

实验 1 晶体三极管放大电路特性研究

一、实验目的

- 1. 掌握用 Multisim7 软件分析晶体三极管放大电路主要性能指标的方法。
- 2. 学会放大电路静态工作点的测量与调整方法。
- 3. 掌握测量电压放大倍数 A_v 。
- 4. 掌握测量放大电路的输入输出电阻的方法。

二、实验原理

三极管是放大电路的主要元器件，通过放大电路可以把弱小电流或电压信号加以放大。对放大电路的基本要求是：要有足够的放大倍数(电压、电流、功率)，尽可能小的波形失真。

静态工作点是指放大电路没有输入信号时，在给定电路参数下，晶体管各极直流电流、电压的数值 (I_B 、 I_C 、 U_{CE})。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。静态工作点偏高，放大器加入交流信号后容易产生饱和失真，输出电压 U_o 的下半周被削顶，如图 1-1 (a) 所示；如果静态工作点过低，则容易产生截止失真，输出电压 U_o 的上半周被削顶，如图 1-1 (b) 所示。改变电路的参数，如基极电阻 R_B 、集电极电阻 R_C 、电源电压 V_{CC} 等都会引起静态工作点的变化。静态工作点可由电压表、电流表测得，也可单独使用电压表测取 U_{RC} 、 U_{RE} 、 U_{CE} 值，间接求得 I_B 、 I_C 。需要说明的是，最佳静态工作点的位置不是绝对的，如果信号幅值很小，静态工作点偏高或偏低也不一定会失真。但是如果输入信号的幅值较大，静态工作点应该靠近负载线的中点。因此，确切地说，产生失真是输入信号幅值和静态工作点不匹配产生的。

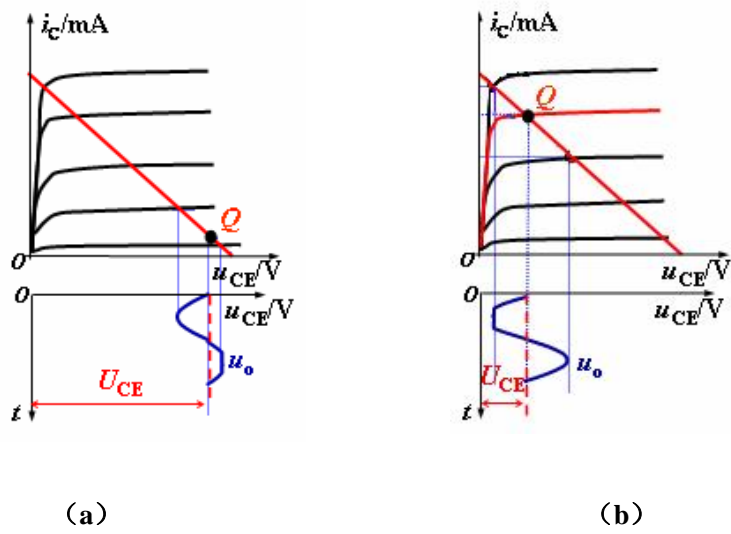


图 1-1 静态工作点对失真的影响

放大电路的动态分析是指放大电路在有信号输入 ($u_i \neq 0$) 时的工作状态。动态分析主要是计算电压放大倍数 A_u 、输入电阻 R_i 、输出电阻 R_o 等。

分压式偏置电路是一种常见的基极放大电路，如图 1-2 所示。它的偏置电路采用 R_{B1} 和 R_{B2} 组成分压电路，并在发射极接有反馈电阻 R_E ，对稳定静态工作点有较好的效果。当在放大器的输入端加入输入信号后，输出端可以得到一个反相、放大的输出信号。 R_E 越大稳定效果越好，但是 R_E 太大能量消耗会增加， R_E 两端的直流压降将增加，减小放大电路输出电压的幅度，降低放大倍数。为此常在 R_E 两端并联一个较大的电容 C_E ，使交流旁路。 C_E 称为交流旁路电容，容量一般为几十到几百微法。

该电路的静态工作点，可以由下式估算。设流过偏置电阻的电流远远大于基极电流 I_B ，则：

$$U_B = R_{B2} I_2 \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

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

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

该电路的交流电压放大倍数为：

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -b \frac{R_e // R_L}{r_{be}}$$

交流输入电阻为： $R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$

输出电阻为： $R_o \approx R_C$

若 C_E 开路，则该电路的交流电压放大倍数为：

$$A_u = \frac{U_o}{U_i} = -b \frac{R_e // R_L}{r_{be} + (1 + b) R_e}$$

交流输入电阻为： $R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be} + (1 + \beta) R_e$

三、实验内容

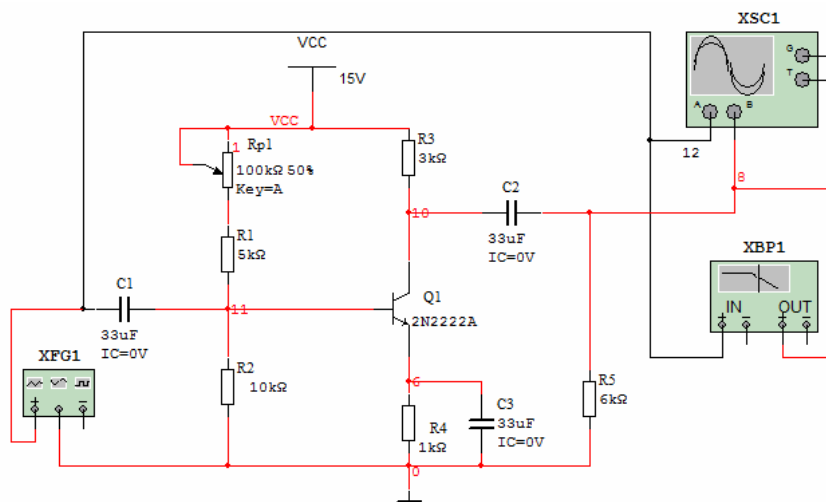


图1-2 晶体三极管放大电路特性研究实验电路

1. 创建电路，给电路中的全部元器件按图 1-2 要求标识，参数设置，鼠标右键弹出窗口选择“show node names”，Multisim 自动给各节点编号，并显示在电路图上。

2. 给虚拟仪器设置参数

(1) 函数发生器

波形：正弦波

Frequency: 1KHz

Duty cycle: 50%

Amplitude: 10mV

Offset: 0

(2) 示波器

Time base: 0.50ms/div, “Y/T”显示方式

Channel A: 10mV/div

y position: 0.00, “AC”工作方式

Channel B: 1 V/div

y position: 0.00, “AC”工作方式

Trigger: “Auto”方式

Channel A: 输入线设为黑色，则输入信号波形为黑色。(点击线段，右键修改 line segment 值)

Channel B: 输入线设为红色，则输出信号波形为红色。

(3) 波特图仪

幅频特性 Vertical: log, F: 60dB, I: 0dB

Horizontal: log, F: 1GHz, I: 1Hz

相频特性 Vertical: lin, F: 360 度, I: -360 度

Horizontal: log, F: 1GHz, I: 1Hz

3. 单击“O/T”开关，运行电路。

(1) 寻找最佳静态工作点

双击示波器图标，打开示波器面板，观察波形，逐渐增大输入信号，当输出波形失真后，调节电位器 R_p ，使输出波形失真消失。反复增大输入信号及调节 R_p ，使输出幅度最大且不失真。

(2) 测量静态工作点

在菜单栏依次执行“Simulate”/“Analyses”/“DC Operating Point”命令，将弹出直流工作点分析对话框，如图 1-3 所示，在“Output variables”选项中选择需要仿真的输出节点，然后单击“simulate”，由各节点电压算出静态工作点，分析结果与理论值比较。（或直接串入 DC 电流表并入 DC 电压表测量各静态值）

静态工作点的值为： I_B =_____； I_C =_____； V_{CE} =_____

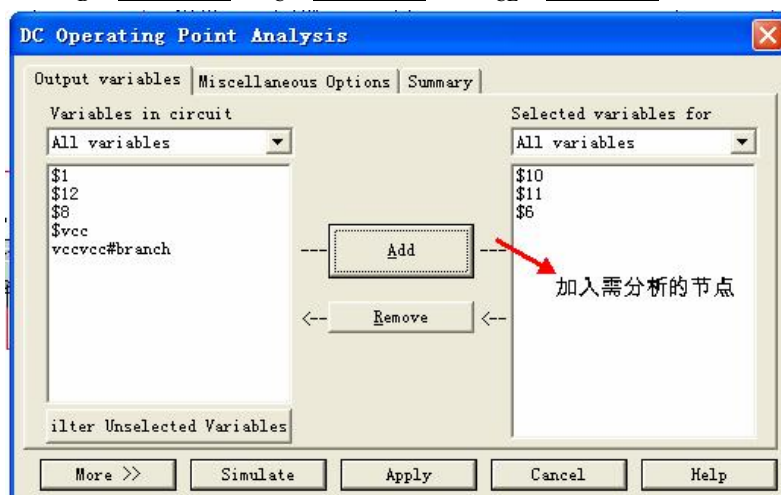


图1-3 直流工作点分析对话框

(3) 测量放大倍数

双击示波器图标，打开示波器面板，观察波形，再单击“Pause”按钮，暂停运行。拖拽读数指针，测得：

$$A_v = V_{OP-P} / V_{IP-P} = \text{_____} \quad \text{相位} \text{_____}$$

(4) 测量幅频特性

双击波特图仪图标，打开波特图仪面板，单击“Magnitude”，测得幅频特性。

拖拽读数指针，测得： BW =_____

单击“phase”，测得相频特性。

(5) 测量输入电阻

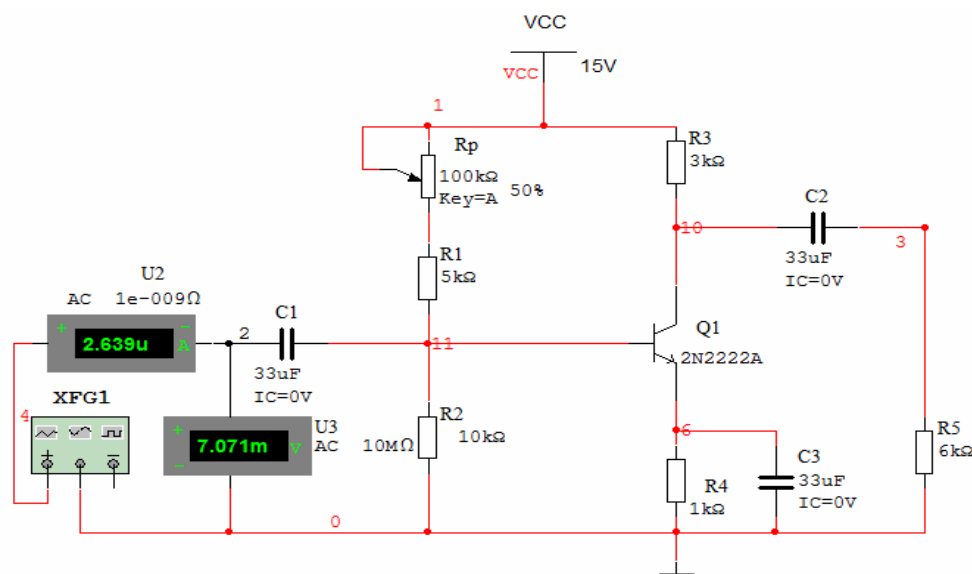


图1-4

通过在输入端接入如图 1-4 所示的电压表和电流表（选择为交流）。激活电路，测得电流电压值，则输入电阻 $R_i = U_i / I_i$ 。

（6）测量输出电阻 R_o ：

如图1-5所示，在 $R_L = \infty$ 时，测量输出电压 U_o ；在 $R_L = 3K$ 时，测量负载电压 U_L 。计算输出电阻 R_o 。

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

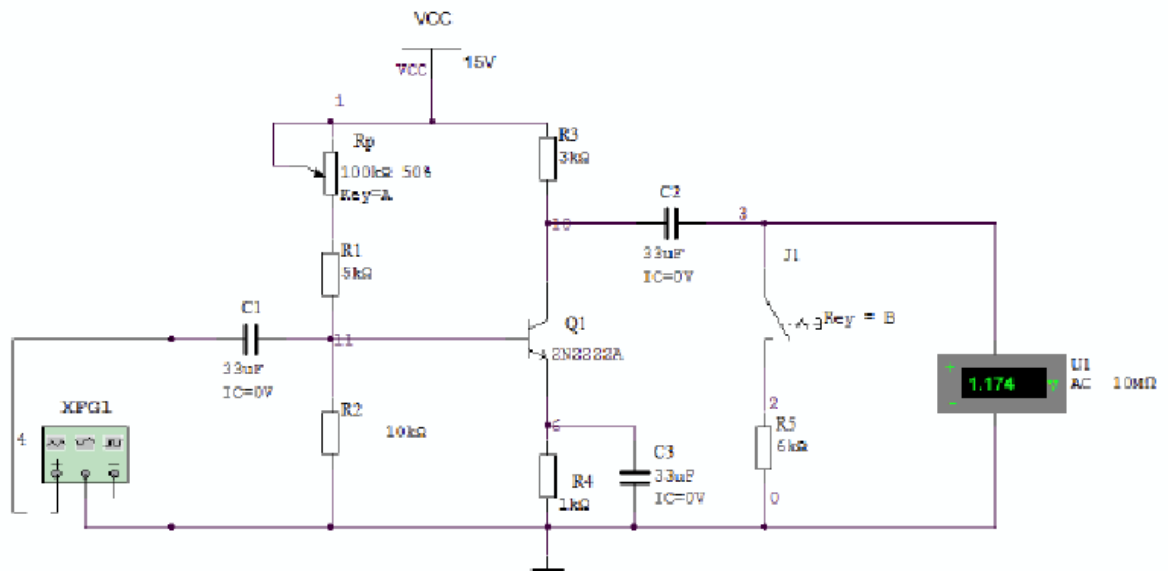


图1-5

激活电路，分别测得电压值，根据公式计算输出电阻。（定义按下键盘上的 B 键为开关 J1 闭合）

（7）观察失真波形：

增加输入信号幅值为 30mv，改变 R_p 值，用示波器观察输出波形，上平顶失真和下平顶失真分别对应什么失真（饱和和截止失真）？

三、思考题

1. 输出波形失真的原因有哪些？怎样克服？
2. 如果 R_2 短路，放大器会出现什么故障？

实验三 晶体管差动放大电路

一、实验目的

1. 了解差模信号和共模信号的区别。
2. 学习差动放大电路对差模和共模信号的放大作用。
3. 熟悉直流稳压电源构成双电源的使用方法。
4. 进一步熟悉常用电子仪器的使用方法。

二、原理说明

1. 长尾式差动放大电路

长尾式差动放大电路如图 3-1 所示。它是一种特殊的直接耦合放大电路，要求电路两边的元器件完全对称，即两管型号相同、特性相同、各对应电阻值相等。

为了改善差动放大电路的零点漂移，在两个三极管的公共射极上接入一个电阻 R_e ，这个电阻即称为“长尾”。长尾电阻 R_e 的作用是引入一个共模负反馈，降低了共模电压放大倍数，减小每个管子输出端的零漂，但对差模电压放大倍数没有影响，因此提高了共模抑制比。电阻 R_e 的值越大，则共模负反馈越强，抑制零漂的效果越好。但随之而来的问题是，由于长尾电阻 R_e 上的直流压降越来越大，为了补偿电阻 R_e 上的直流压降，要求负电源 V_{EE} 的值也越来越高。

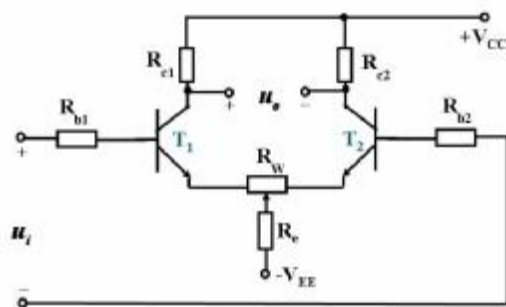


图 3-1 长尾式差动放大电路

1. 恒流源式差动放大电路

为了得到比较好的抑制零漂的效果，同时又希望负电源 V_{EE} 的值不要过高，可以采用一个三极管代替原来的长尾电阻 R_e ，这就是恒流源式差动放大电路，如图 3-2 所示。当三极管工作在恒流区（即放大区）时，三极管集电极与发射极之间的动态电阻 r_{ce} 很大，故用一个三极管代替长尾电阻 R_e ，既可较好地抑制零漂，又不要求过高的负电源 V_{EE} ，而且集成电路制造工艺中常常用三极管代替大电阻的特点，因而在集成运放中应用十分广泛。

差动放大电路根据输入输出不同的连接方式，分为以下四种情况：

- | | |
|------------|------------|
| ①差动输入，双端输出 | ②差动输入，单端输出 |
| ③单端输入，双端输出 | ④单端输入，单端输出 |

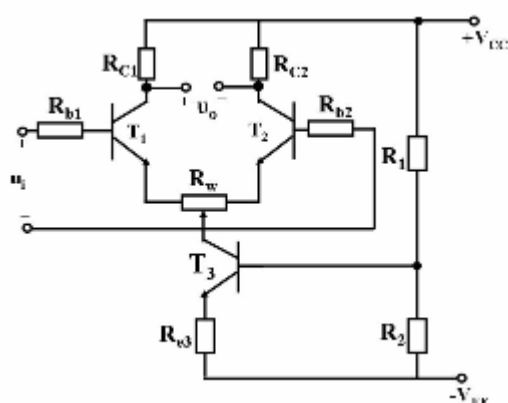


图 3-2 恒流源式差动放大电路

(1) 差模电压放大倍数

图 3-2 所示电路的差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{-bR_{c1}}{R_{b1} + r_{be} + \frac{1}{2}(1+b)R_w}$$

实验中差模电压放大倍数的测量方法是：输入差模信号：正弦波 u_{id} ，设差动放大电路为单端输入，双端输出接法。用晶体管毫伏表测量出 T_1 、 T_2 集电极对地的交流电压有效值 U_{C1} 、 U_{C2} ，则双端输出时差模电压放大倍数为

$$A_{ud} = \frac{U_{C1} + U_{C2}}{U_{id}}$$

(2) 共模电压放大倍数

图 3-2 所示电路的共模电压放大倍数为

$$A_{uc} = 0$$

实验中差模电压放大倍数的测量方法是：两个输入端输入一对共模信号：直流电压 U_{ic} ，用万用表测量出 U_O ，则双端输出时共模电压放大倍数为

$$A_{uc} = \frac{U_O}{U_{ic}}$$

(3) 共模抑制比

常用共模抑制比 K_{CMR} 来表示差动放大电路对共模信号的抑制能力，即

$$K_{CMR} = \left| \frac{A_{ud}}{A_{oc}} \right|$$

或

$$K_{CMR} = 20 \lg \left| \frac{A_{ud}}{A_{oc}} \right| \text{dB}$$

K_{CMR} 越大，说明差动放大电路对共模信号的抑制能力越强，放大电路的性能越好。
晶体管差动放大电路实验模块图如图3-3所示：

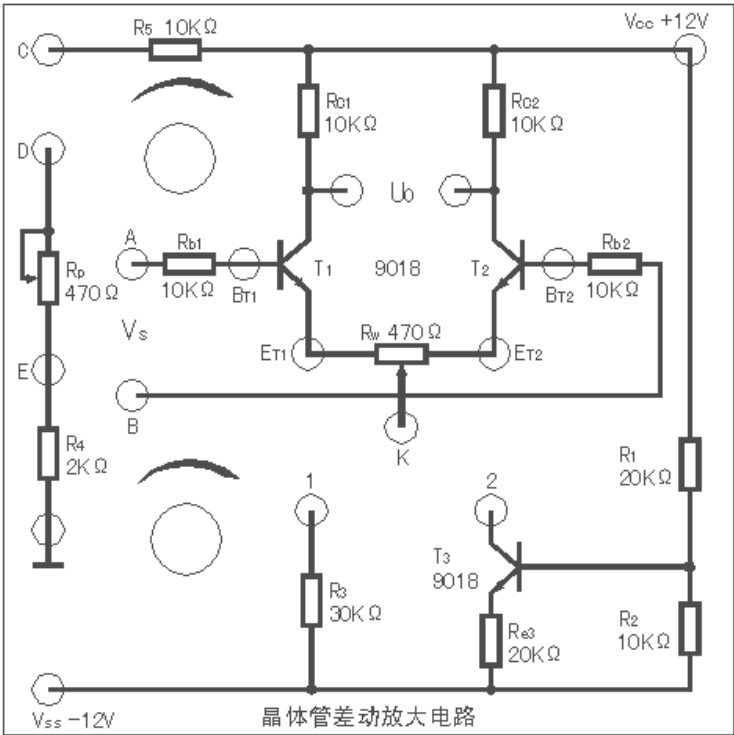


图3-3 晶体管差动放大电路实验模块

二、实验内容及步骤

- 在晶体管差动放大电路实验模块上构成长尾差动放大电路（短接 K 和位置1）。

正负电源的连接

为了给差动放大电路提供 $\pm 12V$ 工作电源，调节双路输出稳压电源，使 E_1 和 E_2 均为 $12V$ 。关掉电源，将稳压电源按图 3-4 接线， E_1 的正极端子输出电压 $+12V$ ，接在实验板的 V_{CC} 处。 E_2 的负极端子输出电压 $-12V$ ，接在实验板的 V_{SS} 处。 E_1 的负极端子和 E_2 的正极端子连接后，接在实验板公共接地端。

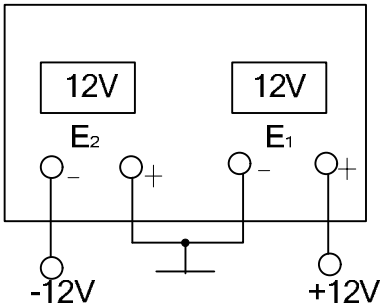


图 3-4 $\pm 12V$ 工作电源的连接方法

- 零点调整和静态工作点测量。

输入端 A、B 同时接地，接通电源 V_{CC} 和 V_{SS} ，用万用表直流电压档测量双端输出电压 U_o ，调节电位器 R_w ，使双端输出电压 U_o 为零。测量有关电压填入下表，并计算相关的电压、电流。

U_{B1}	U_{B2}	U_{CE1}	U_{CE2}	U_{E1}	U_{E2}	U_{Rc1}	U_{Rc2}	U_{R3}	
计算项	U_{BE1}	U_{BE2}	I_{Rb1}	I_{Rb2}	I_{C1}	I_{C2}	β_1	β_2	I_{R3}

3. 差模放大倍数测量

输入端 A 接入 1KHz、20mV 的正弦交流信号，输入端 B 接地（单端输入）。分别用示波器观察差动放大管 T_1 、 T_2 集电极对地的电压（单端输出）和电阻 R_3 两端（1端与地）的电压波形。可以看出 R_3 两端交流分量基本为零，用交流毫伏表测量也可验证。在输出波形不失真的条件下，用交流毫伏表分别测量 T_1 、 T_2 集电极对地的交流电压有效值 U_{O1} 和 U_{O2} ，用交流毫伏表测量 R_3 两端交流电压 U_{R3} 。然后改变输入交流信号为 1KHz、40mV，重复上述测量填入下表并计算差模放大倍数 A_{UD} 。

U_S	$ U_{O1} $	$ U_{O2} $	U_{R3}	$U_O = U_{O1} + U_{O2} $	$A_{UD} = U_O / U_S$
20 mV					
40 mV					

[注1: $A_{UD} = (|U_{O1}| + |U_{O2}|) / U_S$] [注2: 使用中注意示波器输入端的共地问题]

4. 在晶体管差动放大电路实验模块上构建成恒流源差动放大电路（短接 K 和位置2）。

1) 重复步骤2的零点调整和步骤3，测量数据填入下表并计算。

U_S	$ U_{O1} $	$ U_{O2} $	U_K	$U_O = U_{O1} + U_{O2} $	$A_{UD1} = U_O / U_S$
20 mV					

2) 共模放大倍数的测量

输入端 A、B 短接点 E（C 与 D 短接），调整 R_p 使短接点 E 与地之间电压在 1.5V~2V 间作为共模电压 U_{IC} ，用万用表直流电压档测量 U_O ，填入下表。

[注: $U_O = U_{C1} - U_{C2}$]

U_{IC}	U_O	$A_{UC} = U_O / U_{IC}$	$CMRR = 20 \lg(A_{UD} / A_{UC})$

3) 同时有差模和共模信号输入时放大倍数的测量

输入端 A 接 D、输入端 B 接 E，用万用表直流电压档测量下表中的各电压，并计算出 A_{UD} 。调节 R_p ，使 $U_{ID} = 0.05V$ 。

U_{IC}	$U_{ID} = U_{Rp}$	U_{O1}	U_{O2}	U_O	$A_{UD2} = U_O / U_{ID}$

分析：比较忽略了 $A_{UD} * U_{ID}$ 后计算出的 A_{UD2} 与步骤1得到 A_{UD1} 的误差。

三、预习要求

1. 复习差动放大电路原理、特点，了解其调整方法。
2. 了解差动放大器差放大倍数、共模放大倍数、CMRR 的测量方法。

实验四 低频功率放大器——OTL 功放

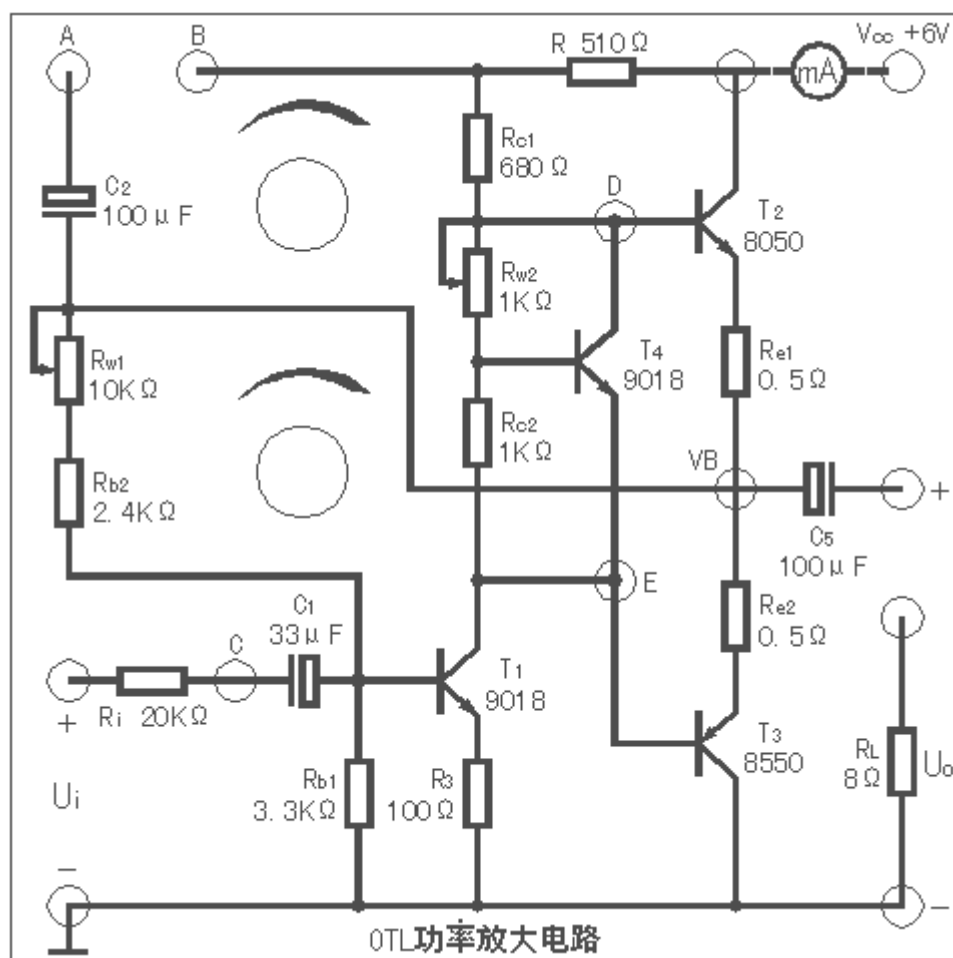
一、实验目的

1. 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、原理说明

OTL 功率放大电路即无变压器耦合的功率放电路。由于它的体积小、重量轻，又便于采用深度负反馈来改善非线性失真，因而得到了广泛的应用。

OTL 功率放大器电路实验模块图如下：



图中晶体管 T_1 为推动级（即前置放大级）， T_2 、 T_3 是一对参数对称的 NPN 和 PNP 型的互补晶体三极管，它们组成互补推挽 OTL 功放电路。 T_2 、 T_3 管都为射极输出器形式，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_4 和 R_{W2} 、 R_{C2} 构成 V_{BE} 扩大电路。 T_1 管工作于甲类状态，集电极电流 I_{C1} 由电位器 R_{W1} 调节。因为静态时要求输出端中点电位 $V_B = 0.5V_{CC}$ ，故电位器 R_{W1} 调整位置由此而定。调节 R_{W2} 则可以使 T_2 、 T_3 管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。

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 管的基极， 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_5 充电；在 U_i 的正半周， T_3 管导通（ T_2 管截止），则已充好电的电容 C_5 起着电源的作用，通过负载 R_L 放电。这样在

R_L 上就得到了完整的正弦波。

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

三、实验内容及步骤

在实验模块上构建 OTL 功率放大器电路。把 R_{W1} 、 R_{W2} 都调到最小，接上负载 R_L 。

1. 静态工作点调整和测量

1) 将 R_{W2} 的阻值调到最小（注：若 R_{W2} 的阻值过大，使 T_2 、 T_3 管的静态电流过大，效率降低，甚至损坏管子）。首先不采用自举电路（即不接入 C_2 ）。检查线路无误后接通电源 V_{CC} （+6V）。缓慢调节电位器 R_{W1} 使输出端中点电位 $V_B=0.5V_{CC}=3V$ ，然后测量 T_2 管集电极电流 I_{C2} 。以下保持电位器 R_{W1} 位置不变。

2) 输入1KHz 的正弦交流信号，逐步调大输入幅度，使输出增大直至出现交越失真，用示波器观察输出波形的交越失真现象。

3) 保持输入信号不变，缓慢调节电位器 R_{W2} 使输出波形的交越失真现象恰好消失。除去输入信号，测量 T_2 管集电极电流 I_{C2} ，此即为最佳静态工作点。

2. 最大输出功率和效率的测定

1) 输入1KHz 的正弦交流，缓慢增大调整输入信号电压幅度，用示波器观察输出波形，在输出波形即将失真时，用交流毫伏表测量 R_L 上的电压 U_{Omax} ，计算最大输出功率 P_{Omax} 。

$$P_{Omax}=U_{Omax}^2 / R_L$$

2) 测出此时直流电源输出的平均电流 I_{DC} ，求得电源输出功率 P_E ，进而求出效率 η 。

$$P_E=V_{CC}*I_{DC}, \quad \eta=P_{Omax} / P_E$$

3. 采用自举电路（即接入 C_2 ），重复以上各实验步骤。并观察采用自举电路前后输出正负半周的幅度变化情况。

	I_{C2}	$I_{C2\text{最佳}}$	U_{Omax}	P_{Omax}	I_{DC}	P_E	η
无自举							
有自举							

四、实验预习要求

1. 熟悉 OTL 功率放大器的工作原理。
2. 熟悉实验电路，明确实验内容和主要步骤。

五、实验报告要求

1. 画出实验电路图。
2. 根据实验线路的数据，理论上计算该电路的静态值。
3. 画出实验中所观察到的几种输出波形。

实验五 负反馈放大器——电压串联负反馈

一、实验目的

1. 了解电压串联负反馈的原理和性能；
2. 掌握负反馈放大器性能的一般测试方法。

二、原理说明

负反馈在电子电路中有着非常广泛的应用。放大电路引入负反馈以后，虽然放大倍数降低了，但是其他性能得到了改善，例如，提高了放大倍数的稳定性，减小放大电路输出波形的非线性失真和抑制干扰，展宽放大电路的通频带，以及根据实际工作提出的要求改变放大电路的输入电阻和输出电阻。负反馈对放大电路性能的改善程度，取决于反馈的深度。一般来说，负反馈越深，即反馈深度 $|1 + A\dot{F}|$ 的值越大，则对放大电路各项性能的改善效果越明显。

负反馈放大电路有 4 种组态，即电压串联负反馈、电压并联负反馈、电流串联负反馈、电流并联负反馈。本实验以电压串联负反馈为例，分析负反馈对放大电路各项性能指标的影响。

图 5-1 所示为带有负反馈的两级阻容耦合放大电路，在电路中通过电阻 R_{F1} 、 R_{F2} 把输出电影 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 。根据反馈的判断方法可知，它属于电压串联负反馈，使放大电路的输入电阻提高，输出电阻降低，提高了放大电路的带负载能力。

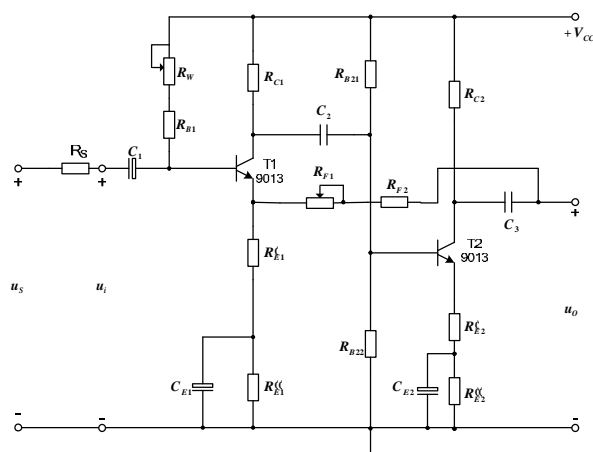


图 5-1 电压串联负反馈放大电路

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	直流稳压电源		1	
2	万用表		1	
3	低频信号发生器		1	

4	晶体管毫伏表		1	
5	示波器		1	
6	负反馈放大电路实验板		1	

四、 实验内容及步骤

1. 静态工作点的测量

电路如图 5-2 所示，接通+12V 电源 V_{CC} ，放大电路的输入端 u_s 短接，短路 R_S ，连接电路中 D、F 两点，接入旁路电容 C_{E1} 。调节 R_W ，用万用表直流电压挡测量 R_{C1} 两端电压，使 $U_{RC1} = 2.4V$ ，测量 T_1 、 T_2 管的静态工作点，记录在表 5-1 中。并计算相关的电压、电流。

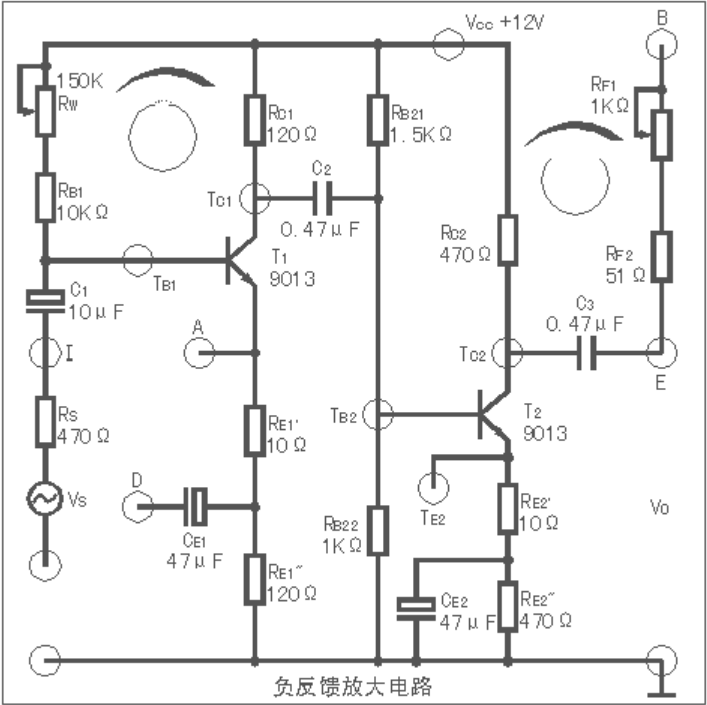


图 5-2 负反馈放大电路

表 5-1

	测量值			计算值	
	$U_B(V)$	$U_C(V)$	$U_E(V)$	$I_C(mA)$	$U_{CE}(V)$
T1					
T2					

2. 测定基本放大电路的性能

放大电路输入端 u_s 接入 1KHz、20mV 的正弦交流信号。且在以下测试中保持不变。用示波器观察输出波形，完成以下实验，将实验数据记录在表 5-2 中，并计算相关实验数据。

1) 测定基本放大电路的放大倍数 A_U

短路 R_S ，负载 R_L 不接（开路），测量此时放大电路输出电压 U_o 。则有：

$$A_U = \frac{U_o}{U_s}$$

2) 测定基本放大电路的输入电阻 R_i

接入 R_S ，负载 R_L 不接（开路），测量此时放大电路输出电压 U_o 。则有：

$$U_o = \frac{R_i}{R_s + R_i} U_s$$

输入电阻 R_i 根据上式即可算出。

3) 测定基本放大电路的输出电阻 R_o

短路 R_S ，接入负载 $R_L=300\Omega$ ，测量此时放大电路输出电压 U_o 。则有：

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

表5-2

测量值				计算值		
U_s (mV)	U_o (mV)	U_o (mV)	U_L (mV)	A_U	R_i (Ω)	R_o (Ω)

3. 测定反馈放大电路的性能

放大电路输入端 u_s 接入1KHz、20mV 的正弦交流信号，且在以下测试中保持不变。
 连接 A、B 两点，即加入负反馈。用示波器观察输出电压，调节 R_{F1} ，使负反馈电路达到最深负反馈状态，即此时输出电压达到最小值。完成以下实验，将实验数据记录在表5-3 中，并计算相关实验数据。

1) 测定反馈放大电路放大倍数 A_{uf}

短路 R_S ，负载 R_L 不接（开路），测量此时反馈放大电路输出电压 U_{of} 。则有：

$$A_{uf} = \frac{U_{of}}{U_s}$$

2) 测定输入电阻 R_{if}

接入 R_S ，负载 R_L 不接（开路），测量此时放大器输出电压 U_{of} 。则有：

$$U_{of} = \frac{R_i}{R_s + R_i} U_{of}$$

输入电阻 R_{if} 据上式即可算出。

3) 测定基本放大电路的输出电阻 R_{of}

短路 R_S ，接入负载 $R_L = 300\Omega$ ，测量此时放大器输出电压 U_{of} ，则有：

$$R_{of} = \frac{U_{of}}{I_{of}} - R_L$$

表5-3

测量值				计算值		
U_s (mV)	U_{of} (mV)	U_{of} (mV)	U_{of} (mV)	A_{uf}	R_{if} (Ω)	R_{of} (Ω)

4. 计算反馈深度

用毫伏表测 A 端和接地端的电压为 U_F ，则 $F = U_F / U_o$ ，由此按下式可计算

$$\text{反馈深度} = 1 + AF = \frac{A_u}{A_{uf}}$$

四、实验预习要求

1. 复习负反馈放大器的工作原理，了解不同反馈方式对放大器放大倍数、输入电阻和输出电阻的影响。
2. 分别计算本实验电路在无反馈和有反馈时的放大倍数、反馈系数 F 、输入电阻和输出电阻 ($\beta=100$)。

五、实验报告要求

1. 画出电压串联负反馈放大器电路原理图，并表标明各元件值。
2. 总结电压串联负反馈对放大器性能的影响（包括放大倍数、输入电阻、输出电阻和频带宽度）。

六、思考题

1. 若要稳定电路的静态工作点，应该如何引入反馈？
2. 本实验线路为什么无法将输入电阻提得很高？若要再提得高一些应该怎么办？

实验六 集成运放的线性应用

一、实验目的

1. 学习集成运算放大器的基本使用方法。
2. 利用集成运算放大器构成比例器、加法器和减法器。

二、原理说明

1. 运算放大器调零

运算放大器电路是由多级直接耦合的放大电路所组成的高放大倍数的多级放大器。第一级是差分电路结构，差分电路的两个三极管很难保证参数全对称，相关的配对电阻也很难做到全对称，因而输入为零时，差分电路输出却不为零，因而要调零。

2. 电路图上的运算放大器通常只有三个引脚，即同相输入端、反相输入端和输出端。由于与分析和设计应用电路无关，其它引脚通常不画出来。但应该记住运算放大器还有电源引脚（一般有正负电源）和公共端，有的还有调零端，这些在实际应用中是必须考虑的。

3. 集成运算放大器既可以工作在线性区，也可以工作在线性区（饱和区）由于开环电压放大倍数非常高，必须引入深度负反馈才能使运算放大器工作在线性区。即运算放大器必须是闭环的。一旦运算放大器工作在饱和区，则它必然是开环的甚至是引入正反馈的。

4. 运算放大器工作在线性区时，由于引入了深度负反馈，输入与输出间的运算关系取决于反馈电路的结构和参数，而与运算放大器本身的参数无关。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	直流稳压电源		1	
2	万用表		1	
3	DC 信号源		1	
4	LM741 运放		1	
5	电阻		若干	

四、实验内容

1. 观察 741 运算放大器的外型与管脚

在实验模块上采用的集成运放型号是 LM741，其在一块器件上含有一个运放电路。电路采用双列直插引脚封装，体积小，集成度高，价格低廉，使用方便。本实验中采用电源 $V_{CC}=+12V$ ， $V_{EE}=-12V$ 。LM741 的管脚排列图详见图 6-2。

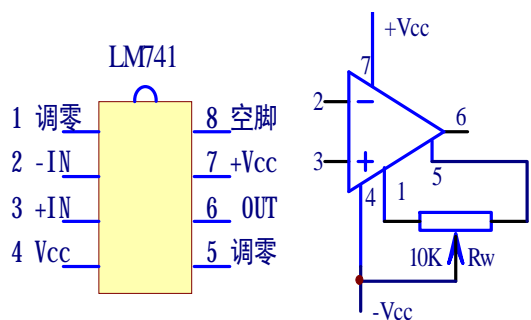


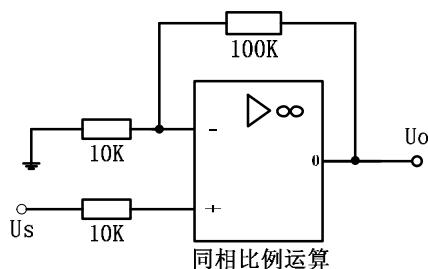
图 6-2 双列直插式 741

2. 放大器的调零

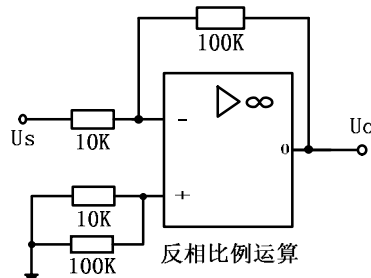
右上图是调零电位器连接示意图,使用时必须正确使用引脚才能确保电路正常工作。所谓调零并不是对独立运放进行调零,而是对运放的应用电路调零。即将运放应用电路输入端接地(即输入 U_x 为零),调节调零电位器,使输出电压等于零。

3. 运放的线性应用

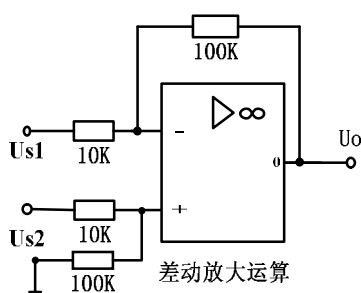
1) 同相比例运算



2) 反相比例运算



3) 差动放大运算



4) 反相求和运算

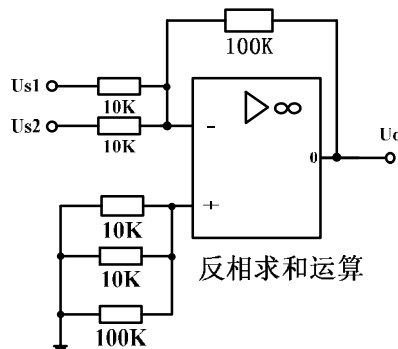


图6-3 运放的线性应用电路

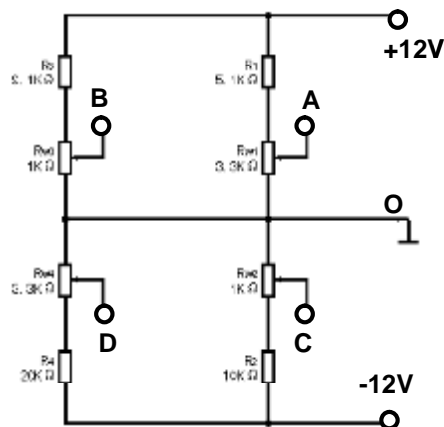
(1) 分别按原理图接线,仔细检查。

(2) 每一实验电路在测试前都要调零,调试方法是将所有的输入端 U_x 接地,调整调零电位器使输出电压为零(输出电压用万用表的直流毫伏档量程测量)。

(3) 按要求调整好输入信号(直流电压:用+12V 或-12V 加电阻、电位器分压输出;交流电压:用低频信号发生器输出),然后接通电源,输入信号。

DC 信号源产生电路如图 6-4 所示。在图中 6-4 中, U_{AO}, U_{BO} 提供正电压, U_{CO}, U_{DO} 提供负电压。改变 R_{w1} 箭头位置, U_{AO} 可以从 0V 变到 4.5V 左右;改变 R_{w3} 箭头位置, U_{BO} 可以从 0V 变到 1V 左右。改变 R_{w2} 箭头位置, U_{CO} 可以从 0V 变到-1V 左右;改变 R_{w4} 箭头位置, U_{DO} 可以从 0V 变到-1.5V 左右; U_{AO} 、 U_{BO} 、 U_{CO} 、 U_{DO} 就是需要的输入信号。可以由万用表直流电压档测量。

注意,在使用时,DC 信号源产生电路板上的 0 点必须与集成运算放大电路板上的地连接。



6-4 四路 DC 信号源

(4) 直流输入时，用万用表测量直流电压档测量输出电压。

(5) 交流输入用示波器观察输出信号，并用交流毫伏表测量输出电压。

(6) 各实验数据记录下表。

项目	输入信号 U_x (注：交流信号为频率1KHZ 的正弦信号)			输出电压 U_o	
				实测值	理论值
同相比例	1	AC	0.01V		
	2	AC	0.1V		
	3	AC	0.5V		
反相比例	1	AC	0.01V		
	2	AC	0.1V		
	3	DC	0.5V		
差动放大	1	DC	0.3V 和0.5V		
	2	DC	0.5V 和0.1V		
反相求和	1	DC	0.3V 和0.5V		
	2	DC	0.5V 和-1V		

四、实验预习要求

1. 了解集成运放的调零方法。
2. 了解集成运放组成加法器、减法器的原理。
3. 熟悉实验电路，列出 U_o 与 U_{S1} 、 U_{S2} 之间的关系方程式，并按电路参数计算出输出电压的理论值。

五、实验报告要求

将实验结果整理成表格，并与理论值进行比较，分析误差原因。

实验七 数字式温度表的设计

一、实验目的

- 1. 了解数字式温度表的基本构成。
- 2. 熟悉数字温度表的工作原理。
- 3. 掌握电阻/电压转换电路、电压放大电路的设计方法。
- 4. 学会电子系统测量和调试技术。

二、设计步骤

1、确定设计方案

所谓设计方案就是对要做的设计先做一个大致的设想，这种设想常用方框图表示，下面的方框图是可采纳的的方案之一。

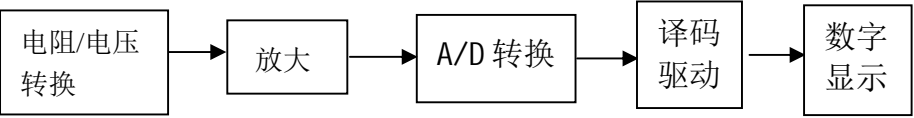


图13-1总体设计方案

2、单元电路的设计

在总电路设计之前，可分别对电路的各部分进行设计。但要注意电源的选择应该合理，使各部分电路的电源电压尽可能一致。

1) 电阻/电压转换电路

铂电阻的电阻值随温度而变化，见表 13-1。在温度测量中，通常采用桥路来实现电阻量到电压量的转换。可参考图 13-2，图中 R_t 是铂电阻 Pt100。

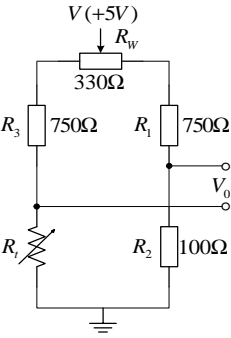


图 13-2 热电阻测量桥路

表13-1 Pt100 铂电阻0~200℃分度表

温度℃	电阻值Ω	温度℃	电阻值Ω	温度℃	电阻值Ω	温度℃	电阻值Ω
0	100	50	119.40	100	138.50	150	157.31
10	103.90	60	123.24	110	142.29	160	161.04
20	107.79	70	127.07	120	146.06	170	164.76
30	111.67	80	130.89	130	149.82	180	168.46
40	115.54	90	134.70	140	153.58	190	172.16
						200	175.84

2) 放大电路

在精密测量仪器中，要使用高质量的差分放大器，要求其输入阻抗高，共模抑制比高，漂移小。这种放大器有组件式的，也有集成电路的。图 13-3 就是用运算放大器组成的仪表放大器，其中 A_1 、 A_2 （即 A_{1A} 、 A_{1B} ）要求是采用低漂移集成运算放大器。稳压管采用元件模块 1 中稳压管。

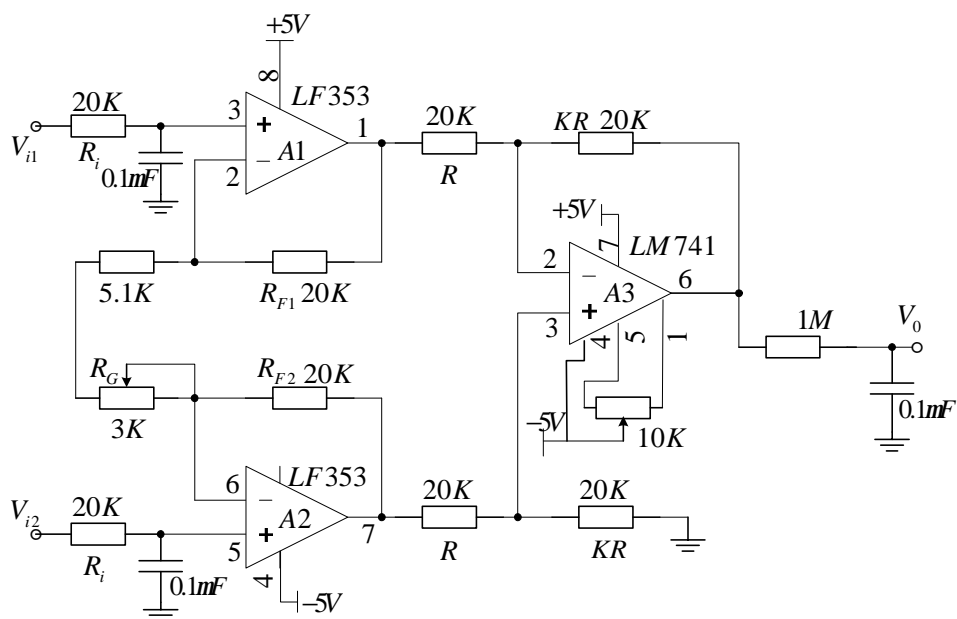


图13-3 用运算放大器组成的仪表放大器

其中 A_1 、 A_2 的差模增益 K_1 可按下面式子推出：

$$\frac{V_{o2} - V_{i2}}{R_{F2}} = \frac{V_{i1} - V_{o1}}{R_{F1}} = \frac{V_{i2} - V_{i1}}{R_G}, \quad V_{o2} - V_{o1} = \left(1 + \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_G}\right)(V_{i2} - V_{i1})$$

$$\text{解得： } K_1 = 1 + \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_G}$$

$$\text{当 } R_{F1} = R_{F2} = R_F \text{ 时， } K_1 = 1 + \frac{2R_F}{R_G}。$$

$$A_3 \text{ 的差模增益 } K_2 = \frac{KR}{R} = K。$$

$$\text{当 } K=1 \text{ 时， } K_2=1， \text{ 因此放大器增益 } K_v = K_1 K_2 = \left(1 + \frac{R_{F1} + R_{F2}}{R_G}\right)K。$$

$$\text{当 } R_{F1} = R_{F2} = R_F \text{ 和 } K=1 \text{ 时， } K_v = 1 + \frac{2R_F}{R_G}$$

3) A/D 转换、译码驱动和数字显示部分由 3 位半数显电压表完成。
数显电压表结构图见图 13-4。

三、连线调试

调试大致可分为以下步骤：

- (1) 放大器零点调试。在铂电阻 $R_t = 100 \Omega$ 时，调节电桥中 330Ω ，使电桥输出为 0，再调节 LM741 运放电路中 10K 调零电位器，使数显电压表显示零。
- (2) 放大器放大倍数的调试。在铂电阻 $R_t = 175.84 \Omega$ 时（即 200°C ），调节 A_1 模块中 3K 电位器，使数显电压表显示 200。
- (3) 用标准电阻箱作为铂电阻接入电路，改变电阻箱的电阻值并记录好显示器所显示的、相应的温度值。对照铂电阻的电阻～温度分度表，计算各温度点误差，以表格的形式表示。

表13-2 温度显示仪误差测试表

温度	电阻值	显示温度	误差	温度	电阻值	显示温度	误差
0	100			100	138.50		
10	103.90			110	142.29		
20	107.79			120	146.06		
30	111.67			130	149.82		
40	115.54			140	153.58		
50	119.40			150	157.31		
60	123.24			160	161.04		
70	127.07			170	164.76		
80	130.89			180	168.46		
90	134.70			190	172.16		
				200	175.84		

调试中应注意的问题：

发现电路有问题，不能正常工作，如电源短路或某些元件过热或电路没有任何反应时，应立即断开电源并检查原因。

四、实验报告要求

- 1、画出总体电路图；
- 2、调试中出现的问题及解决的方法；
- 3、实验结果报告；

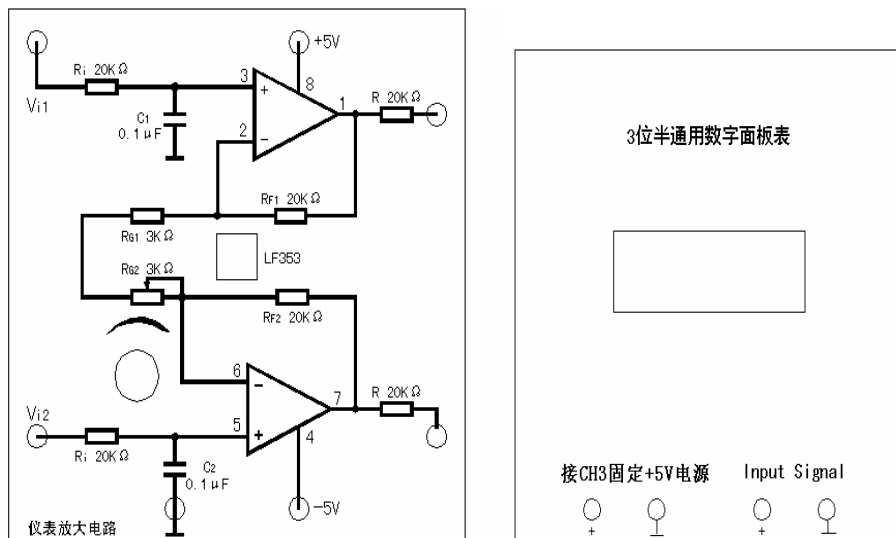


图 13-4 仪表放大电路和数显电压表面板

实验八 集成电路 RC 正弦波振荡电路

一、实验目的

1. 掌握桥式RC 正弦波振荡电路的构成及工作原理。
2. 熟悉正弦波振荡电路的调整、测试方法。
3. 观察RC 参数对振荡频率的影响，学习振荡频率的测定方法。

二、实验内容及步骤

1. 按图5-39接线。

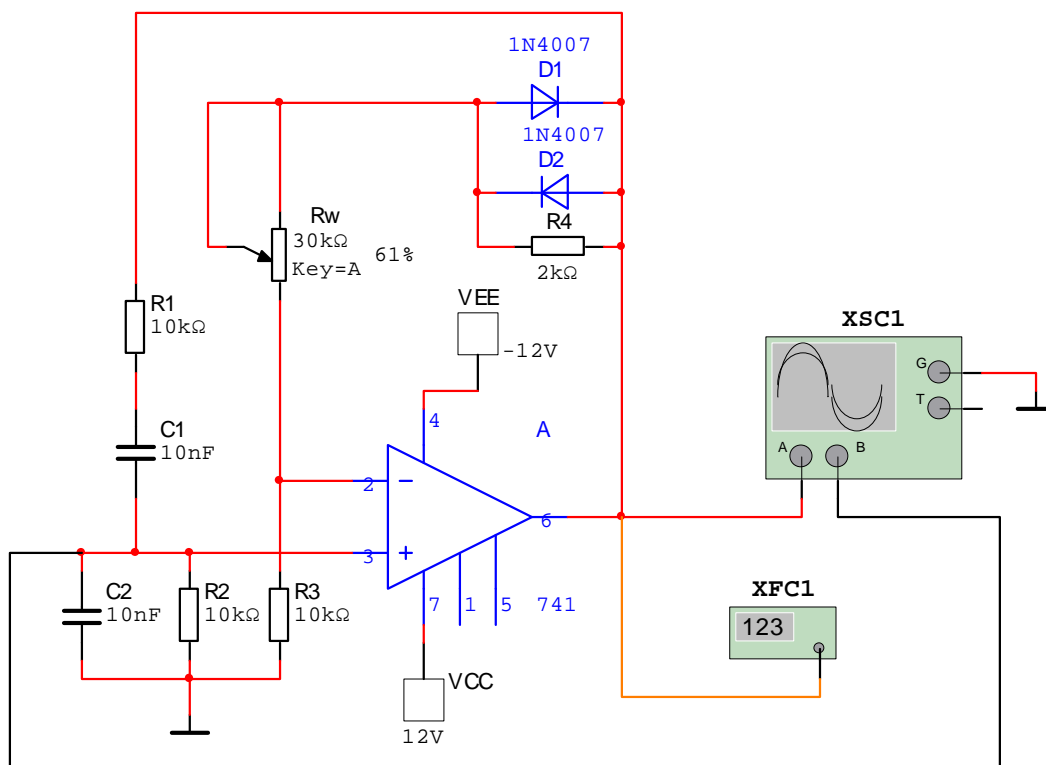


图5-39

2、启动仿真开关，用示波器观察输出波形，调节电位器 R_w ，使输出波形从无到有，直至正弦波出现失真。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。

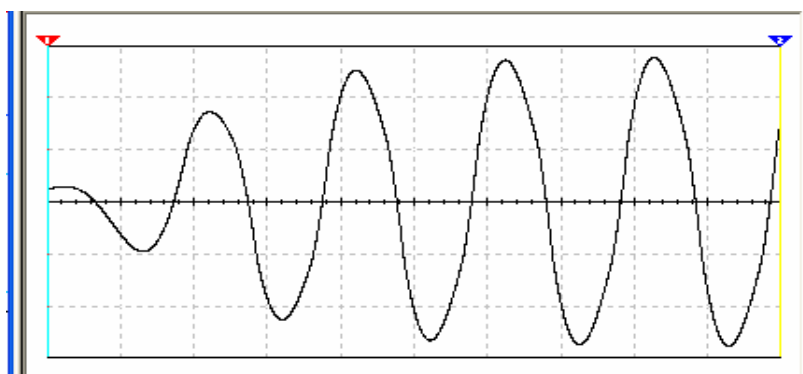


图 5-40

图5-41为失真时的波形。

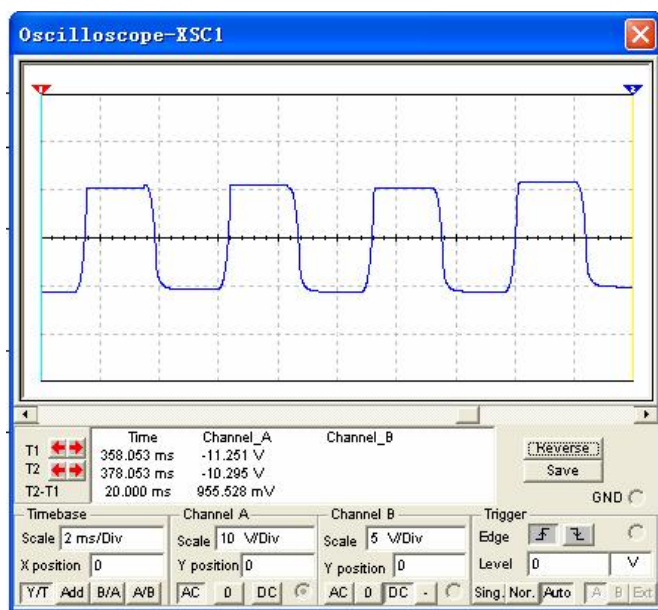


图5-41

3. 用频率计测上述电路输出频率， $f = \underline{\hspace{2cm}}$ ，理论值 $\underline{\hspace{2cm}}$ 。
4. 调节电位器 R_w ，使输出电压 U_o 不失真，用万用表测量输出电压 U_o ，反馈电压 U_+ 和 U_- ，分析振幅平衡条件。
5. 调节电位器 R_w ，使输出为正弦波，并记下此时的输出值。断开正反馈网络与同相输入端的连接点。把低频信号发生器的输出电压接至一个 $1\text{ k}\Omega$ 的电位器上，再从这个 $1\text{ k}\Omega$ 电位器的滑动接点取 V_i 接至运放同相输入端，见图 5-42。调节 V_i 使 V_o 等于原值，测出此时的 V_i 值。则： $A_{uf} = V_o/V_i = \underline{\hspace{2cm}}$ 倍。
6. 改变 RC 串并联网络中 R 或 C 值，观察振荡频率变化情况。

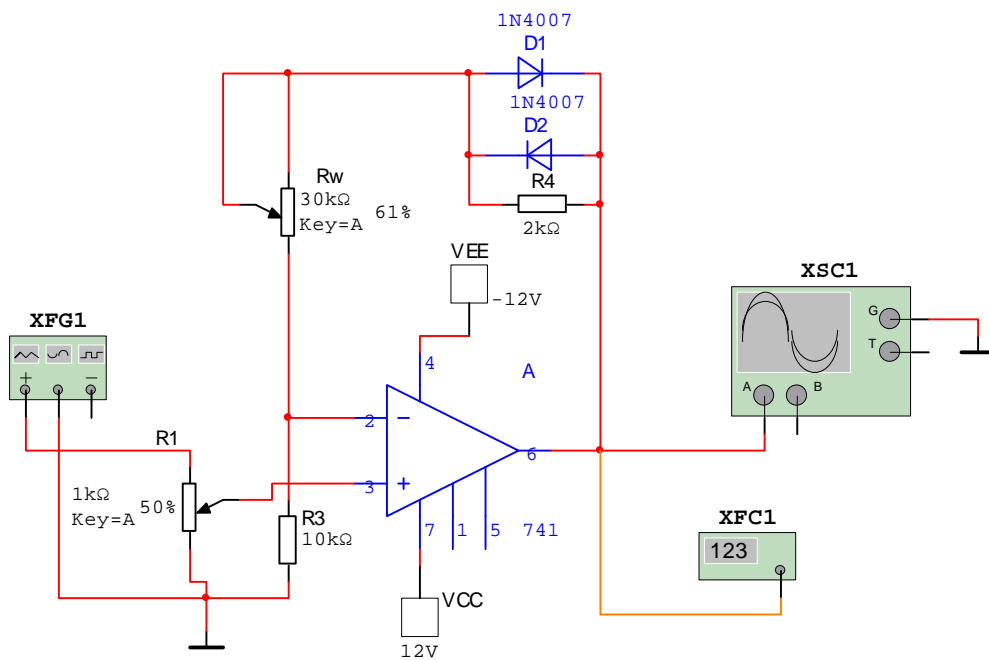


图 5-42

实验十三 整流、滤波及稳压电源

一、实验目的

1. 观察整流、滤波、稳压电路的输入、输出波形，电容器的作用及稳压管的稳压特性。
2. 测量电路外特性。
3. 熟悉和掌握线性集成稳压电路的工作原理和使用方法。

二、实验原理

直流稳压电源是电子设备中最基本、最常用的仪器之一。它作为能源，可保证电子设备的正常运行。直流稳压电源由四个环节组成：变压器、整流电路、滤波器及稳压电路。如图 13-1 所示。

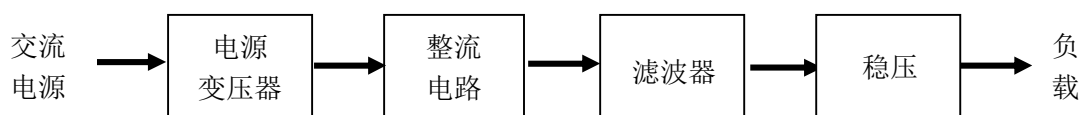


图 13-1 直流稳压电源原理图

- (1) 变压器：将交流电源电压变换为符合整流需要的电压。
- (2) 整流电路：将交流电压变换为单向脉动电压。其中的整流元件（晶体二极管）所以能整流，是因为它具有单向导电的特性。
- (3) 滤波器：利用电抗性元件（电容、电感）的贮能作用，以平滑输出电压，减小整流电压的脉动程度，以适合负载的需要。
- (4) 稳压环节：在交流电源电压波动或负载变动时，使直流输出电压稳定。在对直流电压的稳定程度要求较低的电路中，稳压环节也可以不要。

稳压电源的主要性能指标：

1. 输出电压 U_o 。
2. 最大负载电流 I_{om}
3. 输出电阻 r_o 。

输出电阻 r_o 定义为，当输入电压 U_i (稳压电路输入) 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 ΔI_o 之比，即

$$r_o = \frac{\Delta U_o}{\Delta I_o} \Big|_{U_i = \text{常数}}$$

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

$$S = \frac{\Delta U_o / U_o}{\Delta U_i / U_i} \Big|_{R_L = \text{常数}}$$

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 $\Delta U_o/U_o$ 做为衡量指标，称为电压调整率。

5. 纹波电压

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

三、实验内容

1. 二极管极性判别

二极管的极性可以用万用表的欧姆档来判别。同样的方法可判别稳压管的好坏。

2. 电路如图 13-2 所示。按图连接电路，桥式整流输入电压 v_i 接 15V 低压交流电源。负载支路接入直流电流表，观察电流表是否有读数。

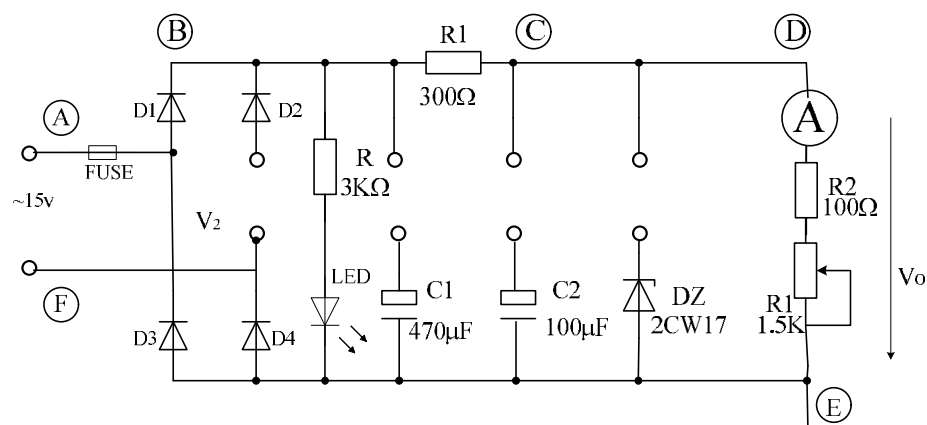


图 13-2 整流、滤波和稳压电路

3. 用示波器观测和万用表测量表 13-1 所列各项内容

画波形时注意：

- 各波形的对应点。
- “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。

4. 测量整流、电容滤波电源的外特性，完成表 13-2 数据测试。

电源的外特性是指输出电压与输入电压之间的关系。本实验的目的是用实验数据来说明外特性曲线 $[U_o = f(I)]$ 。

2. 测量整流、CRC 滤波、稳压电源的外特性，完成表 13-3 数据测试

表 13-1

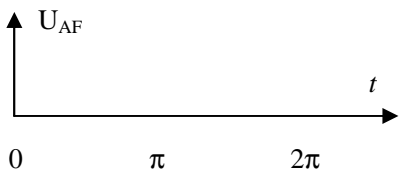
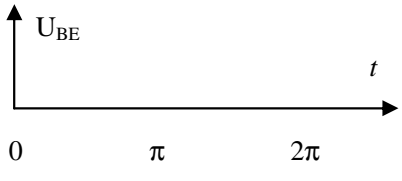
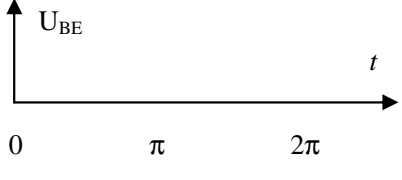
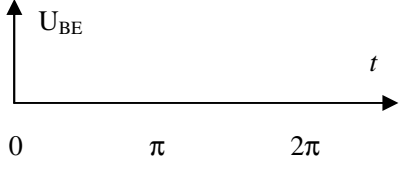
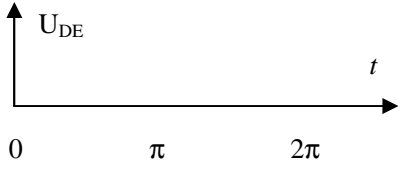
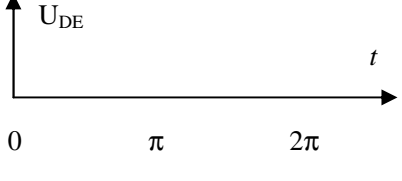
名称	测试点	波形	数值
变压器输出电压	A、F		$U_{AF} =$
整流输出 (不接 C_1 、 C_2 、 D_Z)	B、E		$U_{BE} =$
	B、E (D2 与 D4 间连接， 构成全波整流)		$U_{BE} =$
整流+滤波输出 (接 C_1 、 C_2 ， 不接 D_Z)	B、E		$U_{BE} =$
	D、E		$U_{DE} =$
整流+滤波+稳压 输出 (接 C_1 、 C_2 ， D_Z)	D、E		$U_{DE} =$

表 13-2 整流、电容滤波电源的外特性 (接 C_1 ，不接 C_2 、 D_Z)

I_O (mA)	0 (负载开路)	15	20	25	30	40	50
U_O (V)							

表 13-3 整流、CRC 滤波、稳压电源的外特性 (接 C_1 、 C_2 、 D_Z)

I_O (mA)	0 (负载开路)	15	20	25	30	40	50
U_O (V)							

