

模拟电子技术实验 指导书

商丘师范学院物理与信息工程系编

目 录

实验一	常用电子仪器仪表的认识和使用	1
实验二	晶体管共射极单管放大器	5
实验三	射极跟随器	10
实验四	负反馈放大器	12
实验五	差动放大电路	15
实验六	集成运算放大器(模拟运算电路)	18
实验七	集成运算放大器(电压比较器)	23
实验八	RC 正弦振荡器	25
实验九	低频功率放大器	28
实验十	直流稳压电源	31
实验十一	单管共射放大电路(设计)	35

实验一 常用电子仪器仪表的认识和使用

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、万用表等的主要技术指标、性能及正确使用方法。
2. 初步掌握用双踪示波器测量信号的幅度、频率等有关参数。

二、实验仪器

模拟实验箱、示波器、毫伏表、万用表

三、实验原理

在电子技术实验里，测试和定量分析电路的静态和动态的工作状况时，最常用的电子仪器有：示波器、函数信号发生器、直流稳压电源、交流毫伏表、万用表等。

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。

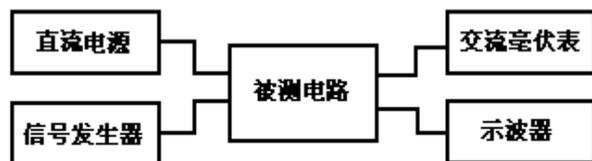


图1-1 模拟电路连接示意图

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。

(1) 寻找扫描光迹

将示波器 Y 轴显示方式置“Y₁”或“Y₂”，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) 三种显示方式

双踪示波器一般有三种显示方式，即“单踪 Y₁ 显示”、“单踪 Y₂ 显示”及“双踪 Y₁+Y₂ 显示”，在双踪显示方式中，可以选择“交替”或“断续”二种显示方式。“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较低时使用。

(3) 其他注意事项

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。

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。

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）乘积，即可算得信号幅值的实测值。

根据被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。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. 直流稳压电源：

为电路提供电源。

4. 交流毫伏表：

交流毫伏表只能在其工作频率范围之内，用于测量电路的输入、输出信号的有效值。

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。

5. 万用表：

该表可用于测量工频交、直流电压，交、直流电流，电阻等。

四、实验步骤

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（Y₁ 或 Y₂），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”（↔）和“Y 轴位移”（↑↓）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（Y₁ 或 Y₂），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“Y₁”或“Y₂”。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 _{p-p} (V)		
频率 f(KHz)		

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。

2. 用示波器、交流毫伏表及频率计测量信号参数

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	频率计读数(Hz)	示波器测量值		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						
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 0.5s/div 挡）和扫速较高挡位(如 5 μ 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 、 Y_2 输入端。

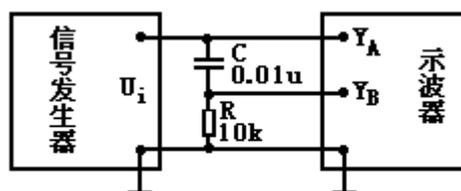
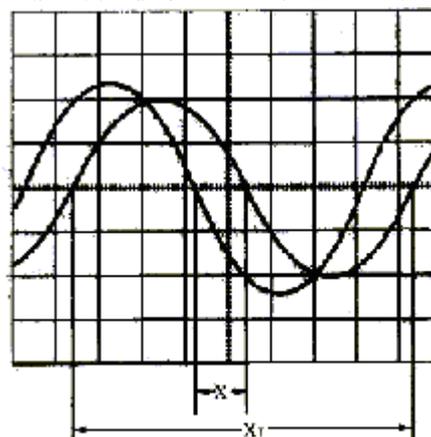


图 1-2 两波形间相位差测量电路

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 、 Y_2 输入耦合方式开关置“ \perp ”挡位，调节 Y_1 、 Y_2 的(\uparrow) \downarrow 移位旋钮，使两条扫描基线重合。

④将 Y_1 、 Y_2 输入耦合方式开关置“AC”挡调节触发电平、扫速开关及 Y_1 、 Y_2 灵敏度开置，使在荧屏上显示出易于观察的两个相位不正弦波形 U_i 及 U_R ，如图 1-3 所示。根据两波水平方向差距 X ，及信号周期 X_T ，则可求得两相位差。



位，
关位
同的
形在
波形

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

式中： X_T —— 一周所占格数

X —— 两波形在 X 轴方向差距格
记录两波形相位差于表 1-3。

图 1-3 双踪示波器显示两相位不同的正弦波

数

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。

4. 直流稳压电源的使用

接通电源开关，调电压调节旋钮使两路电源分别输出+3V 和+12V，用万用表“DC/V”挡测量输出电压的值。

五、数据处理

1. 整理实验数据，并进行分析。
2. 画出用双踪示波器测量相位差的波形图。*

六、问题思考

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？

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和测量方法，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、实验仪器

模拟实验箱、示波器、毫伏表、万用表、单管/负反馈两级放大电路板

三、实验原理

图 2-1 为电阻分压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。

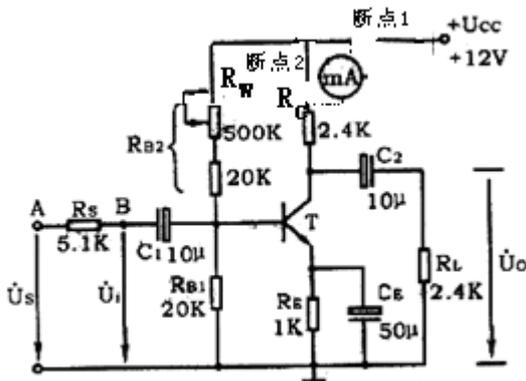


图 2-1 共射极单管放大器实验电路

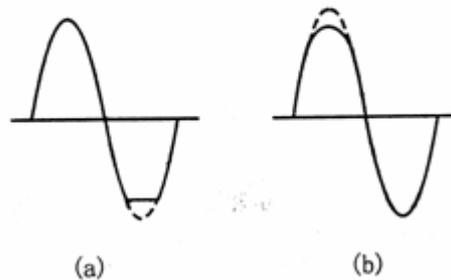


图 2-2 静态工作点对 U_o 波形失真的影响

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 （一般 5~10 倍），则它的静态工作点可用下式估算：

$$U_B = \frac{R_{B1}}{R_{B1} + R_{B2}} \times V_{CC} \quad I_E = \frac{U_B - U_{BE}}{R_E} \approx I_C$$

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

电压放大倍数

$$A_u = -\beta \frac{R_B // R_L}{r_{be}}$$

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 、 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： $I_E \approx I_C = \frac{U_E}{R_E}$ 算出 I_c (也可根据 $I_C = \frac{U_{CC} - U_C}{R_C}$ ，由 U_c 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 的正半周被削顶（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。

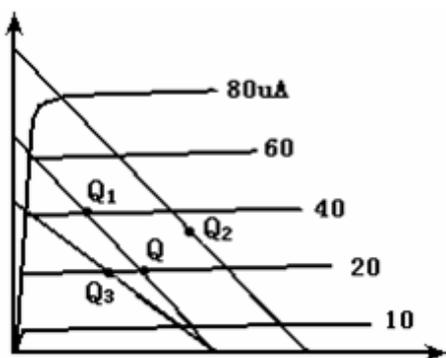


图 2-3 电路参数对静态工作点的影响

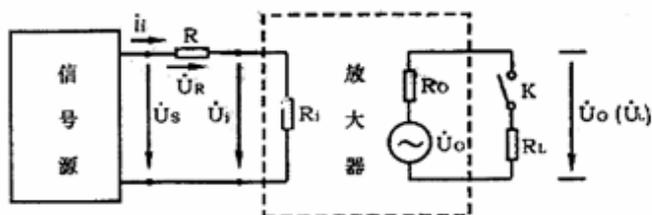


图 2-4 输入、输出电阻测量电路

改变电路参数 V_{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。

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_u 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

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

(2) 输入电阻 R_i 的测量

输入电阻 R_i 的大小表示放大电路从信号源或前级放大电路获取电流的多少。输入电阻越大，索取前级电流越小，对前级的影响就越小。

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

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

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 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 $U_{OL} = \frac{R_L}{R_o - R_L} U_o$ 可求出 $R_o = \frac{U_o - U_{OL}}{U_{OL}} R_L$ 。

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。同样, 为了使测量值尽可能精确, 最好取 R_L 与 R_o 的阻值为同一数量级。

(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。

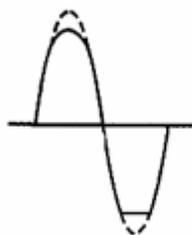


图 2-5 静态工作点正常, 输入信号太大引起的失真

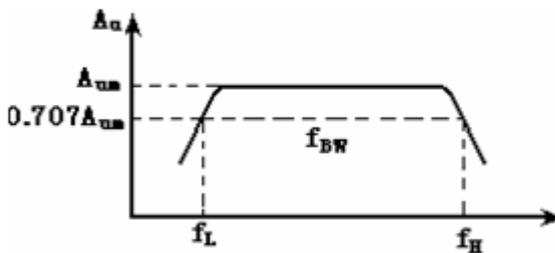


图 2-6 幅频特性曲线

(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 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。

四、实验步骤

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。

1. 测试静态工作点

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至零。接通 +12V 电源、调节 R_w , 使 $I_c = 2.0mA$ (即 $U_E = 2.0V$), 用直流电压表测量 U_B 、 U_E 、 U_C 及万用表测量 R_{B2} 值。记入表 2-1

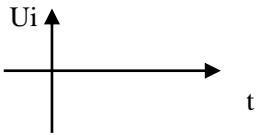
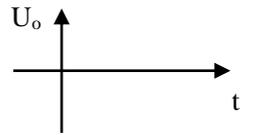
表 2-1 ($I_c=2\text{mA}$)

测量值				计算值		
U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	R_{B2} (K Ω)	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 ($I_c=2.0\text{mA}$ $U_i=10\text{mV}$)

R_c (K Ω)	R_L (K Ω)	U_o (V)	A_v	观察记录一组 U_o 和 U_i 波形	
2.4	∞				
1.2	∞				
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 ($R_c=2.4\text{K}\Omega$ $R_L=\infty$ $U_i=10\text{mV}$)

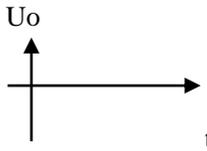
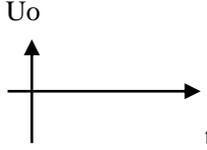
I_c (mA)			2.0		
U_o (V)					
A_u					

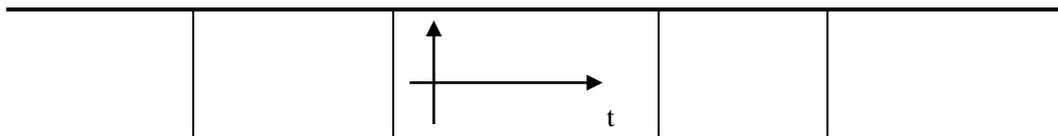
测量 I_c 时, 要先将信号源输出旋钮旋至零 (即使 $U_i=0$)。

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_o 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_o 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 ($R_c=2.4\text{K}\Omega$ $R_L=\infty$ $U_i=10\text{mV}$)

I_c (mA)	U_{CE} (V)	U_o 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_O 值, 记入表 2-5。

表 2-5 ($R_C=2.4K\Omega$ $R_L=2.4K\Omega$)

$I_C(mA)$	$U_{im}(mV)$	$U_{Om}(V)$	$U_{opp}(V)$

*6. 测量输入电阻和输出电阻

按照图 2-4 连接电路, 使 $R_C=2.4 K\Omega$, $R_L=2.4 K\Omega$, $I_C=2.0mA$ 。输入 $f=1KHz$ 的正弦信号, 在输出电压 U_O 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_O , 记入表 2-6

表 2-6 ($I_C=2.0mA$ $R_C=2.4 K\Omega$ $R_L=2.4 K\Omega$)

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

五、数据处理

- 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 (取一级数据进行比较), 分析产生误差原因。
- 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。
- 讨论静态工作点变化对放大器输出波形的影响。

六、问题思考

- 本实验中若出现图 2-8 所示输出波形, 试判断它们各属于哪种类型的失真。
- 测量放大器静态工作点时, 如果测得 $V_{CEQ} < 0.5V$, 说明三极管处于什么工作状态? 如果 $V_{CEQ} \approx V_{CC}$, 三极管又处于什么工作状态?

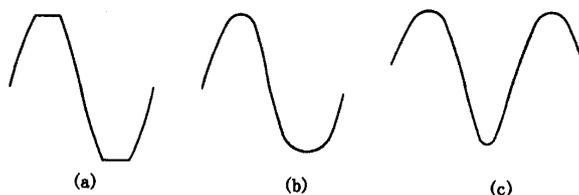


图 4-2 基本放大器

- 图 2-1 所示电路中, 上偏置固定电阻 R_{B2} 起什么作用? 既然有了 R_P , 不要 R_{B2} 可否? 为什么?

实验三 射极跟随器

一、目的

1. 调试并测量静态工作点 (U_{BE} 、 U_{CE})
2. 测量电压放大倍数
3. 测量输入电阻和输出电阻

二、仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 射极输出器电路板

三、实验原理

1. 参考电路

图 3—1 是一个共集组态的单管放大电路，输入信号与输出信号的公共端是三极管的集电极，所以属于共集组态，又由于输出信号从发射极引出，因此这种电路也称为射极输出器。

这种电路，电压放大倍数小(近似等于 1)，电流放大倍数大于 1 ($1 + \beta$)；但输入电阻较大 ($R_{i2} \approx (R_{b2} + R_p) // \beta 2R_L$)，同时其输出电阻小，使整个放大电路的带负载能力大大增强。

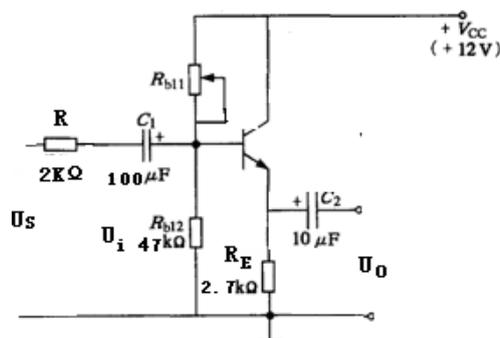


图 3-1 射极跟随器

2. 静态工作点设置与调整

按图 3—1 正确连线，(取 U_s 大约 3V 左右，1KHz,)，输出接示波器，调节可调电阻，使示波器显示最大不失真波形，在直流通路下测量 U_{BE} 、 U_{CE} 。

3. 电压放大倍数的测量

电压放大倍数 A_u 是指总的输出电压与输入电压的有效值之比，即：

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

4. 输入、输出电阻的测量

输入电阻 R_i 的大小表示放大电路从信号源或前级放大电路获取电流的多少。输入电阻越大，索取前级电流越小，对前级的影响就越小。 $R_i = \frac{U_i}{I_i} = \frac{U_i}{\frac{U_s}{R} - \frac{U_i}{R}} = \frac{U_i}{\frac{U_s - U_i}{R}} = \frac{U_i}{U_s - U_i} R$ 。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_{oL} ，根据 $U_{oL} = \frac{R_L}{R_o + R_L} U_o$

可求出 $R_o = \frac{U_o - U_{oL}}{U_{oL}} R_L$ 。

四、实验步骤

1. 按图正确连线，调整并测量静态工作点。

表 3-1

测 量 值				计 算 值		
U_B (V)	U_E (V)	U_C (V)	R_{B2} (K Ω)	U_{BE} (V)	U_{CE} (V)	I_c (mA)

2. 测量电压放大倍数

表 3-2

R_L (K Ω)	U_o (V)	A_v
∞		
5		

3. 输入、输出电阻的测量

表 3-3 ($R_c=2\text{ K}\Omega$ $R_L=5\text{ K}\Omega$)

U_S (mV)	U_i (mV)	R_i (K Ω)		U_L (V)	U_o (V)	R_o (K Ω)	
		测量值	计算值			测量值	计算值

五、数据处理

1. 认真记录实验数据。
2. 对测试结果进行理论分析，找出产生误差的原因，提出减少实验误差的措施。

六、问题思考

1. 射极输出器具有什么特点？
2. 根据射极输出器特点，该电路主要用于何处？

实验四 负反馈放大器

一、目的

1. 加深理解负反馈对放大电路性能的影响。
2. 掌握放大电路开环与闭环特性的测试方法。
3. 进一步熟悉常用电子仪器的使用方法。

二、仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 单管/负反馈两级放大器电路板

三、实验原理

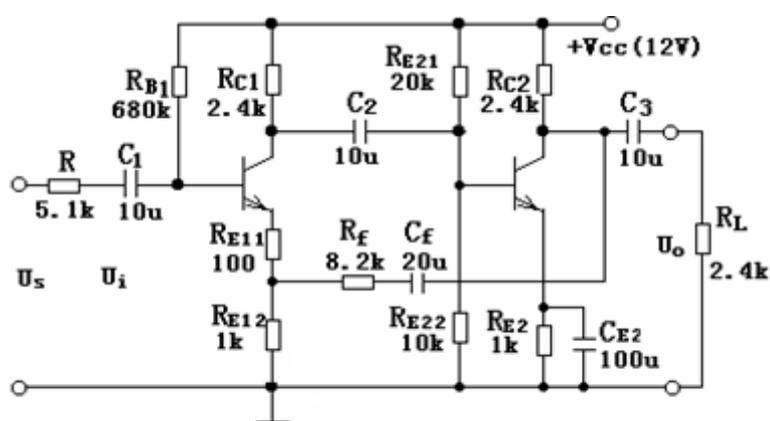


图 4-1 带有电压串联负反馈的两级阻容耦合放

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_{E1} 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

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

其中 $A_u = U_o / U_i$ 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。

- (2) 反馈系数

$$F_u = \frac{R_{E1}}{R_f + R_{E11}}$$

- (3) 输入电阻

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

R_i 为基本放大器的输入电阻

(4) 输出电阻

$$R_{of} = \frac{R_o}{1 + A_u R_u}$$

R_o 为基本放大器的输出电阻； A_u 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，但又要将反馈网络的影响（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_{E11} 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，此是 $(R_f + R_{E11})$ 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。

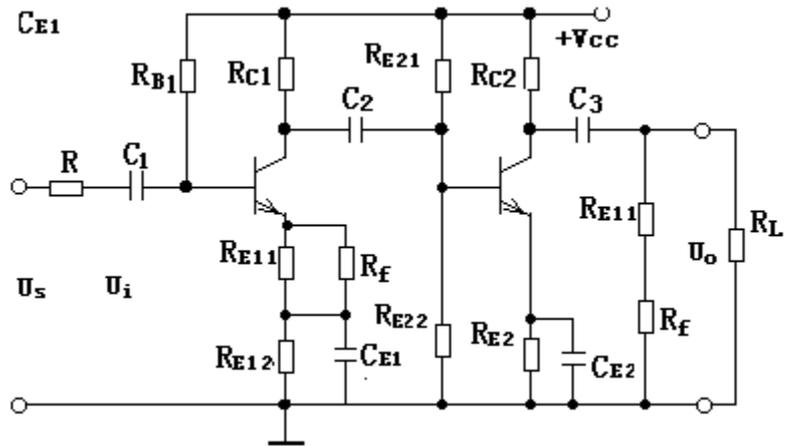


图 4-2 基本放大器

四、实验内容

1. 测量静态工作点

按图 4-1 连接实验电路，取 $V_{CC} = +12V$ ， $U_i = 0$ ，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_u ，输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

以 $f = 1kHz$ ， U_s 约 $10mV$ 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_u	R_i (k)	R_o (k)
负反馈放大器	U_S (mV)	U_i (mV)	U_L (V)	U_o (V)	A_{uf}	R_{if} (k)	R_{of} (k)

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

表 4-3

基本放大器	f_L (kHz)	f_H (kHz)	f_{BW} (kHz)
负反馈放大器	f_{Lf} (kHz)	f_{Hf} (kHz)	f_{BW} (kHz)

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 20mV), 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 4-2; 测量 f_{Hf} 和 f_{Lf} , 记入表 4-3。

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、数据处理

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、问题思考

1. 能否说 $|1+\mathbf{AF}|$ 越大, 负反馈效果越好?
2. 对多级放大器应从末级向输入级引负反馈, 这样做可以吗? 为什么?

实验五 差动放大电路

一、实验目的

1. 加深对差分放大电路原理、性能及特点的理解。
2. 学习差分放大电路主要性能指标的测试方法。

二、实验仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 差分放大电路板

三、实验原理

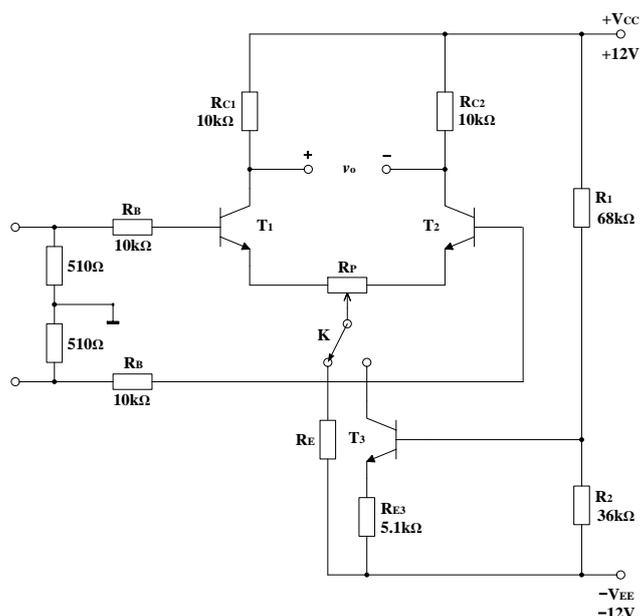


图 5-1 差分放大电路

图 5-1 是差分放大电路的基本结构。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，构成典型的差分放大电路。调节调零电位器 R_P ，使差分放大电路两边对称的元件参数相等，当输入信号 $U_i=0$ 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。当开关拨向右边时，构成具有恒流源的差分放大电路。它用晶体管恒流源代替发射极电阻 R_E ，可以进一步提高差分放大电路抑制共模信号的能力。

1. 静态工作点的估算

典型电路

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

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

恒流源电路

$$I_{C3} \approx I_{E3} = \frac{[R_2 \times (U_{CC} + |U_{EE}|)]}{(R_1 + R_2) - U_{BE}} \times \frac{1}{R_{E3}}$$

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

2. 差模电压放大倍数和共模电压放大倍数

当差分放大电路的射极电阻 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,

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

单端输出: $A_{d1} = \frac{\Delta U_{c1}}{\Delta U_i} = \frac{A_d}{2}$

$$A_{d2} = \frac{\Delta U_{c2}}{\Delta U_i} = -\frac{A_d}{2}$$

当输入共模信号时, 若为单端输出, 则有,

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

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, 因此共模放大倍数 A_c 也不会绝对等于零。

3. 共模抑制比 K_{CMR}

为了表征差分放大电路对有用信号(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

$$\begin{aligned} K_{CMR} &= \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad \text{或者} \\ K_{CMR} &= 20 \log \left| \frac{A_d}{A_c} \right| \quad (\text{dB}) \end{aligned}$$

差分放大电路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 $f=1\text{KHz}$ 的正信号作为输入信号。

四、实验内容

1. 典型差分放大电路性能测试

按图 5-1 连接实验电路, 开关拨向左边构成典型差分放大电路。

(1) 测量静态工作点

①调节放大器零点信号源不接入, 将输入端 A、B 与地短接, 接通 ± 12 伏直流电源, 用直流电压表测量输出电压, 调节调零电位器, 使输出电压等于零。调节要仔细, 力求准确。②测量静态工作点 调好零点以后, 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} , 计入表 5-1 中。

表 5-1

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

(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(输入电压 U_i 为 0), 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 100mV), 在输入波形无失真的情况下, 用交流毫伏表测 U_i , U_{C1} , U_{C2} . 计入表 5-2 中, 并观察 U_i , U_{C1} , U_{C2} 之间的相位关系及 U_{BE} 随 U_i 改变而变化的情况。

(3) 测量共模电压放大倍数 将放大器输入端 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 5-2 中, 并观察 U_i , U_{C1} , U_{C2} 之间的相位关系及 U_{BE} 随 U_i 改变而变化的情况。

2. 具有恒流源的差分放大电路性能测试

将图 5-1 电路中开关 K 拨向右边, 构成具有恒流源的差分放大电路。重复内容 1-2)、1-3) 的要求, 计入表 5-2 中。

表 5-2

	典型差分放大电路		带恒流源的差分放大电路	
	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)				
$A_{d1}=U_{C1}/U_i$		/		/
$A_d=V_o/U_i$		/		/
$A_{c1}=U_{C1}/U_i$	/		/	
$A_c=U_o/U_i$	/		/	
$\text{CMRR}= A_{d1}/A_{c1} $				

五、数据处理

1. 整理实验数据, 填入实验表格中。
2. 根据测试结果, 说明两种差分放大电路性能的差异及其原因。

六、问题思考

1. 为什么要对差分放大电路进行调零? 调零时能否用晶体管毫伏表来指示输出 U_o 值?
2. 对基本差分放大电路而言, 在 V_{CC} 和 V_{EE} 已确定的情况下, 要使静态工作点达到某个预定值, 应怎样调整?
3. 差分放大电路的差模输出电压是与输入电压的差还是和成正比?
4. 设电路参数对称, 加到差分放大电路两管基极的输入信号相等、相位相同时, 输出电压等于多少?

实验六 集成运算放大器(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、实验仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 芯片 LM741

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。

1. 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。

2. 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，可简化运放电路和计算。

3. 基本运算电路

(1) 反相比例运算电路

电路如图 6-1 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

$$R_2 = R_1 // R_F。$$

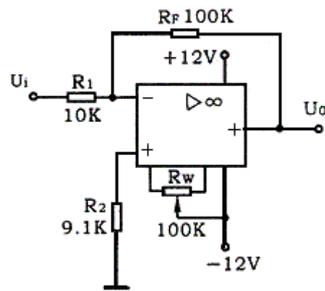


图6-1 反相比例运算电路

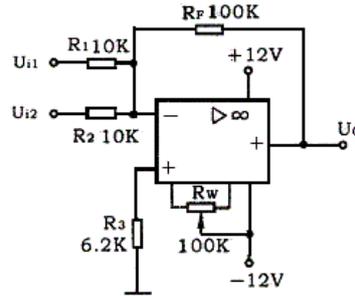


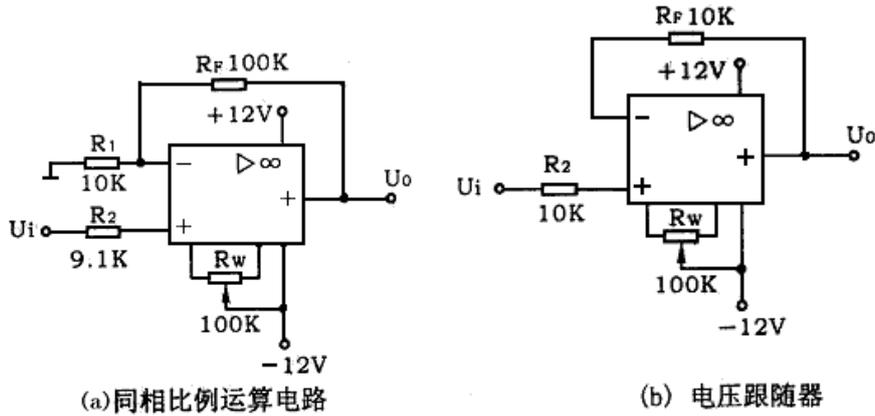
图6-2 反相加法运算电路

(2) 反相加法电路

电路如图 6-2 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



(a) 同相比例运算电路

(b) 电压跟随器

图 6-3 同相比例运算电路

图 6-3 (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 6-3 (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。

(4) 差动放大电路（减法器）

对于图 6-4 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

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

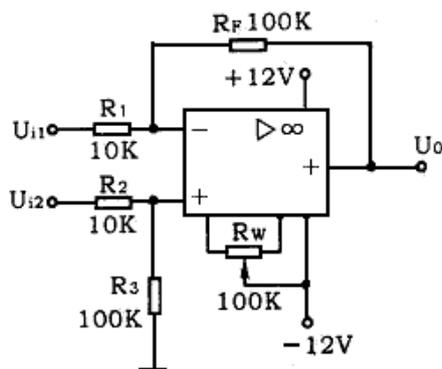


图 6-4 减法运算电路图

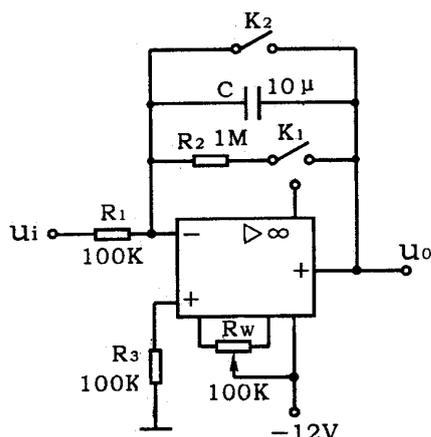


图 6-5 积分运算电路

(5) 积分运算电路

反相积分电路如图 6-5 所示。在理想化条件下，输出电压 U_0 等于

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

式中 $u_c(o)$ 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 $u_c(o) = 0$ ，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 $u_c(o) = 0$ ，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. 反比例运算电路

(1) 按图 6-1 连接实验电路，接通 $\pm 12V$ 电源，输入端对地短路，进行调零和消振。

(2) 输入 $f = 100Hz$ ， $U_i = 0.5V$ 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 6-1。

表 6-1 $U_i = 0.5V, f = 100Hz$

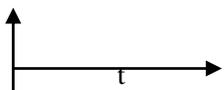
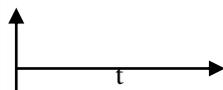
$U_i(V)$	$U_0(V)$	u_i 波形	u_0 波形	A_v	
				实测值	计算值

2. 同比例运算电路

(1) 按图 6-3 (a) 连接实验电路。实验步骤同内容 1，将结果记入表 6-2。

(2) 将图 6-3 (a) 中的 R_1 断开，得图 6-3 (b) 电路 (实验重复内容 1)

表 6-2 $U_i = 0.5V, f = 100Hz$

$U_i(V)$	$U_0(V)$	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 6-2 连接实验电路。调零和消振。

(2) 输入信号采用直流信号，图 6-6 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 6-3。

表 6-3

$U_{i1}(V)$					
$U_{i2}(V)$					
$U_0(V)$					

4. 减法运算电路

(1) 按图 6-4 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 6-4。

表 6-4

$U_{i1}(V)$					
$U_{i2}(V)$					
$U_0(V)$					

5. 积分运算电路

实验电路如图 6-5 所示。

(1) 打开 K_2 ，闭全 K_1 ，对运放输出进行调零。

(2) 调零完成后，再打开 K_1 ，闭全 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 ，然后用直流电压表测量输出电压 U_0 ，每隔 5 秒读一次 U_0 ，记入表 6-5，直到 U_0 不继续明显增大为止。

表 6-5

$t(s)$	0	5	10	15	20	25	30
$U_0(V)$							

五、数据处理

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、问题思考

1. 由本实验的电源电压，能否计算出各运放电路的最大不失真输出电压吗？请思考在什么情况下，输入电压和输出电压之间就不再符合运算公式？
2. 当输入信号从同相端输入和反相端输入其输出电压波形有何不同？

实验七 集成运算放大器(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. 学会比较器的方法。

二、实验仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 芯片 LM741

三、实验原理

电压比较器是一种用来比较输入信号电压大小的电路,它可以将连续的线性模拟信号转换为仅有两个状态的矩形波,因此比较器的输出方式有两种:高电平或低电平。

1. 电压比较器的分类

大致分为单限比较器、过零比较器、滞回比较器等。
失调与漂移均为零等。

2. 单限比较器

只有一个门限电压的比较器称为单限比较器。其门限电压即为参考电压 V_{REF} ,将 U_I 与 V_{REF} 相比较,电路如图 7—1 所示。

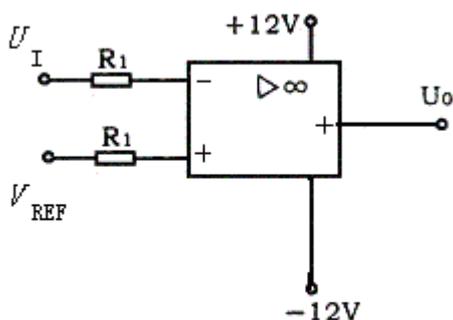


图 7—1 单限比较器

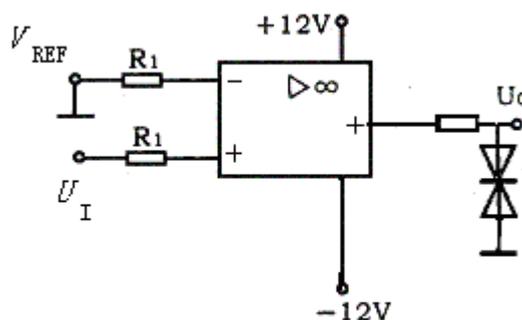


图 7—2 过零比较器

3. 过零比较器

电路如图 7-2 所示。比较器的门限电压 $V_{REF}=0$,输入信号电压与零电位进行比较,则输入信号电压每次过零时,输出电压都产生相应的跳变。

(2) 反相加法电路

电路如图 6-2 所示,输出电压与输入电压之间的关系为

(3) 滞回比较器

滞回比较器的阈值与过去的输出状态有关,滞回传输特性可从输出与输入之间练成正反馈而得到。
上限电压

$$V_1 = \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_{O+} + \frac{R_F}{R_1 + R_F} V_{REF}$$

下限电压

$$V_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_{O-} + \frac{R_F}{R_1 + R_F} V_{REF}$$

回差

$$V_H = \frac{R_1}{R_1 + R_F}(V_{O+} - V_{O-})$$

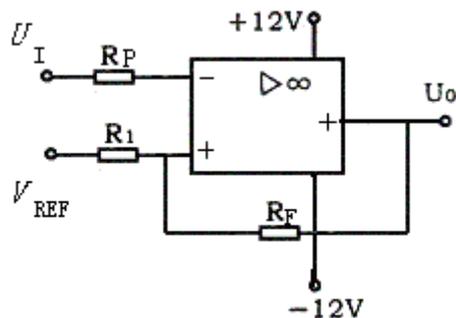


图7-3 滞回比较器

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. 单限比较器

(1) 按图 7-1 连接实验电路，接通 $\pm 12V$ 电源，选定门限电压 V_{REF} 。

(2) 输入可调直流信号并调节，测量相应的饱和电压 U_{O+} 和 U_{O-} ，画出传输特性曲线。

2. 过零比较器

(1) 按图 7-2 连接实验电路。实验步骤同内容 1。

(2) 输入正弦波，测量相应的饱和电压 U_{O+} 和 U_{O-} ，画出传输特性曲线。

3. 滞回比较器

(1) 按图 7-3 连接实验电路。

(2) 输入信号采用可调直流信号，得出上限门限电压、下限门限电压、回差，画出传输特性曲线，并与理论值相比较。

五、数据处理

1. 整理实验数据，画出传输特性曲线图。

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。

六、问题思考

1. 为什么在比较器电路中引入反馈？

2. 滞回比较器为什么有抗干扰能力？

实验八 RC 正弦振荡器

一、实验目的

1. 掌握 RC 正弦振荡器的组成和振荡条件。
2. 学会测量、调试振荡电路。

二、实验仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 RC 正弦振荡电路板

三、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 1Hz~1MHz 的低频信号。

1. RC 移相振荡器

电路型式如图 8-1 所示，选择 $R \gg R_i$ 。

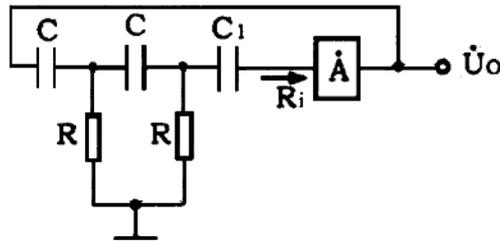


图 8-1 RC 移相振荡器原理图

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 $A > 29$

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 8-2 所示。

振荡频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$

起振条件 $A > 3$

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。

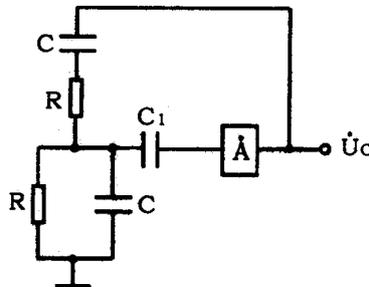


图 8-2 RC 串并网络振荡器原理图

3. 双 T 选频网络振荡器

电路型式如图 8-3 所示。

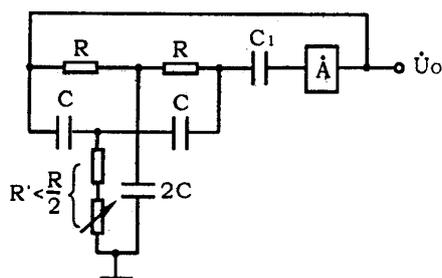


图 8-3 双 T 选频网络振荡器原理图

振荡频率 $f_0 = \frac{1}{5RC}$

起振条件 $R' < \frac{R}{2}$ $FA > 1$

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。

四、实验内容

1. RC 串并联选频网络振荡器

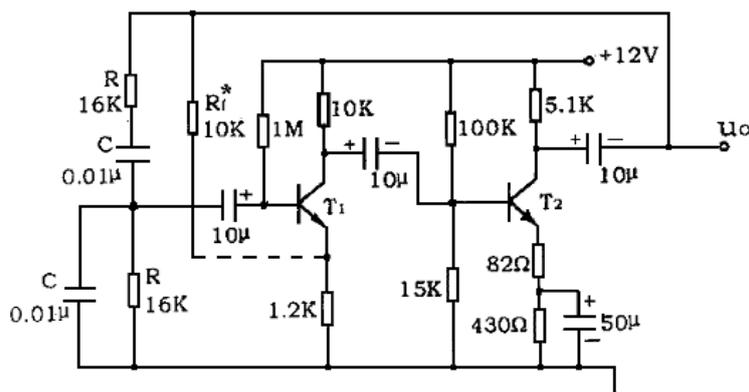


图 8-4 RC 串并联选频网络振荡器

- (1) 按图 8-4 组接线路
- (2) 断开 RC 串并联网路，测量放大器静态工作及电压放大倍数。
- (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_0 波形，调节 R_f 使获得满意的正弦信号，记录波形及振荡频率，填入表表 8-1 中，并与计算值进行比较。

表 8-1

R/ KΩ	C/ μF	频率计算值 f /Hz	频率实测值 f /Hz	输出波形

- (4) 改变 R 或 C 值，观察振荡频率变化情况。

* (5) 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 串并联网路，保持输入信号的幅度不变（约 3V），频率由低到高变化，RC 串并联网路输出幅值将随之变化，当信号源达某一频率时，RC 串并联网路的输出将达最大值（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 8-5 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。

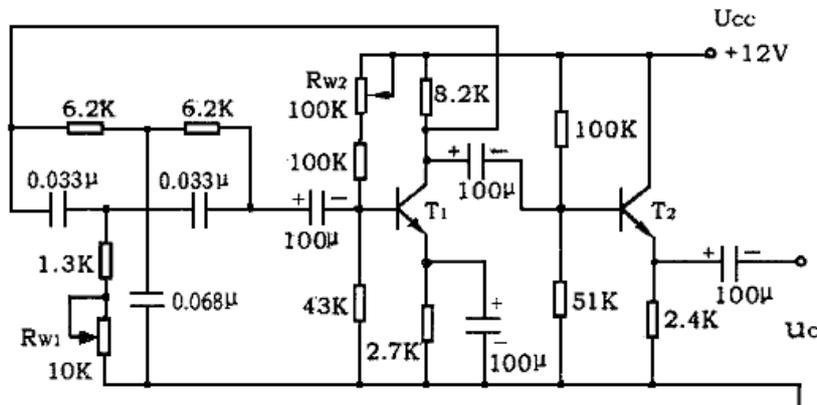


图 8-5 双 T 网络 RC 正弦波振荡器

*3. RC 移相式振荡器的组装与调试

- (1) 按图 8-6 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_o 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。

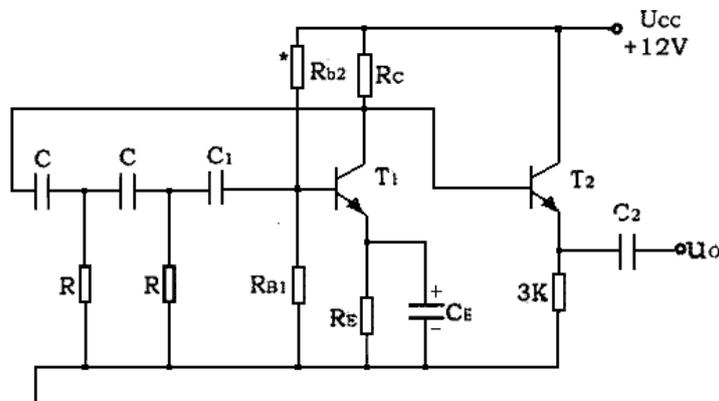


图 8-6 RC 移相式振荡器

五、数据处理

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、问题思考

1. 用示波器测量频率有哪几种方法？
2. 如何用示波器来测量振荡电路的振荡频率。

实验九 低频功率放大器

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、实验仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 低频功率放大电路板

三、实验原理

图 9-1 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 PNP 和 NPN 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。 T_1 管工作于甲类状态，

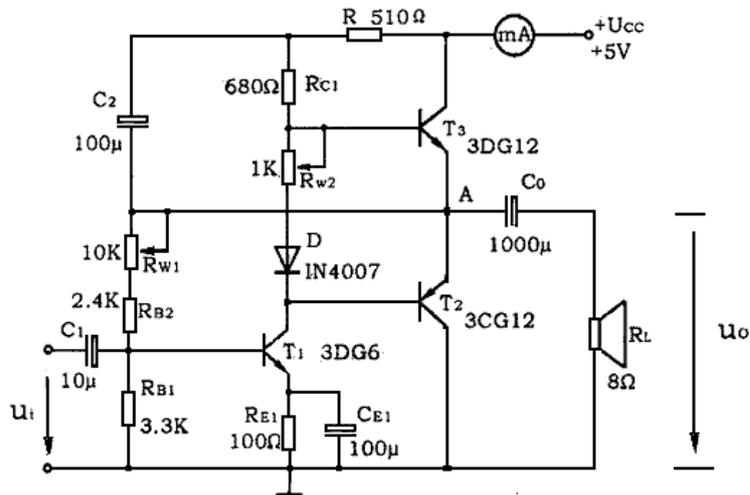


图 9-1 OTL 功率放大实验电路

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 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 η

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

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 $P_E = U_{CC} \cdot I_{dC}$, 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。

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 9-1 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) 调整输出级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 $5 \sim 10\text{mA}$ 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。

输出级电流调好以后, 测量各级静态工作点, 记入表 8-1。

	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_{0m} 和效率 η 的测试

(1) 测量 P_{0m}

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_0 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_{0m} ，则

$$P_{0m} = \frac{U_{0m}^2}{R_L}$$

(2) 测量 η

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_{0m} ，即可求出 $\eta = \frac{P_{0m}}{P_E}$ 。

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 9-2。

表 9-2 $U_i = \quad mV$

	f_L		f_0		f_H					
$f(\text{Hz})$				1000						
$U_0(\text{V})$										
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. 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。

五、数据处理

1. 整理实验数据，计算静态工作点、最大不失真输出功率 P_{0m} 、效率 η 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、问题思考

1. OTL 功放电路中的自举电路的作用是什么？
2. 若中点 A 的电压不对应调节哪个元件？
3. 图 8-1 中各电容的作用是什么？

实验十 直流稳压电源

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、实验仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表

三、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。

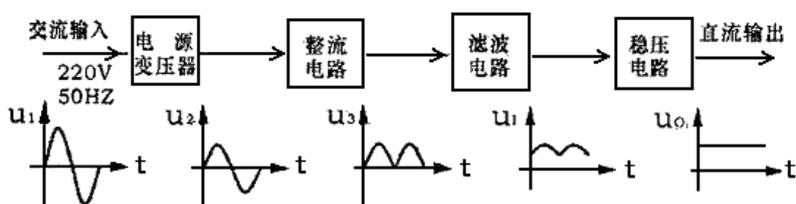


图 10-1 直流稳压电源框图

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 10-1 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 10-2 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源，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。

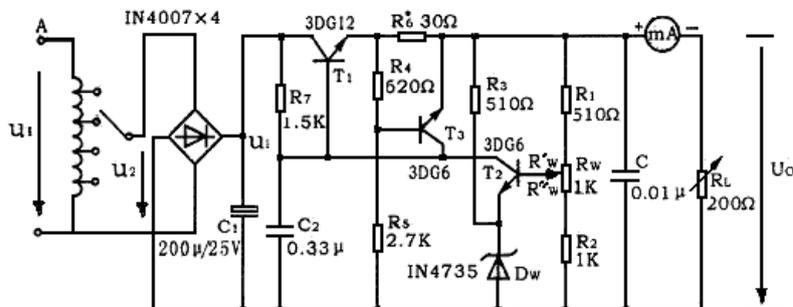


图 10-2 串联型稳压电源实验电路

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 10-2 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_{0m}

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

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

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

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

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）。

四、实验内容

1. 整流滤波电路测试

按图 10-3 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 。

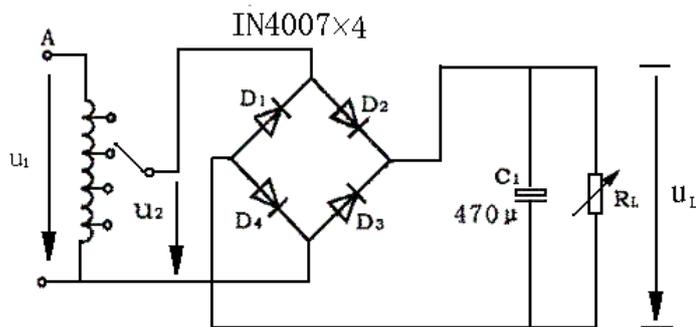
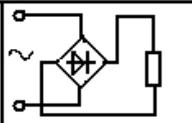
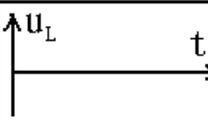
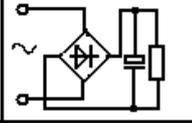
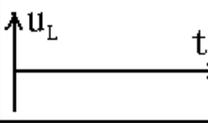
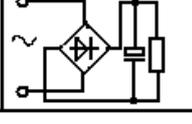
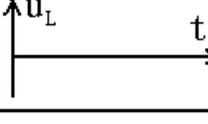


图 10-3 整流滤波电路

(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 \tilde{U}_L ，并用示波器观察 u_2 和 u_L 波形，记入表 10-1。

表 10-1 $U_2=16V$

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

(2) 取 $R_L = 240 \Omega$, $C = 470 \mu F$, 重复内容 1) 的要求, 记入表 9-1。

(3) 取 $R_L = 120 \Omega$, $C = 470 \mu F$, 重复内容 1) 的要求, 记入表 9-1。

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 10-3 基础上按图 10-2 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}), 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 $I_0 \approx 100mA$ 。再调节电位器 R_W , 测量输出电压可调范围 $U_{0min} \sim U_{0max}$ 。且使 R_W 动点在中间位置附近时 $U_0 = 12V$ 。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 $U_0 = 12V$, 输出电流 $I_0 = 100mA$, 测量各级静态工作点, 记入表 9-2。

表 10-2 $U_2=16V$ $U_0=12V$ $I_0=100mA$

	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 10-3 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 10-3。

表 10-3 $I_0 = 100mA$

测试值			计算值
$U_2(V)$	$U_1(V)$	$U_0(V)$	S
14			$S_{12} =$
16		12	
18			$S_{23} =$

(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 9-4。

表 10-4 $U_2=16V$

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

(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. 断开交流信号，接上保护回路，再接通交流信号，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_0 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、数据处理

对表 10-1 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。

1. 根据表 10-3 和表 10-4 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。
2. 分析讨论实验中出现的故障及其排除方法。

六、问题思考

1. 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_{1min} 应等于多少？交流输入电压 U_{2min} 又怎样确定？
2. 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？
3. 分析保护电路的工作原理。怎样提高稳压电源的性能指标（减小 S 和 R_0 ）？

实验十一 单管共射放大电路（设计）

一、实验目的

1. 确定电路方案，选取合适元件参数。
2. 测量放大电路在线性状态下的静态工作点。

二、实验仪器

模拟实验箱 示波器 毫伏表 万用表 常用电路元器件

三、实验原理

1. 设计任务

电压增益： ≥ 50 倍

输入正弦信号电压：20mV

负载电阻：5.1K Ω

环境温度： $t=0\sim 70^{\circ}\text{C}$

三极管：3DG6(β 实测)

2. 射极偏置电路

设计一偏置电路,图 11—1 是应用最广泛的为射极偏置共射放大电路。其特点是利用分压式电阻维持 V_B 基本恒定和射极电阻 R_E 的电流负反馈作用,在满足: $I_1 \geq I_B$; $V_B \geq V_{BE}$ 的条件下,具有相当好的温度稳定性,这是最常用的一种稳定工作点的偏执电路。元件参数选择时,既要考虑有合适的静态工作点,也要考虑能否满足电路的设计性能要求。

1. 确定静态工作点 (V_{CE} 、 I_C): V_{CE} : 考虑到电路在正常的工作范围应使输出电压 U_o 幅度足够大,同时满足放大倍数的前提下,输出电压不应产生饱和失真,因此 $V_{CE} > V_o + V_{CES}$; I_C 选择的原则是要考虑放大电路不致产生截止失真。 I_C 通常可取 1mA 左右。

2. 选择电源电压 V_{CC} : 由晶体管输出特性可知, V_{CC} 与 V_{CE} 的关系近似为 $V_{CC} > 2U_{CE} + U_E$, 式中 $V_E \approx V_B$ 。

3. 确定偏置电阻 R_{b1} 、 R_{b2} : 确定的依据是式 $I_1 \geq I_B$; $V_B \geq V_{BE}$ 的温度稳定性条件。

$$\text{由此可知: } R_{b2} = \frac{V_B}{I_1} \Rightarrow R_{b2} = \frac{V_{CC}}{I_1} - R_{b1} \quad (1)$$

$$4. \text{ 确定 } R_e: R_e = \frac{V_E}{I_C} = \frac{V_B - V_{BE}}{I_C} \quad (2)$$

5. 确定 R_C : 选择集电极电阻 R_C 应注意两方面的问题,一要满足放大倍数的要求,其次要避免产

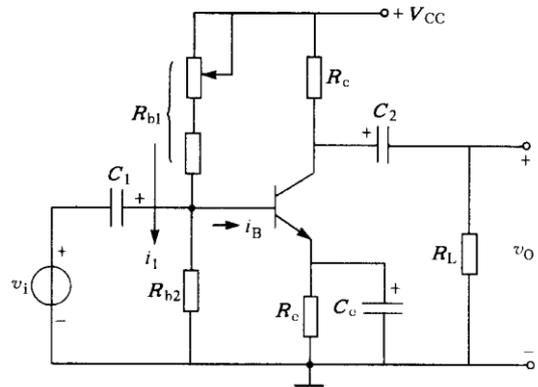


图 11—1 射极偏置电路

生非线性失真。为此应有：
$$R_C = \frac{V_{CC} - V_{CE} - V_E}{I_C} \quad (3)$$

6. 元件选择：图 11—1 所示的射极偏置电路中的电容 C_1 、 C_2 、 C_e 均为电解电容， C_1 、 C_2 一般选用， C_1 、 C_2 选用均可满足要求。电阻 R_e 、 R_e 、 R_e 选用金属膜电阻或者炭膜电阻均可。

2. 集电极—基极偏执电路

1. 电路工作原理

图 11—2 所示为集电极—基极偏置共射放大电路。其特点是利用 R_b 的负反馈作用同样可以稳定工作点。所不同的是，这种偏置电路不适用于 R_C 很小的放大电路（如变压器耦合电路）。

2. 参数确定与元件选择

在图 11—2 所示电路中，静态工作点（ V_{CE} 、 I_C ）与电源电压 V_{CC} 的选择原则均与图 11—1 相同，不另赘述。不同的是：

①确定 R_C ，

选择电阻 R_C ，同样要从两方面考虑：若从满足电压放大倍数 $|A|$ 的要求估算 R_C 则要满足下列关

$$R'_L > \frac{A_U \cdot r_{be}}{\beta} \quad (4)$$

式中 $R'_L = R_{b2} // R_e // R_L$ (R_{b2} 为设定值， R_L 已知)

$$\text{若从避免产生非线性失真而选定的 } V_{CC} \text{ 值来估算 } R_C \text{ 则关系式为：} R_e = \frac{V_{CC} - V_{CE}}{(1 + \beta)I_B} \quad (5)$$

综合考虑式 4 和 5 的计算结果，选择合适的 R_C 值。

②确定 R_b

偏置电阻 R_b 的大小不但与工作点的稳定性有关，同时还与工作点的设置位置有关。若从提高工作稳定性来考虑， R_b 越小越好，但又必须保证正常工作所需的偏流 I_B 。通常， R_b 由所需偏流 I_B 来决定。一般取： $R_b = (10 \sim 20) R_C$

图 11—2 所示电路阻容元件的选用原则与图 7—1 电路相同。

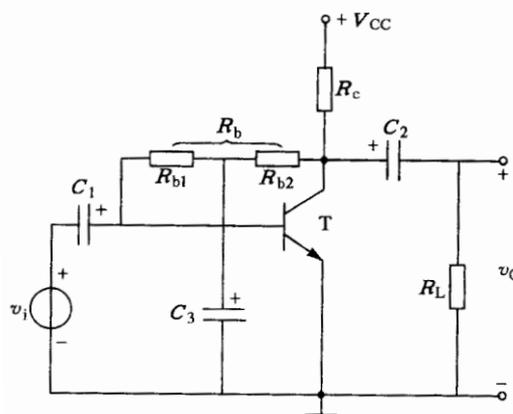


图 11—2 集电极—基极偏置电路

四、实验内容

1. 实验电路采用如图 11—1 所示射极偏置电路。根据已知条件和设计要求，计算和选取元件参数，并在实验电路板上组装、搭接电路，检查无误后接通电源，进行测试。

2. 测量该电路在线性工作状态下的静态工作点。

输入端接入 $f=1\text{kHz}$ ， $V_i=20\text{mV}$ （有效值）的正弦信号，用示波器观察输出电压 U_O 的波形，同时调节可调电阻 R_{b1} ，使 U_O 波形不失真的动态范围幅度最大，然后将输入端与信号源断开并接地（ $U_i=0$ ），测试此时的 V_B 、 V_E 、 V_{CE} 、 V_{BE} ，算出 I_C 。并与理论计算值比较。注意记录可调电阻的阻值。

3. 测量该电路的电压增益 A_U 。

输入端接入 $f=1\text{kHz}$, $U_i=20\text{mV}$ (有效值) 的正弦信号, 用示波器同时观测输入 U_i 和输出电压 U_o 的波形, 分别记录幅值与相位关系, 算出电压增益 $A_U = \frac{U_o}{U_i}$ 。

4. 测量该电路的输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

五、数据处理

1. 根据设计任务与已知条件, 以图 11—1 射极偏置电路为参考电路, 计算和选取参数。
2. 计算该放大电路的静态工作点, 电压增益 A_U , 输入电阻 R_i 和输出电阻 R_o 。

六、问题思考

1. 当电路出现饱和或截止失真时, 应怎样调整元件?
2. 改变静态工作点时, 对输入电阻有无影响? 为什么?
3. 在使用示波器测量放大电路的静态工作点和电压增益时, 测量过程中分别应注意哪些问题?