可以改变振荡频率，改变比值  $\frac{R_1}{R_2}$  可调节三角波的幅值。

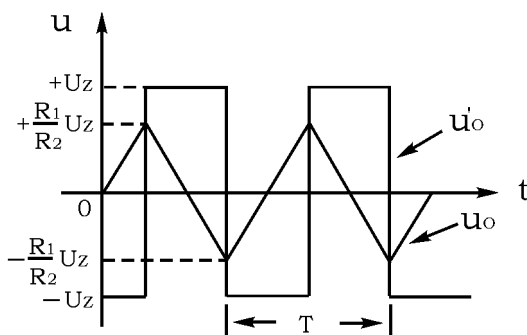


图 11-4 方波、三角波发生器输出波形图

### 三、实验设备与器件

- |                               |                         |
|-------------------------------|-------------------------|
| 1、±12V 直流电源                   | 2、双踪示波器                 |
| 3、交流毫伏表                       | 4、频率计                   |
| 5、集成运算放大器 $\mu A741 \times 2$ | 6、二极管 IN4148 $\times 2$ |
| 7、稳压管 2CW231 $\times 1$       | 电阻器、电容器若干。              |

### 四、实验内容

#### 1、RC 桥式正弦波振荡器

按图 11-1 连接实验电路。

1) 接通 ±12V 电源，调节电位器  $R_w$ ，使输出波形从无到有，从正弦波到出现失真。描绘  $u_o$  的波形，记下临界起振、正弦波输出及失真情况下的  $R_w$  值，

分析负反馈强弱对起振条件及输出波形的影响。

2) 调节电位器  $R_w$ ，使输出电压  $u_0$  幅值最大且不失真，用交流毫伏表分别测量输出电压  $U_0$ 、反馈电压  $U_+$  和  $U_-$ ，分析研究振荡的幅值条件。

3) 用示波器或频率计测量振荡频率  $f_0$ ，然后在选频网络的两个电阻  $R$  上并联同一阻值电阻，观察记录振荡频率的变化情况，并与理论值进行比较。

4) 断开二极管  $D_1$ 、 $D_2$ ，重复 2) 的内容，将测试结果与 2) 进行比较，分析  $D_1$ 、 $D_2$  的稳幅作用。

#### \*5) RC 串并网络幅频特性观察

将 RC 串并网络与运放断开，由函数信号发生器注入 3V 左右正弦信号，并用双踪示波器同时观察 RC 串并网络输入、输出波形。保持输入幅值 (3V) 不变，从低到高改变频率，当信号源达某一频率时，RC 串并网络输出将达最大值 (约 1V)，且输入、输出同相位。此时的信号源频率

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

## 2、方波发生器

按图 11-2 连接实验电路。

1) 将电位器  $R_w$  调至中心位置，用双踪示波器观察并描绘方波  $u_0$  及三角波  $u_c$  的波形 (注意对应关系)，测量其幅值及频率，记录之。

2) 改变  $R_w$  动点的位置，观察  $u_0$ 、 $u_c$  幅值及频率变化情况。把动点调至最上端和最下端，测出频率范围，记录之。

3) 将  $R_w$  恢复至中心位置，将一只稳压管短接，观察  $u_0$  波形，分析  $D_z$  的限幅作用。

## 3、三角波和方波发生器

按图 11-3 连接实验电路。

1) 将电位器  $R_w$  调至合适位置，用双踪示波器观察并描绘三角波输出  $u_0$  及方波输出  $u_0'$ ，测其幅值、频率及  $R_w$  值，记录之。

2) 改变  $R_w$  的位置，观察对  $u_0$ 、 $u_0'$  幅值及频率的影响。

3) 改变  $R_1$  (或  $R_2$ )，观察对  $u_0$ 、 $u_0'$  幅值及频率的影响。

## 五、实验总结

### 1、 正弦波发生器

- 1) 列表整理实验数据，画出波形，把实测频率与理论值进行比较
- 2) 根据实验分析 RC 振荡器的振幅条件
- 3) 讨论二极管  $D_1$ 、 $D_2$  的稳幅作用。

### 2、 方波发生器

1) 列表整理实验数据，在同一坐标纸上，按比例画出方波和三角波的波形图（标出时间和电压幅值）。

- 2) 分析  $R_w$  变化时，对  $u_0$  波形的幅值及频率的影响。
- 3) 讨论  $D_z$  的限幅作用。

### 3、 三角波和方波发生器

- 1) 整理实验数据，把实测频率与理论值进行比较。
- 2) 在同一坐标纸上，按比例画出三角波及方波的波形，并标明时间和电压幅值。
- 3) 分析电路参数变化（ $R_1$ ， $R_2$  和  $R_w$ ）对输出波形频率及幅值的影响。

## 六、预习要求

1、 复习有关 RC 正弦波振荡器、三角波及方波发生器的工作原理，并估算图 11-1、11-2、11-3 电路的振荡频率。

### 2、 设计实验表格

3、 为什么在 RC 正弦波振荡电路中要引入负反馈支路？为什么要增加二极管  $D_1$  和  $D_2$ ？它们是怎样稳幅的？

4、 电路参数变化对图 11-2、11-3 产生的方波和三角波频率及电压幅值有什么影响？（或者：怎样改变图 11-2、11-3 电路中方波及三角波的频率及幅值？）

5、 在波形发生器各电路中，“相位补偿”和“调零”是否需要？为什么？

6、 怎样测量非正弦波电压的幅值？



## 实验十二 RC 正弦波振荡器

### 一、实验目的

- 1、进一步学习 RC 正弦波振荡器的组成及其振荡条件
- 2、学会测量、调试振荡器

### 二、实验原理

从结构上看，正弦波振荡器是没有输入信号的，带选频网络的正反馈放大器。若用 R、C 元件组成选频网络，就称为 RC 振荡器，一般用来产生 1Hz~1MHz 的低频信号。

#### 1、RC 移相振荡器

电路型式如图 12-1 所示, 选择  $R \gg R_i$ 。

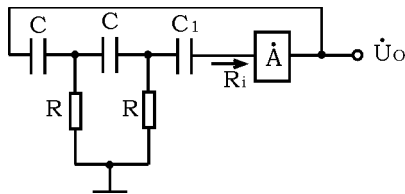


图 12-1 RC 移相振荡器原理图

振荡频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{6RC}}$

起振条件 放大器 A 的电压放大倍数  $|\dot{A}| > 29$

电路特点 简便，但选频作用差，振幅不稳，频率调节不便，一般用于频率固定且稳定性要求不高的场合。

频率范围 几赫~数十千赫。

#### 2、RC 串并网络（文氏桥）振荡器

电路型式如图 12-2 所示。

振荡频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

起振条件  $|\dot{A}| > 3$

电路特点 可方便地连续改变振荡频率，便于加负反馈稳幅，容易得到良好的振荡波形。

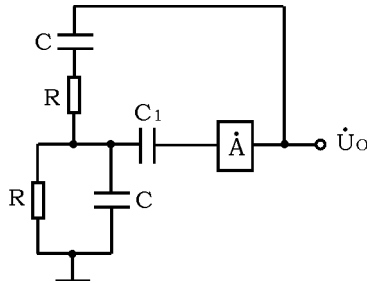


图 12-2 RC串并联网络振荡器原理图

### 3、双 T 选频网络振荡器

电路型式如图 12-3 所示。

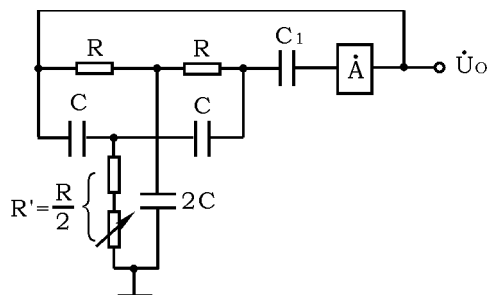


图 12-3 双 T 选频网络振荡器原理图

振荡频率  $f_0 = \frac{1}{5RC}$

起振条件  $R' < \frac{R}{2} \quad |\dot{A}\dot{F}| > 1$

电路特点 选频特性好，调频困难，适于产生单一频率的振荡。

注：本实验采用两级共射极分立元件放大器组成 RC 正弦波振荡器。

### 三、实验设备与器件

- |              |                     |
|--------------|---------------------|
| 1、 +12V 直流电源 | 2、 函数信号发生器          |
| 3、 双踪示波器     | 4、 频率计              |
| 5、 直流电压表     | 6、 3DG12×2 或 9013×2 |
- 电阻、电容、电位器等

### 四、实验内容

#### 1、 RC 串并联选频网络振荡器

(1) 按图 12—4 组接线路

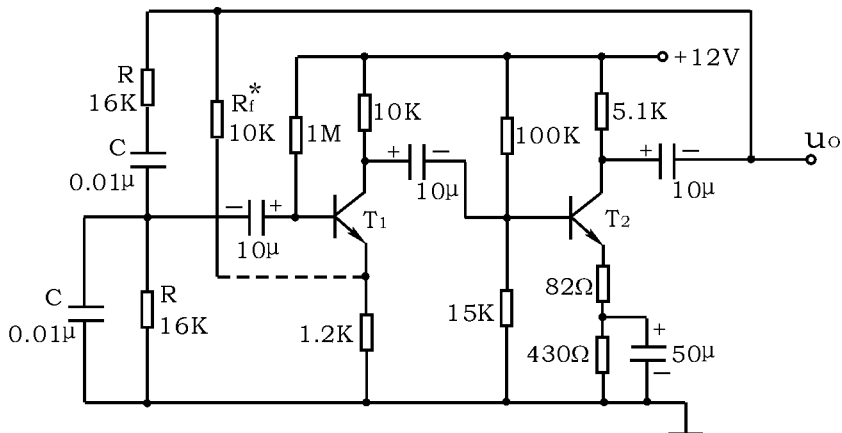


图 12—4 RC 串并联选频网络振荡器

- (2) 断开 RC 串并联网路，测量放大器静态工作点及电压放大倍数。
  - (3) 接通 RC 串并联网路，并使电路起振，用示波器观测输出电压  $u_o$  波形，调节  $R_f$  使获得满意的正弦信号，记录波形及其参数。
  - (4) 测量振荡频率，并与计算值进行比较。
  - (5) 改变 R 或 C 值，观察振荡频率变化情况。
  - (6) RC 串并联网路幅频特性的观察
- 将 RC 串并联网路与放大器断开，用函数信号发生器的正弦信号注入 RC 串

并网络，保持输入信号的幅度不变（约 3V），频率由低到高变化，RC 串并网络输出幅值将随之变化，当信号源达某一频率时，RC 串并网络的输出将达最大值（约 1V 左右）。且输入、输出同相位，此时信号源频率为

$$f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$$

## 2、双 T 选频网络振荡器

- (1) 按图 12-5 组接线路
- (2) 断开双 T 网络，调试  $T_1$  管静态工作点，使  $U_{C1}$  为 6~7V。
- (3) 接入双 T 网络，用示波器观察输出波形。若不起振，调节  $R_{w1}$ ，使电路起振。
- (4) 测量电路振荡频率，并与计算值比较。

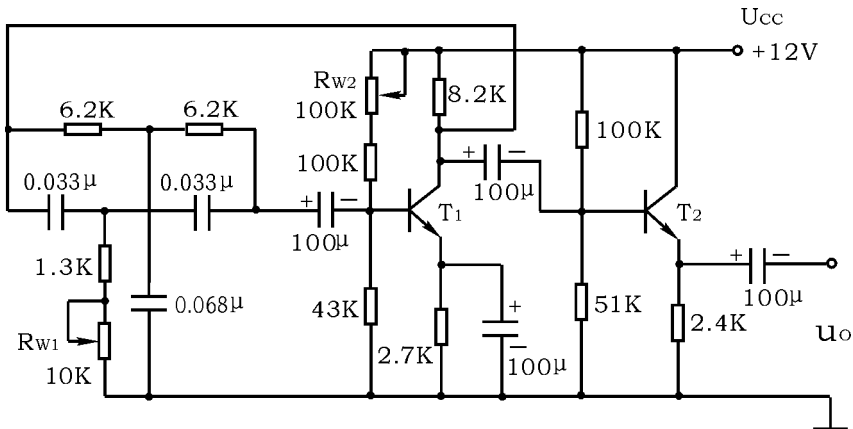


图 12-5 双 T 网络 RC 正弦波振荡器

## \* 3、RC 移相式振荡器的组装与调试

- (1) 按图 12-6 组接线路
- (2) 断开 RC 移相电路，调整放大器的静态工作点，测量放大器电压放大倍数。
- (3) 接通 RC 移相电路，调节  $R_{b2}$  使电路起振，并使输出波形幅度最大，用示波器观测输出电压  $u_0$  波形，同时用频率计和示波器测量振荡频率，并与理论

值比较。

\* 参数自选，时间不够可不作。

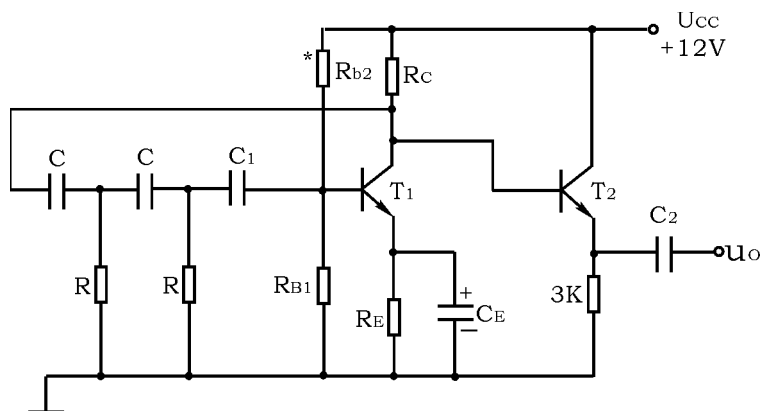


图 12-6 RC 移相式振荡器

## 五、实验总结

1、由给定电路参数计算振荡频率，并与实测值比较，分析误差产生的原因。

2、总结三类 RC 振荡器的特点。

## 六、预习要求

1、复习教材有关三种类型 RC 振荡器的结构与工作原理。

2、计算三种实验电路的振荡频率。

3、如何用示波器来测量振荡电路的振荡频率。

## 实验十三 LC 正弦波振荡器

### 一、实验目的

- 1、掌握变压器反馈式 LC 正弦波振荡器的调整和测试方法
- 2、研究电路参数对 LC 振荡器起振条件及输出波形的影响

### 二、实验原理

LC 正弦波振荡器是用 L、C 元件组成选频网络的振荡器，一般用来产生 1MHz 以上的高频正弦信号。根据 LC 调谐回路的不同连接方式，LC 正弦波振荡器又可分为变压器反馈式（或称互感耦合式）、电感三点式和电容三点式三种。图 13-1 为变压器反馈式 LC 正弦波振荡器的实验电路。其中晶体三极管  $T_1$  组成共射放大电路，变压器  $T_r$  的原绕组  $L_1$ （振荡线圈）与电容 C 组成调谐回路，它既做为放大器的负载，又起选频作用，副绕组  $L_2$  为反馈线圈， $L_3$  为输出线圈。

该电路是靠变压器原、副绕组同名端的正确连接（如图中所示），来满足自激振荡的相位条件，即满足正反馈条件。在实际调试中可以通过把振荡线圈  $L_1$  或反馈线圈  $L_2$  的首、末端对调，来改变反馈的极性。而振幅条件的满足，一是靠合理选择电路参数，使放大器建立合适的静态工作点，其次是改变线圈  $L_2$  的匝数，或它与  $L_1$  之间的耦合程度，以得到足够强的反馈量。稳幅作用是利用晶体管的非线性来实现的。由于 LC 并联谐振回路具有良好的选频作用，因此输出电压波形一般失真不大。

振荡器的振荡频率由谐振回路的电感和电容决定

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

式中 L 为并联谐振回路的等效电感（即考虑其它绕组的影响）。

振荡器的输出端增加一级射极跟随器，用以提高电路的带负载能力。

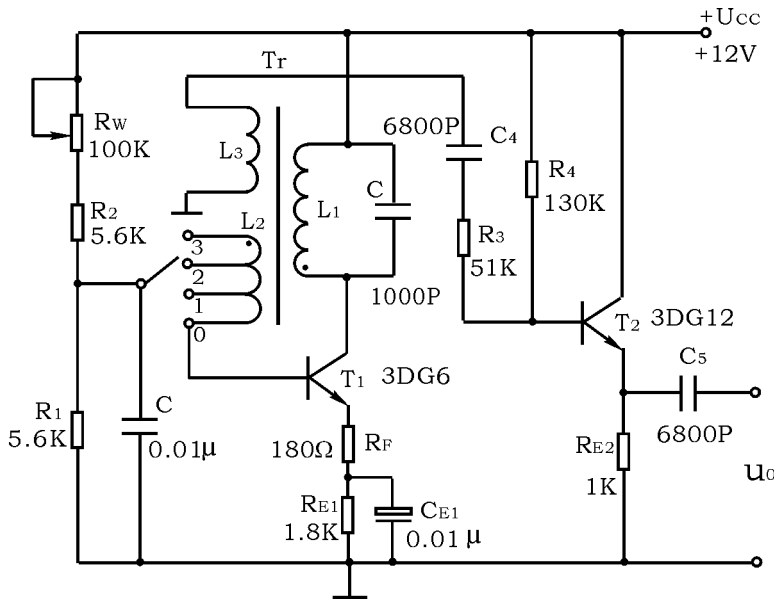


图 13-1 LC 正弦波振荡器实验电路

### 三、实验设备与器件

- |                          |                  |
|--------------------------|------------------|
| 1、 +12V 直流电源             | 2、 双踪示波器         |
| 3、 交流毫伏表                 | 4、 直流电压表         |
| 5、 频率计                   | 6、 振荡线圈          |
| 7、 晶体三极管 3DG6×1 (9011×1) |                  |
|                          | 3DG12×1 (9013×1) |

电阻器、电容器若干。

### 四、实验内容

按图 13-1 连接实验电路。电位器  $R_w$  置最大位置，振荡电路的输出端接示波器。

#### 1、静态工作点的调整

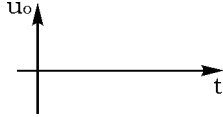
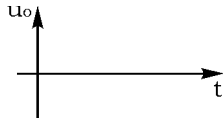

1) 接通  $U_{CC} = +12$  电源，调节电位器  $R_w$ ，使输出端得到不失真的正弦波形，如不起振，可改变  $L_2$  的首末端位置，使之起振。

测量两管的静态工作点及正弦波的有效值  $U_0$ ，记入表 13-1。

2) 把  $R_w$  调小, 观察输出波形的变化。测量有关数据, 记入表 13-1。

3) 调大  $R_w$ , 使振荡波形刚刚消失, 测量有关数据, 记入表 13-1。

表 13-1

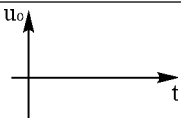
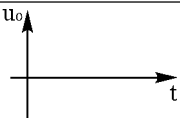
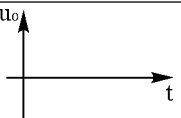
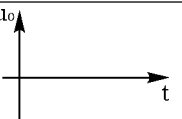
		$U_B$ (V)	$U_E$ (V)	$U_C$ (V)	$I_C$ (mA)	$U_o$ (V)	$u_o$ 波形
$R_w$ 居中	$T_1$						
	$T_2$						
$R_w$ 小	$T_1$						
	$T_2$						
$R_w$ 大	$T_1$						
	$T_2$						

根据以上三组数据, 分析静态工作点对电路起振、输出波形幅度和失真的影响。

## 2、 观察反馈量大小对输出波形的影响

置反馈线圈  $L_2$  于位置 “0” (无反馈)、“1” (反馈量不足)、“2” (反馈量合适)、“3” (反馈量过强) 时测量相应的输出电压波形, 记入表 13-2。

表 13-2

$L_2$ 位置	“0”	“1”	“2”	“3”
$u_o$ 波形				

## 3、 验证相位条件

改变线圈  $L_2$  的首、末端位置, 观察停振现象;

恢复  $L_2$  的正反馈接法, 改变  $L_1$  的首末端位置, 观察停振现象。

## 4、 测量振荡频率

调节  $R_w$  使电路正常起振, 同时用示波器和频率计测量以下两种情况下的振



荡频率  $f_0$ ，记入表 13-3。

谐振回路电容 1)  $C=1000\text{Pf}$ 。

2)  $C=100\text{Pf}$  。

表 13-3

C (pf)	1000	100
f (KHz)		

5、观察谐振回路 Q 值对电路工作的影响

谐振回路两端并入  $R=5.1\text{K}\Omega$  的电阻，观察 R 并入前后振荡波形的变化情况。

## 五、实验总结

1、整理实验数据，并分析讨论：

- 1) LC 正弦波振荡器的相位条件和幅值条件。
- 2) 电路参数对 LC 振荡器起振条件及输出波形的影响。

2、讨论实验中发现的问题及解决办法。

## 六、预习要求

1、复习教材中有关 LC 振荡器内容。

2、LC 振荡器是怎样进行稳幅的？在不影响起振的条件下，晶体管的集电极电流是大一些好，还是小一些好？

1、为什么可以用测量停振和起振两种情况下晶体管的  $U_{BE}$  变化，来判断振荡器是否起振？

## 实验十四 函数信号发生器的组装与调试

### 一、实验目的

- 1、了解单片多功能集成电路函数信号发生器的功能及特点
- 2、进一步掌握波形参数的测试方法

### 二、实验原理

1、ICL8038 是单片集成函数信号发生器，其内部框图如图 14-1 所示。它由恒流源  $I_1$  和  $I_2$ 、电压比较器 A 和 B、触发器、缓冲器和三角波变正弦波电路等组成。

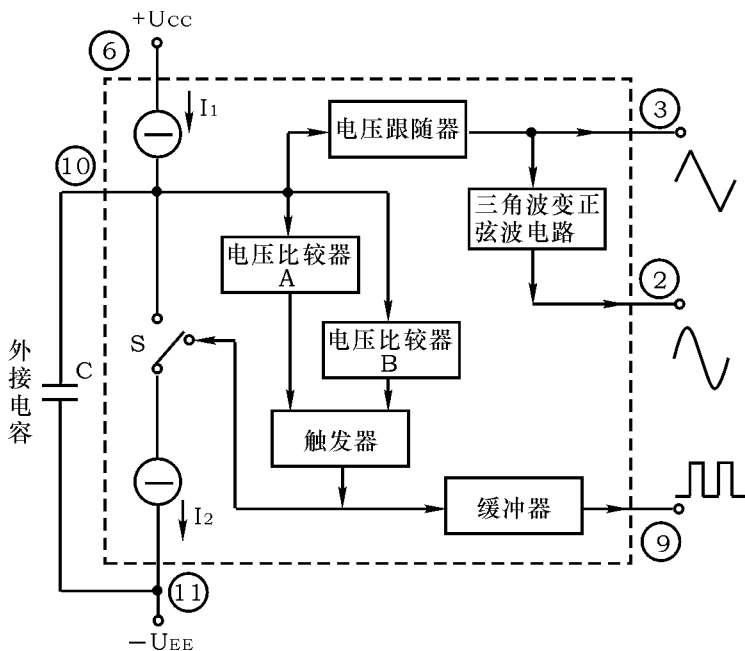


图 14-1 ICL8038 原理框图

外接电容  $C$  由两个恒流源充电和放电，电压比较器 A、B 的阈值分别为电源电压（指  $U_{CC} + U_{EE}$ ）的  $2/3$  和  $1/3$ 。恒流源  $I_1$  和  $I_2$  的大小可通过外接电阻调节，但必须  $I_2 > I_1$ 。当触发器的输出为低电平时，恒流源  $I_2$  断开，恒流源  $I_1$  给  $C$  充电，它的两端电压  $u_c$  随时间线性上升，当  $u_c$  达到电源电压的  $2/3$  时，

电压比较器 A 的输出电压发生跳变，使触发器输出由低电平变为高电平，恒流源  $I_2$  接通，由于  $I_2 > I_1$ （设  $I_2 = 2I_1$ ），恒流源  $I_2$  将电流  $2I_1$  加到 C 上反充电，相当于 C 由一个净电流  $I$  放电，C 两端的电压  $u_c$  又转为直线下降。当它下降到电源电压的  $1/3$  时，电压比较器 B 的输出电压发生跳变，使触发器的输出由高电平跳变为原来的低电平，恒流源  $I_2$  断开， $I_1$  再给 C 充电，…如此周而复始，产生振荡。若调整电路，使  $I_2 = 2I_1$ ，则触发器输出为方波，经反相缓冲器由管脚⑨输出方波信号。C 上的电压  $u_c$ ，上升与下降时间相等，为三角波，经电压跟随器从管脚③输出三角波信号。将三角波变成正弦波是经过一个非线性的变换网络（正弦波变换器）而得以实现，在这个非线性网络中，当三角波电位向两端顶点摆动时，网络提供的交流通路阻抗会减小，这样就使三角波的两端变为平滑的正弦波，从管脚②输出。

## 2、ICL8038 管脚功能图

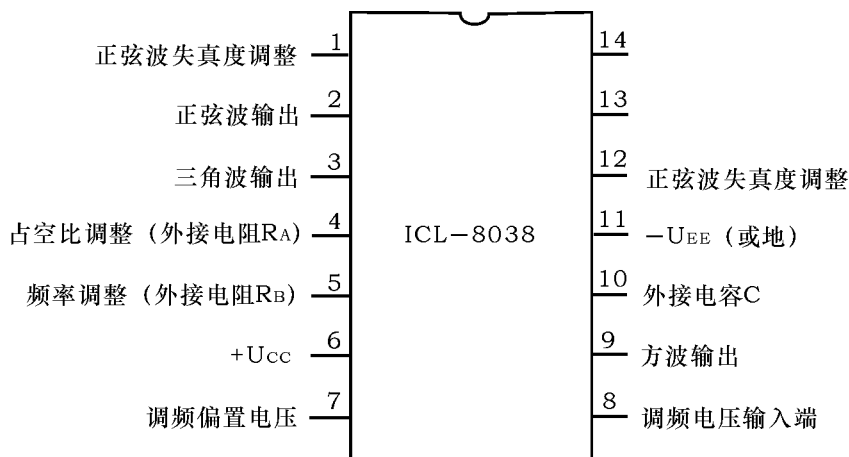


图 14-2 ICL8038 管脚图

电源电压  $\begin{cases} \text{单电源 } 10 \sim 30\text{V} \\ \text{双电源 } \pm 5\text{V} \sim \pm 15\text{V} \end{cases}$

3、实验电路如图 14-3 所示

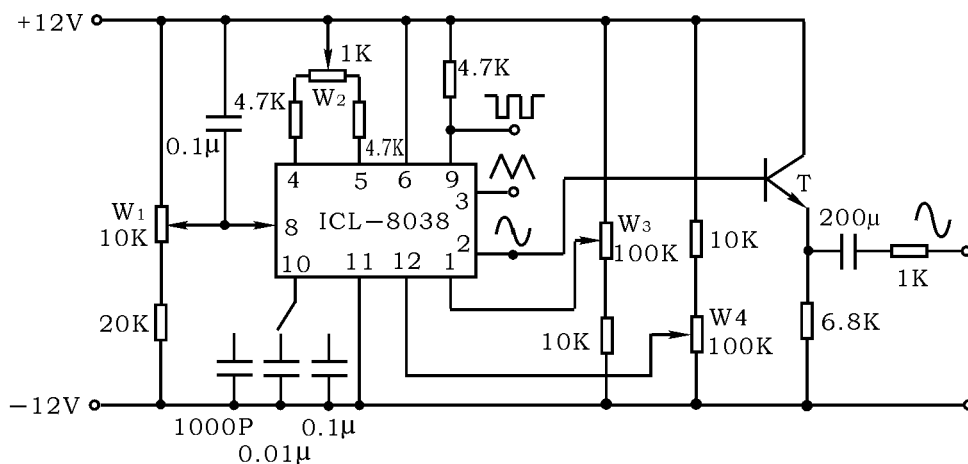


图 14-3 ICL8038 实验电路图

### 三、实验设备与器件

- |              |                        |
|--------------|------------------------|
| 1、 ±12V 直流电源 | 2、 双踪示波器               |
| 3、 频率计       | 4、 直流电压表               |
| 5、 ICL8038   | 6、 晶体三极管 3DG12×1(9013) |
- 电位器、电阻器、电容器等

### 四、实验内容

- 按图 14-3 所示的电路图组装电路，取  $C=0.01\mu f$ ， $W_1$ 、 $W_2$ 、 $W_3$ 、 $W_4$  均置中间位置。
- 调整电路，使其处于振荡，产生方波，通过调整电位器  $W_2$ ，使方波的占空比达到 50%。
- 保持方波的占空比为 50% 不变，用示波器观测 8038 正弦波输出端的波形，反复调整  $W_3$ 、 $W_4$ ，使正弦波不产生明显的失真。
- 调节电位器  $W_1$ ，使输出信号从小到大变化，记录管脚 8 的电位及测量输出正弦波的频率，列表记录之。

5、 改变外接电容  $C$  的值（取  $C=0.1$  和  $1000P$ ）， 观测三种输出波形， 并与  $C=0.01 \mu f$  时测得的波形作比较， 有何结论？

6、 改变电位器  $W_2$  的值， 观测三种输出波形， 有何结论？

7、 如有失真度测试仪， 则测出  $C$  分别为  $0.1 \mu f$ ，  $0.01 \mu f$  和  $1000P$  时的正弦波失真系数  $r$  值（一般要求该值小于  $3\%$ ）。

## 五、预习要求

1、 翻阅有关 ICL8038 的资料， 熟悉管脚的排列及其功能。

2、 如果改变了方波的占空比， 试问此时三角波和正弦波输出端将会变成怎样的一个波形？

## 六、实验总结

1、 分别画出  $C=0.1 \mu f$ ，  $C=0.01 \mu f$ ，  $1000P$  时所观测到的方波， 三角波和正弦波的波形图， 从中得出什么结论。

2、 列表整理  $C$  取不同值时三种波形的频率和幅值。

1、 组装、 调整函数信号发生器的心得、 体会。

## 实验十五 压控振荡器

### 一、实验目的

了解压控振荡器的组成及调试方法

### 二、实验原理

调节可变电阻或可变电容可以改变波形发生电路的振荡频率，一般是通过人的手来调节的。而在自动控制等场合往往要求能自动地调节振荡频率。常见的情况是给出一个控制电压（例如计算机通过接口电路输出的控制电压），要求波形发生电路的振荡频率与控制电压成正比。这种电路称为压控振荡器，又称为 VCO 或  $u$ - $f$  转换电路。

利用集成运放可以构成精度高、线性好的压控振荡器。下面介绍这种电路的构成和工作原理，并求出振荡频率与输入电压的函数关系。

#### 1、电路的构成及工作原理

怎样用集成运放构成压控振荡器呢？我们知道积分电路输出电压变化的速率与输入电压的大小成正比，如果积分电容充电使输出电压达到一定程度后，设法使它迅速放电，然后输入电压再给它充电，如此周而复始，产生振荡，其振荡频率与输入电压成正比。即压控振荡器。图 15-1 就是实现上述意图的压控振荡器（它的输入电压  $U_i > 0$ ）。

图 15-1 所示电路中  $A_1$  是积分电路， $A_2$  是同相输入滞回比较器，它起开关作用。当它的输出电压  $u_{o1} = +U_z$  时，二极管  $D$  截止，输入电压（ $U_i > 0$ ），经电阻  $R_1$  向电容  $C$  充电，输出电压  $u_o$  逐渐下降，当  $u_o$  下降到零再继续下降使滞回比较器  $A_2$  同相输入端电位略低于零， $u_{o1}$  由  $+U_z$  跳变为  $-U_z$ ，二极管  $D$  由截止变导通，电容  $C$  放电，由于放电回路的等效电阻比  $R_1$  小得多，因此放电很快， $u_o$  迅速上升，使  $A_2$  的  $u_i$  很快上升到大于零， $u_{o1}$  很快从  $-U_z$  跳回到  $+U_z$ ，二极管又截止，输入电压经  $R_1$  再向电容充电。如此周而复始，产生振荡。

图 15-2 所示为压控振荡器  $u_o$  和  $u_{o1}$  的波形图。

## 2、振荡频率与输入电压的函数关系

$$f = \frac{1}{T} \approx \frac{1}{T_1} = \frac{R_4}{2R_1R_3C} \frac{U_i}{U_z}$$

可见振荡频率与输入电压成正比。

上述电路实际上就是一个方波、锯齿波发生电路，只不过这里是通过改变输入电压  $U_i$  的大小来改变输出波形频率，从而将电压参量转换成频率参量。

压控振荡器的用途较广。为了使用方便，一些厂家将压控振荡器做成模块，有的压控振荡器模块输出信号的频率与输入电压幅值的非线性误差小于 0.02%，但振荡频率较低，一般在 100Kz 以下。

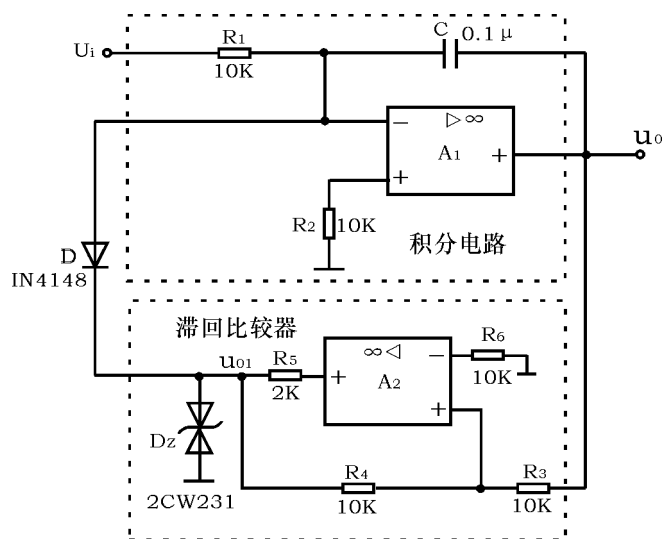


图 15-1 压控振荡器实验电路

## 三、实验设备与器件

- 1、 ±12V 直流电源
  - 2、 双踪示波器
  - 3、 交流毫伏表
  - 4、 直流电压表
  - 5、 频率计
  - 6、 运算放大器  $\mu A741 \times 2$ 、
  - 7、 稳压管 2CW231  $\times 1$
  - 8、 二极管 IN4148  $\times 1$
- 电阻器、电容器若干。

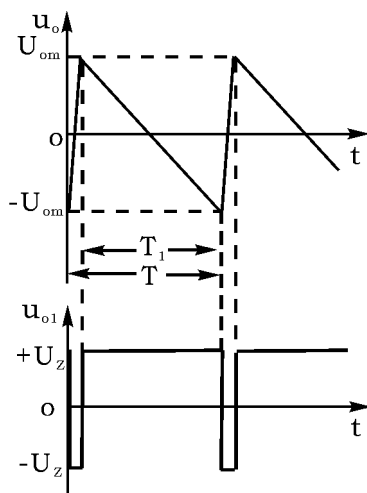


图 15-2 压控振荡器波形图

#### 四、实验内容

- 1、按图 15-1 接线，用示波器监视输出波形
- 2、按下表的内容，测量电路的输入电压与振荡频率的转换关系
- 3、用双踪示波器观察并描绘  $u_o$ 、 $u_{o1}$  波形。

	$U_i$ (V)	1	2	3	4	5	6
用示波器测得	T (ms)						
	f (Hz)						
用频率计测得	f (Hz)						

#### 五、实验总结

作出电压—频率关系曲线，并讨论其结果。

#### 六、预习要求

- 1、指出图 15-1 中电容器 C 的充电和放电回路。
- 2、定性分析用可调电压  $U_i$  改变  $u_o$  频率的工作原理。
- 3、电阻  $R_3$  和  $R_4$  的阻值如何确定？当要求输出信号幅值为  $12U_{opp}$ ，输入电压值为 3V，输出频率为 3000Hz，计算出  $R_3$ 、 $R_4$  的值。



## 实验十六 低频功率放大器 ( I )

### — OTL 功率放大器 —

#### 一、实验目的

- 1、进一步理解 OTL 功率放大器的工作原理
- 2、学会 OTL 电路的调试及主要性能指标的测试方法

#### 二、实验原理

图 16-1 所示为 OTL 低频功率放大器。其中由晶体三极管  $T_1$  组成推动级 (也称前置放大级),  $T_2$ 、 $T_3$  是一对参数对称的 NPN 和 PNP 型晶体三极管, 它们组成互补推挽 OTL 功放电路。由于每一个管子都接成射极输出器形式, 因此具

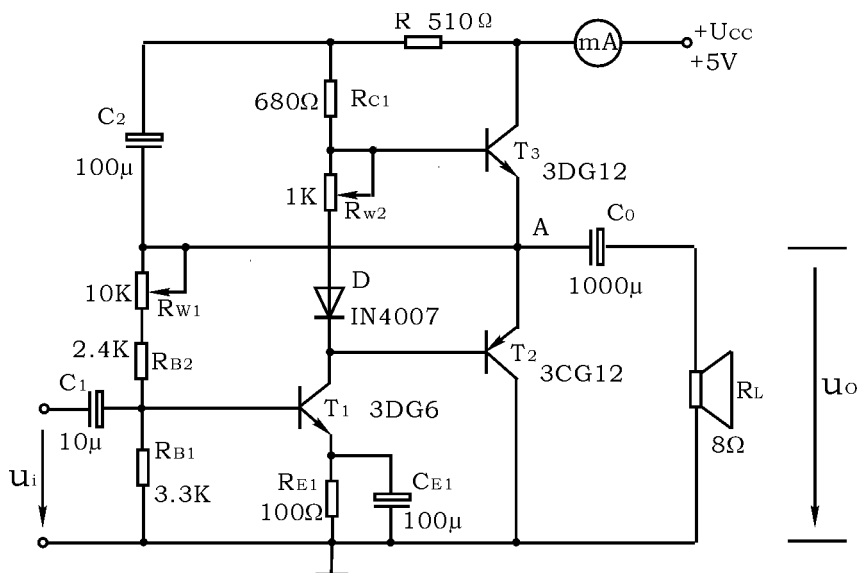


图 16-1 OTL 功率放大器实验电路

有输出电阻低, 负载能力强等优点, 适合于作功率输出级。  $T_1$  管工作于甲类状态, 它的集电极电流  $I_{C1}$  由电位器  $R_{w1}$  进行调节。  $I_{C1}$  的一部分流经电位器  $R_{w2}$  及二极管  $D$ , 给  $T_2$ 、 $T_3$  提供偏压。调节  $R_{w2}$ , 可以使  $T_2$ 、 $T_3$  得到合适的静态电流而

工作于甲、乙类状态，以克服交越失真。静态时要求输出端中点 A 的电位  $U_A = \frac{1}{2}U_{CC}$ ，可以通过调节  $R_{W1}$  来实现，又由于  $R_{W1}$  的一端接在 A 点，因此在电路中引入交、直流电压并联负反馈，一方面能够稳定放大器的静态工作点，同时也改善了非线性失真。

当输入正弦交流信号  $u_i$  时，经  $T_1$  放大、倒相后同时作用于  $T_2$ 、 $T_3$  的基极， $u_i$  的负半周使  $T_2$  管导通（ $T_3$  管截止），有电流通过负载  $R_L$ ，同时向电容  $C_0$  充电，在  $u_i$  的正半周， $T_3$  导通（ $T_2$  截止），则已充好电的电容器  $C_0$  起着电源的作用，通过负载  $R_L$  放电，这样在  $R_L$  上就得到完整的正弦波。

$C_2$  和  $R$  构成自举电路，用于提高输出电压正半周的幅度，以得到大的动态范围。

OTL 电路的主要性能指标

1、最大不失真输出功率  $P_{om}$

理想情况下， $P_{om} = \frac{1}{8} \frac{U_{CC}^2}{R_L}$ ，在实验中可通过测量  $R_L$  两端的电压有效值，来

求得实际的  $P_{om} = \frac{U_0^2}{R_L}$ 。

2、效率  $\eta$

$$\eta = \frac{P_{om}}{P_E} 100\% \quad P_E \text{ 一直流电源供给的平均功率}$$

理想情况下， $\eta_{max} = 78.5\%$ 。在实验中，可测量电源供给的平均电流  $I_{dc}$ ，从而求得  $P_E = U_{CC} \cdot I_{dc}$ ，负载上的交流功率已用上述方法求出，因而也就可以计算实际效率了。

3、频率响应

详见实验二有关部分内容

4、输入灵敏度

输入灵敏度是指输出最大不失真功率时，输入信号  $U_i$  之值。

### 三、实验设备与器件

- 1、 +5V 直流电源
- 2、 函数信号发生器
- 3、 双踪示波器
- 4、 交流毫伏表
- 5、 直流电压表
- 6、 直流毫安表
- 7、 频率计
- 8、 晶体三极管 3DG6 (9011) 3DG12 (9013)  
3CG12 (9012) 晶体二极管 IN4007  
8Ω 扬声器、电阻器、电容器若干

### 四、实验内容

在整个测试过程中，电路不应有自激现象。

#### 1、 静态工作点的测试

按图 16—1 连接实验电路，将输入信号旋钮旋至零 ( $u_i=0$ ) 电源进线中串入直流毫安表，电位器  $R_{w2}$  置最小值， $R_{w1}$  置中间位置。接通 +5V 电源，观察毫安表指示，同时用手触摸输出级管子，若电流过大，或管子温升显著，应立即断开电源检查原因（如  $R_{w2}$  开路，电路自激，或输出管性能不好等）。如无异常现象，可开始调试。

##### 1) 调节输出端中点电位 $U_A$

调节电位器  $R_{w1}$ ，用直流电压表测量 A 点电位，使  $U_A = \frac{1}{2} U_{CC}$ 。

##### 2) 调整输出极静态电流及测试各级静态工作点

调节  $R_{w2}$ ，使  $T_2$ 、 $T_3$  管的  $I_{C2} = I_{C3} = 5 \sim 10\text{mA}$ 。从减小交越失真角度而言，应适当加大输出极静态电流，但该电流过大，会使效率降低，所以一般以  $5 \sim 10\text{mA}$  左右为宜。由于毫安表是串在电源进线中，因此测得的是整个放大器的电流，但一般  $T_1$  的集电极电流  $I_{C1}$  较小，从而可以把测得的总电流近似当作末级的静态电流。如要准确得到末级静态电流，则可从总电流中减去  $I_{C1}$  之值。

调整输出级静态电流的另一方法是动态调试法。先使  $R_{w2} = 0$ ，在输入端接入  $f = 1\text{KHz}$  的正弦信号  $u_i$ 。逐渐加大输入信号的幅值，此时，输出波形应出

现较严重的交越失真（注意：没有饱和和截止失真），然后缓慢增大  $R_{w2}$ ，当交越失真刚好消失时，停止调节  $R_{w2}$ ，恢复  $u_i=0$ ，此时直流毫安表读数即为输出级静态电流。一般数值也应在  $5\sim 10\text{mA}$  左右，如过大，则要检查电路。

输出极电流调好以后，测量各级静态工作点，记入表 16-1。

表 16-1  $I_{c2}=I_{c3}=\quad \text{mA}$   $U_A=2.5\text{V}$

	$T_1$	$T_2$	$T_3$
$U_B(\text{V})$			
$U_C(\text{V})$			
$U_E(\text{V})$			

注意：

① 在调整  $R_{w2}$  时，一是要注意旋转方向，不要调得过大，更不能开路，以免损坏输出管

② 输出管静态电流调好，如无特殊情况，不得随意旋动  $R_{w2}$  的位置。

2、最大输出功率  $P_{om}$  和效率  $\eta$  的测试

1) 测量  $P_{om}$

输入端接  $f=1\text{KHz}$  的正弦信号  $u_i$ ，输出端用示波器观察输出电压  $u_o$  波形。逐渐增大  $u_i$ ，使输出电压达到最大不失真输出，用交流毫伏表测出负载  $R_L$  上的电压  $U_{om}$ ，则

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}。$$

2) 测量  $\eta$

当输出电压为最大不失真输出时，读出直流毫安表中的电流值，此电流即为直流电源供给的平均电流  $I_{dc}$ （有一定误差），由此可近似求得

$$P_E = U_{CC}I_{dc}，再根据上面测得的  $P_{om}$ ，即可求出  $\eta = \frac{P_{om}}{P_E}。$$$

### 3、输入灵敏度测试

根据输入灵敏度的定义，只要测出输出功率  $P_0=P_{0m}$  时的输入电压值  $U_i$  即可。

### 4、频率响应的测试

测试方法同实验二。记入表 16-2。

表 16-2  $U_i =$  mV

	$f_L$		$f_0$		$f_H$	
f (Hz)				1000		
$U_0$ (V)						
$A_V$						

在测试时，为保证电路的安全，应在较低电压下进行，通常取输入信号为输入灵敏度的 50%。在整个测试过程中，应保持  $U_i$  为恒定值，且输出波形不得失真。

### 5、研究自举电路的作用

1) 测量有自举电路，且  $P_0=P_{0max}$  时的电压增益  $A_V = \frac{U_{0m}}{U_i}$

2) 将  $C_2$  开路，R 短路（无自举），再测量  $P_0=P_{0max}$  的  $A_V$ 。

用示波器观察 1)、2) 两种情况下的输出电压波形，并将以上两项测量结果进行比较，分析研究自举电路的作用。

### 6、噪声电压的测试

测量时将输入端短路 ( $u_i=0$ )，观察输出噪声波形，并用交流毫伏表测量输出电压，即为噪声电压  $U_N$ ，本电路若  $U_N < 15mV$ ，即满足要求。

### 7、试听

输入信号改为录音机输出，输出端接试听音箱及示波器。开机试听，并观察语言和音乐信号的输出波形。

## 五、实验总结

1、整理实验数据，计算静态工作点、最大不失真输出功率  $P_{om}$ 、效率  $\eta$  等，并与理论值进行比较。画频率响应曲线。

2、分析自举电路的作用。

3、讨论实验中发生的问题及解决办法。

## 六、预习要求

1、复习有关 OTL 工作原理部分内容。

2、为什么引入自举电路能够扩大输出电压的动态范围？

3、交越失真产生的原因是什么？怎样克服交越失真？

4、电路中电位器  $R_{w2}$  如果开路或短路，对电路工作有何影响？

5、为了不损坏输出管，调试中应注意什么问题？

6、如电路有自激现象，应如何消除？

# 实验十七 低频功率放大器（II）

## — 集成功率放大器 —

### 一、实验目的

- 1、了解功率放大集成块的应用
- 2、学习集成功率放大器基本技术指标的测试

### 二、实验原理

集成功率放大器由集成功放块和一些外部阻容元件构成。它具有线路简单，性能优越，工作可靠，调试方便等优点，已经成为在音频领域中应用十分广泛的功率放大器。

电路中最主要的组件为集成功放块，它的内部电路与一般分立元件功率放大器不同，通常包括前置级、推动级和功率级等几部分。有些还具有一些特殊功能（消除噪声、短路保护等）的电路。其电压增益较高（不加负反馈时，电压增益达 70~80db，加典型负反馈时电压增益在 40db 以上）。

集成功放块的种类很多。本实验采用的集成功放块型号为 LA4112，它的内部电路如图 17-1 所示，由三级电压放大，一级功率放大以及偏置、恒流、反馈、退耦电路组成。

#### 1) 电压放大级

第一级选用由  $T_1$  和  $T_2$  管组成的差动放大器，这种直接耦合的放大器零漂较小，第二级的  $T_3$  管完成直接耦合电路中的电平移动， $T_4$  是  $T_3$  管的恒流源负载，以获得较大的增益；第三级由  $T_6$  管等组成，此级增益最高，为防止出现自激振荡，需在该管的 B、C 极之间外接消振电容。

#### 2) 功率放大级

由  $T_8-T_{13}$  等组成复合互补推挽电路。为提高输出级增益和正向输出幅度，需外接“自举”电容。

#### 3) 偏置电路

为建立各级合适的静态工作点而设立。

除上述主要部分外，为了使电路工作正常，还需要和外部元件一起构成反馈电路来稳定和控制增益。同时，还设有退耦电路来消除各级间的不良影响。

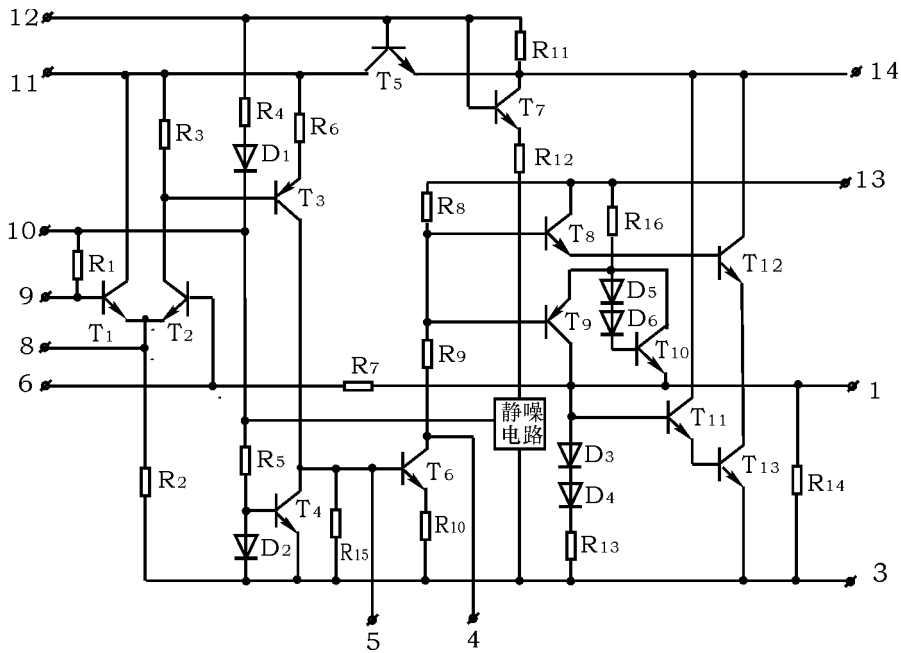


图 17-1 LA4112 内部电路图

LA4112 集成功放块是一种塑料封装十四脚的双列直插器件。它的外形如图 17-2 所示。表 17-1、2 是它的极限参数和电参数。

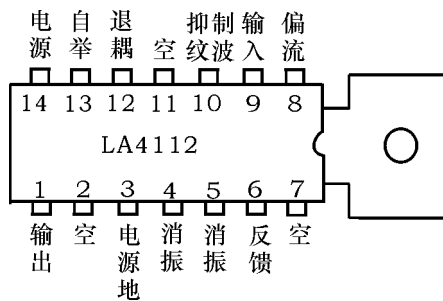


图 17-2 LA4112 外形及管脚排列图



与 LA4112 集成功放块技术指标相同的国内外产品还有 FD403；FY4112；D4112 等，可以互相替代使用。

表 17-1

参 数	符号与单位	额 定 值
最大电源电压	$U_{CCmax}$ (V)	13 (有信号时)
允许功耗	$P_0$ (W)	1.2
		2.25 (50×50mm <sup>2</sup> 铜箔散热片)
工作温度	$T_{opr}$ (°C)	-20~+70

表 17-2

参 数	符号与单位	测试条件	典 型 值
工作电压	$U_{CC}$ (V)		9
静态电流	$I_{CCQ}$ (mA)	$U_{CC}=9V$	15
开环电压增益	$A_{v0}$ (db)		70
输出功率	$P_0$ (W)	$R_L=4\Omega$ $f=1KHz$	1.7
输入阻抗	$R_i$ (K $\Omega$ )		20

集成功率放大器 LA4112 的应用电路如图 17-3 所示，该电路中各电容和电阻的作用简要说明如下：

$C_1$ 、 $C_9$  — 输入、输出耦合电容，隔直作用。

$C_2$  和  $R_f$  — 反馈元件，决定电路的闭环增益。

$C_3$ 、 $C_4$ 、 $C_8$  — 滤波、退耦电容。

$C_5$ 、 $C_6$ 、 $C_{10}$  — 消振电容，消除寄生振荡。

$C_7$  — 自举电容，若无此电容，将出现输出波形半边被削波的现象。

### 三、实验设备与器件

- |             |                 |
|-------------|-----------------|
| 1、 +9V 直流电源 | 2、 函数信号发生器      |
| 3、 双踪示波器    | 4、 交流毫伏表        |
| 5、 直流电压表    | 6、 电流毫安表        |
| 7、 频率计      | 8、 集成功放块 LA4112 |
| 9、 8Ω 扬声器   | 电阻器、电容器若干。      |

### 四、实验内容

按图 17-3 连接实验电路，输入端接函数信号发生器，输出端接扬声器。

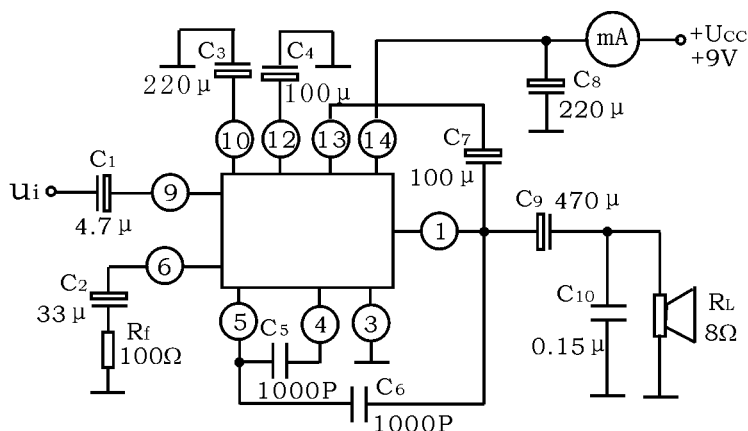


图 17-3 由 LA4112 构成的集成功放实验电路

#### 1、静态测试

将输入信号旋钮旋至零，接通+9V 直流电源，测量静态总电流及集成块各引脚对地电压，记入自拟表格中。

#### 2. 动态测试

##### 1) 最大输出功率

##### a、接入自举电容 $C_7$

输入端接 1KHZ 正弦信号，输出端用示波器观察输出电压波形，逐渐加大输入信号幅度，使输出电压为最大不失真输出，用交流毫伏表测量此时的输出

电压  $U_{om}$ ，则最大输出功率

$$P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$$

b、断开自举电容  $C_7$

观察输出电压波形变化情况

2) 输入灵敏度

要求  $U_i < 100\text{mV}$ ，测试方法同实验十六。

3) 频率响应

测试方法同实验十六。

4) 噪声电压

要求  $U_N < 2.5\text{mV}$ ，测试方法同实验十六。

3、试听

## 五、实验总结

1、整理实验数据，并进行分析。

2、画频率响应曲线

3、讨论实验中发生的问题及解决办法。

## 六、预习要求

1、复习有关集成功率放大器部分内容

2、若将电容  $C_7$  除去，将会出现什么现象？

3、若在无输入信号时，从接在输出端的示波器上观察到频率较高的波形，正常否？如何消除？

4、如何由 +12V 直流电源获得 +9V 直流电源？

5、进行本实验时，应注意以下几点：

(1) 电源电压不允许超过极限值，不允许极性接反，否则集成块将遭损坏。

(2) 电路工作时绝对避免负载短路，否则将烧毁集成块。

(3) 接通电源后，时刻注意集成块的温度，有时，未加输入信号集成块就发热过甚，同时直流毫安表指示出较大电流及示波器显示出幅度较大，频率较高的波形，说明电路有自激现象，应即关机，然后进行故障分析，处理。待自激振荡消除后，才能重新进行实验。

(4) 输入信号不要过大。

## 实验十八 直流稳压电源（I）

### — 串联型晶体管稳压电源 —

#### 一、实验目的

- 1、研究单相桥式整流、电容滤波电路的特性。
- 2、掌握串联型晶体管稳压电源主要技术指标的测试方法。

#### 二、实验原理

电子设备一般都需要直流电源供电。这些直流电除了少数直接利用干电池和直流发电机外，大多数是采用把交流电（市电）转变为直流电的直流稳压电源。

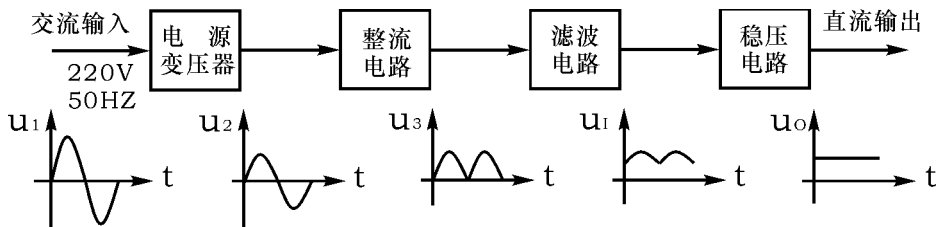


图 18—1 直流稳压电源框图

直流稳压电源由电源变压器、整流、滤波和稳压电路四部分组成，其原理框图如图 18—1 所示。电网供给的交流电压  $u_1$  (220V, 50Hz) 经电源变压器降压后，得到符合电路需要的交流电压  $u_2$ ，然后由整流电路变换成方向不变、大小随时间变化的脉动电压  $u_3$ ，再用滤波器滤去其交流分量，就可得到比较平直的直流电压  $u_4$ 。但这样的直流输出电压，还会随交流电网电压的波动或负载的变动而变化。在对直流供电要求较高的场合，还需要使用稳压电路，以保证输出直流电压更加稳定。

图 18—2 是由分立元件组成的串联型稳压电源的电路图。其整流部分为单相桥式整流、电容滤波电路。稳压部分为串联型稳压电路，它由调整元件（晶体管  $T_1$ ）；比较放大器  $T_2$ 、 $R_7$ ；取样电路  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_w$ ，基准电压  $D_w$ 、 $R_3$  和过流保

护电路  $T_3$  管及电阻  $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  等组成。整个稳压电路是一个具有电压串联负反馈的闭环系统，其稳压过程为：当电网电压波动或负载变动引起输出直流电压发生变化时，取样电路取出输出电压的一部分送入比较放大器，并与基准电压进行比较，产生的误差信号经  $T_2$  放大后送至调整管  $T_1$  的基极，使调整管改变其管压降，以补偿输出电压的变化，从而达到稳定输出电压的目的。

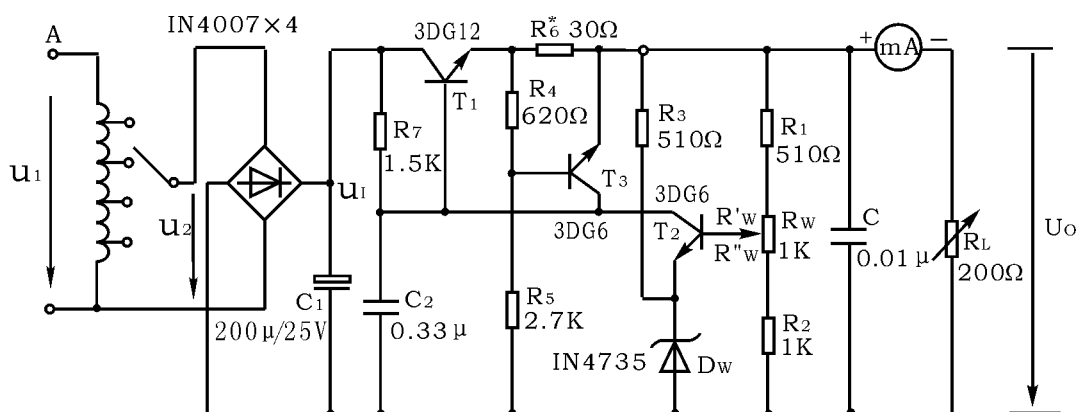


图 18-2 串联型稳压电源实验电路

由于在稳压电路中，调整管与负载串联，因此流过它的电流与负载电流一样大。当输出电流过大或发生短路时，调整管会因电流过大或电压过高而损坏，所以需要调整管加以保护。在图 18-2 电路中，晶体管  $T_3$ 、 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$  组成减流型保护电路。此电路设计在  $I_{OP} = 1.2I_0$  时开始起保护作用，此时输出电流减小，输出电压降低。故障排除后电路应能自动恢复正常工作。在调试时，若保护提前作用，应减少  $R_6$  值；若保护作用迟后，则应增大  $R_6$  之值。

稳压电源的主要性能指标：

- 1、 输出电压  $U_0$  和输出电压调节范围

$$U_0 = \frac{R_1 + R_w + R_2}{R_2 + R_w''} (U_Z + U_{BE2})$$

调节  $R_w$  可以改变输出电压  $U_0$ 。

- 2、 最大负载电流  $I_{om}$

### 3、 输出电阻 $R_0$

输出电阻  $R_0$  定义为：当输入电压  $U_1$ （指稳压电路输入电压）保持不变，由于负载变化而引起的输出电压变化量与输出电流变化量之比，即

$$R_0 = \frac{\Delta U_0}{\Delta I_0} \Bigg|_{U_1 = \text{常数}}$$

### 4、 稳压系数 $S$ （电压调整率）

稳压系数定义为：当负载保持不变，输出电压相对变化量与输入电压相对变化量之比，即

$$S = \frac{\Delta U_0 / U_0}{\Delta U_1 / U_1} \Bigg|_{R_L = \text{常数}}$$

由于工程上常把电网电压波动  $\pm 10\%$  做为极限条件，因此也有将此时输出电压的相对变化  $\Delta U_0 / U_0$  做为衡量指标，称为电压调整率。

### 5、 纹波电压

输出纹波电压是指在额定负载条件下，输出电压中所含交流分量的有效值（或峰值）。

## 三、实验设备与器件

- |   |                            |
|---|----------------------------|
| 1、 可调工频电源   | 2、 双踪示波器                   |
| 3、 交流毫伏表  | 4、 直流电压表                   |
| 5、 直流毫安表  | 6、 滑线变阻器 $200 \Omega / 1A$ |
| 7、 晶体三极管 $3DG6 \times 2 (9011 \times 2)$ ， $3DG12 \times 1 (9013 \times 1)$ |                            |
| 晶体二极管 $IN4007 \times 4$   | 稳压管 $IN4735 \times 1$      |
| 电阻器、电容器若干   |                            |

## 四、实验内容

### 1、 整流滤波电路测试

按图 18-3 连接实验电路。取可调工频电源电压为 16V，作为整流电路输入电压  $u_2$ 。

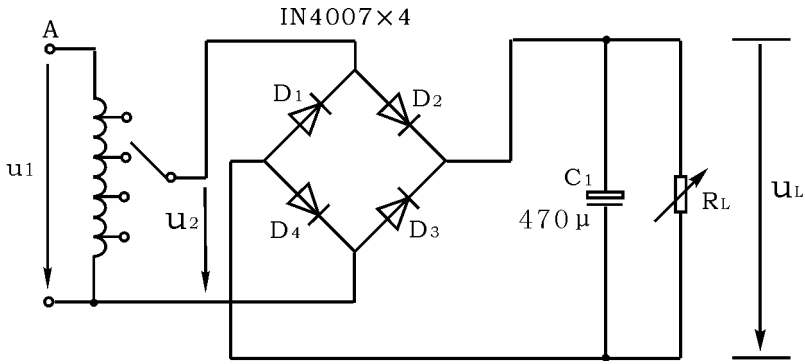


图 18-3 整流滤波电路

- 1) 取  $R_L=240\ \Omega$ ，不加滤波电容，测量直流输出电压  $U_L$  及纹波电压  $\widetilde{U}_L$ ，并用示波器观察  $u_2$  和  $u_L$  波形，记入表 18-1。
- 2) 取  $R_L=240\ \Omega$ ， $C=470\ \mu\text{f}$ ，重复内容 1) 的要求，记入表 18-1。
- 3) 取  $R_L=120\ \Omega$ ， $C=470\ \mu\text{f}$ ，重复内容 1) 的要求，记入表 18-1。

表 18-1  $U_2=16\text{V}$

电路形式		$U_L$ (V)	$\widetilde{U}_L$ (V)	$u_L$ 波形
$R_L=240\ \Omega$				
$R_L=240\ \Omega$ $C=470\ \mu\text{f}$				
$R_L=120\ \Omega$ $C=470\ \mu\text{f}$				



## 注意

①每次改接电路时，必须切断工频电源。

②在观察输出电压  $u_L$  波形的过程中，“Y 轴灵敏度”旋钮位置调好以后，不要再变动，否则将无法比较各波形的脉动情况。

### 2、串联型稳压电源性能测试

切断工频电源，在图 18—3 基础上按图 18—2 连接实验电路。

#### 1) 初测

稳压器输出端负载开路，断开保护电路，接通 16V 工频电源，测量整流电路输入电压  $U_2$ ，滤波电路输出电压  $U_1$ （稳压器输入电压）及输出电压  $U_0$ 。调节电位器  $R_w$ ，观察  $U_0$  的大小和变化情况，如果  $U_0$  能跟随  $R_w$  线性变化，这说明稳压电路各反馈环路工作基本正常。否则，说明稳压电路有故障，因为稳压器是一个深负反馈的闭环系统，只要环路中任一个环节出现故障（某管截止或饱和），稳压器就会失去自动调节作用。此时可分别检查基准电压  $U_z$ ，输入电压  $U_1$ ，输出电压  $U_0$ ，以及比较放大器和调整管各电极的电位（主要是  $U_{BE}$  和  $U_{CE}$ ），分析它们的工作状态是否都处在线性区，从而找出不能正常工作的原因。排除故障以后就可以进行下一步测试。

#### 2) 测量输出电压可调范围

接入负载  $R_L$ （滑线变阻器），并调节  $R_L$ ，使输出电流  $I_0 \approx 100\text{mA}$ 。再调节电位器  $R_w$ ，测量输出电压可调范围  $U_{0\text{min}} \sim U_{0\text{max}}$ 。且使  $R_w$  动点在中间位置附近时  $U_0 = 12\text{V}$ 。若不满足要求，可适当调整  $R_1$ 、 $R_2$  之值。

#### 3) 测量各级静态工作点

调节输出电压  $U_0 = 12\text{V}$ ，输出电流  $I_0 = 100\text{mA}$ ，测量各级静态工作点，记入表 18—2。

表 18-2  $U_2=16V$   $U_0=12V$   $I_0=100mA$

	$T_1$	$T_2$	$T_3$
$U_B$ (V)			
$U_C$ (V)			
$U_E$ (V)			

4) 测量稳压系数  $S$

取  $I_0=100mA$ ，按表 18-3 改变整流电路输入电压  $U_2$  (模拟电网电压波动)，分别测出相应的稳压器输入电压  $U_1$  及输出直流电压  $U_0$ ，记入表 18-3。

5) 测量输出电阻  $R_0$

取  $U_2=16V$ ，改变滑线变阻器位置，使  $I_0$  为空载、50mA 和 100mA，测量相应的  $U_0$  值，记入表 18-4。

表 18-3  $I_0=100mA$

测 试 值			计算值
$U_2$ (V)	$U_1$ (V)	$U_0$ (V)	$S$
14			$S_{12} =$
16		12	$S_{23} =$
18			

表 18-4  $U_2=16V$

测 试 值		计算值
$I_0$ (mA)	$U_0$ (V)	$R_0$ ( $\Omega$ )
空载		$R_{012} =$
50	12	$R_{023} =$
100		

6) 测量输出纹波电压

取  $U_2=16V$ ， $U_0=12V$ ， $I_0=100mA$ ，测量输出纹波电压  $U_0$ ，记录之。

7) 调整过流保护电路

a. 断开工频电源，接上保护回路，再接通工频电源，调节  $R_w$  及  $R_L$  使  $U_0=12V$ ， $I_0=100mA$ ，此时保护电路应不起作用。测出  $T_3$  管各极电位值。

b. 逐渐减小  $R_L$ ，使  $I_0$  增加到 120mA，观察  $U_0$  是否下降，并测出保护起作用时  $T_3$  管各极的电位值。若保护作用过早或迟后，可改变  $R_6$  之值进行调整。

c. 用导线瞬时短接一下输出端，测量  $U_0$  值，然后去掉导线，检查电路是否能自动恢复正常工作。

## 五、实验总结

1、对表 18—1 所测结果进行全面分析，总结桥式整流、电容滤波电路的特点。

2、根据表 18—3 和表 18—4 所测数据，计算稳压电路的稳压系数  $S$  和输出电阻  $R_0$ ，并进行分析。

3、分析讨论实验中出现的故障及其排除方法。

## 六、预习要求

1、复习教材中有关分立元件稳压电源部分内容，并根据实验电路参数估算  $U_0$  的可调范围及  $U_0=12V$  时  $T_1$ 、 $T_2$  管的静态工作点（假设调整管的饱和压降  $U_{CE1S} \approx 1V$ ）。

2、说明图 18—2 中  $U_2$ 、 $U_1$ 、 $U_0$  及  $\tilde{U}_0$  的物理意义，并从实验仪器中选择合适的测量仪表。

3、在桥式整流电路实验中，能否用双踪示波器同时观察  $u_2$  和  $u_L$  波形，为什么？

4、在桥式整流电路中，如果某个二极管发生开路、短路或反接三种情况，将会出现什么问题？

5、为了使稳压电源的输出电压  $U_0=12V$ ，则其输入电压的最小值  $U_{Imin}$  应等于多少？交流输入电压  $U_{2min}$  又怎样确定？

6、当稳压电源输出不正常，或输出电压  $U_0$  不随取样电位器  $R_w$  而变化时，应如何进行检查找出故障所在？

7、分析保护电路的工作原理。

8、怎样提高稳压电源的性能指标（减小  $S$  和  $R_0$ ）？

## 实验十九 直流稳压电源（II）

### — 集成稳压器 —

#### 一、实验目的

- 1、研究集成稳压器的特点和性能指标的测试方法。
- 2、了解集成稳压器扩展性能的方法。

#### 二、实验原理

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，应根据设备对直流电源的要求来进行选择。对于大多数电子仪器、设备和电子电路来说，通常是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。

W7800、W7900 系列三端式集成稳压器的输出电压是固定的，在使用中不能进行调整。W7800 系列三端式稳压器输出正极性电压，一般有 5V、6V、9V、12V、15V、18V、24V 七个档次，输出电流最大可达 1.5A（加散热片）。同类型 78M 系列稳压器的输出电流为 0.5A，78L 系列稳压器的输出电流为 0.1A。若要求负极性输出电压，则可选用 W7900 系列稳压器。

图 19—1 为 W7800 系列的外形和接线图。

它有三个引出端

输入端（不稳定电压输入端） 标以 “1”

输出端（稳定电压输出端） 标以 “3”

公共端 标以 “2”

除固定输出三端稳压器外，尚有可调式三端稳压器，后者可通过外接元件对输出电压进行调整，以适应不同的需要。

本实验所用集成稳压器为三端固定正稳压器 W7812，它的主要参数有：输出直流电压  $U_0 = +12V$ ，输出电流 L:0.1A，M:0.5A，电压调整率 10mV/V，输

出电阻  $R_0=0.15\Omega$ ，输入电压  $U_1$  的范围  $15\sim 17V$ 。因为一般  $U_1$  要比  $U_0$  大  $3\sim 5V$ ，才能保证集成稳压器工作在线性区。

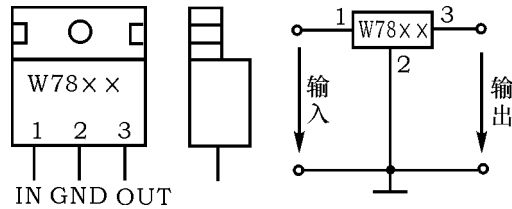


图 19-1 W7800 系列外形及接线图

图 19-2 是用三端式稳压器 W7812 构成的单电源电压输出串联型稳压电源的实验电路图。其中整流部分采用了由四个二极管组成的桥式整流器成品（又称桥堆），型号为 2W06（或 KBP306），内部接线和外部管脚引线如图 19-3 所示。滤波电容  $C_1$ 、 $C_2$  一般选取几百~几千微法。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  $C_3$ （数值为  $0.33\mu F$ ），以抵消线路的电感效应，防止产生自激振荡。输出端电容  $C_4$  ( $0.1\mu F$ ) 用以滤除输出端的高频信号，改善电路的暂态响应。

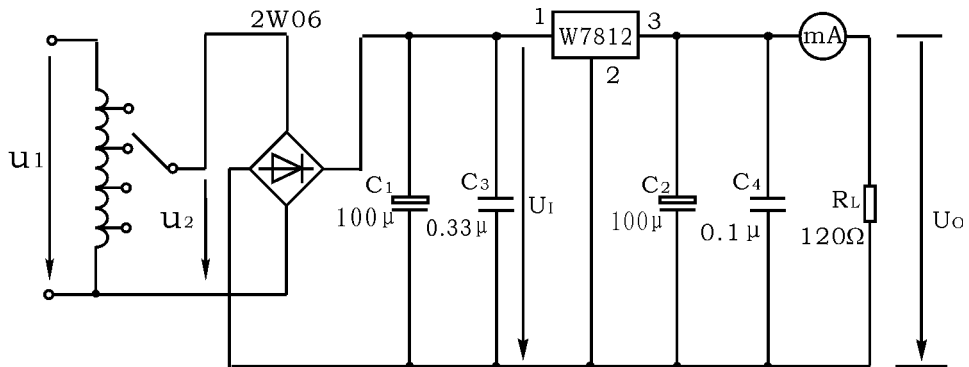


图 19-2 由 W7815 构成的串联型稳压电源

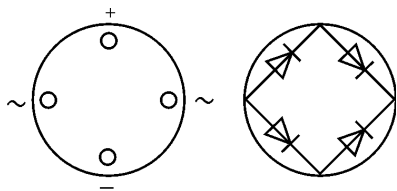


图 19-3(a) 圆桥 2W06

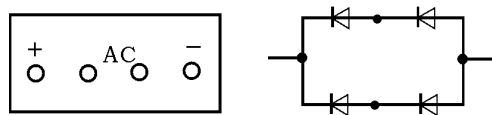


图 19-3(b) 排桥 KBP306

图 19-3 桥堆管脚图

图 19-4 为正、负双电压输出电路，例如需要  $U_{o1} = +15V$ ， $U_{o2} = -15V$ ，则可选用 W7815 和 W7915 三端稳压器，这时的  $U_I$  应为单电压输出时的两倍。

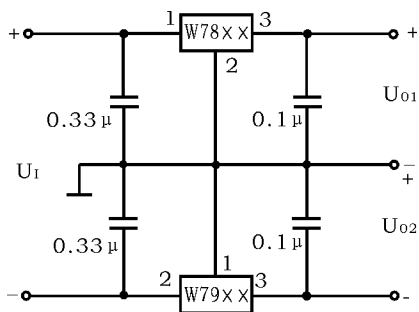


图 19-4 正、负双电压输出电路

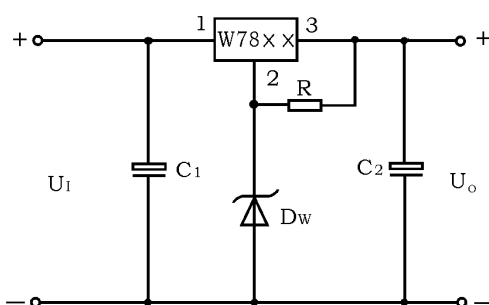


图 19-5 输出电压扩展电路

当集成稳压器本身的输出电压或输出电流不能满足要求时，可通过外接电路来进行性能扩展。图 19-5 是一种简单的输出电压扩展电路。如 W7812 稳压器的 3、2 端间输出电压为 12V，因此只要适当选择 R 的值，使稳压管  $D_w$  工作在稳压区，则输出电压  $U_o = 12 + U_z$ ，可以高于稳压器本身的输出电压。

图 11-6 是通过外接晶体管 T 及电阻  $R_1$  来进行电流扩展的电路。电阻  $R_1$  的阻值由外接晶体管的发射结导通电压  $U_{BE}$ 、三端式稳压器的输入电流  $I_i$ （近似等于三端稳压器的输出电流  $I_{o1}$ ）和 T 的基极电流  $I_B$  来决定，即

$$R_1 = \frac{U_{BE}}{I_R} = \frac{U_{BE}}{I_i - I_B} = \frac{U_{BE}}{I_{o1} - \frac{I_C}{\beta}}$$

式中： $I_C$  为晶体管 T 的集电极电流，它应等于  $I_C = I_o - I_{o1}$ ； $\beta$  为 T 的电

流放大系数；对于锗管  $U_{BE}$  可按 0.3V 估算，对于硅管  $U_{BE}$  按 0.7V 估算。

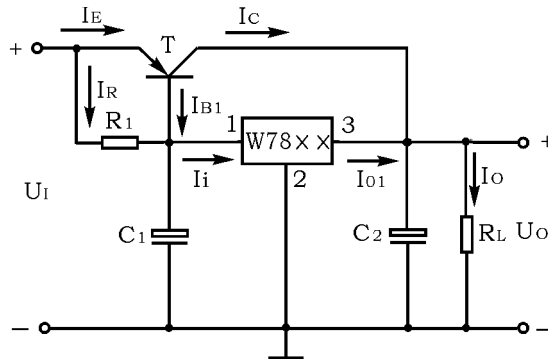


图 19-6 输出电流扩展电路

附：(1) 图 19-7 为 W7900 系列（输出负电压）外形及接线图

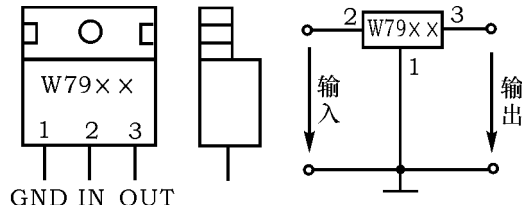


图 19-7 W7900 系列外形及接线图

(2) 图 19-8 为可调输出正三端稳压器 W317 外形及接线图。

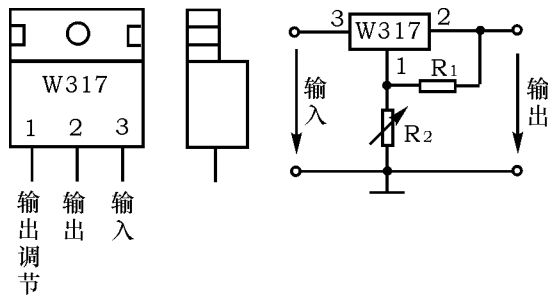


图 19-8 W317 外形及接线图

输出电压计算公式  $U_0 \approx 1.25(1 + \frac{R_2}{R_1})$

最大输入电压  $U_{im} = 40V$

输出电压范围  $U_0 = 1.2 \sim 37$

### 三、实验设备与器件

- |                       |                            |
|-----------------------|----------------------------|
| 1、 可调工频电源             | 2、 双踪示波器                   |
| 3、 交流毫伏表              | 4、 直流电压表                   |
| 5、 直流毫安表              | 6、 三端稳压器 W7812、W7815、W7915 |
| 7、 桥堆 2W06(或 KBP306 ) | 电阻器、电容器若干                  |

### 四、实验内容

#### 1、 整流滤波电路测试

按图 19—9 连接实验电路，取可调工频电源 14V 电压作为整流电路输入电压  $u_2$ 。接通工频电源，测量输出端直流电压  $U_L$  及纹波电压  $U_L$ ，用示波器观察  $u_2$ ，  $u_L$  的波形，把数据及波形记入自拟表格中。

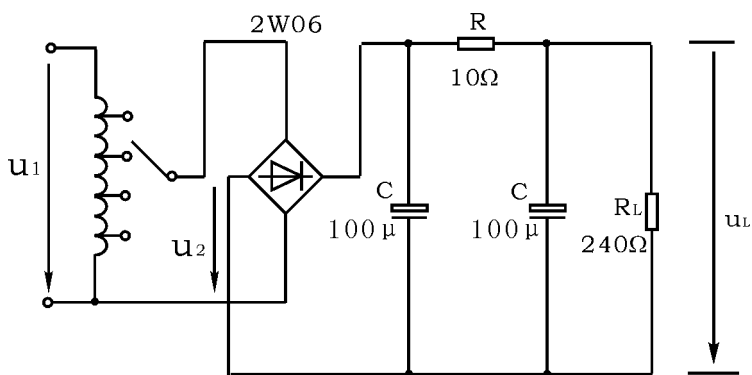


图 19—9 整流滤波电路

#### 2、 集成稳压器性能测试

断开工频电源，按图 19—2 改接实验电路，取负载电阻  $R_L = 120 \Omega$ 。



### 1) 初测

接通工频 14V 电源，测量  $U_2$  值；测量滤波电路输出电压  $U_1$  (稳压器输入电压)，集成稳压器输出电压  $U_0$ ，它们的数值应与理论值大致符合，否则说明电路出了故障。设法查找故障并加以排除。

电路经初测进入正常工作状态后，才能进行各项指标的测试。

### 2) 各项性能指标测试

①输出电压  $U_0$  和最大输出电流  $I_{omix}$  的测量。

在输出端接负载电阻  $R_L = 120 \Omega$ ，由于 7812 输出电压  $U_0 = 12V$ ，因此流过  $R_L$  的电流  $I_{omix} = \frac{12}{120} = 100mA$ 。这时  $U_0$  应基本保持不变，若变化较大则说明集成块性能不良。

②稳压系数  $S$  的测量

③输出电阻  $R_0$  的测量

④输出纹波电压的测量

②、③、④的测试方法同实验十，把测量结果记入自拟表格中。

### \* 3) 集成稳压器性能扩展

根据实验器材，选取图 19-4、图 19-5 或 19-8 中各元器件，并自拟测试方法与表格，记录实验结果。

## 五、实验总结

- 1、整理实验数据，计算  $S$  和  $R_0$ ，并与手册上的典型值进行比较。
- 2、分析讨论实验中发生的现象和问题。

## 六、预习要求

- 1、复习教材中有关集成稳压器部分内容。
- 2、列出实验内容中所要求的各种表格。
- 3、在测量稳压系数  $S$  和内阻  $R_0$  时，应怎样选择测试仪表？

## 实验二十 晶闸管可控整流电路

### 一、实验目的

- 1、学习单结晶体管和晶闸管的简易测试方法。
- 2、熟悉单结晶体管触发电路（阻容移相桥触发电路）的工作原理及调试方法。
- 3、熟悉用单结晶体管触发电路控制晶闸管调压电路的方法。

### 二、实验原理

可控整流电路的作用是把交流电变换为电压值可以调节的直流电。图 20-1 所示为单相半控桥式整流实验电路。主电路由负载  $R_L$ （灯泡）和晶闸管  $T_1$  组成，触发电路为单结晶体管  $T_2$  及一些阻容元件构成的阻容移相桥触发电路。改变晶闸管  $T_1$  的导通角，便可调节主电路的可控输出整流电压（或电流）的数值，这点可由灯泡负载的亮度变化看出。晶闸管导通角的大小决定于触发脉冲的频率  $f$ ，由公式

$$f = \frac{1}{RC} \ln\left(\frac{1}{1-\eta}\right)$$

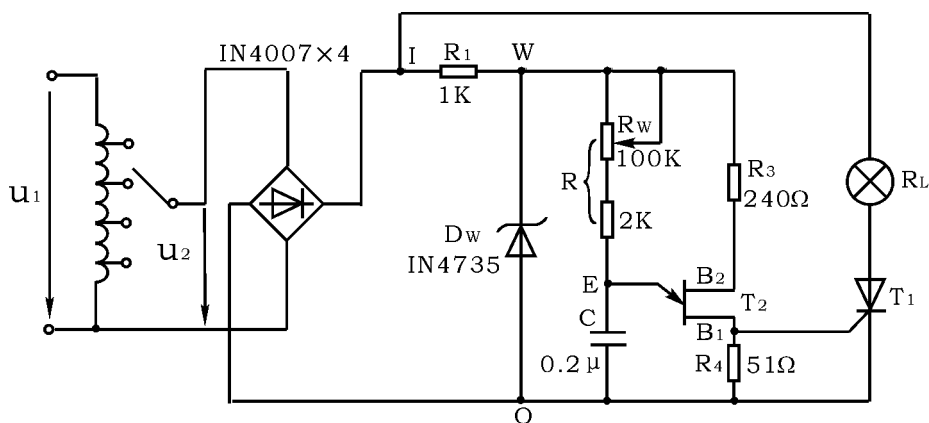


图 20-1 单相半控桥式整流实验电路

可知，当单晶体管的分压比  $\eta$ （一般在 0.5~0.8 之间）及电容  $C$  值固定时，则频率  $f$  大小由  $R$  决定，因此，通过调节电位器  $R_w$ ，使可以改变触发脉冲频率，主电路的输出电压也随之改变，从而达到可控调压的目的。

用万用电表的电阻档(或用数字万用表二极管档)可以对单晶体管和晶闸管进行简易测试。

图 20—2 为单晶体管 BT33 管脚排列、结构图及电路符号。好的单晶体管 PN 结正向电阻  $R_{EB1}$ 、 $R_{EB2}$  均较小，且  $R_{EB1}$  稍大于  $R_{EB2}$ ，PN 结的反向电阻  $R_{B1E}$ 、 $R_{B2E}$  均应很大，根据所测阻值，即可判断出各管脚及管子的质量优劣。

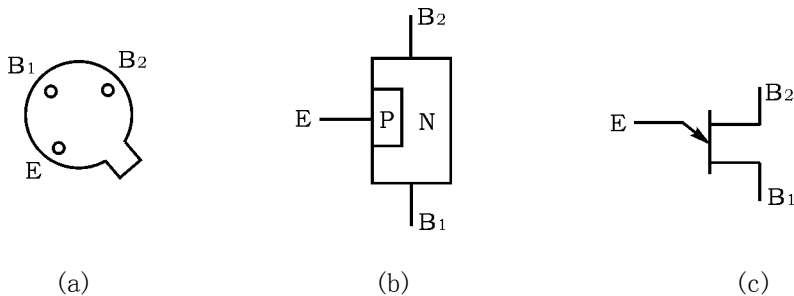


图 20—2 单晶体管 BT33 管脚排列、结构图及电路符号

图 20—3 为晶闸管 3CT3A 管脚排列、结构图及电路符号。晶闸管阳极(A) — 阴极(K) 及阳极(A) — 门极(G) 之间的正、反向电阻  $R_{AK}$ 、 $R_{KA}$ 、 $R_{AG}$ 、 $R_{GA}$  均应很大，而 G — K 之间为一个 PN 结，PN 结正向电阻应较小，反向电阻应很大。

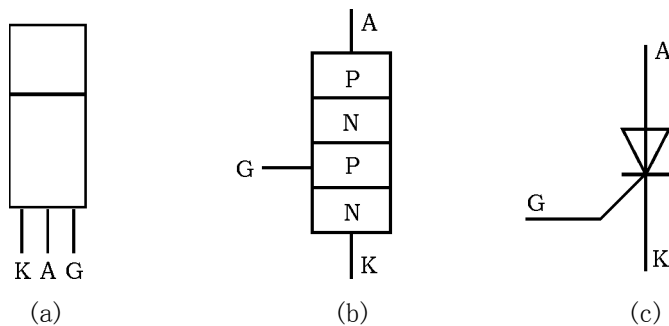


图 20—3 晶闸管管脚排列、结构图及电路符号

### 三、实验设备及器件

- |                 |            |
|-----------------|------------|
| 1、±5V、±12V 直流电源 | 2、 可调工频电源  |
| 3、 万用电表         | 4、 双踪示波器   |
| 5、 交流毫伏表        | 6、 直流电压表   |
| 7、 晶闸管 3CT3A    | 单晶体管 BT33  |
| 二极管 IN4007×4    | 稳压管 IN4735 |
| 灯炮 12V / 0.1A   |            |

### 四、实验内容

#### 1、 单晶体管的简易测试

用万用电表  $R \times 10 \Omega$  档分别测量  $EB_1$ 、 $EB_2$  间正、反向电阻，记入表 20-1。

表 20-1

$R_{EB1} (\Omega)$	$R_{EB2} (\Omega)$	$R_{B1E} (K \Omega)$	$R_{B2E} (K \Omega)$	结论

#### 2、 晶闸管的简易测试

用万用电表  $R \times 1K$  档分别测量 A — K、A — G 间正、反向电阻；用  $R \times 10 \Omega$  档测量 G — K 间正、反向电阻，记入表 20-2。

表 20-2

$R_{AK} (K \Omega)$	$R_{KA} (K \Omega)$	$R_{AG} (K \Omega)$	$R_{GA} (K \Omega)$	$R_{GK} (K \Omega)$	$R_{KG} (K \Omega)$	结论

#### 3、 晶闸管导通，关断条件测试

断开±12V、±5V 直流电源，按图 20-4 连接实验电路

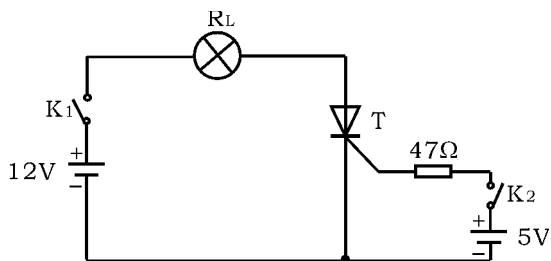


图 20—4 晶闸管导通、关断条件测试

1) 晶闸管阳极加 12V 正向电压，门极 a) 开路 b) 加 5V 正向电压，观察管子是否导通（导通时灯泡亮，关断时灯泡熄灭），管子导通后，c) 去掉 +5V 门极电压、d) 反接门极电压（接 -5V），观察管子是否继续导通。

2) 晶闸管导通后，a) 去掉 +12V 阳极电压、b) 反接阳极电压（接 -12V ），观察管子是否关断。记录之。

#### 4、晶闸管可控整流电路

按图 20—1 连接实验电路。取可调工频电源 14V 电压作为整流电路输入电压  $u_2$ ，电位器  $R_w$  置中间位置。

##### 1) 单结晶体管触发电路

a) 断开主电路（把灯泡取下），接通工频电源，测量  $U_2$  值。用示波器依次观察并记录交流电压  $u_2$ 、整流输出电压  $u_1$  (I—0)、削波电压  $u_w$  (W—0)、锯齿波电压  $u_E$  (E—0)、触发输出电压  $u_{B1}$  (B<sub>1</sub>—0)。记录波形时，注意各波形间对应关系，并标出电压幅度及时间。记入表 20—3。

b) 改变移相电位器  $R_w$  阻值，观察  $u_E$  及  $u_{B1}$  波形的变化及  $u_{B1}$  的移相范围，记入表 20—3 。

表 20—3

$u_2$	$u_1$	$u_w$	$u_E$	$u_{B1}$	移相范围

## 2) 可控整流电路

断开工频电源，接入负载灯泡  $R_L$ ，再接通工频电源，调节电位器  $R_w$ ，使电灯由暗到中等亮，再到最亮，用示波器观察晶闸管两端电压  $u_{T1}$ 、负载两端电压  $u_L$ ，并测量负载直流电压  $U_L$  及工频电源电压  $U_2$  有效值，记入表 20-4。

表 20-4

	暗	较亮	最亮
$u_L$ 波形			
$u_T$ 波形			
导通角 $\theta$			
$U_L$ (V)			
$U_2$ (V)			

## 五、实验总结

- 1、总结晶闸管导通、关断的基本条件。
- 2、画出实验中记录的波形（注意各波形间对应关系），并进行讨论。
- 3、对实验数据  $U_L$  与理论计算数据  $U_L = 0.9U_2 \frac{1 + \cos \alpha}{2}$  进行比较，并分析

产生误差原因。

- 4、分析实验中出现的异常现象。

## 六、预习要求

- 1、复习晶闸管可控整流部分内容
- 2、可否用万用电表  $R \times 10K$  欧姆档测试管子，为什么？
- 3、为什么可控整流电路必须保证触发电路与主电路同步？本实验是如何实现同步的？
- 4、可以采取那些措施改变触发信号的幅度和移相范围。
- 5、能否用双踪示波器同时观察  $u_2$  和  $u_L$  或  $u_L$  和  $u_{T1}$  波形？为什么？

## 实验二十一 应用实验

### — 温度监测及控制电路 —

#### 一、实验目的

- 1、学习由双臂电桥和差动输入集成运放组成的桥式放大电路。
- 2、掌握滞回比较器的性能和调试方法。
- 3、学会系统测量和调试。

#### 二、实验原理

1、实验电路如图 21-1 所示，它是由负温度系数电阻特性的热敏电阻（NTC 元件） $R_t$  为一臂组成测温电桥，其输出经测量放大器放大后由滞回比较器输出“加热”与“停止”信号，经三极管放大后控制加热器“加热”与“停止”。改变滞回比较器的比较电压  $U_R$  即改变控温的范围，而控温的精度则由滞回比较器的滞回宽度确定。

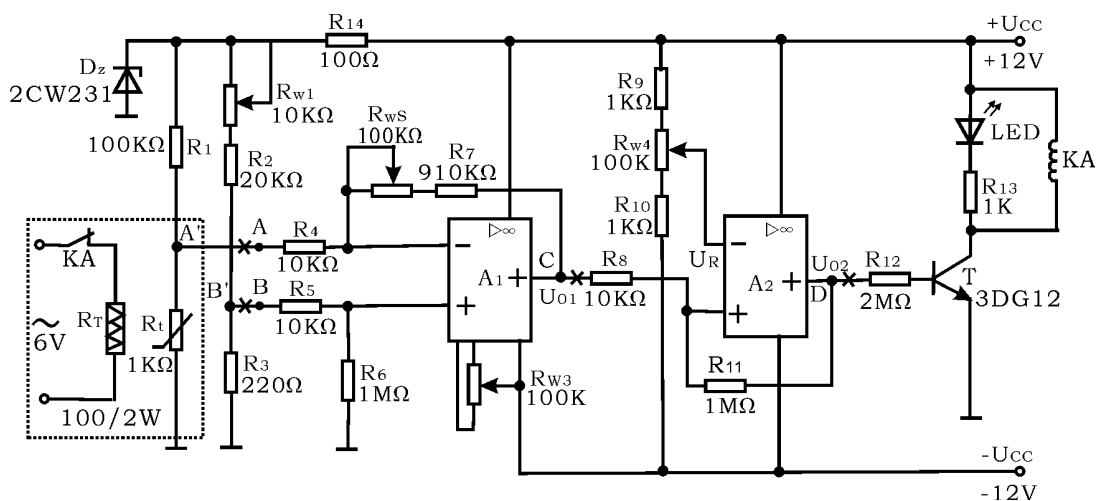


图 21-1 温度监测及控制实验电路

#### (1)、测温电桥

由  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 、 $R_{w1}$  及  $R_t$  组成测温电桥，其中  $R_t$  是温度传感器。其呈现出的

阻值与温度成线性变化关系且具有负温度系数，而温度系数又与流过它的工作电流有关。为了稳定  $R_t$  的工作电流，达到稳定其温度系数的目的，设置了稳压管  $D_2$ 。 $R_{w1}$  可决定测温电桥的平衡。

### (2)、差动放大电路

由  $A_1$  及外围电路组成的差动放大电路，将测温电桥输出电压  $\Delta U$  按比例放大。其输出电压

$$U_{01} = -\left(\frac{R_7 + R_{w2}}{R_4}\right)U_A + \left(\frac{R_4 + R_7 + R_{w2}}{R_4}\right)\left(\frac{R_6}{R_5 + R_6}\right)U_B$$

当  $R_4 = R_5$ ,  $(R_7 + R_{w2}) = R_6$  时

$$U_{01} = \frac{R_7 + R_{w2}}{R_4}(U_B - U_A)$$

$R_{w3}$  用于差动放大器调零。

可见差动放大电路的输出电压  $U_{01}$  仅取决于二个输入电压之差和外部电阻的比值。

### (3)、滞回比较器

差动放大器的输出电压  $U_{01}$  输入由  $A_2$  组成的滞回比较器。

滞回比较器的单元电路如图 21-2 所示，设比较器输出高电平为  $U_{OH}$ ，输出低电平为  $U_{OL}$ ，参考电压  $U_R$  加在反相输入端。

当输出为高电平  $U_{OH}$  时，运放同相输入端电位

$$u_{+H} = \frac{R_F}{R_2 + R_F}u_i + \frac{R_2}{R_2 + R_F}U_{OH}$$

当  $u_i$  减小到使  $u_{+H} = U_R$ ，即

$$u_i = u_{TL} = \frac{R_2 + R_F}{R_F}U_R - \frac{R_2}{R_F}U_{OH}$$

此后， $u_i$  稍有减小，输出就从高电平跳变为低电平。

当输出为低电平  $U_{OL}$  时，运放同相输入端电位

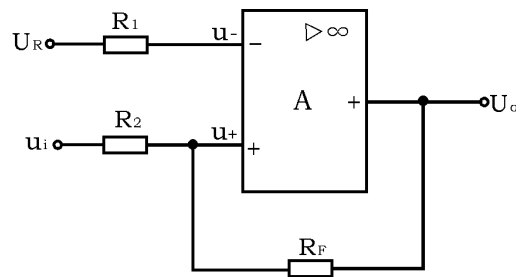


图 21-2 同相滞回比较器



$$u_{+L} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} u_i + \frac{R_2}{R_2 + R_F} U_{OL}$$

当  $u_i$  增大到使  $u_{+L} = U_R$ , 即

$$u_i = U_{TH} = \frac{R_2 + R_F}{R_F} U_R - \frac{R_2}{R_F} U_{OL}$$

此后,  $u_i$  稍有增加, 输出又从低电平跳变为高电平。

因此  $U_{TL}$  和  $U_{TH}$  为输出电平跳变时对应的输入

电平, 常称  $U_{TL}$  为下门限电平,  $U_{TH}$  为上门限电平, 而两者的差值

$$\Delta U_T = U_{TH} - U_{TL} = \frac{R_2}{R_F} (U_{OH} - U_{OL})$$

称为门限宽度, 它们的大小可通过调节  $R_2/R_F$  的比值来调节。

图 21-3 为滞回比较器的电压传输特性。

由上述分析可见差动放大器输出电压  $u_{o1}$  经分压后  $A_2$  组成的滞回比较器, 与反相输入端的参考电压  $U_R$  相比较。当同相输入端的电压信号大于反相输入端的电压时,  $A_2$  输出正饱和电压, 三极管 T 饱和导通。通过发光二极管 LED 的发光情况, 可见负载的工作状态为加热。反之, 为同相输入信号小于反相输入端电压时,  $A_2$  输出负饱和电压, 三极管 T 截止, LED 熄灭, 负载的工作状态为停止。调节  $R_{w4}$  可改变参考电平, 也同时调节了上下门限电平, 从而达到设定温度的目的。

### 三、实验设备

- 1、±12V 直流电源
- 2、函数信号发生器
- 3、双踪示波器
- 4、热敏电阻 (NTC)
- 5、运算放大器  $\mu A741 \times 2$ 、晶体三极管 3DG12、稳压管 2CW231、发光管 LED

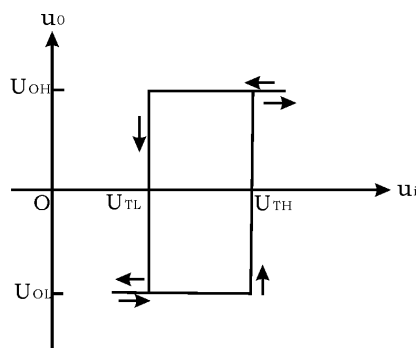


图 21-3 电压传输特性

## 四、实验内容

按图 21-2，连接实验电路，各级之间暂不连通，形成各级单元电路，以便各单元分别进行调试。

### 1、差动放大器

差动放大电路如图 21-4 所示。它可实现差动比例运算。

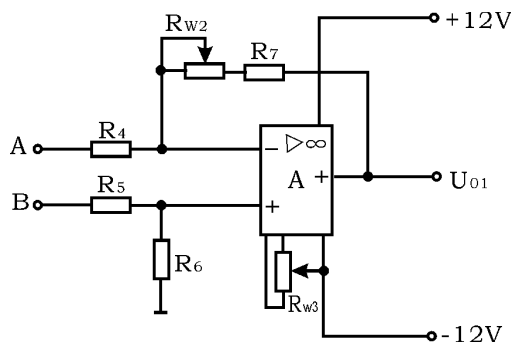


图 21-4 差动放大电路

1)、运放调零。将 A、B 两端对地短路，调节  $R_{w3}$  使  $U_0=0$ 。

2)、去掉 A、B 端对地短路线。从 A、B 端分别加入不同的二个直流电平。

当电路中  $R_7+R_{w2}=R_6$ ， $R_4=R_5$  时，其输出电压

$$u_0 = \frac{R_7 + R_{w2}}{R_4} (U_B - U_A)$$

在测试时，要注意加入的输入电压不能太大，以免放大器输出进入饱和区。

3)、将 B 点对地短路，把频率为 100Hz、有效值为 10mV 的正弦波加入 A 点。用示波器观察输出波形。在输出波形不失真的情况下，用交流毫伏表测出  $u_i$  和  $u_0$  的电压。算得此差动放大电路的电压放大倍数 A。

### 2、桥式测温放大电路

将差动放大电路的 A、B 端与测温电桥的 A'、B' 端相连，构成一个桥式测温放大电路。

1)、在室温下使电桥平衡

在实验室室温条件下，调节  $R_{w1}$ ，使差动放大器输出  $U_{01}=0$ （注意：前面实

验中调好的  $R_{w3}$  不能再动)。

### 2)、温度系数 $K$ (V/C)

由于测温需升温槽, 为使实验简易, 可虚设室温  $T$  及输出电压  $u_{o1}$ , 温度系数  $K$  也定为一个常数, 具体参数由读者自行填入表格内

表 21-1

温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	室温 $^{\circ}\text{C}$				
输出电压 $U_{o1}$ (V)	0				

从表 21-1 中可得到  $K = \Delta U / \Delta T$ 。

### 3)、桥式测温放大器的温度-电压关系曲线

根据前面测温放大器的温度系数  $K$ , 可画出测温放大器的温度-电压关系曲线, 实验时要标注相关的温度和电压的值, 如图 21-5 所示。从图中可求得在其它温度时, 放大器实际应输出的电压值。也可得到在当前室温时,  $U_{o1}$  实际对应值  $U_s$ 。

4)、重调  $R_{w1}$ , 使测温放大器在当前室温下输出  $U_s$ 。即调  $R_{w1}$ , 使  $U_{o1} = U_s$ 。

### 3、滞回比较器

4、滞回比较器电路如图 21-5 所示。

#### 1)、直流法测试比较器的上下门限电平

首先确定参考电平  $U_R$  值。调  $R_{w4}$ , 使  $U_R = 2V$ 。然后将可变的直流电压  $U_i$  加入比较器的输入端。比较器的输出电压  $U_o$  送入示波器 Y 输入端(将示波器的“输入耦合方式开关”置于“DC”, X 轴“扫描触发方式开关”置于“自动”)。改变直流输入电压  $U_i$  的大小, 从示波器屏幕上观察到当  $u_o$  跳变时所对应的  $U_i$  值, 即为上、下门限电平。

#### 2)、交流法测试电压传输特性曲线

将频率为 100Hz, 幅度 3V 的正弦信号加入比较器输入端, 同时送入示波器的 X 轴输入端, 作为 X 轴扫描信号。比较器的输出信号送入示波器的 Y 轴输入

端。微调正弦信号的大小，可从示波器显示屏上到完整的电压传输特性曲线。

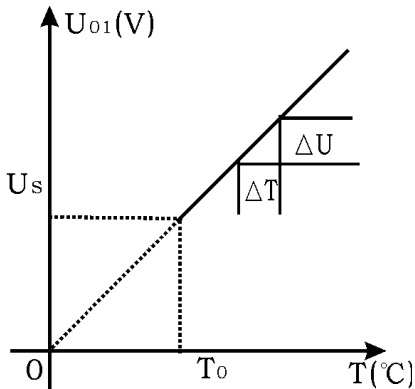


图 21-5 温度—电压关系曲线

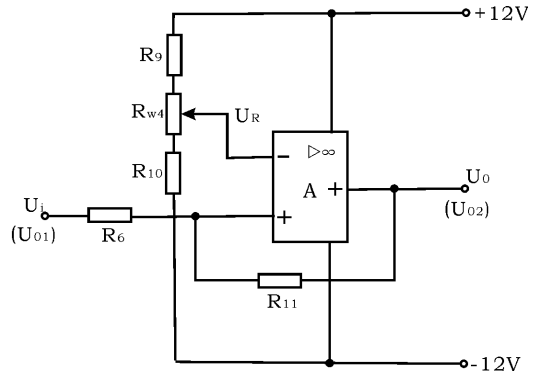


图 21-6 滞回比较器电路

#### 5、温度检测控制电路整机工作状态

1)、按图 21-1 连接各级电路。(注意：可调元件  $R_{w1}$ 、 $R_{w2}$ 、 $R_{w3}$  不能随意变动。如有变动，必须重新进行前面内容。)

2)、根据所需检测报警或控制的温度  $T$ ，从测温放大器温度—电压关系曲线中确定对应的  $u_{01}$  值。

3)、调节  $R_{w4}$  使参考电压  $U'_R = U_R = U_{01}$

4)、用加热器升温，观察温升情况，直至报警电路动作报警（在实验电路中当 LED 发光时作为报警），记下动作时对应的温度值  $t_1$  和  $U_{011}$  的值。

5)、用自然降温法使热敏电阻降温，记下电路解除时所对应的温度值  $t_2$  和  $U_{012}$  的值。

6) 改变控制温度  $T$ ，重做 2)、3)、4)、5)、内容。把测试结果记入表 21-2。

根据  $t_1$  和  $t_2$  值，可得到检测灵敏度  $t_0 = (t_2 - t_1)$

注：实验中的加热装置可用一个  $100 \Omega / 2W$  的电阻  $R_t$  模拟，将此电阻靠近  $R_t$  即可。

#### 五、实验总结

- 1、整理实数据，画出有关曲线、数据表格以及实验线路。
- 2、用方格纸画出测温放大电路温度系数曲线及比较器电压传输特性曲线。
- 3、实验中的故障排除情况及体会。

表 10-2

	设定温度 $T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )								
设定电压	从曲线上查得 $U_{01}$								
	$U_R$								
动作温度	$T_1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )								
	$T_2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )								
动作电压	$U_{011}$ (V)								
	$U_{012}$ (V)								

## 六、预习要求

- 1、阅读教材中有关集成运算放大器应用部分的章节。了解集成运算放大器构成的差动放大器等电路的性能和特点。
- 2、根据实验任务，拟出实验步骤及测试内容，画出数据记录表格。
- 3、依照实验线路板上集成运放插座的位置，从左到右安排前后各级电路。画出元件排列及布线图。元件排列既要紧凑，又不能相碰，以便缩短连线，防止引入干扰。同时又要便于实验中测试方便。
- 4、思考并回答下列问题：
  - 1)、如果放大器不进行调零，将会引起什么结果？
  - 2)、如何设定温度检测控制点？

## 实验二十二 综合实验

### 用运算放大器组成万用电表的设计与调试

#### 一、实验目的

- 1、设计由运算放大器组成的万用电表
- 2、组装与调试

#### 二、设计要求

- 1、直流电压表 满量程 +6V
- 2、直流电流表 满量程 10mA
- 3、交流电压表 满量程 6V, 50Hz~1KHz
- 4、交流电流表 满量程 10mA
- 5、欧姆表 满量程分别为 1K $\Omega$ , 10K $\Omega$ , 100K $\Omega$

#### 三、万用电表工作原理及参考电路

在测量中，电表的接入应不影响被测电路的原工作状态，这就要求电压表应具有无穷大的输入电阻，电流表的内阻应为零。但实际上，万用电表表头的可动线圈总有一定的电阻，例如 100 $\mu$ A 的表头，其内阻约为 1K $\Omega$ ，用它进行测量时将影响被测量，引起误差。此外，交流电表中的整流二极管的压降和非线性特性也会产生误差。如果在万用电表中使用运算放大器，就能大大降低这些误差，提高测量精度。在欧姆表中采用运算放大器，不仅能得到线性刻度，还能实现自动调零。

##### 1、直流电压表

图 22—1 为同相端输入，高精度直流电压表电原理图。

为了减小表头参数对测量精度的影响，将表头置于运算放大器的反馈回路中，这时，流经表头的电流与表头的参数无关，只要改变  $R_1$  一个电阻，就可进行量程的切换。

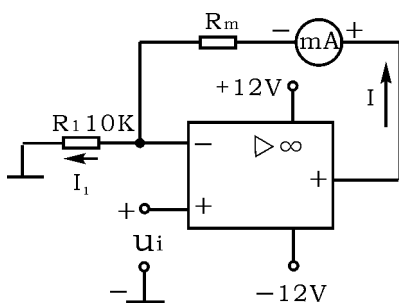


图 22-1 直流电压表

表头电流  $I$  与被测电压  $U_i$  的关系为

$$I = \frac{U_i}{R_1}$$

应当指出：图 22-1 适用于测量电路与运算放大器共地的有关电路。此外，当被测电压较高时，在运放的输入端应设置衰减器。

## 2、 直流电流表

图 22-2 是浮地直流电流表的电原理图。在电流测量中，浮地电流的测量是普遍存在的，例如：若被测电流无接地点，就属于这种情况。为此，应把运算放大器的电源也对地浮动，按此种方式构成的电流表就可象常规电流表那样，串联在任何电流通路中测量电流。

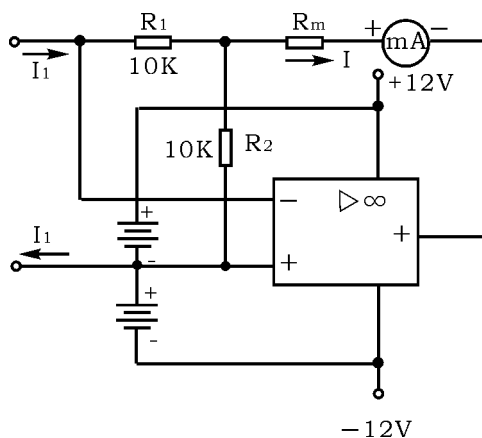


图 22-2 直流电流表

表头电流  $I$  与被测电流  $I_1$  间关系为

$$-I_1 R_1 = (I_1 - I) R_2$$

$$\therefore I = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) I_1$$

可见，改变电阻比 ( $R_1 / R_2$ )，可调节流过电流表的电流，以提高灵敏度。如果被测电流较大时，应给电流表表头并联分流电阻。

### 3、交流电压表

由运算放大器、二极管整流桥和直流毫安表组成的交流电压表如图 22-3 所示。被测交流电压  $u_i$  加到运算放大器的同相端，故有很高的输入阻抗，又因为负反馈能减小反馈回路中的非线性影响，故把二极管桥路和表头置于运算放大器的反馈回路中，以减小二极管本身非线性的影响。

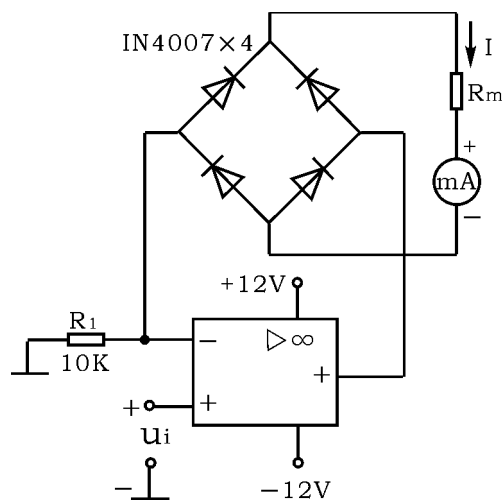


图 22-3 交流电压表

表头电流  $I$  与被测电压  $u_i$  的关系为

$$I = \frac{U_i}{R_1}$$

电流  $I$  全部流过桥路，其值仅与  $U_i / R_1$  有关，与桥路和表头参数（如二极



管的死区等非线性参数) 无关。表头中电流与被测电压  $u_i$  的全波整流平均值成正比, 若  $u_i$  为正弦波, 则表头可按有效值来刻度。被测电压的上限频率决定于运算放大器的频带和上升速率。

#### 4、 交流电流表

图 22-4 为浮地交流电流表, 表头读数由被测交流电流  $i$  的全波整流平均值  $I_{1AV}$  决定, 即  $I = (1 + \frac{R_1}{R_2}) I_{1AV}$

如果被测电流  $i$  为正弦电流, 即

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin \omega t, \text{ 则上式可写为}$$

$$I = 0.9 \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) I_1$$

则表头可按有效值来刻度。

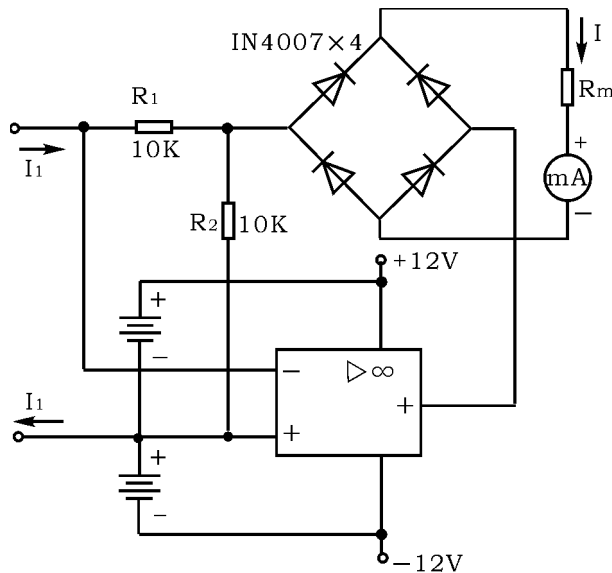


图 22-4 交流电流表

#### 5、 欧姆表

图 22-5 为多量程的欧姆表。

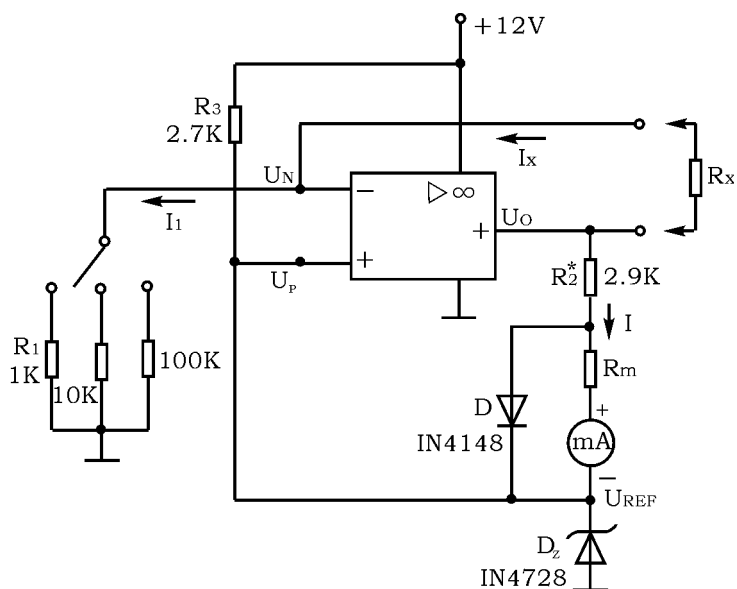


图 22-5 欧姆表

在此电路中，运算放大器改由单电源供电，被测电阻  $R_x$  跨接在运算放大器的反馈回路中，同相端加基准电压  $U_{REF}$ 。

$$\because U_p = U_N = U_{REF}$$

$$I_1 = I_x$$

$$\frac{U_{REF}}{R_1} = \frac{U_0 - U_{REF}}{R_x}$$

$$\text{即 } R_x = \frac{R_1}{U_{REF}} (U_0 - U_{REF})$$

流经表头的电流

$$I = \frac{U_0 - U_{REF}}{R_2 + R_m}$$

由上两式消去  $(U_0 - U_{REF})$

$$\text{可得 } I = \frac{U_{REF} R_x}{R_1 (R_m + R_2)}$$

可见，电流  $I$  与被测电阻成正比，而且表头具有线性刻度，改变  $R_1$  值，可

改变欧姆表的量程。这种欧姆表能自动调零，当  $R_x=0$  时，电路变成电压跟随器， $U_0=U_{REF}$ ，故表头电流为零，从而实现了自动调零。

二极管 D 起保护电表的作用，如果没有 D，当  $R_x$  超量程时，特别是当  $R_x \rightarrow \infty$ ，运算放大器的输出电压将接近电源电压，使表头过载。有了 D 就可使输出钳位，防止表头过载。调整  $R_2$ ，可实现满量程调节。

#### 四、电路设计

1、万用电表的电路是多种多样的，建议用参考电路设计一只较完整的万用电表。

2、万用电表作电压、电流或欧姆测量时，和进行量程切换时应用开关切换，但实验时可用引接线切换。

#### 五、实验元器件选择

1、表头 灵敏度为 1mA，内阻为  $100 \Omega$

2、运算放大器  $\mu A741$

3、电阻器 均采用  $\frac{1}{4}W$  的金属膜电阻器

4、二极管 IN4007 $\times$ 4、IN4148

5、稳压管 IN4728

#### 六、注意事项

1、在连接电源时，正、负电源连接点上各接大容量的滤波电容器和  $0.01 \mu f \sim 0.1 \mu f$  的小电容器，以消除通过电源产生的干扰。

2、万用电表的电性能测试要用标准电压、电流表校正，欧姆表用标准电阻校正。考虑实验要求不高，建议用数字式  $4\frac{1}{2}$  位万用电表作为标准表。

#### 七、报告要求

1、画出完整的万用电表的设计电路原理图。

2、将万用电表与标准表作测试比较，计算万用电表各功能档的相对误差，分析误差原因。

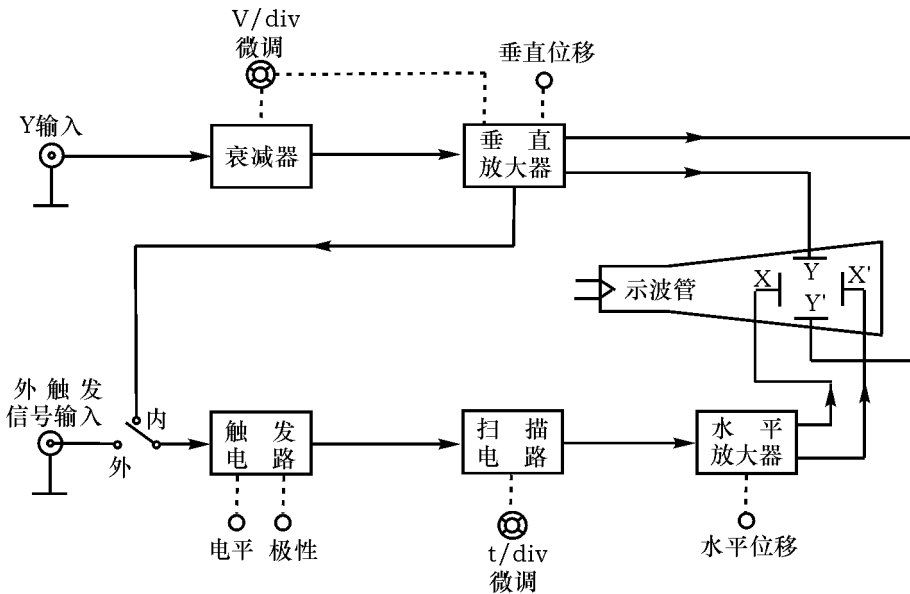
3、 电路改进建议

4、 收获与体会

# 附录 I 示波器原理及使用

## 一、 示波器的基本结构

示波器的种类很多，但它们都包含下列基本组成部分，如附图 1-1 所示。



附图 1-1 示波器的基本结构框图

### 1、主机

主机包括示波管及其所需的各种直流供电电路，在面板上的控制旋钮有：辉度、聚焦、水平移位、垂直移位等。

### 2、垂直通道

垂直通道主要用来控制电子束按被测信号的幅值大小在垂直方向上的偏移。

它包括 Y 轴衰减器，Y 轴放大器和配用的高频探头。通常示波管的偏转灵敏度比较低，因此在一般情况下，被测信号往往需要通过 Y 轴放大器放大后加到垂直偏转板上，才能在屏幕上显示出一定幅度的波形。Y 轴放大器的作用

提高了示波管 Y 轴偏转灵敏度。为了保证 Y 轴放大不失真，加到 Y 轴放大器的信号不宜太大，但是实际的被测信号幅度往往在很大范围内变化，此 Y 轴放大器前还必须加一 Y 轴衰减器，以适应观察不同幅度的被测信号。示波器面板上设有“Y 轴衰减器”（通常称“Y 轴灵敏度选择”开关）和“Y 轴增益微调”旋钮，分别调节 Y 轴衰减器的衰减量和 Y 轴放大器的增益。

对 Y 轴放大器的要求是：增益大，频响好，输入阻抗高。

为了避免杂散信号的干扰，被测信号一般都通过同轴电缆或带有探头的同轴电缆加到示波器 Y 轴输入端。但必须注意，被测信号通过探头幅值将衰减（或不衰减），其衰减比为 10：1（或 1：1）。

### 3、水平通道

水平通道主要是控制电子束按时间值在水平方向上偏移。

主要由扫描发生器、水平放大器、触发电路组成。

#### 3.1) 扫描发生器

扫描发生器又叫锯齿波发生器，用来产生频率调节范围宽的锯齿波，作为 X 轴偏转板的扫描电压。锯齿波的频率（或周期）调节是由“扫描速率选择”开关和“扫速微调”旋钮控制的。使用时，调节“扫速选择”开关和“扫速微调”旋钮，使其扫描周期为被测信号周期的整数倍，保证屏幕上显示稳定的波形。

#### 3.2) 水平放大器

其作用与垂直放大器一样，将扫描发生器产生的锯齿波放大到 X 轴偏转板所需的数值。

#### 3.3) 触发电路

用于产生触发信号以实现触发扫描的电路。为了扩展示波器应用范围，一般示波器上都设有触发源控制开关，触发电平与极性控制旋钮和触发方式选择开关等。

## 二、示波器的二踪显示

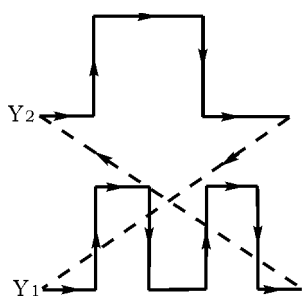
### 1、二踪显示原理

示波器的二踪显示是依靠电子开关的控制作用来实现的。

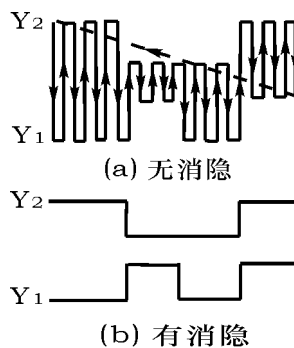
电子开关由“显示方式”开关控制，共有五种工作状态，即  $Y_1$ 、 $Y_2$ 、 $Y_1+Y_2$ 、

交替、断续。当开关置于“交替”或“断续”位置时，荧光屏上便可同时显示两个波形。当开关置于“交替”位置时，电子开关的转换频率受扫描系统控制，工作过程如附图 1-2 所示。即电子开关首先接通  $Y_2$  通道，进行第一次扫描，显示由  $Y_2$  通道送入的被测信号的波形；然后电子开关接通  $Y_1$  通道，进行第二次扫描，显示由  $Y_1$  通道送入的被测信号的波形；接着再接通  $Y_2$  通道……这样便轮流地对  $Y_2$  和  $Y_1$  两通道送入的信号进行扫描、显示，由于电子开关转换速度较快，每次扫描的回扫线在荧光屏上又不显示出来，借助于荧光屏的余辉作用和人眼的视觉暂留特性，使用者便能在荧光屏上同时观察到两个清晰的波形。这种工作方式适宜于观察频率较高的输入信号场合。

当开关置于“断续”位置时，相当于将一次扫描分成许多个相等的时间间隔。在第一次扫描的第一个时间间隔内显示  $Y_2$  信号波形的某一段；在第二个时间间隔内显示  $Y_1$  信号波形的某一段；以后各个时间间隔轮流地显示  $Y_2$ 、 $Y_1$  两信号波形的其余段，经过若干次断续转换，使荧光屏上显示出两个由光点组成的完整波形如附图 1-3(a) 所示。由于转换的频率很高，光点靠得很近，其间隙用肉眼几乎分辨不出，再利用消隐的方法使两通道间转换过程的过渡线不显示出来，见附图 1-3(b)，因而同样可达到同时清晰地显示两个波形的目的。这种工作方式适合于输入信号频率较低时使用。



附图 1-2 交替方式显示波形



附图 1-3 断续方式显示波形

## 2、触发扫描

在普通示波器中，X 轴的扫描总是连续进行的，称为“连续扫描”。为了更好地观测各种脉冲波形，在脉冲示波器中，通常采用“触发扫描”。采用这种

扫描方式时，扫描发生器将工作在待触发状态。它仅在外加触发信号作用下，时基信号才开始扫描，否则便不扫描。这个外加触发信号通过触发选择开关分别取自“内触发”（Y 轴的输入信号经由内触发放大器输出触发信号），也可取自“外触发”输入端的外接同步信号。其基本原理是利用这些触发脉冲信号的上升沿或下降沿来触发扫描发生器，产生锯齿波扫描电压，然后经 X 轴放大后送 X 轴偏转板进行光点扫描。适当地调节“扫描速率”开关和“电平”调节旋钮，能方便地在荧光屏上显示具有合适宽度的被测信号波形。

上面介绍了示波器的基本结构，下面将结合使用介绍电子技术实验中常用的 CA8020 型双踪示波器。

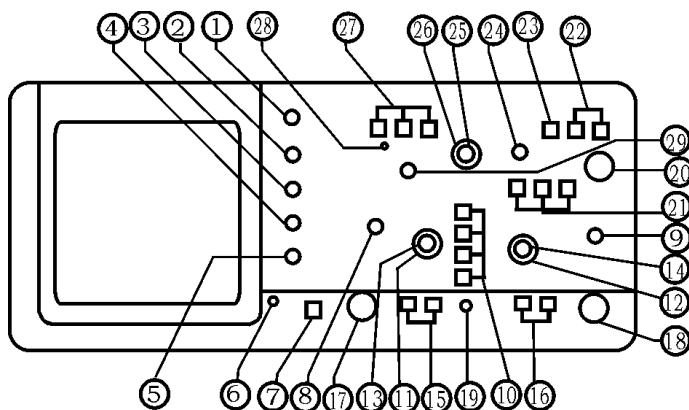
### 三、CA8020 型双踪示波器

#### 1、概述

CA8020 型示波器为便携式双通道示波器。本机垂直系统具有 0~20MHz 的频带宽度和 5mV/DIV~5V/DIV 的偏转灵敏度，配以 10:1 探极，灵敏度可达 5V/DIV。本机在全频带范围内可获得稳定触发，触发方式设有常态、自动、TV 和峰值自动，尤其峰值自动给使用带来了极大的方便。内触设置了交替触发，可以稳定地显示两个频率不相关的信号。本机水平系统具有 0.5S/DIV~0.2 $\mu$ S/DIV 的扫描速度，并设有扩展 $\times 10$ ，可将最快扫速度提高到 20nS/DIV。

#### 2、面板控制件介绍

CA8020 面板图如附图 1-4 所示



附图 1-4 CA8020 型双踪示波器面板图



序号	控制件名称	功 能
(1)	亮度	调节光迹的亮度
(2)	辅助聚焦	与聚焦配合，调节光迹的清晰度
(3)	聚焦	调节光迹的清晰度
(4)	迹线旋转	调节光迹与水平刻度线平行
(5)	校正信号	提供幅度为 0.5V，频率为 1KHz 的方波信号，用于校正 10 : 1 探极的补偿电容器和检测示波器垂直与水平的偏转因数
(6)	电源指示	电源接通时，灯亮
(7)	电源开关	电源接通或关闭
(8)	CH1 移位 PULL CH1-X CH2-Y	调节通道 1 光迹在屏幕上的垂直位置，用作 X-Y 显示
(9)	CH2 移位 PULL INVERT	调节通道 2 光迹在屏幕上的垂直位置，在 ADD 方式时使 CH1+CH2 或 CH1-CH2
(10)	垂直方式	CH1 或 CH2：通道 1 或通道 2 单独显示 ALT：两个通道交替显示 CHOP：两个通道断续显示，用于扫速较慢时的双踪显示 ADD：用于两个通道的代数和或差
(11)	垂直衰减器	调节垂直偏转灵敏度
(12)	垂直衰减器	调节垂直偏转灵敏度
(13)	微调	用于连续调节垂直偏转灵敏度，顺时针旋足为校正位置
(14)	微调	用于连续调节垂直偏转灵敏度，顺时针旋足为校正位置

(15)	耦合方式 (AC-DC-GND)	用于选择被测信号饋入垂直通道的耦合方式
(16)	耦合方式 (AC-DC-GND)	用于选择被测信号饋入垂直通道的耦合方式
(17)	CH1 OR X	被测信号的输入插座
(18)	CH2 OR Y	被测信号的输入插座
(19)	接地(GND)	与机壳相联的接地端
(20)	外触发输入	外触发输入插座
(21)	内触发源	用于选择 CH1、CH2 或交替触发
(22)	触发源选择	用于选择触发源为 INT (内), EXT (外) 或 LINE (电源)
(23)	触发极性	用于选择信号的上升或下降沿触发扫描
(24)	电平	用于调节被测信号在某一电平触发扫描
(25)	微调	用于连续调节扫描速度, 顺时针旋足为校正位置
(26)	扫描速率	用于调节扫描速度
(27)	触发方式	<p>常态 (NORM): 无信号时, 屏幕上无显示; 有信号时, 与电平控制配合显示稳定波形。</p> <p>自动 (AUTO): 无信号时, 屏幕上显示光迹; 有信号时, 与电平控制配合显示稳定波形。</p> <p>电视场 (TV): 用于显示电视场信号。</p> <p>峰值自动 (P-P AUTO): 无信号时, 屏幕上显示光迹; 有信号时, 无须调节电平即能获得稳定波形显示。</p>
(28)	触发指示	在触发扫描时, 指示灯亮
(29)	水平移位 PULL×10	调节迹线在屏幕上的水平位置拉出时扫描速度被扩展 10 倍

### 3、操作方法

#### 1)、电源检查

CA8020 双踪示波器电源电压为  $220V \pm 10\%$ 。接通电源前，检查当地电源电压，如果不相符合，则严格禁止使用！

#### 2)、面板一般功能检查

##### A. 将有关控制件按下表置位

控制件名称	作用位置	控制件名称	作用位置
亮度	居中	触发方式	峰值自动
聚焦	居中	扫描速率	0.5mS/div
位移	居中	极性	正
垂直方式	CH1	触发源	INT
灵敏度选择	10mV/div	内触发源	CH1
微调	校正位置	输入耦合	AC

B. 接通电源，电源指示灯亮，稍预热后，屏幕上出现扫描光迹，分别调节亮度、聚焦、辅助聚焦、迹线旋转、垂直、水平移位等控制件，使光迹清晰并与水平刻度平行。

C. 用 10：1 探极将校正信号输入至 CH1 输入插座。

D. 调节示波器有关控制件，使荧光屏上显示稳定且易观察方波波形。

E. 将探极换至 CH2 输入插座，垂直方式置于“CH2”，内触发源置于“CH2”，重复 D 操作。

#### 3)、垂直系统的操作

##### A. 垂直方式的选择

当只需观察一路信号时，将“垂直方式”开关置“CH1”或“CH2”，此时被选中的通道有效，被测信号可从通道端口输入。当需要同时观察两路信号时，将“垂直方式”开关置“交替”，该方式使两个通道的信号被交替显示，交替显

示的频率受扫描周期控制。当扫速低于一定频率时，交替方式显示会出现闪烁，此时应将开关置于“断续”位置。当需要观察两路信号代数和时，将“垂直方式”开关置于“代数和”位置，在选择这种方式时，两个通道的衰减设置必须一致，CH2 移位处于常态时为  $CH1+CH2$ ，CH2 移位拉出时为  $CH1-CH2$ 。

#### B. 输入耦合方式的选择

直流（DC）耦合：适用于观察包含直流成份的被测信号，如信号的逻辑电平和静态信号的直流电平，当被测信号的频率很低时，也必须采用这种方式。

交流（AC）耦合：信号中的直流分量被隔断，用于观察信号的交流份量，如观察较高直流电平上的小信号。

接地（GND）：通道输入端接地（输入信号断开），用于确定输入为零时光迹所处位置。

#### C. 灵敏度选择(V/div)的设定

按被测信号幅值的大小选择合适档级。“灵敏度选择”开关外旋钮为粗调，中心旋钮为细调（微调），微调旋钮按顺时针方向旋足至校正位置时，可根据粗调旋钮的示值(V/div)和波形在垂直轴方向上的格数读出被测信号幅值。

#### 4)、触发源的选择

##### A. 触发源选择

当触发源开关置于“电源”触发，机内 50Hz 信号输入到触发电路。当触发源开关置于“常态”触发，有两种选择，一种是“外触发”，由面板上外触发输入插座输入触发信号；另一种是“内触发”，由内触发源选择开关控制。

##### B. 内触发源选择

“CH1”触发：触发源取自通道 1。

“CH2”触发：触发源取自通道 2。

“交替触发”：触发源受垂直方式开关控制，当垂直方式开关置于“CH1”，触发源自动切换到通道 1；当垂直方式开关置于“CH2”，触发源自动切换到通道 2；当垂直方式开关置于“交替”，触发源与通道 1、通道 2 同步切换，在这

种状态使用时，两个不相关的信号其频率不应相差很大，同时垂直输入耦合应置于“AC”，触发方式应置于“自动”或“常态”。当垂直方式开关置于“断续”和“代数和”时，内触发源选择应置于“CH1”或“CH2”。

#### 5)、水平系统的操作

##### A. 扫描速度选择(t/div)的设定

按被测信号频率高低选择合适档级，“扫描速率”开关外旋钮为粗调，中心旋钮为细调（微调），微调旋钮按顺时针方向旋足至校正位置时，可根据粗调旋钮的示值(t/div)和波形在水平轴方向上的格数读出被测信号的时间参数。当需要观察波形某一个细节时，可进行水平扩展 $\times 10$ ，此时原波形在水平轴方向上被扩展 10 倍。

##### B. 触发方式的选择

“常态”：无信号输入时，屏幕上无光迹显示；有信号输入时，触发电平调节在合适位置上，电路被触发扫描。当被测信号频率低于 20Hz 时，必须选择这种方式。

“自动”：无信号输入时，屏幕上有光迹显示；一旦有信号输入时，电平调节在合适位置上，电路自动转换到触发扫描状态，显示稳定的波形，当被测信号频率高于 20Hz 时，最常用这一种方式。

“电视场”：对电视信号中的场信号进行同步，如果是正极性，则可以由 CH2 输入，借助于 CH2 移位拉出，把正极性转变为负极性后测量。

“峰值自动”：这种方式同自动方式，但无须调节电平即能同步，它一般适用于正弦波、对称方波或占空比相差不大的脉冲波。对于频率较高的测试信号，有时也要借助于电平调节，它的触发同步灵敏度要比“常态”或“自动”稍低一些。

##### C. “极性”的选择

用于选择被测试信号的上升沿或下降沿去触发扫描。

##### D. “电平”的位置

用于调节被测信号在某一合适的电平上启动扫描，当产生触发扫描后，触发指示灯亮。

#### 4、测量电参数

##### 1) 电压的测量

示波器的电压测量实际上是对所显示波形的幅度进行测量，测量时应使被测波形稳定地显示在荧光屏中央，幅度一般不宜超过 6div，以避免非线性失真造成的测量误差。

##### 1.1) 交流电压的测量

A. 将信号输入至 CH1 或 CH2 插座，将垂直方式置于被选用的通道。

B. 将 Y 轴“灵敏度微调”旋钮置校准位置，调整示波器有关控制件，使荧光屏上显示稳定、易观察的波形，则交流电压幅值

$$V_{p-p} = \text{垂直方向格数}(\text{div}) \times \text{垂直偏转因数}(\text{V/div})$$

##### 1.2) 直流电平的测量

A. 设置面板控制件，使屏幕显示扫描基线。

B. 设置被选用通道的输入耦合方式为“GND”。

C. 调节垂直移位，将扫描基线调至合适位置，作为零电平基准线。

D. 将“灵敏度微调”旋钮置校准位置，输入耦合方式置“DC”，被测电平由相应 Y 输入端输入，这时扫描基线将偏移，读出扫描基线在垂直方向偏移的格数(div)，则被测电平

$$V = \text{垂直方向偏移格数}(\text{div}) \times \text{垂直偏转因数}(\text{V/div}) \times \text{偏转方向}(+ \text{或} -)$$

式中，基线向上偏移取正号，基线向下偏移取负号。

##### 2)、时间测量

时间测量是指对脉冲波形的宽度、周期、边沿时间及两个信号波形间的时间间隔(相位差)等参数的测量。一般要求被测部分在荧光屏 X 轴方向应占(4~6)div。

### 2.1) 时间间隔的测量

对于一个波形中两点间的时间间隔的测量，测量时先将“扫描微调”旋钮置校准位置，调整示波器有关控制件，使荧光屏上波形在 X 轴方向大小适中，读出波形中需测量两点间水平方向格数，则时间间隔：

$$\text{时间间隔} = \text{两点之间水平方向格数 (div)} \times \text{扫描时间因数 (t/div)}$$

### 2.2) 脉冲边沿时间的测量

上升（或下降）时间的测量方法和时间间隔的测量方法一样，只不过是测量被测波形满幅度的 10% 和 90% 两点之间的水平方向距离，如附图 1-5 所示。

用示波器观察脉冲波形的上升边沿、下降边沿时，必须合理选择示波器的触发极性（用触发极性开关控制）。显示波形的上升边沿用“+”极性触发，显示波形下降边沿用“-”极性触发。如波形的上升沿或下降沿较快则可将水平扩展×10，使波形在水平方向上扩展 10 倍，则上升（或下降）时间：

$$\text{上升（或下降）时间} = \frac{\text{水平方向格数 (div)} \times \text{扫描时间因数 (t/div)}}{\text{水平扩展倍数}}$$

### 2.3) 相位差的测量

A. 参考信号和一个待比较信号分别插入“CH1”和“CH2”输入插座。

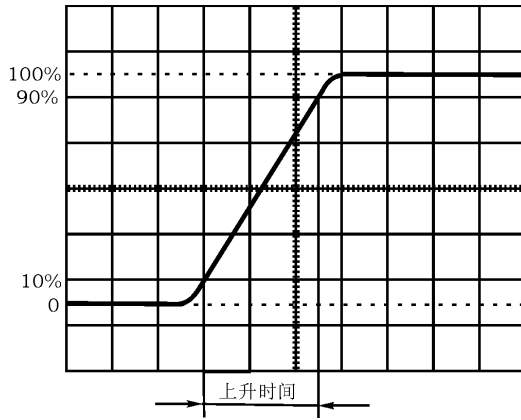
B. 根据信号频率，将垂直方式置于“交替”或“断续”

C. 设置内触发源至参考信号那个通道。

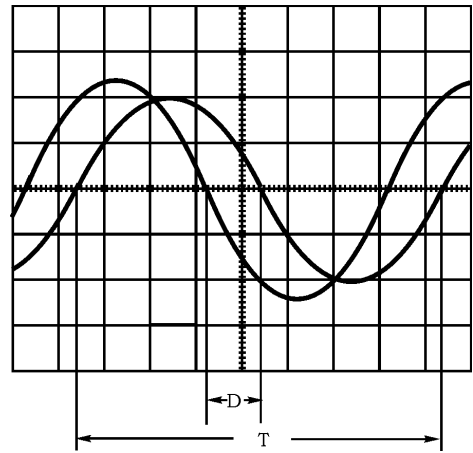
D. 将 CH1 和 CH2 输入耦合方式置“⊥”，调节 CH1、CH2 移位旋钮，使两条扫描基线重合。

E. 将 CH1、CH2 耦合方式开关置“AC”，调整有关控制件，使荧光屏显示大小适中、便于观察两路信号，如附图 1-6 所示。读出两波形水平方向差距格数 D 及信号周期所占格数 T，则相位差：

$$\theta = \frac{D}{T} \times 360^\circ$$



附图 1-5 上升时间的测量



附图 1-6 相位差的测量



## 附录 II 用万用电表对常用电子元器件检测

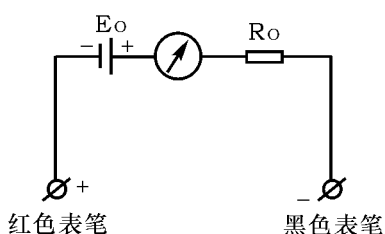
用万用表可以对晶体二极管、三极管、电阻、电容等进行粗测。万用表电阻档等值电路如附图(II)-1所示,其中的 $R_0$ 为等效电阻, $E_0$ 为表内电池,当万用表处于 $R\times 1$ 、 $R\times 100$ 、 $R\times 1K$ 档时,一般, $E_0=1.5V$ ,而处于 $R\times 10K$ 档时, $E_0=15V$ 。测试电阻时要记住,红表笔接在表内电池负端(表笔插孔标“+”号),而黑表笔接在正端(表笔插孔标以“-”号)。

### 1、晶体二极管管脚极性、质量的判别

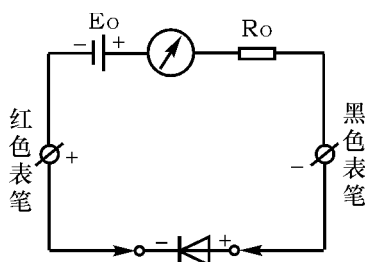
晶体二极管由一个PN结组成,具有单向导电性,其正向电阻小(一般为几百欧)而反向电阻大(一般为几十千欧至几百千欧),利用此点可进行判别。

#### (1) 管脚极性判别

将万用表拨到 $R\times 100$ (或 $R\times 1K$ )的欧姆档,把二极管的两只管脚分别接到万用表的两根测试笔上,如附图II-2所示。如果测出的电阻较小(约几百欧),则与万用表黑表笔相接的一端是正极,另一端就是负极。相反,如果测出的电阻较大(约百千欧),那么与万用表黑表笔相连接的一端是负极,另一端就是正极。



附图 II-1 万用表电阻档等值电路



附图 II-2 判断二极管极性

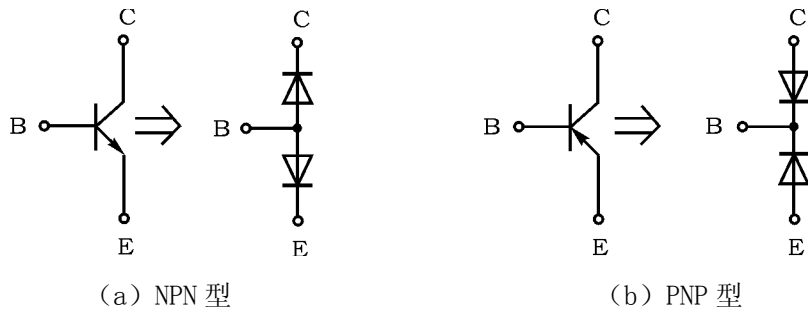
#### (2) 判别二极管质量的好坏

一个二极管的正、反向电阻差别越大,其性能就越好。如果双向电阻值都较小,说明二极管质量差,不能使用;如果双向阻值都为无穷大,则说明该二极管已经断路。如双向阻值均为零,说明二极管已被击穿。

利用数字万用表的二极管档也可判别正、负极，此时红表笔（插在“V·Ω”插孔）带正电，黑表笔（插在“COM”插孔）带负电。用两支表笔分别接触二极管两个电极，若显示值在 1V 以下，说明管子处于正向导通状态，红表笔接的是正极，黑表笔接的是负极。若显示溢出符号“1”，表明管子处于反向截止状态，黑表笔接的是正极，红表笔接的是负极。

## 2、晶体三极管管脚、质量判别

可以把晶体三极管的结构看作是两个背靠背的 PN 结，对 NPN 型来说基极是两个 PN 结的公共阳极，对 PNP 型管来说基极是两个 PN 结的公共阴极，分别如附图 II—3 所示。



附图 II—3 晶体三极管结构示意图

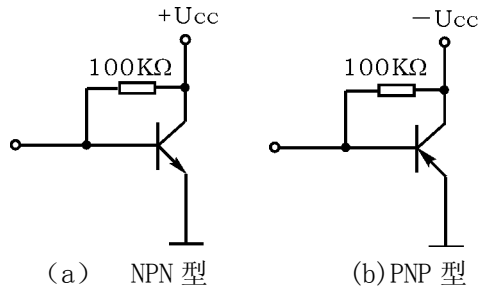
### (1) 管型与基极的判别

万用表置电阻档，量程选 1K 档（或  $R \times 100$ ），将万用表任一表笔先接触某一个电极—假定的公共极，另一表笔分别接触其他两个电极，当两次测得的电阻均很小（或均很大），则前者所接电极就是基极，如两次测得的阻值一大、一小，相差很多，则前者假定的基极有错，应更换其他电极重测。

根据上述方法，可以找出公共极，该公共极就是基极 B，若公共极是阳极，该管属 NPN 型管，反之则是 PNP 型管。

### (2) 发射极与集电极的判别

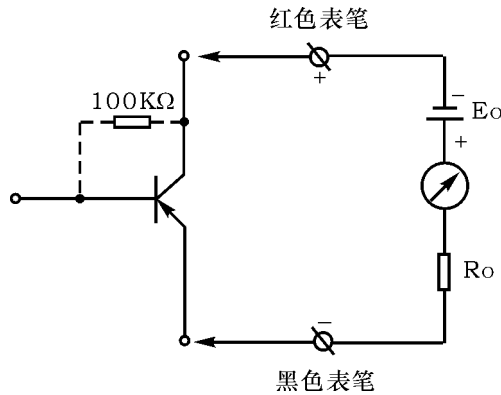
为使三极管具有电流放大作用，发射结需加正偏置，集电结加反偏置。如附图 II—4 所示。



图附 II -4 晶体三极管的偏置情况

当三极管基极 B 确定后，便可判别集电极 C 和发射极 E，同时还可以大致了解穿透电流  $I_{CE0}$  和电流放大系数  $\beta$  的大小。

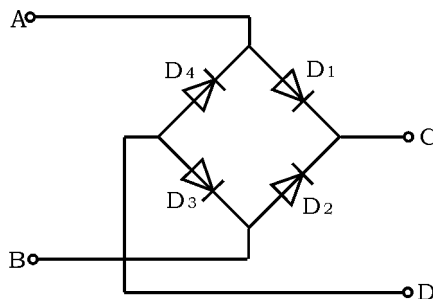
以 PNP 型管为例，若用红表笔（对应表内电池的负极）接集电极 C，黑表笔接 E 极，（相当 C、E 极间电源正确接法），如附图 II -5 所示，这时万用表指针摆动很小，它所指示的电阻值反映管子穿透电流  $I_{CE0}$  的大小（电阻值大，表示  $I_{CE0}$  小）。如果在 C、B 间跨接一只  $R_B=100K$  电阻，此时万用表指针将有较大摆动，它指示的电阻值较小，反映了集电极电流  $I_C=I_{CE0}+\beta I_B$  的大小。且电阻值减小愈多表示  $\beta$  愈大。如果 C、E 极接反（相当于 C-E 间电源极性反接）则三极管处于倒置工作状态，此时电流放大系数很小（一般  $<1$ ）于是万用表指针摆动很小。因此，比较 C-E 极两种不同电源极性接法，便可判断 C 极和 E 极了。同时还可大致了解穿透电流  $I_{CE0}$  和电流放大系数  $\beta$  的大小，如万用表上有  $h_{FE}$  插孔，可利用  $h_{FE}$  来测量电流放大系数  $\beta$ 。



附图 II -5 晶体三极管集电极 C、发射极 E 的判别

### 3、检查整流桥堆的质量

整流桥堆是把四只硅整流二极管接成桥式电路，再用环氧树脂（或绝缘塑料）封装而成的半导体器件。桥堆有交流输入端（A、B）和直流输出端（C、D），如附图 II - 6 所示。采用判定二极管的方法可以检查桥堆的质量。从图中可看出，交流输入端 A-B 之间总会有一只二极管处于截止状态使 A-B 间总电阻趋向于无穷大。直流输出端 D-C 间的正向压降则等于两只硅二极管的压降之和。因此，用数字万用表的二极管档测 A-B 的正、反向电压时均显示溢出，而测 D-C 时显示大约 1V，即可证明桥堆内部无短路现象。如果有一只二极管已经击穿短路，那么测 A-B 的正、反向电压时，必定有一次显示 0.5V 左右。

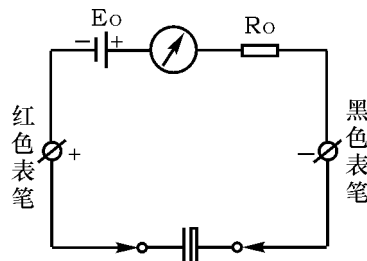


附图 II - 6 整流桥堆管脚及质量判别

### 4、电容的测量

电容的测量，一般应借助于专门的测试仪器。通常用电桥。而用万用表仅能粗略地检查一下电解电容是否失效或漏电情况。

测量电路如附图 II - 7 所示



附图 II - 7 电容的测量

测量前应先将电解电容的两个引出线短接一下，使其上所充的电荷释放。然后将万用表置于 1K 档，并将电解电容的正、负极分别与万用表的黑表笔、红表笔接触。在正常情况下，可以看到表头指针先是产生较大偏转（向零欧姆处），以后逐渐向起始零位（高阻值处）返回。这反映了电容器的充电过程，指针的偏转反映电容器充电电流的变化情况。

一般说来，表头指针偏转愈大，返回速度愈慢，则说明电容器的容量愈大，若指针返回到接近零位（高阻值），说明电容器漏电阻很大，指针所指示电阻值，即为该电容器的漏电阻。对于合格的电解电容器而言，该阻值通常在  $500\text{K}\Omega$  以上。电解电容在失效时（电解液干涸，容量大幅度下降）表头指针就偏转很小，甚至不偏转。已被击穿的电容器，其阻值接近于零。

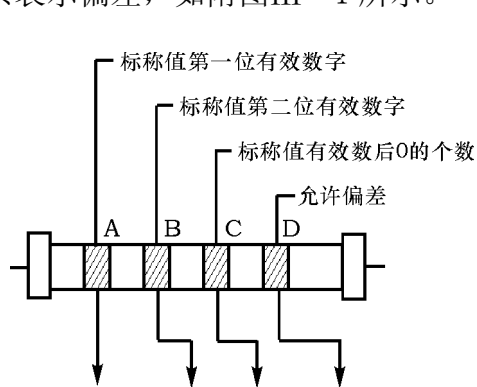
对于容量较小的电容器（云母、瓷质电容等），原则上也可以用上述方法进行检查，但由于电容量较小，表头指针偏转也很小，返回速度又很快，实际上难以对它们的电容量和性能进行鉴别，仅能检查它们是否短路或断路。这时应选用  $R\times 10\text{K}$  档测量。

## 附录III 电阻器的标称值及精度色环标志法

色环标志法是用不同颜色的色环在电阻器表面标称阻值和允许偏差。

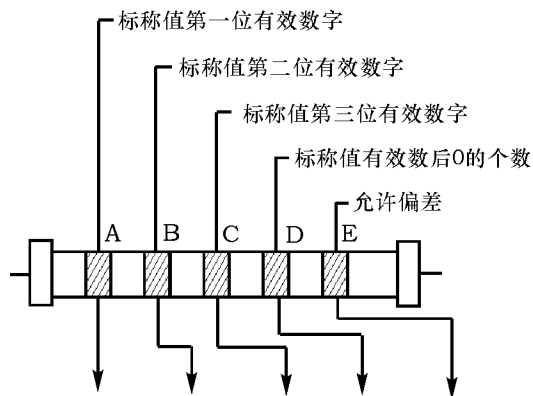
1、两位有效数字的色环标志法。

普通电阻器用四条色环表示标称阻值和允许偏差，其中三条表示阻值，一条表示偏差，如附图III—1所示。



颜色	第一有效数	第二有效数	倍率	允许偏差
黑	0	0	$10^0$	
棕	1	1	$10^1$	
红	2	2	$10^2$	
橙	3	3	$10^3$	
黄	4	4	$10^4$	
绿	5	5	$10^5$	
蓝	6	6	$10^6$	
紫	7	7	$10^7$	
灰	8	8	$10^8$	
白	9	9	$10^9$	+50% -20%
金			$10^{-1}$	±5%
银			$10^{-2}$	±10%
无色				±20%

图III—1 两位有效数字的阻值色环标志法

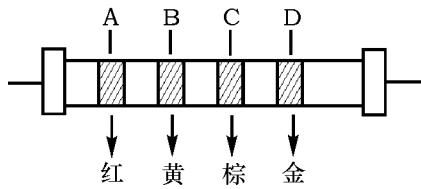


颜色	第一有效数	第二有效数	第三有效数	倍率	允许偏差
黑	0	0	0	$10^0$	
棕	1	1	1	$10^1$	±1%
红	2	2	2	$10^2$	±2%
橙	3	3	3	$10^3$	
黄	4	4	4	$10^4$	
绿	5	5	5	$10^5$	±0.5%
蓝	6	6	6	$10^6$	±0.25%
紫	7	7	7	$10^7$	±0.1%
灰	8	8	8	$10^8$	
白	9	9	9	$10^9$	
金				$10^{-1}$	
银				$10^{-2}$	

附图III—2 三位有效数字的阻值色环标志法

2、三位有效数字的色环标志法。精密电阻器用五条色环表示标称阻值和允许偏差，如附图III-2所示。

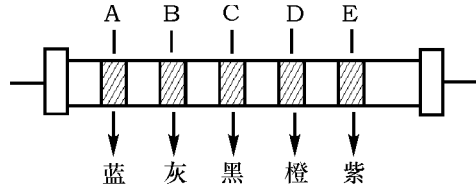
示例：



如：色环 A—红色；B—黄色  
C—棕色；D—金色

则该电阻标称值及精度为：

$$24 \times 10^1 = 240 \Omega \quad \text{精度：} \pm 5\%$$



如：色环 A—蓝色；B—灰色；C—黑色  
D—橙色；E—紫色

则该电阻标称值及精度为：

$$680 \times 10^3 = 680K \Omega \quad \text{精度：} \pm 0.1\%$$

## 附录IV 放大器干扰、噪声抑制和自激振荡的消除

放大器的调试一般包括调整和测量静态工作点，调整和测量放大器的性能指标：放大倍数、输入电阻、输出电阻和通频带等。由于放大电路是一种弱电系统，具有很高的灵敏度，因此很容易接受外界和内部一些无规则信号的影响。也就是在放大器的输入端短路时，输出端仍有杂乱无规则的电压输出，这就是放大器的噪声和干扰电压。另外，由于安装、布线不合理，负反馈太深以及各级放大器共用一个直流电源造成级间耦合等，也能使放大器没有输入信号时，有一定幅度和频率的电压输出，例如收音机的尖叫声或“突突……”的汽船声，这就是放大器发生了自激振荡。噪声、干扰和自激振荡的存在都妨碍了对有用信号的观察和测量，严重时放大器将不能正常工作。所以必须抑制干扰、噪声和消除自激振荡，才能进行正常的调试和测量。



附图 4-1

### 一、干扰和噪声的抑制

把放大器输入端短路，在放大器输出端仍可测量到一定的噪声和干扰电压。其频率如果是 50Hz（或 100Hz），一般称为 50Hz 交流声，有时是非周期性的，没有一定规律，可以用示波器观察到如附图 4-1 所示波形。50Hz 交流声大都来自电源变压器或交流电源线，100Hz 交流声往往是由于整流滤波不良所造成的。另外，由电路周围的电磁波干扰信号引起的干扰电压也是常见的。由于放大器的放大倍数很高（特别是多级放大器），只要在它的前级引进一点微弱的干



扰，经过几级放大，在输出端就可以产生一个很大的干扰电压。还有，电路中的地线接得不合理，也会引起干扰。

抑制干扰和噪声的措施一般有以下几种

### 1、选用低噪声的元器件

如噪声小的集成运放和金属膜电阻等。另外可加低噪声的前置差动放大电路。由于集成运放内部电路复杂，因此它的噪声较大。即使是“极低噪声”的集成运放，也不如某些噪声小的场效应对管，或双极型超 $\beta$ 对管，所以在要求噪声系数极低的场合，以挑选噪声小对管组成前置差动放大电路为宜。也可加有源滤波器。

### 2、合理布线

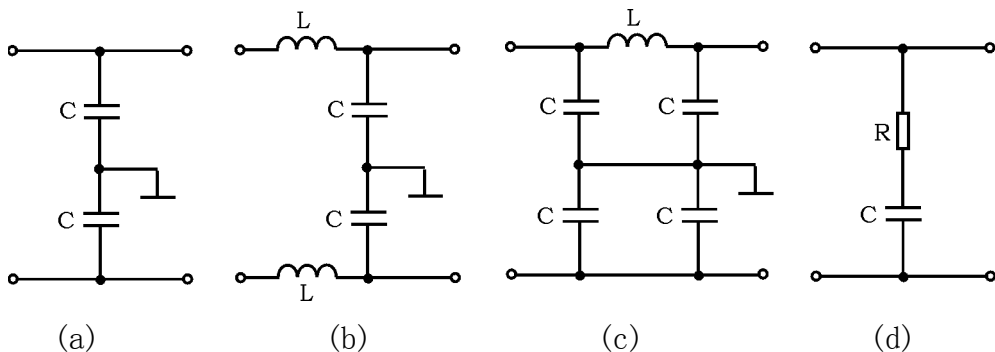
放大器输入回路的导线和输出回路、交流电源的导线要分开，不要平行铺设或捆扎在一起，以免相互感应。

### 3、屏蔽

小信号的输入线可以采用具有金属丝外套的屏蔽线，外套接地。整个输入级用单独金属盒罩起来，外罩接地。电源变压器的初、次级之间加屏蔽层。电源变压器要远离放大器前级，必要时可以把变压器也用金属盒罩起来，以利隔离。

### 4、滤波

为防止电源串入干扰信号，可在交（直）流电源线的进线处加滤波电路。附图 4-2(a)、(b)、(c)所示的无源滤波器可以滤除天电干扰（雷电等引起）

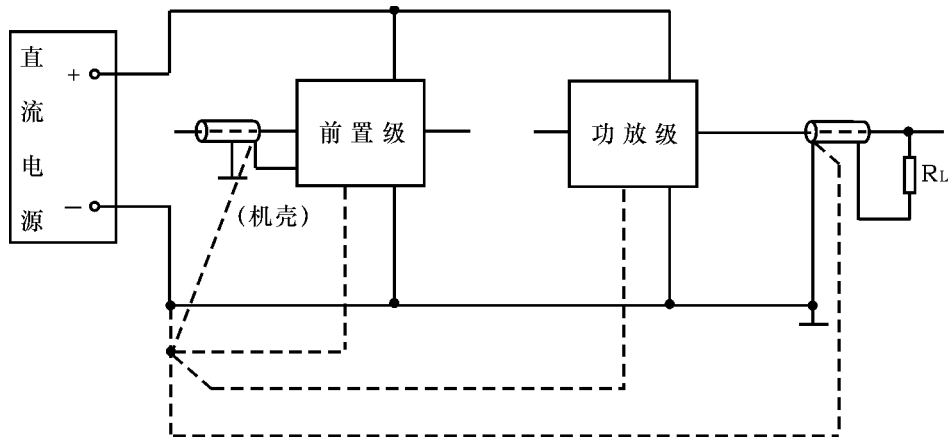


附图 4-2

和工业干扰（电机、电磁铁等设备起、制动时引起）等干扰信号，而不影响 50Hz 电源的引入。图中电感，电容元件，一般 L 为几~几十毫亨，C 为几千微微法。图(d)中阻容串联电路对电源电压的突变有吸收作用，以免其进入放大器。R 和 C 的数值可选  $100\ \Omega$  和  $2\ \mu\text{F}$  左右。

### 5、选择合理的接地点

在各级放大电路中，如果接地点安排不当，也会造成严重的干扰。例如，在附图 4-3 中，同一台电子设备的放大器，由前置放大级和功率放大级组成。当接地点如图中实线所示时，功率级的输出电流是比较大的，此电流通过导线产生的压降，与电源电压一起，作用于前置级，引起扰动，甚至产生振荡。还因负载电流流回电源时，造成机壳（地）与电源负端之间电压波动，而前置放大级的输入端接到这个不稳定的“地”上，会引起更为严重的干扰。如将接地点改成图中虚线所示，则可克服上述弊端。

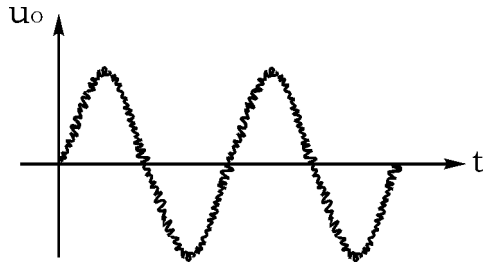


附图 4-3

## 二、自激振荡的消除

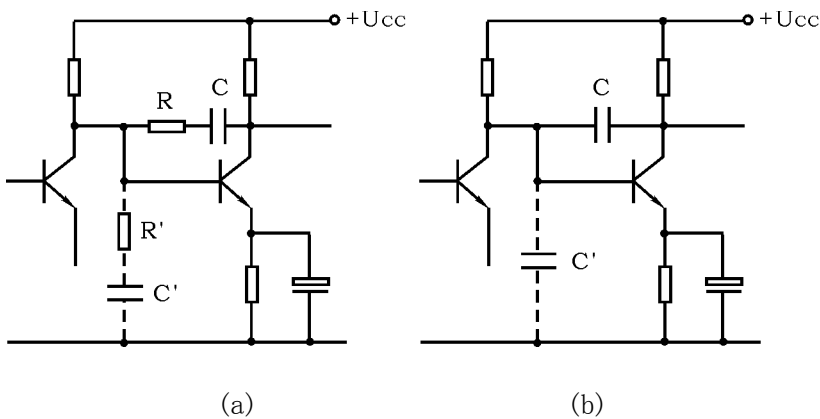
检查放大器是否发生自激振荡，可以把输入端短路，用示波器（或毫伏表）接在放大器的输出端进行观察，如附图 4-4 所示波形。自激振荡和噪声的区别是，自激振荡的频率一般为比较高的或极低的数值，而且频率随着放大器元

件参数不同而改变（甚至拨动一下放大器内部导线的位置，频率也会改变），振荡波形一般是比较规则的，幅度也较大，往往使三极管处于饱和和截止状态。



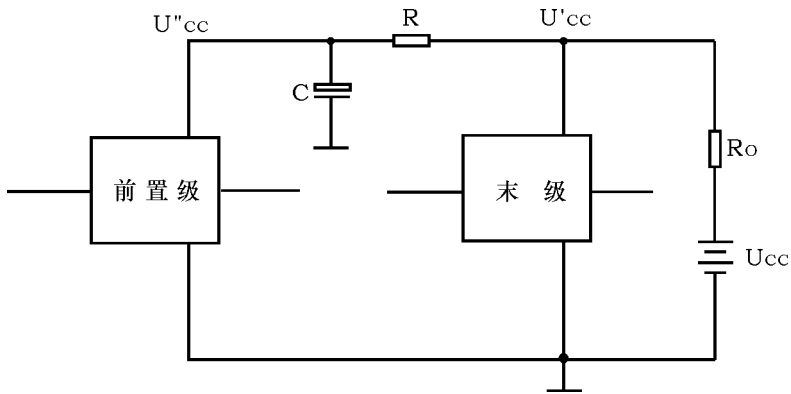
附图 4-4

高频振荡主要是由于安装、布线不合理引起的。例如输入和输出线靠的太近，产生正反馈作用。对此应从安装工艺方面解决，如元件布置紧凑，接线要短等。也可以用小电容（例如 1000PF 左右）一端接地，另一端逐级接触管子的输入端，或电路中合适部位，找到抑制振荡的最灵敏的一点（即电容接此点时，自激振荡消失），在此处外接一个合适的电阻电容或单一电容（一般 100PF~0.1  $\mu$ F，由试验决定），进行高频滤波或负反馈，以压低放大电路对高频信号的放大倍数或移动高频电压的相位，从而抑制高频振荡（如附图 4-5 所示）。



附图 4-5

低频振荡是由于各级放大电路共用一个直流电源所引起。如附图 4-6 所示，因为电源总有一定的内阻  $R_0$ ，特别是电池用得时间过长或稳压电源质量不高，使得内阻  $R_0$  比较大时，则会引起  $U'_{cc}$  处电位的波动， $U'_{cc}$  的波动作用到前级，使前级输出电压相应变化，经放大后，使波动更厉害，如此循环，就会造成振荡现象。最常用的消除办法是在放大电路各级之间加上“去耦电路”如图中的  $R$  和  $C$ ，从电源方面使前后级减小相互影响。去耦电路  $R$  的值一般为几百欧，电容  $C$  选几十微法或更大一些。



附图 4-6