

# 第2章 模拟电子电路的基础实验

(以天煌模电实验箱为平台)

## 实验2.1 常用电子仪器的使用

### 一、实验目的

- (1) 熟悉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) 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。
- (3) 掌握万用表的使用及用万用表粗测晶体三极管、三极管的质量的好坏及管脚的判断。

### 二、实验设备与器件

- (1) 函数信号发生器。
- (2) 双踪示波器。
- (3) 万用表。
- (4) 电阻、电容、二极管、三极管。

### 三、实验原理

在模拟电子电路实验中，经常使用的电子测量仪器有示波器、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，各测量仪器与被测实验装置之间的布局与连接如图2-1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。

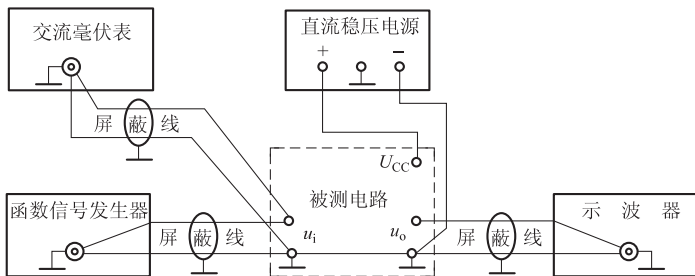


图 2-1 模拟电子电路中常用电子仪器布局图

## 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“ $Y_1$ ”或“ $Y_2$ ”，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（ $\updownarrow$ ）、水平（ $\rightleftarrows$ ）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“ $Y_1$ ”、“ $Y_2$ ”、“ $Y_1 + Y_2$ ”三种单踪显示方式和“交替”、“断续”两种双踪显示方式。“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 1~2 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  $X$  轴扫描微调旋钮置于“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 ( $t/\text{div}$ ) 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  $20 V_{p-p}$ 。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挡开关进行调节。

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的位置上, 然后在测量中逐挡减小量程。

# 四、实验内容

## (一) 双踪示波器的使用及测试

### 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”, 内触发源选择置“ $Y_1$ ”或“ $Y_2$ ”。调节 X 轴扫描速率开关 ( $t/\text{div}$ ) 和 Y 轴输入灵敏度开关 ( $V/\text{div}$ ), 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。

① 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 2-1 中。

注意: 不同型号示波器标准值有所不同, 请按所使用示波器的型号将标准值填入表格中。

② 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 2-1 中。

③ 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, 从显示屏上清楚地读出上升时间和下降时间, 记入表 2-1 中。



表 2-1 校正信号的幅度

	标准值	实测值
幅度 $U_{p-p}/V$		
频率 $f/kHz$		
上升沿时间/ $\mu s$		
下降沿时间/ $\mu s$		

## 2. 用示波器测量信号参数

调节函数信号发生器有关旋钮，使输出频率分别为 100 Hz、1 kHz、10 kHz、100 kHz，有效值均为 1 V（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 2-2 中。

表 2-2 交流毫伏表与示波器测量结果的比较

信号电压频率	示波器测量值		示波器测量值	
	周期/ms	频率/Hz	峰—峰值/V	有效值/V
100 Hz				
1 kHz				
10 kHz				
100 kHz				

## 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 0.5 s/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 2-2 连接实验电路，将函数信号发生器的输出电压调至频率为 1 kHz，幅值为 2 V 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。

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  $Y_1$ 、 $Y_2$  的上下移位旋钮，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 2-3 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：

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

式中， $X_T$  为一周期所占格数； $X$  为两波形在  $X$  轴方向差距格数。记录两波形相位差于表 2-3 中。

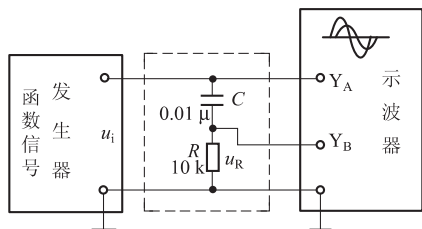


图 2-2 两波形间相位差测量电路

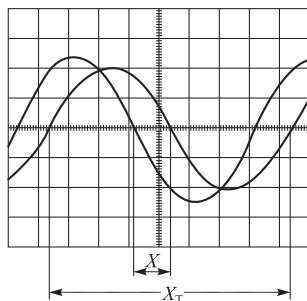


图 2-3 双踪示波器显示两相位不同的正弦波

表 2-3 两波形的相位差

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

为读数及计算方便，可适当调节扫速开关及微调旋钮，使波形一周期占整数格。

### (二) 利用指针式万用表粗测二极管的质量及管脚极性

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  $R \times 1 K$ ）欧姆挡，把二极管的两只管脚分别接到万用表的两根测试笔上，如图 2-4 (a) 所示。如果测出的电阻较小（约几千欧），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。

(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。如图 2-4 (b) 所示，如果双向阻值都较小，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挡也可判别正、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

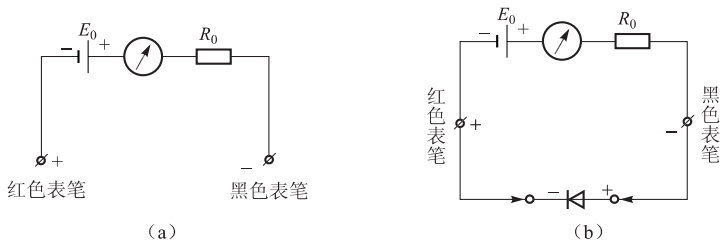


图 2-4 用万用表测试二极管

(a) 万用表电阻挡等值电路；(b) 判断二极管极性

示一个数值，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。

用两支表笔分别接触二极管两个电极，若两次显示一个数值，或均显示溢出符号“1”，则说明二极管短路或开路即已损坏。若一次显示一个数值，另一次显示溢出符号“1”，则说明二极管是好的。

### (三) 晶体三极管管脚、质量判别

可以把晶体三极管的结构看做是两个背靠背的 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，分别如图 2-5 (a)、图 2-5 (b) 所示。

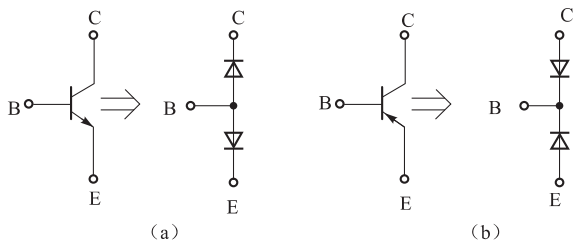


图 2-5 晶体三极管结构示意图

(a) NPN 型；(b) PNP 型

(1) 管型与基极的判别：万用表置电阻挡，量程选 1 K 挡（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。

若为数字万用表，则可置于二极管挡用红表笔先接触某一个电极——假定的基极，黑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），则红表笔所接电极为基极，如两次测得的阻值一大、一小，相差很多，则假定的基极有错，应更换其他电极重测。



当两次测得的电阻均很小时该管属 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。如图 2-6 所示。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 极间电源正接），如图 2-7 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  $R_B = 100\text{ k}\Omega$  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。且电阻值减小越多表示  $\beta$  越大。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  $\beta$ 。当接法正确时，电流放大系数  $\beta$  较大；而当三极管倒置使用时，电流放大系数  $\beta$  很小。

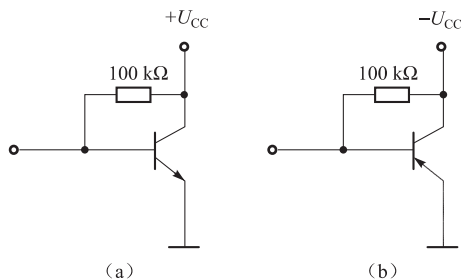


图 2-6 晶体三极管 C、E 的判别

(a) NPN 型；(b) PNP 型

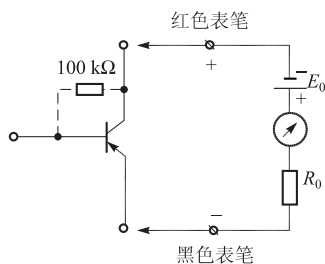


图 2-7 晶体三极管的偏置情况

## 五、实验报告要求

(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？

- 显示方式选择： $Y_1$ ； $Y_2$ ； $Y_1 + Y_2$ ；交替；断续。
- 触发方式：常态；自动。
- 触发源选择：内；外。
- 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) 怎样用万用表粗测判断晶体管的质量好坏与管脚的？

## 实验 2.2 场效应管伏安特性的测试

### 一、实验目的

- (1) 了解场效应管的工作原理与伏安特性。
- (2) 掌握场效应管性能参数的测试方法。
- (3) 掌握场效应管的基本应用。

### 二、实验仪器

直流稳压电源、万用表。

### 三、实验原理

场效应管是利用电场强度  $E$  来控制半导体中多数载流子运动的一种晶体管器件。场效应管按其结构和工作原理的不同，可分为两大类：MOS 场效应管和结型场效应管。MOS 场效应管由于其输入阻抗很高（其栅极  $G$  与漏  $D$ 、源  $S$  间互相绝缘），可达  $10^{12} \Omega$ ，以及它在硅片上的集成度高，因此在大规模集成电路中占有非常重要的地位。

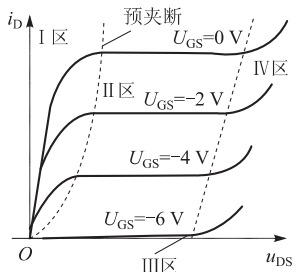


图 2-8 输出伏安特性曲线

#### 1. 场效应管的伏安特性（以增强型 NMOS 为例）

N 沟道增强型 MOS 场效应管的输出特性曲线如图 2-8 所示。图中特性曲线可分为可变电阻区、恒流区和击穿区三个区。

(1) 可变电阻区（I 区）：当  $U_{GS} > U_T$  [或称之为  $U_{GS(off)}$ ] 时，沟道形成；在  $U_{DS} = 0$  时，沟道内横向电场等于零，所以  $I_D = 0$ ；当  $U_{DS} > 0$  时，沟道内的电子在横向电场的作用下，产生漏极电流  $I_D$ 。但当  $|U_{DS}|$  较小时，由于  $U_{DS}$  的变化对沟道的大小影响不大，沟道电阻基本为一常数，因此，

$I_D$  基本随  $U_{DS}$  作线性变化。当  $U_{GS}$  恒定时，沟道导通电阻近似为一常数，但当  $U_{GS}$  变化时，沟道的导通电阻将随  $U_{GS}$  而变化，因此，该区域称为可变电阻区。利用这一特点，场效应管又可作为可变电阻器来使用。

(2) 恒流区（II 区）：当  $U_{GS}$  恒定，但未饱和时，增加  $U_{DS}$ ，使漏极电流  $I_D$  增加。当加大  $U_{DS}$  到使靠近漏极端的栅漏电压等于开启电压，即  $U_{GD} = U_{GS} - U_{DS} = U_T$  或  $U_{DS} = U_{GS} - U_T$





时,漏极电流达到最大值,漏极端的导电沟道将开始消失(称为预夹断),此时场效应管刚好饱和。若继续增大 $U_{DS}$ ,即 $U_D > U_{GS} - U_T$ ,会使漏极导电沟道被夹断而出现耗尽层,并随着 $U_{DS}$ 的增加,夹断点向源极移动。由于耗尽层的电阻率远大于沟道的电阻率,因此当漏极出现耗尽层后,所增加的 $U_{DS}$ 几乎全部降在耗尽层的两端,而加在沟道两端的电压几乎不变,从而使漏极电流 $I_D$ 几乎不随 $U_{DS}$ 而变化。在输出伏安特性曲线上,将不同 $U_{GS}$ 值时的预夹断点连接起来,即得到图2-8中左侧的虚线和右侧虚线的夹区域,即为恒流区(或称为饱和区)。场效应管作为放大器使用时,一般工作在此区域内。

(3) 击穿区(Ⅲ区):当 $U_{DS}$ 增大到某一临界值时, $I_D$ 开始迅速增加而出现击穿现象。此时,场效应管将不能正常工作,甚至烧毁,工作时要避免进入此区间。

## 2. 场效应管的基本应用

(1) 电阻:场效应管可以当做非线性电阻来使用,电路如图2-9(a)所示。将N沟道增强型绝缘栅场效应管MOSFET的栅极与漏极连接在一起,则 $U_{DS} = U_{GS}$ 。当 $U_{GS} \leq U_T$ 时, $I_D = 0$ 。当 $U_{GS} > U_T$ 时, $U_{DS} = U_{GS}$ ,漏极电流与漏源电压 $U_{DS}$ 呈非线性关系,即得如图2-9(a)所示的当做非线性电阻使用的电路。

(2) 开关:一个MOSFET用作开关来控制负载 $R_D$ 的电路如图2-9(b)所示。当输入信号 $U_i$ 低于截止电压 $U_T$ 时,漏极电流 $I_D = 0$ ,MOSFET的D、S之间相当于开路一样。当 $U_i > U_T$ 时,若电压为一定值,则流过负载 $R_D$ 的电流的大小由电源 $U_{CC}$ 和负载 $R_D$ 的大小来决定,因此,MOSFET在电路中可以看做是由 $U_i$ 控制的无触点开关。

(3) 镜像电流源:由两个参数几乎相同的MOS对管 $VT_1$ 、 $VT_2$ 组成的镜像电流源电路如图2-10所示。因 $VT_1$ 、 $VT_2$ 具有相同的开启电压 $U_T$ ,且电源 $U_{CC}$ 与电阻 $R_D$ 使 $VT_1$ 处于饱和状态(即 $U_{DS} \geq U_{GS} - U_T$ ),在忽略沟道长度调制效应的条件下:

$$I_{D1} = K_1 (U_{GS} - U_T)^2 = \frac{U_{CC} - U_{DS}}{R_{D1}} \quad (2-1)$$

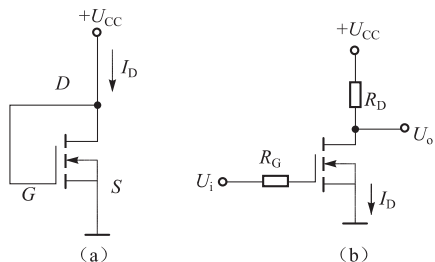


图2-9 场效应管的基本应用

(a) 当做非线性电阻的电路; (b) 当做开关的电路

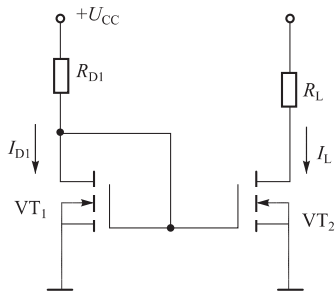


图2-10 镜像电流源电路



若  $VT_2$  也为饱和状态, 则其电流  $I_L$  为:

$$I_L = K_2(U_{GS} - U_T)^2 \quad (2-2)$$

由式 (2-1)、式 (2-2) 可得:

$$(U_{GS} - U_T)^2 = I_{D1}/K_1 = I_L/K_2 \quad (2-3)$$

又由于  $VT_1$  和  $VT_2$  具有相同的特性参数和相同的沟道宽长比, 即  $K_1 = K_2$ , 则上式的  $I_{D1} = I_L$ 。因此, 当  $VT_2$  也饱和时, 流过负载  $R_L$  的电流等于流过  $VT_1$  的漏极电流  $I_{D1}$ , 而与  $I_L$  无关。

## 四、实验内容

### 1. 场效应管作为开关使用

实验电路如图 2-11 所示。实验步骤如下:

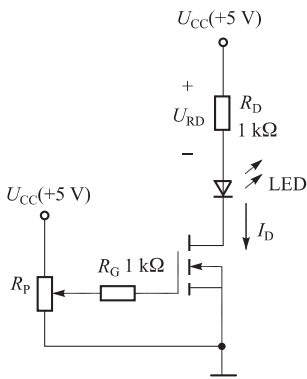


图 2-11 MOSFET 作为开关使用电路

(1) 调节电位器  $R_p$ , 使  $U_{GS} = 0 \text{ V}$ 。

(2) 测量电压  $U_{RD}$ 、 $U_{DS}$  和电流  $I_D$ , 并注意发光二极管是否点亮 ( $I_D = U_{RD}/R_D$ )。

(3) 调节  $R_p$ , 逐渐增大  $U_{GS}$  直到  $I_D$  略大于零, 注意此时  $U_{GS}$  是否为 MOSFET 的开启电压  $U_T$ 。

(4) 调节  $R_p$ , 逐渐增加  $U_{GS}$  直到  $I_D = 15 \text{ mA}$ , 检查 LED 是否点亮。

### 2. 场效应管作为电阻使用

实验电路如 2-9 (a) 所示, 实验步骤如下:

(1) 调节直流电压源输出 +1 V 作为  $U_{CC}$  电源。

(2) 测量  $U_{DS}$  和  $I_D$  ( $I_D = U_{RD}/R_D$ )。

(3) 调节  $U_{CC}$  依次为 +2 V, +3 V, ..., +7 V 并分别测量其对应的  $U_{DS}$  和  $I_D$ 。

(4) 以测得的  $U_{DS}$  为 X 轴,  $I_D$  为 Y 轴, 画出 MOSFET 栅极—漏极连接的电阻特性曲线。

### 3. 构成镜像电流源

实验电路如图 2-10 所示, 图中  $VT_1$  和  $VT_2$  为型号相同, 特性相似的两个 N 沟道增强型 MOSFET,  $R_{D1}$  为 1 kΩ,  $R_L$  为 1.5 kΩ。实验步骤如下:

(1) 测量  $R_{D1}$  和  $U_{RL}$ , 并计算  $I_{D1}$  和  $I_L$  ( $I_{D1} = U_{RD1}/R_{D1}$ ,  $I_L = U_{RL}/R_L$ )。

(2) 将  $R_{D1}$  依次改为 2.2 kΩ、4.7 kΩ 和 8.2 kΩ, 分别重复步骤 (1), 观察  $I_{D1}$  和  $I_L$  是否相同。

(3) 将  $R_{D1}$  改为 1 kΩ, 将  $R_L$  依次改为 2.2 kΩ、4.7 kΩ 和 8.2 kΩ, 分别重复步骤 (2)。



## 五、实验报告要求

- (1) 整理测试数据，并对数据进行相应的处理。
- (2) 通过对数据的总结，对场效应管工作在不同情况下的特点进行分析，进一步掌握场效应管的应用特点。
- (3) 判断 MOSFET 用作开关、非线性电阻和镜像电流源电路时，分别工作在输出特性曲线的什么区域？

## 实验 2.3 场效应管基本放大电路

### 一、实验目的

- (1) 了解结型场效应管的性能和特点。
- (2) 掌握场效应管放大器动态参数的测试方法。

### 二、实验设备与器件

① +12 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 结型场效应管 3DJ6F × 1、电阻器、电容器若干。

### 三、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。如图 2-12 所示为 N 沟道结型场效应管

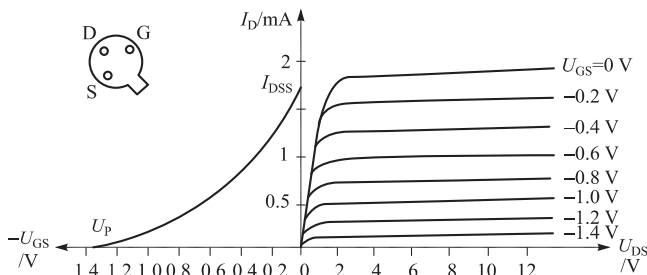


图 2-12 3DJ6F 的输出特性和转移特性曲线



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 2-4 列出了 3DJ6F 的典型参数值及测试条件。

表 2-4 3DJ6F 的典型参数值及测试条件

参数名称	饱和漏极电流 $I_{DSS}/\text{mA}$	夹断电压 $U_p/\text{V}$	跨导 $g_m/(\mu\text{A} \cdot \text{V}^{-1})$
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 2-13 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  $U_{GS}$  要用静态工作点处的数值。

## 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、输入电阻和输出电阻的测量方法与晶体管放大器的测量方法相同。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 2-14 所示。

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:

$$U_{o2} = A_V U_i = \frac{R_i}{R + R_i} U_S A_V$$

由此可以求出:

$$R_i = \frac{U_{o2}}{U_{o1} - U_{o2}} R$$

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

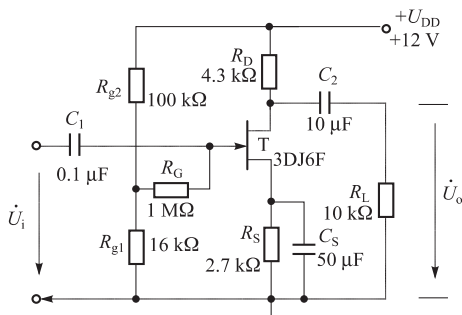


图 2-13 结型场效应管共源级放大器

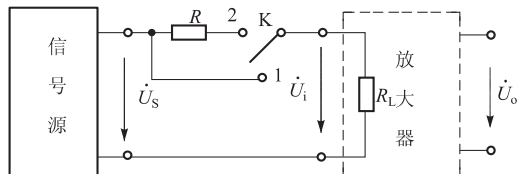


图 2-14 输入电阻测量电路

## 四、实验内容

### 1. 静态工作点的测量和调整

(1) 按图 2-13 连接电路, 令  $u_i = 0$ , 接通 +12 V 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 2-5 中。

(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 2-5 中。

表 2-5 静态工作点的测量

测量值						计算值		
$U_G/\text{V}$	$U_S/\text{V}$	$U_D/\text{V}$	$U_{DS}/\text{V}$	$U_{GS}/\text{V}$	$I_D/\text{mA}$	$U_{DS}/\text{V}$	$U_{GS}/\text{V}$	$I_D/\text{mA}$

### 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  $R_L = 10 \text{ k}\Omega$  时的输出电压  $u_o$ 。(注意: 保持  $u_i$  幅值不变), 记入表 2-6 中。

表 2-6  $A_V$  和  $R_o$  的测量

测量值				计算值		$u_i$ 和 $u_o$ 波形
	$u_i/V$	$u_o/V$	$A_V$	$R_o/k\Omega$	$A_V$	$R_o/k\Omega$
$R_L = \infty$						
$R_L = 10\text{ k}$						

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 2-14 改接实验电路，选择合适大小的输入电压  $U_s$  (50 ~ 100 mV)，将开关 K 掷向“1”，测出  $R=0$  时的输出电压  $U_{o1}$ ，然后将开关掷向“2”，(接入  $R$ )，保持  $U_s$  不变，再测出  $U_{o2}$ ，根据公式： $R_i = \frac{U_{o2}}{U_{o1} - U_{o2}}R$  求出  $R_i$ ，记入表 2-7 中。

表 2-7  $R_i$  的测量

测量值			计算值
$U_{o1}/V$	$U_{o2}/V$	$R/k\Omega$	$R_i/k\Omega$

## 五、实验报告要求

- (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。

## 实验 2.4 负反馈放大电路

### 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、实验设备与器件

① +12 V 直流电源。② 函数信号发生器。③ 双踪示波器。④ 万用表。⑤ 晶体三极管 3DG6 × 2 ( $\beta = 50 \sim 100$ ) 或 9011 × 2、电阻器、电容器若干。



### 三、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，绝大多数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 2-15 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  $VT_1$  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：

$$A_{uf} = \frac{A_u}{1 + A_u F_u}$$

式中， $A_u = U_o/U_i$  为基本放大器（无反馈）的电压放大倍数，即开环电压放大倍数； $(1 + A_u F_u)$  为反馈深度，它的大小决定了负反馈对放大器性能改善的程度。

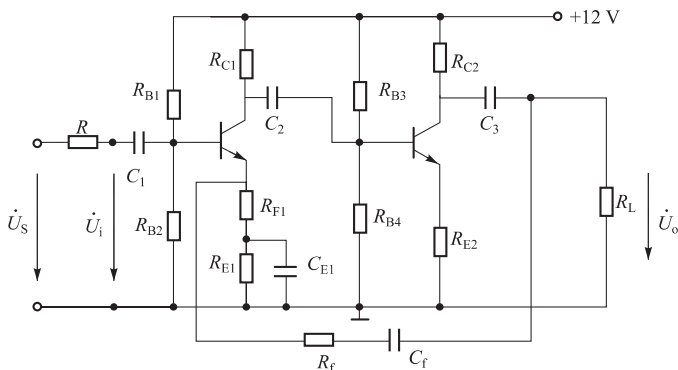


图 2-15 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放大器

② 反馈系数：

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

③ 输入电阻：

$$R_{if} = (1 + A_u F_u) R_i$$

式中， $R_i$  为基本放大器的输入电阻。

④ 输出电阻：



$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_{uo}F_u}$$

式中， $R_o$  为基本放大器的输出电阻； $A_{uo}$  为基本放大器  $R_L = \infty$  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。因此：

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（VT<sub>1</sub>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 2-16 所示的基本放大器。

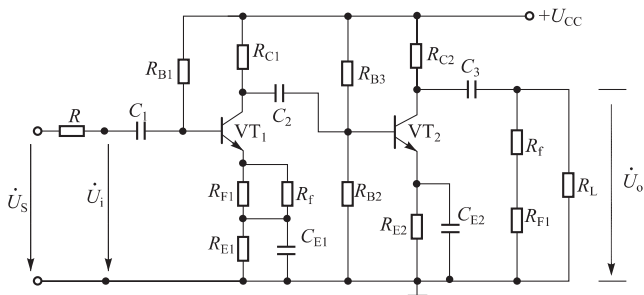


图 2-16 基本放大器

## 四、实验内容

### 1. 测量静态工作点

按图 2-16 连接实验电路，首先取  $U_s$  为合适的值，频率为 1 kHz 左右，调节电位器使放大器的输出不出现失真，然后使  $u_i = 0$ （即断开信号源的输出连接线），用万用表直流电压挡分别测量第一、第二级的静态工作点，记入表 2-8 中。

表 2-8 静态工作点测量记录

	$U_B/V$	$U_E/V$	$U_C/V$	$I_C/mA$
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 2-17 改接，即把  $R_f$  断开后分别并在  $R_{F1}$  和  $R_L$  上，其他连线不动。



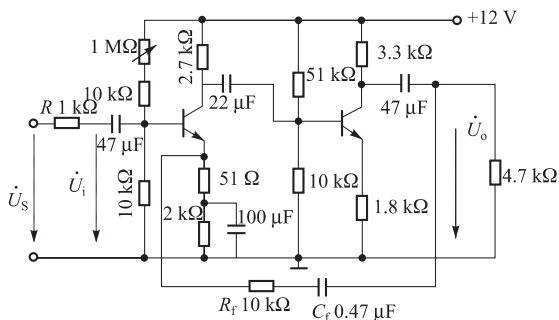


图 2-17 测试基本放大器的各项性能指标

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

以  $f=1\text{ kHz}$ ， $U_{SP-P}$  约  $20\text{ mV}$  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，用示波器测量  $U_{SP-P}$ 、 $U_{iP-P}$ 、 $U_{LP-P}$ ，记入表 2-9 中。

表 2-9 测量中频电压放大倍数  $A_u$ ，输入电阻  $R_i$  和输出电阻  $R_o$ 

基本放大器	$U_{SP-P}/\text{mV}$	$U_{iP-P}/\text{mV}$	$U_{LP-P}/\text{V}$	$U_{oP-P}/\text{V}$	$A_u$	$R_i/\text{k}\Omega$	$R_o/\text{k}\Omega$
负反馈放大器	$U_{SP-P}/\text{mV}$	$U_{iP-P}/\text{mV}$	$U_{LP-P}/\text{V}$	$U_{oP-P}/\text{V}$	$A_{uf}$	$R_{if}/\text{k}\Omega$	$R_{of}/\text{k}\Omega$

保持  $U_{SP-P}$  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  $U_{oP-P}$ ，记入表 2-9 中。

(2) 测量通频带：接上  $R_L$ ，保持 (1) 中的  $U_{SP-P}$  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 2-10 中。

### 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 2-17 的负反馈放大电路。适当加大  $U_{SP-P}$ ，在输出波形不失真的条件下，测量负反馈放大器的  $A_{uf}$ 、 $R_{if}$  和  $R_{of}$ ，记入表 2-9 中；测量  $f_{Hf}$  和  $f_{Lf}$ ，记入表 2-10 中。

表 2-10 测量通频带

基本放大器	$f_L/\text{kHz}$	$f_H/\text{kHz}$	$\Delta f/\text{kHz}$
负反馈放大器	$f_{Lf}/\text{kHz}$	$f_{Hf}/\text{kHz}$	$\Delta f_f/\text{kHz}$



#### 4. 观察负反馈对非线性失真的改善

(1) 实验电路改接成图 2-16 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图 2-17 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、实验报告要求

(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。

## 实验 2.5 差动放大电路

### 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 万用表。⑤ 晶体三极管 3DG6 $\times 3$ ; (或 9013 $\times 3$ ) 电阻器、电容器若干。

### 三、实验原理

图 2-18 是差动放大器的基本结构。它由两个元件参数完全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  $VT_1$ 、 $VT_2$  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, 但对共模信号有很强的负反馈作用, 故可以有效地抑制零漂, 稳定静态工作点。

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:

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

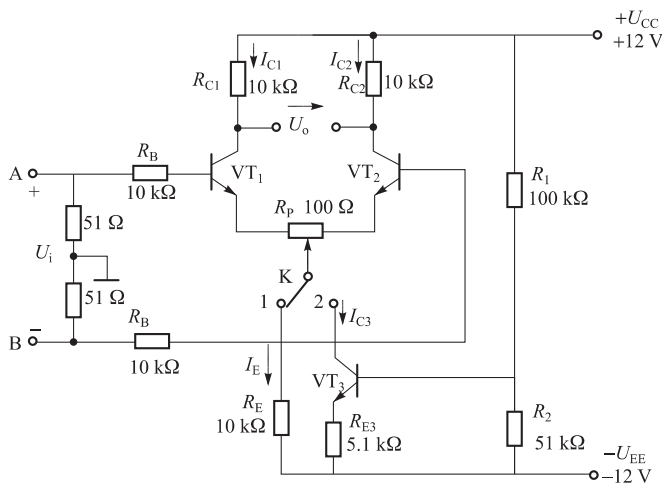


图 2-18 差动放大器的实验电路

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

恒流源电路:

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

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

## 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

$$\text{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

或

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

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。

## 四、实验内容

### 1. 典型差动放大器性能测试

如图 2-18 所示连接实验电路，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，用万用表的直流电压挡测量输出电压  $U_o$ ，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，用万用表的直流电压挡测量  $VT_1$ 、 $VT_2$  管各电极电位及射极电阻  $R_E$  两端电压  $U_{RE}$ ，记入表 2-11 中。

表 2-11 静态工作点的测量记录表

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, 放大器输入 B 端接地构成单端输入方式, 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  $u_i$ , 在输出波形无失真的情况下, 用示波器测  $U_{iP-P}$ ,  $U_{C1P-P}$ ,  $U_{C2P-P}$ , 记入表 2-12 中, 并观察  $u_i$ ,  $u_{C1}$ ,  $u_{C2}$  之间的相位关系及  $U_{REP-P}$  随  $U_{iP-P}$  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  $f = 1 \text{ kHz}$ ,  $U_{iP-P} = 2 \text{ V}$ , 在输出电压无失真的情况下, 测量  $U_{C1P-P}$ 、 $U_{C2P-P}$  之值记入表 2-12 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。

## 2. 具有恒流源的差动放大电路性能测试

将图 2-18 电路中开关 K 拨向右边, 构成具有恒流源的差动放大电路。重复上述 (2)、(3) 的要求, 记入表 2-12 中。

表 2-12 差/共模电压放大倍数的测试结果记录

	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
$U_{iP-P}$	200 mV	2 V	200 mV	2 V
$U_{C1P-P}/V$				
$U_{C2P-P}/V$				
$A_{dl} = \frac{U_{C1P-P}}{U_{iP-P}}$		/		/
$A_d = \frac{U_{oP-P}}{U_{iP-P}}$		/		/
$A_{C1} = \frac{U_{C1P-P}}{U_{iP-P}}$	/		/	
$A_C = \frac{U_{oP-P}}{U_{iP-P}}$	/		/	
$CMRR = \left  \frac{A_{dl}}{A_{C1}} \right $				

## 五、实验报告要求

(1) 整理实验数据, 列表比较实验结果和理论估算值, 分析产生误差的原因。

① 将静态工作点和差模电压放大倍数的实测值与理论值比较。



② 将典型差动放大电路单端输出时 CMRR 的实测值与理论值比较。

③ 将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。

## 实验 2.6 集成运算放大器性能指标的测试

### 一、实验目的

(1) 掌握集成运算放大器主要指标的测试方法。

(2) 通过对集成运算放大器  $\mu A741$  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 万用表。⑤ 集成运算放大器  $\mu A741 \times 1$ , 电阻器、电容器若干。

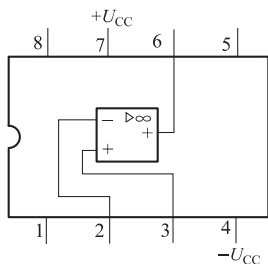
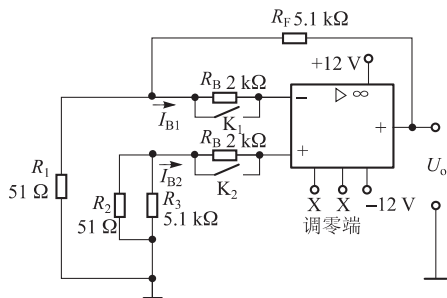
### 三、实验原理

集成运算放大器是一种线性集成电路, 和其他半导体器件一样, 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。集成运放  $\mu A741$  (或 F007), 引脚排列如图 2-19 所示, 它是八脚双列直插式组件, 2、3 脚分别为反相和同相输入端, 6 脚为输出端, 7、4 脚为正、负电源端, 1、5 脚为失调电压的调零端, 1、5 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

(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 2-20 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:

$$U_{os} = \frac{R_1}{R_1 + R_F} U_{o1}$$

图 2-19  $\mu\text{A741}$  的引脚图图 2-20 输入失调电压  $U_{os}$ 、输入失调电流  $I_{os}$  的测试电路

测试时注意：一是将运放调零端开路。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。二是要求电阻  $R_1$  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，即

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

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 2-20 所示，测试分两步进行。

① 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。

② 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：

$$I_{os} = |I_{B1} - I_{B2}| = |U_{o2} - U_{o1}| \frac{R_1}{R_1 + R_F R_B}$$

一般情况下， $I_{os}$  为几十 ~ 几百  $\text{nA}$  ( $10^{-9} \text{ A}$ )，高质量运放  $I_{os}$  低于  $1 \text{ nA}$ 。

测试时注意：一是将运放调零端开路。二是两输入端电阻  $R_B$  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  $U_o$  与两个差分输入端之间所加信号电压  $U_{id}$  之比为

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



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（几十赫兹以下）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 2-21 所示。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：

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

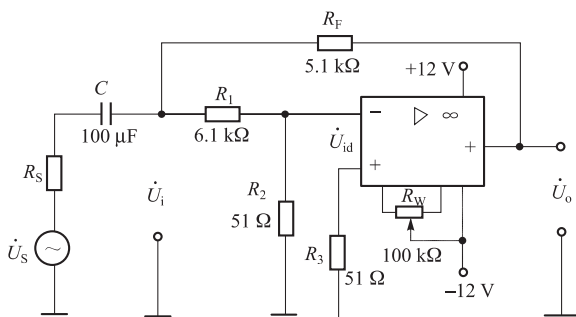


图 2-21 差模电压放大倍数  $A_{ud}$  的测试电路

通常低增益运放  $A_{ud}$  为 60 ~ 70 dB，中增益运放约为 80 dB，高增益在 100 dB 以上，可达 120 ~ 140 dB。测试中应注意：

- ① 测试前电路应首先消振及调零。
- ② 被测运放要工作在线性区。
- ③ 输入信号频率应较低，一般用 50 ~ 100 Hz，输出信号幅度应较小，且无明显失真。

(4) 共模抑制比  $K_{CMRR}$ 。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：

$$K_{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_c} \right|$$

或

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

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，输出端共模信号越小，说明电路对称性越好，也就是说运放对共模干扰信号的抑制能力越强，即  $K_{CMRR}$  越大。 $K_{CMRR}$  的测试电





路如图 2-22 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：

$$A_C = \frac{U_{oC}}{U_{iC}}$$

共模抑制比为：

$$K_{CMRR} = \left| \frac{A_d}{A_C} \right| = \frac{R_F}{R_1} \frac{U_{iC}}{U_{oC}}$$

测试时注意：① 消振与调零。②  $R_1$  与  $R_2$ 、 $R_3$  与  $R_F$  之间阻值严格对称。③ 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  $K_{CMRR}$  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 2-23 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 2-24 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  $U_{oP-P}$ 。

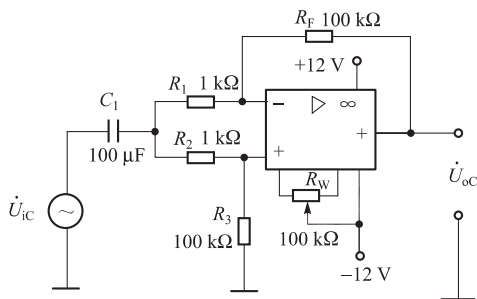


图 2-22 共模抑制比  $K_{CMRR}$  的测试电路

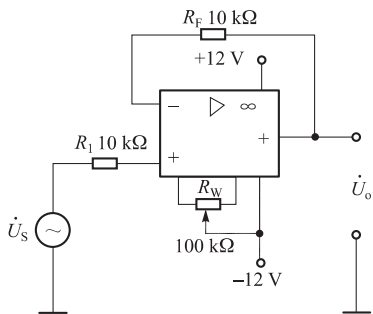


图 2-23 共模输入电压范围  $U_{iCm}$  测试电路

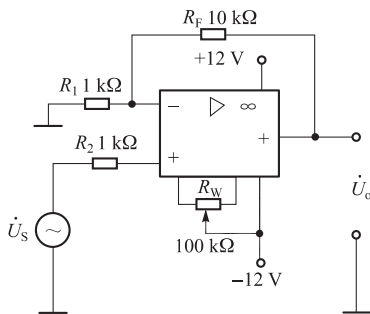


图 2-24 输出电压最大动态范围  $U_{oP-P}$  测试电路

## 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）。如果没有调零端子，若要调零，可按图 2-25 所示电路进行调零。

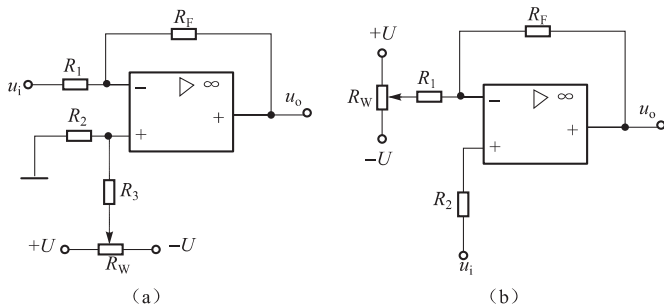


图 2-25 调零电路

(a) 同相输入端调零；(b) 反相输入端调零

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。

(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。

## 四、实验内容

实验前看清运放管脚排列及电源电压极性及其数值，切忌正、负电源接反。

(1) 测量输入失调电压  $U_{os}$ 。按图 2-20 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  $U_{o1}$ ，并计算  $U_{os}$ 。记入表 2-13 中。

表 2-13  $U_{os}$ 、 $I_{os}$ 、 $\dot{A}_{ud}$  的测试记录

$U_{os}/\text{mV}$		$I_{os}/\text{nA}$		$A_{ud}/\text{dB}$		$K_{\text{CMRR}}/\text{dB}$	
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

(2) 测量输入失调电流  $I_{os}$ 。实验电路如图 2-20，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 2-13 中。

(3) 测量开环差模电压放大倍数  $A_{ud}$ 。按图 2-23 连接实验电路，运放输入端加频率 100 Hz，大小为 30 ~ 50 mV 正弦信号，用示波器监视输出波形。并用示波器测量  $U_{op-p}$  和  $U_{ip-p}$ ，并计算  $A_{ud}$ ，记入表 2-13 中。

(4) 测量共模抑制比  $K_{\text{CMRR}}$ 。按图 2-24 连接实验电路，运放输入端加  $f = 100$  Hz， $U_{icp-p} = 2 \sim 4$  V 正弦信号，监视输出波形。并测量  $U_{ocp-p}$  和  $U_{icp-p}$ ，计算  $A_C$  及  $K_{\text{CMRR}}$ ，记入表 2-13 中。

(5) 测量共模输入电压范围  $U_{icm}$  及输出电压最大动态范围  $U_{op-p}$ 。自拟实验步骤及方法。

## 五、实验报告要求

- (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遇到的问题进行分析、讨论。

## 实验 2.7 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、实验设备与器件

①  $\pm 12$  V 直流电源。② 函数信号发生器。③ 双踪示波器。④ 万用表。⑤ 集成运算放大器  $\mu\text{A}741 \times 1$ ，电阻器、电容器若干。

### 三、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运算。



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。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如下：

① 输出电压  $U_o$  与输入电压之间满足关系式为：

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

由于  $A_{ud} = \infty$ ，而  $U_o$  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。

(1) 反相比例运算电路。电路如图 2-26 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：

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

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  $R_2 = R_1 // R_F$ 。

(2) 反相加法电路。电路如图 2-27 所示，输出电压与输入电压之间的关系为：

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

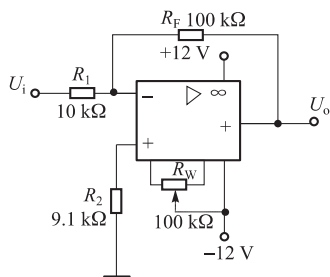


图 2-26 反相比例运算电路

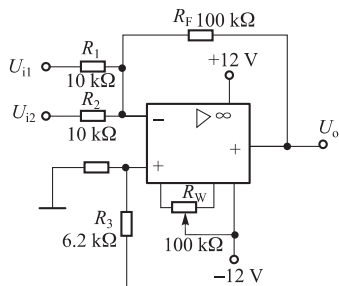


图 2-27 反相加法运算电路

(3) 同相比例运算电路。图 2-28 (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：

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

当  $R_1 \rightarrow \infty$  时， $U_o = U_i$ ，即得到如图 2-28 (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 10 kΩ， $R_F$  太小起不到保护作用，太大则影响跟随特性。

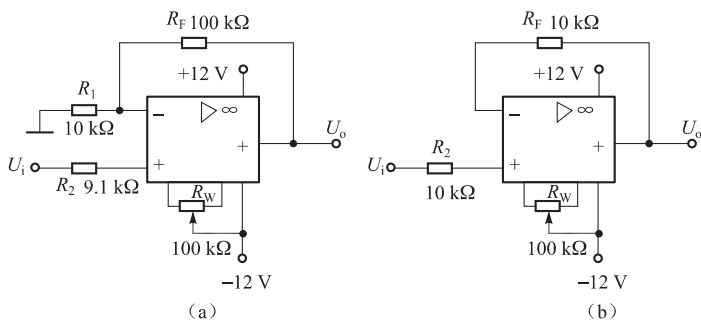


图 2-28 同相比例运算电路

(a) 同相比例运算电路; (b) 电压跟随器

(4) 差动放大电路(减法器)。对于图 2-29 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:

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

(5) 积分运算电路。反相积分电路如图 2-30 所示。在理想化条件下,输出电压  $u_o$  等于:

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

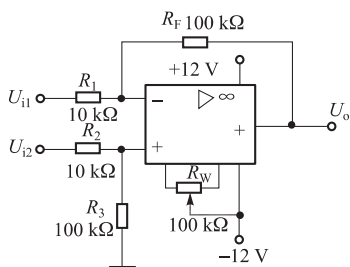


图 2-29 减法运算电路图

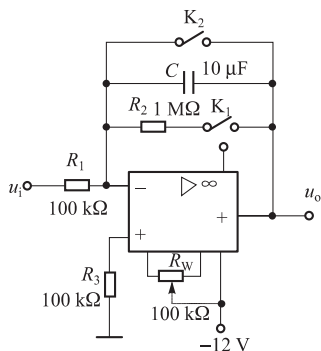


图 2-30 积分运算电路

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

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

即输出电压  $u_o(t)$  随时间增长而线性下降。显然  $RC$  的数值越大,达到给定的  $U_o$  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制。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  $u_i$  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。

#### 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 2-26 连接实验电路, 接通  $\pm 12\text{ V}$  电源, 输入端对地短路, 进行调零和消振。

(2) 输入  $f = 100\text{ Hz}$ ,  $U_{iP-P} = 1\text{ V}$  的正弦交流信号, 测量相应的  $U_{oP-P}$ , 并用示波器观察  $u_o$  和  $u_i$  的相位关系, 记入表 2-14 中。

表 2-14 反相比例运算电路的输入、输出电压波形 ( $U_{iP-P} = 1\text{ V}$ ,  $f = 100\text{ Hz}$ )

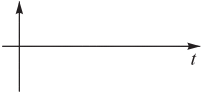
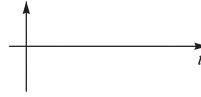
$U_{iP-P}/\text{V}$	$U_{oP-P}/\text{V}$	$u_i$ 波形	$u_o$ 波形	$A_v$	
				实测值	计算值
					

##### 2. 同相比例运算电路

(1) 按图 2-28 (a) 连接实验电路。实验步骤同内容 1, 将结果记入表 2-15 中。

(2) 将图 2-28 (a) 中的  $R_1$  断开, 得图 2-28 (b) 电路, 重复内容 (1)。

表 2-15 同相比例运算电路的输入输出波形图 ( $U_{iP-P} = 1\text{ V}$ ,  $f = 100\text{ Hz}$ )

$U_{iP-P}/\text{V}$	$U_{oP-P}/\text{V}$	$u_i$ 波形	$u_o$ 波形	$A_v$	
				实测值	计算值
					

##### 3. 反相加法运算电路

(1) 按图 2-27 连接实验电路, 调零和消振。



(2) 输入信号采用直流信号,如图 2-31 所示电路为简易直流信号源,由实验者自行完成。实验时要注意选择几组合适的直流信号幅度以确保集成运放工作在线性区。用万用表直流电压挡测量输入电压  $U_{i1}$ 、 $U_{i2}$  及输出电压  $U_o$ , 记入表 2-16 中。

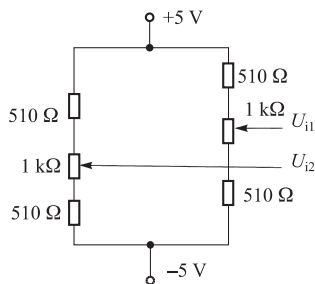


图 2-31 简易可调直流信号源

#### 4. 减法运算电路

(1) 按图 2-29 连接实验电路, 调零和消振。

(2) 用如图 2-31 所示可调直流信号源输入直流信号, 实验步骤同内容 3, 记入表 2-17 中。

表 2-16 反相加法运算电路的  $U_o(t)$  测试记录

$U_{i1}/V$					
$U_{i2}/V$					
$U_o/V$					

表 2-17 减法运算电路的  $U_o(t)$  测试记录

$U_{i1}/V$					
$U_{i2}/V$					
$U_o/V$					

表 2-18 积分运算电路的  $U_o(t)$  测试记录

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

#### 5. 积分运算电路

实验电路如图 2-30 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  $u_c(0) = 0$ 。

(3) 预先调好直流输入电压  $U_i = 0.5V$ , 接入实验电路, 再打开  $K_2$ , 然后用万用表直流电压挡测量输出电压  $U_o$ , 每隔 5 秒读一次  $U_o$ , 记入表 2-18 中, 直到  $U_o$  不继续明显增大为止。

### 五、实验报告要求

(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。

## 实验 2.8 有源滤波电路

### 一、实验目的

- (1) 研究利用运放、电阻和电容分别构成有源低通、高通、带通和带阻滤波器的方法。
- (2) 学会测量有源滤波器的幅频特性。

### 二、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  $\mu\text{A}741 \times 1$ , 电阻器、电容器若干。

### 三、实验原理

由  $RC$  元件与运算放大器组成的滤波器称为  $RC$  有源滤波器, 其功能是让一定频率范围内的信号通过, 抑制或急剧衰减此频率范围以外的信号。可用在信号处理、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中、低频场合。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) 四种滤波器, 它们的幅频特性如图 2-32 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接近理想的。一般来说, 滤波器的幅频特性越好, 其相频特性越差, 反之亦然。滤波器的阶数越高, 幅频特性衰减的速率越快, 但  $RC$  网络的节数越多, 元件参数计算越烦琐, 电路调试越困难。任何高阶滤波器均可以用较低的二阶  $RC$  有源滤波器级联实现。

#### 1. 低通滤波器 (LPF)

低通滤波器是用来通过低频信号衰减或抑制高频信号。

典型的二阶有源低通滤波器如图 2-33 (a) 所示。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 2-33 (b) 为二阶低通滤波器的幅频特性曲线。其性能参数为: 二阶低通滤波器的通带增益  $A_{\text{up}} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ 。截止频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ , 它是二阶低通滤波器通带与阻带的界限频率。品质因数

$Q = \frac{1}{3 - A_{\text{up}}}$ , 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



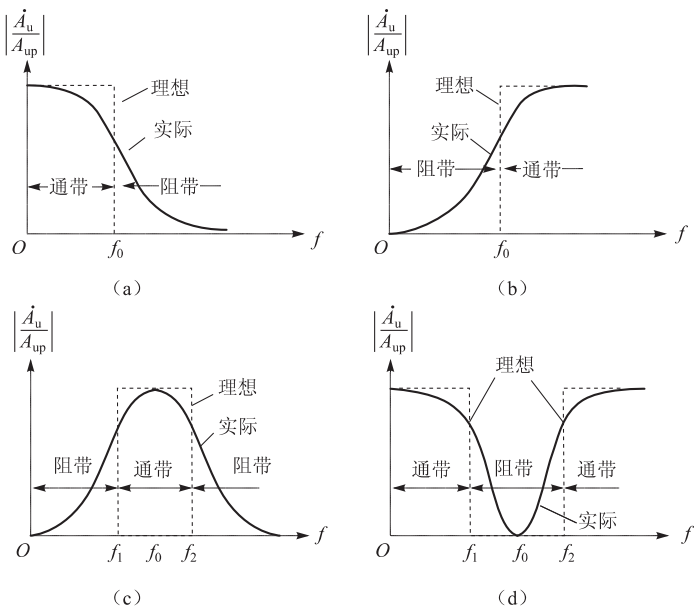


图 2-32 四种滤波电路的幅频特性示意图

(a) 低通; (b) 高通; (c) 带通; (d) 带阻

2-33 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 2-34 (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“镜像”关系, 仿照 LPF 分析方法, 不难求得 HPF 的幅频特性。电路性能参数  $A_{up}$ 、 $f_0$ 、 $Q$  各量的含义同二阶低通滤波器。图 2-34 (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。

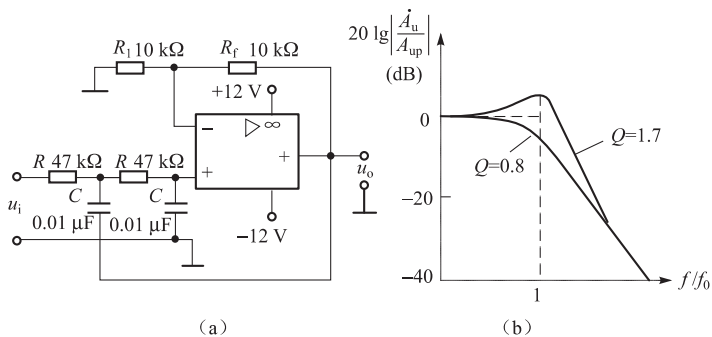
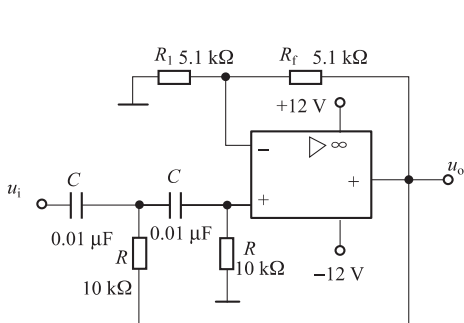
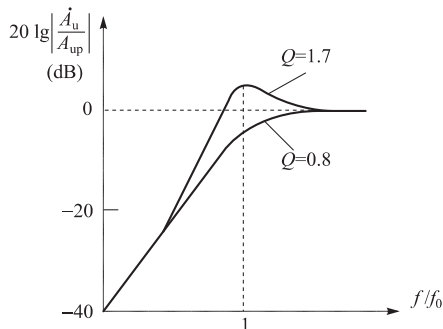


图 2-33 二阶低通滤波器

(a) 电路图; (b) 幅频特性



(a)



(b)

图 2-34 二阶高通滤波器

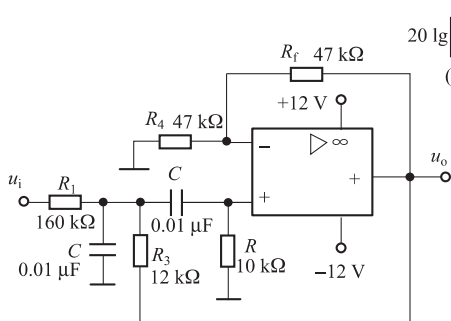
(a) 电路图; (b) 幅频特性

### 3. 带通滤波器 (BPF)

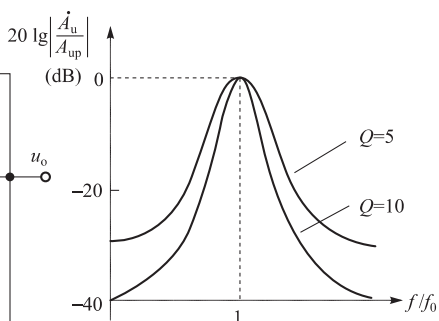
这种滤波器的作用是只允许在某一个通频带范围内的信号通过, 而比通频带下限频率低和比上限频率高的信号均加以衰减或抑制。典型的带通滤波器可以从二阶低通滤波器中将其一级改成高通而成。其电路图和幅频特性曲线图如图 2-35 所示。电路性能参数有: 通频带增益  $A_{up}$ 、中心频率  $f_0$ 、通频带宽度  $B$ 、选择性  $Q$ 。

带增益  $A_{up} = \frac{R_4 + R_f}{R_4 R_1 C B}$ ; 中心频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{R_2 C^2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right)}$ ; 通频带宽度  $B =$

$\frac{1}{C} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{2}{R_2} - \frac{R_f}{R_3 R_4} \right)$ ; 选择性  $Q = \frac{\omega_0}{B}$ 。



(a)



(b)

图 2-35 二阶带通滤波器

(a) 电路图; (b) 幅频特性



此电路的优点是改变  $R_1$  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 2-36 (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。电路性能参数有: 通频带增益  $A_{up} = 1 + \frac{R_f}{R_1}$ ; 中心频率  $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ ; 选择性  $Q = \frac{1}{2(2 - A_{up})}$ ; 阻带宽度  $B = 2(2 - A_{up})f_0$ 。

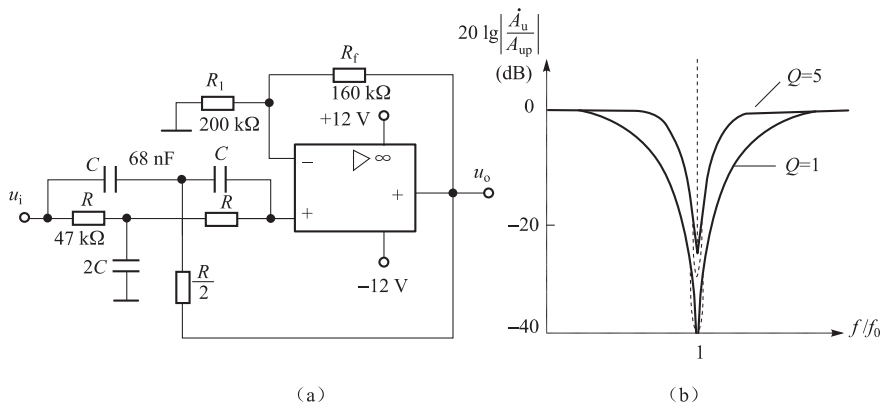


图 2-36 二阶带阻滤波器  
(a) 电路图; (b) 幅频特性

## 四、实验内容

### 1. 二阶低通滤波器

实验电路如图 2-33 (a) 所示。

(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  $U_{iP-P} = 2\text{ V}$  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 2-19 中, 描绘频率特性曲线。

表 2-19 二阶低通滤波器的  $U_o(f)$  测试记录

$f/\text{Hz}$	
$U_{oP-P}/\text{V}$	



## 2. 二阶高通滤波器

实验电路如图 2-34 (a) 所示。

(1) 粗测：输入  $U_{iP-P} = 2\text{ V}$  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 2-20 中。

表 2-20 二阶高通滤波器的  $U_o(f)$  测试记录

$f/\text{Hz}$											
$U_{oP-P}/\text{V}$											

## 3. 带通滤波器

实验电路如图 2-35 (a) 所示。测量其频率特性。记入表 2-21 中。

(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。

## 4. 带阻滤波器

实验电路如图 2-36 (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 2-22 中。

表 2-21 带通滤波器 (BPF) 的  $U_o(f)$  测试记录

$f/\text{Hz}$											
$U_{oP-P}/\text{V}$											

表 2-22 带阻滤波器 (BEF) 的  $U_o(f)$  测试记录

$f/\text{Hz}$											
$U_{oP-P}/\text{V}$											

## 五、实验报告要求

(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  $f_1$  或  $f_2$ 、中心频率  $f_0$ ，带宽及品质因数  $Q$ 。

(3) 总结有源滤波电路的特性。



## 实验 2.9 电压比较器

### 一、实验目的

- (1) 掌握构成电压比较器的电路的方法并熟悉其特点；
- (2) 学会测试电压比较器的方法。

### 二、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 万用表。
- ⑤ 二极管。
- ⑥ 运算放大器  $\mu\text{A}741 \times 2$ 。
- ⑦ 稳压管  $2\text{CW}231 \times 1$ 。
- ⑧ 电阻器等。

### 三、实验原理

电压比较器是集成运放的非线性应用电路，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。如图 2-37 所示为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。

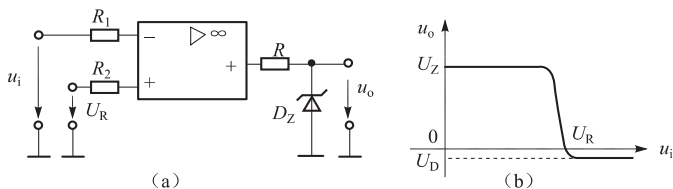


图 2-37 电压比较器  
(a) 电路图；(b) 传输特性

当  $u_i < U_R$  时，运放输出高电平，稳压管  $D_Z$  反向稳压工作。输出端电位被其钳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 2-37 (b) 为图 2-37 (a) 电压比较器的传输特性。

常用的电压比较器有过零电压比较器、滞回电压比较器、窗口电压比较器等。

#### 1. 过零电压比较器

电路如图 2-38 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 2-38 (b) 所示。过零比较器结构简单，



灵敏度高，但抗干扰能力差。

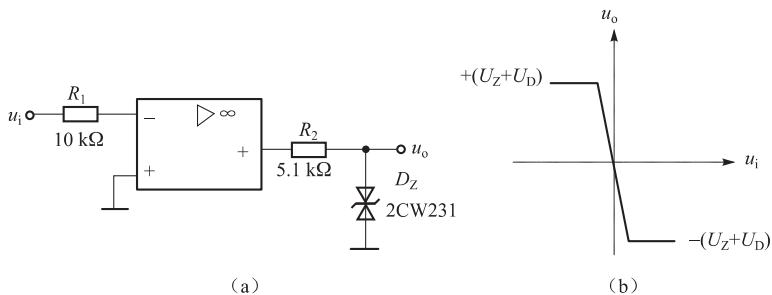


图 2-38 过零电压比较器

(a) 过零比较器; (b) 电压传输特性

## 2. 滞回电压比较器

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，这种波动在控制系统中，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 2-39 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， $\Sigma$  点也随着改变电位，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  $U_-$ ）， $U_\Sigma$  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  $U_+$ ，于是出现如图 2-34 (b) 中所示的滞回特性。 $-U_\Sigma$  与  $U_\Sigma$  的差称为回差。改变  $R_2$  的数值可以改变回差的大小。

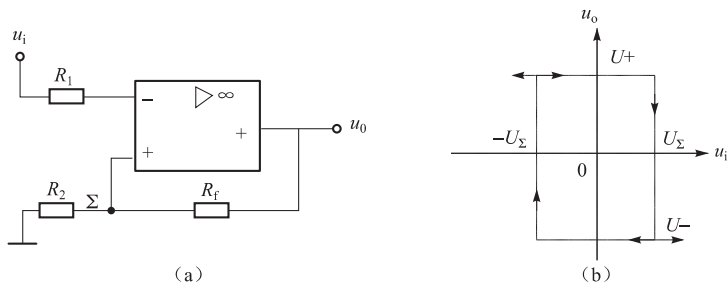


图 2-39 滞回电压比较器

(a) 电路图; (b) 传输特性

## 3. 窗口（双限）电压比较器

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，窗口比较电路由两个简单比较器组成，如图 2-40 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 ( $+U_{o\max}$ )，

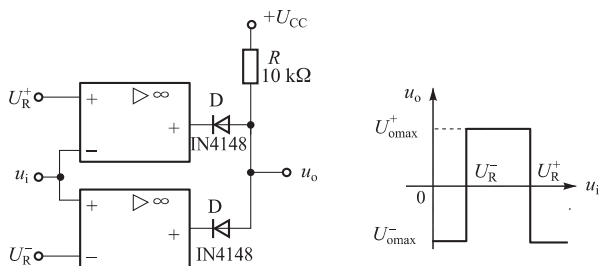


图 2-40 窗口电压比较器

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 ( $-U_{o,max}$ )。

## 四、实验内容

### 1. 过零比较器

实验电路如图 2-38 所示。

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

### 2. 反相滞回电压比较器

实验电路如图 2-41 所示。

- (1) 按图接线， $u_i$  接  $+5\text{ V}$  可调直流电源，测出  $u_o$  由  $+U_{o,max} \rightarrow -U_{o,max}$  时  $u_i$  的临界值。
- (2) 同上，测出  $u_o$  由  $-U_{o,max} \rightarrow +U_{o,max}$  时  $u_i$  的临界值。
- (3)  $u_i$  接  $500\text{ Hz}$ ，峰值为  $2\text{ V}$  的正弦信号，观察并记录  $u_i \rightarrow u_o$  波形。
- (4) 将分压支路  $100\text{ k}\Omega$  电阻改为  $200\text{ k}\Omega$ ，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 2-42 所示。

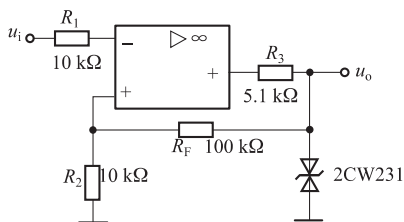


图 2-41 反相滞回电压比较器

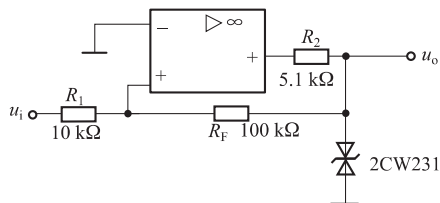


图 2-42 同相滞回电压比较器



(1) 参照 2, 自拟实验步骤及方法。

(2) 将结果与 2 进行比较。

#### 4. 窗口比较器

参照图 2-40 自拟实验步骤和方法测定其传输特性。

### 五、实验报告要求

(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。

## 实验 2.10 波形产生电路

### 一、实验目的

(1) 掌握集成运放构成正弦波、方波和三角波发生器的方法;

(2) 熟悉波形发生器的调整和主要性能指标的测试方法。

### 二、实验设备与器件

①  $\pm 12\text{ V}$  直流电源。② 双踪示波器。③ 集成运算放大器  $\mu\text{A}741 \times 2$ 。④ 二极管  $\text{IN}4001 \times 2$ 。⑤ 稳压管  $2\text{CW}231 \times 1$ 。⑥ 电阻器、电容器若干。

### 三、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。

#### 1. $RC$ 桥式正弦波振荡器 (文氏电桥振荡器)

图 2-43 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  $\text{VD}_1$ 、 $\text{VD}_2$  正向电阻的非线性特性来实现稳幅。 $\text{VD}_1$ 、 $\text{VD}_2$  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,  $R_f = R'_w + R'_2 + (R_3 // r_D)$ ,  $r_D$  为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  $R$  作量程内的频率微调。

## 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 2-44 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。电路振荡频率为:

$$f_0 = \frac{1}{2R_1 C_f \ln\left(1 + \frac{2R_2}{R_1}\right)}$$

式中,  $R_1 = R'_1 + R'_w$ ,  $R_2 = R'_2 + R''_w$ 。

方波输出幅值  $U_{om} = \pm U_Z$ ; 三角波输出幅值  $U_{cm} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_Z$

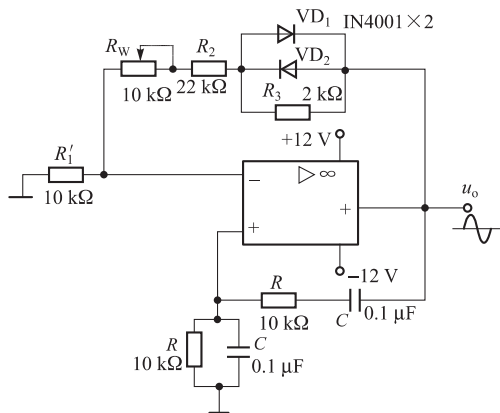


图 2-43 RC 桥式正弦波振荡器

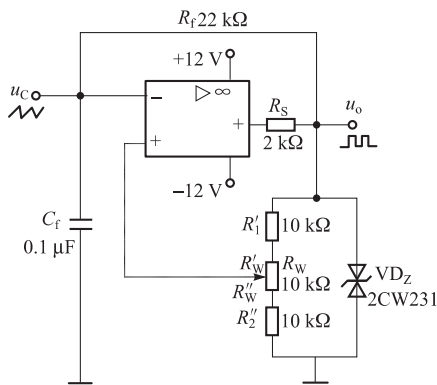


图 2-44 方波发生器

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。

## 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 2-45 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 2-46 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。

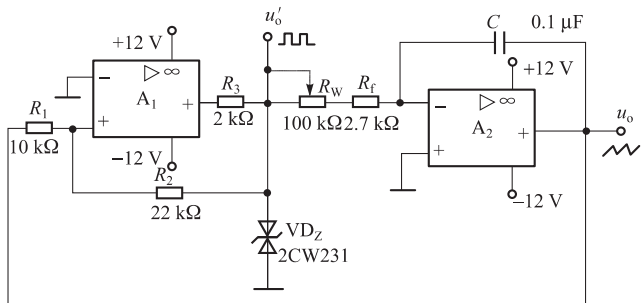


图 2-45 三角波、方波发生器

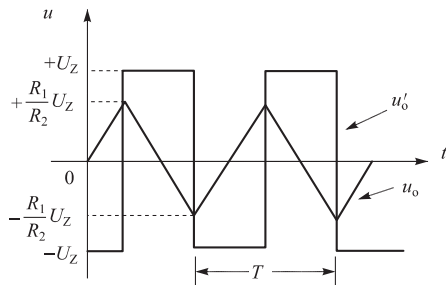


图 2-46 方波、三角波发生器输出波形图

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。

## 四、实验内容

### 1. RC 桥式正弦波振荡器

按图 2-43 连接实验电路。

(1) 接通  $\pm 12\text{ V}$  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  $u_o$  幅值最大且不失真, 用示波器分别测量输出电压  $U_{oP-P}$ 、反馈电压  $U_{+P-P}$  和  $U_{-P-P}$ , 分析研究振荡的幅值条件。

(3) 用示波器测量振荡频率  $f_0$ , 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  $VD_1$ 、 $VD_2$ , 重复②的内容, 将测试结果与②进行比较, 分析  $VD_1$ 、 $VD_2$  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, 用函数信号发生器送入 3 V 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 (3 V) 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 1 V), 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 2-44 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  $u_o$  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  $u_o$ 、 $u_c$  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  $u_o$  波形, 分析  $VD_z$  的限幅作用。

### 3. 三角波和方波发生器

按图 2-45 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  $u_o$  及方波输出  $u'_o$ , 测其幅值、频率及  $R_w$  值, 记录之。

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

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

## 五、实验报告要求

### 1. 正弦波发生器

(1) 列表整理实验数据, 画出波形图, 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  $VD_1$ 、 $VD_2$  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  $u_o$  波形的幅值及频率的影响。

(3) 讨论  $VD_z$  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图, 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。

## 实验 2.11 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) 掌握 OTL 电路的调试及主要性能指标的测试方法。



## 二、实验设备与器件

① +5 V 直流电源。② 函数信号发生器。③ 双踪示波器。④ 万用表。⑤ 晶体三极管 3DG6 (9011)、3DG12 (9013)、3CG12 (9012)；晶体二极管 IN4007、8  $\Omega$  扬声器、电阻器、电容器若干。

## 三、实验原理

如图 2-47 所示为 OTL 低频功率放大器。其中由晶体三极管  $VT_1$  组成推动级（也称前置放大级）， $VT_2$ 、 $VT_3$  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，因此具有输出电阻低，负载能力强等优点，适合于作功率输出级。 $VT_1$  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 VD，给  $VT_2$ 、 $VT_3$  提供偏压。调节  $R_{W2}$ ，可以使  $VT_2$ 、 $VT_3$  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  $VT_1$  放大、倒相后同时作用于  $VT_2$ 、 $VT_3$  的基极， $u_i$  的负半周使  $VT_2$  管导通（ $VT_3$  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， $VT_3$  导通（ $VT_2$  截止），则已充好电的电容  $C_0$  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。

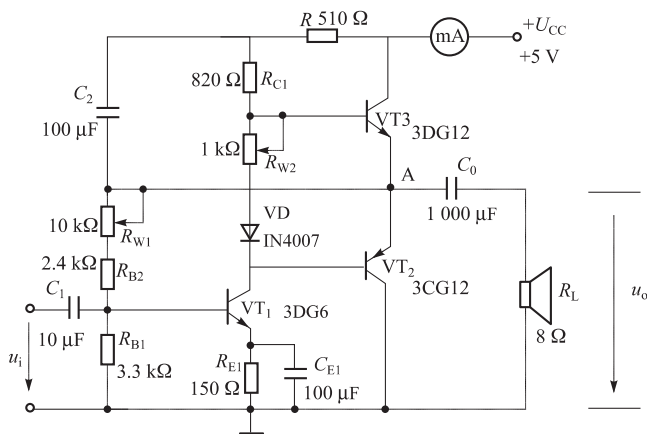


图 2-47 OTL 功率放大器实验电路



OTL 电路的主要性能指标:

(1) 最大不失真输出功率: 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  $P_{om} = \frac{U_o^2}{R_L}$ 。

(2) 效率:  $\eta = \frac{P_{om}}{P_E} \times 100\%$ ,  $P_E$  为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  $P_E = U_{CC} I_{dc}$ , 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 2.3 有关内容

(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。

## 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 2-47 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 (将万用表置于直流毫安挡代替), 电位器  $R_{W2}$  置最小值,  $R_{W1}$  置中间位置。接通 +5 V 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  $R_{W1}$ , 用万用表的直流电压挡测量 A 点电位, 使  $U_A = \frac{1}{2} U_{CC}$ 。

(2) 测试各级静态工作点: 调节  $R_{W2}$ , 使  $VT_2$ 、 $VT_3$  管的  $I_{C2} = I_{C3} = 5 \sim 10$  mA。调整输出级静态电流, 从减小交越失真角度而言, 应适当加大输出级静态电流, 但该电流过大, 会使效率降低, 所以一般以  $5 \sim 10$  mA 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, 一般  $VT_1$  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  $f = 1$  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 (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  $5 \sim 10$  mA, 如过大, 则要检查电路。输出级电流调好以后, 测量各级静态工作点, 记入表 2-23 中。

表 2-23 测量各级静态工作点 ( $I_{C2} = I_{C3} = \text{mA}$ ,  $U_A = 2.5 \text{ V}$ )

	$VT_1$	$VT_2$	$VT_3$
$U_B/\text{V}$			
$U_C/\text{V}$			
$U_E/\text{V}$			

注意：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；二是输出管静态电流调好，如无特殊情况，不得随意旋转  $R_{W2}$  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，用示波器测出此时负载  $R_L$  上的电压峰—峰值  $U_{omP-P}$ ，则：

$$P_{om} = \frac{U_{omP-P}^2}{8R_L}$$

(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  $P_o = P_{om}$  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 2.3，测试数据记入表 2-24 中。在测试时，取中频频率  $f_0 = 1 \text{ kHz}$ ，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。

表 2-24 频率响应的测试 ( $U_{iP-P} = 2 \text{ mV}$ )

	$f_L$				$f_0$	$f_H$			
$f/\text{Hz}$					1 000				
$U_{oP-P}/\text{V}$									
$A_u$									



## 五、实验报告要求

- (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) 讨论实验中发生的问题及解决办法。

## 实验 2.12 集成功率放大器

### 一、实验目的

- (1) 掌握功率放大集成块的应用方法。
- (2) 熟悉集成功率放大器基本技术指标的测试方法。

### 二、实验设备与器件

- ① +9 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 电流毫安表; ⑦ 频率计; ⑧ 集成功放块 LA4112; ⑨ 8  $\Omega$  扬声器、电阻器、电容器若干。

### 三、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、推动级和功率放大级等几部分。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 ~ 80 dB, 加典型负反馈时电压增益在 40 dB 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 2-48 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  $VT_1$  和  $VT_2$  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  $VT_3$  管完成直接耦合电路中的电平移动,  $VT_4$  是  $VT_3$  管的恒流源负载, 以获得较大的增益; 第三级由  $VT_6$  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  $VT_8 \sim VT_{13}$  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。

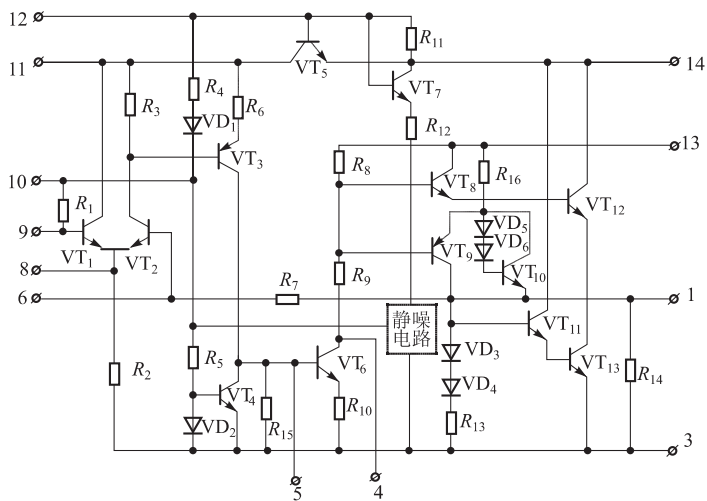


图 2-48 LA4112 内部电路图

### 3. 偏置电路

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在增益。同时，还设有退耦电路来消除各级之间的不良影响。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 2-49 所示。表 2-25、表 2-26 分别是它的额定参数和典型参数。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。集成功率放

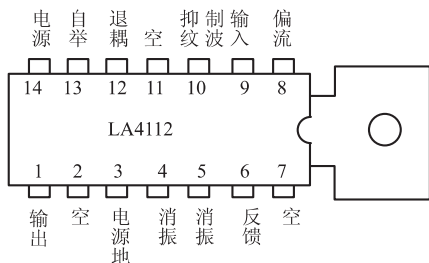


图 2-49 LA4112 外形及管脚排列图

大器 LA4112 的应用电路如图 2-50 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。
- $C_2$ 、 $R_f$ ——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。

表 2-25 LA4112 集成功放的额定参数

参 数	符号与单位	额 定 值
最大电源电压	$U_{CCmax}/V$	13 (有信号时)





续表

参 数	符号与单位	额 定 值
允许功耗	$P_o/W$	1.2
		2.25 (50 × 50 mm <sup>2</sup> 铜箔散热片)
工作温度	$T_{opr}/^{\circ}C$	-20 ~ +70

表 2-26 LA4112 集成功放的典型参数

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	$I_{CCQ}/mA$	$U_{CC} = 9 V$	15
开环电压增益	$A_{V_o}/dB$		70
输出功率	$P_o/W$	$R_L = 4 \Omega, f = 1 kHz$	1.7
输入阻抗	$R_i/k\Omega$		20

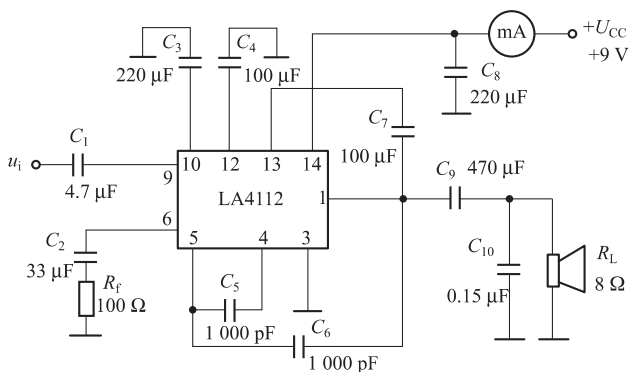


图 2-50 由 LA4112 构成的集成功放实验电路

#### 四、实验内容

按图 2-50 连接实验电路，输入端接函数信号发生器，输出端接扬声器。

##### 1. 静态测试

将输入信号旋钮旋至零，接通 +9 V 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。

① 接入自举电容  $C_7$ ：输入端接 1 kHz 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  $P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$ 。

### ② 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  $U_i < 100$  mV，测试方法同实验 2.11。

(3) 频率响应：测试方法同实验 2.3。

(4) 噪声电压：要求  $U_N < 2.5$  mV，测试方法同实验 2.11。

## 3. 试听

## 五、实验报告要求

(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。

## 实验 2.13 集成直流稳压电源

### 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、实验设备与器件

① 可调工频电源。② 双踪示波器。③ 万用表。④ 三端集成稳压器、桥堆、电阻、电容等。

### 三、实验原理

由于集成稳压器具有体积小、外接线路简单、使用方便、工作可靠和通用性强等优点，因此在各种电子设备中应用十分普遍。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。对于大多数电子测量仪器、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 5 V、6 V、9 V、12 V、15 V、18 V、24 V 七个档次，输出电流最大可达 1.5 A（加散热片）。同类型 78M 系列稳压器的输出电流为 0.5 A，78L 系列稳压器的输出电流为 0.1 A。若要求负极性输出电压，则可选用 W7900 系列稳压器。

1. 图 2-51 为 W7800 系列的外形和接线图

W7800 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

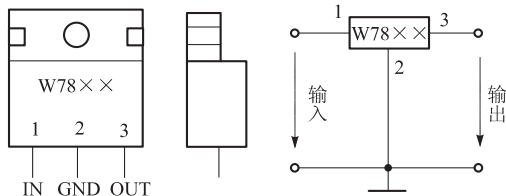


图 2-51 W7800 系列外形及接线图

数有：输出直流电压  $U_o = +12\text{ V}$ ，输出电流 1.5 A，电压调整率 10 mV/V，输出电阻  $R_o = 0.15\ \Omega$ ，输入电压  $U_i$  的范围 15 ~ 17 V。因为一般  $U_i$  要比  $U_o$  大 3 ~ 5 V，才能保证集成稳压器工作在线性区。

### 2. 串联型稳压电源的实验电路

图 2-52 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。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 2-53 所示。滤波电容  $C_1$ 、 $C_2$  一般选取几百到几千微法。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  $0.33\ \mu\text{F}$ ），以抵消线路的电感效应，防止产生自激振荡。输出端电容  $C_4$ （ $0.1\ \mu\text{F}$ ）用以滤除输出端的高频信号，改善电路的暂态响应。

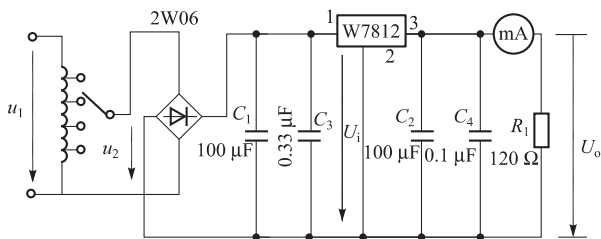


图 2-52 由 W7815 构成的串联型稳压电源

图 2-54 为正、负双电压输出电路，例如，需要  $U_{o1} = +15\text{ V}$ ， $U_{o2} = -15\text{ V}$ ，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。

### 3. 外接电路输出电压、电流扩展电路

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

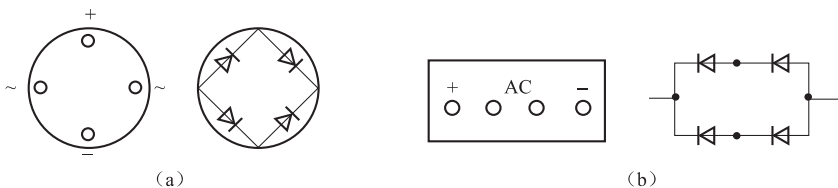


图 2-53 桥堆管脚图

(a) 圆桥 2W06; (b) 排桥 KBP306

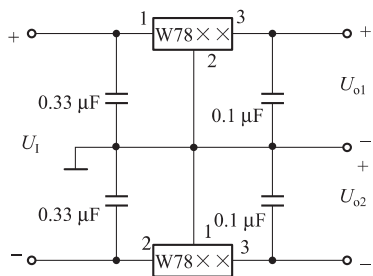


图 2-54 正、负双电压输出电路

扩展。图 2-55 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 12 V，因此只要适当选择  $R$  的值，使稳压管  $VD_w$  工作在稳压区，则输出电压  $U_o = 12 + U_z$ ，可以升高稳压器本身的输出电压。图 2-56 是通过外接晶体管 VT 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 VT 的基极电流  $I_B$  来决定，即：

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

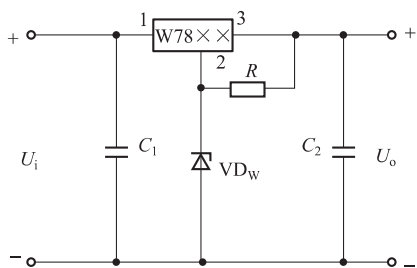


图 2-55 输出电压扩展电路

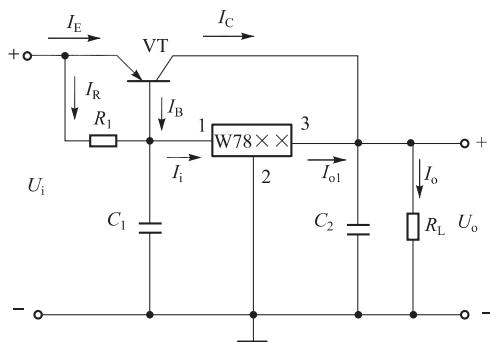


图 2-56 输出电流扩展电路图

式中， $I_C$  为晶体管 VT 的集电极电流，它等于  $I_C = I_o - I_{o1}$ ； $\beta$  为 VT 管的电流放大系数；对于锗管  $U_{BE}$  按 0.3 V 估算，对于硅管  $U_{BE}$  则按 0.7 V 估算。图 2-57 为 W7900 系列（输出负电压）外形及接线图。图 2-58 为可调输出正三端稳压器 W317 外形及接线图。输出电压计算公式： $U_o \approx 1.25 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$ ；最大输入电压： $U_{i\max} = 40 \text{ V}$ ；输出电压范围： $U_o = 1.2 \sim 37 \text{ V}$ 。

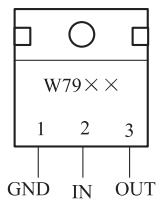


图 2-57 W7900 系列外形及接线图

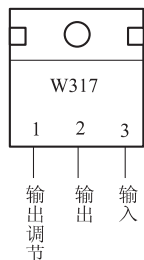
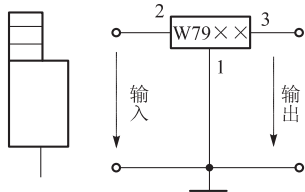
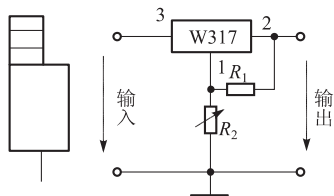


图 2-58 W317 外形及接线图



## 四、实验内容

### 1. 整流滤波电路测试

按图 2-59 接实验电路, 取可调工频电源 15 V 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  $\tilde{U}_L$ , 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。

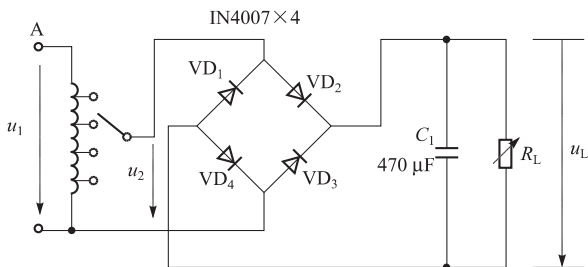


图 2-59 整流滤波电路

### 2. 集成稳压器性能测试

断开工频电源, 按图 2-52 改接实验电路, 取负载电阻  $R_L = 120 \Omega$ 。

(1) 初测: 接通工频 14 V 电源, 测量  $U_2$  值; 测量滤波电路输出电压  $U_i$  (稳压器输入电压), 集成稳压器输出电压  $U_o$ , 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  $U_o$  和最大输出电流  $I_{o,max}$  的测量。在输出端接负载电阻  $R_L = 120 \Omega$ , 由于 W7812 输出电压  $U_o = 12 \text{ V}$ , 因此流过  $R_L$  的电流  $I_{o,max} = \frac{12}{120} = 100 \text{ mA}$ 。这时  $U_o$  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  $R_o$  的测量。

④ 输出纹波电压的测量。

②、③、④的测试方法同实验 2.6，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 2-55、图 2-56 和图 2-58 中各元、器件，并自拟测试方法与表格，记录实验结果。

## 五、实验报告要求

(1) 整理实验数据，计算  $S$  和  $R_o$ ，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。