模拟电子技术实验

实验一　常用电子仪器使用

一．实验目的

1．学习示波器、晶体管毫伏表、万用表和信号发生器等常用电子仪器的正确使用方法。
2．学会用示波器测量电压波形、幅度、频率的基本方法。
3．学会正确调节函数信号发生器频率、幅度的方法，熟悉 dB 按键。
4．学会正确使用交流毫伏表的方法。

二．实验仪器及设备

二踪示波器（SS7802A 型）
晶体管毫伏表（HG2170 型）
信号发生器（GAG—809 型）
数字万用表（UT50 型）

三．实验原理

在电子测量中，首先要了解仪器的基本功能和性能,仪器的等级是否满足测量要求。电子测量中的测量范围一般都比较宽，如电压通常可以从几毫伏至几十伏甚至上百伏，频率可以从直流到几兆赫或者更高。因此选用仪器时,一定要注意其技术指标，适用范围(量程,频带)。仪器的等级再高，如果使用不当，也达不到应有的效果，如用毫伏表测直流电压，用数字万用表测大于 1KHz 的交流信号，都将不会得到正确的结果。

在模拟电子技术基础实验中，最常用的电子仪器有示波器、信号发生器、数字万用表、晶体管毫伏表及直流稳压电源等。用以完成对模拟电子电路的静态和动态工作情况的测试。其测试示意图如下：

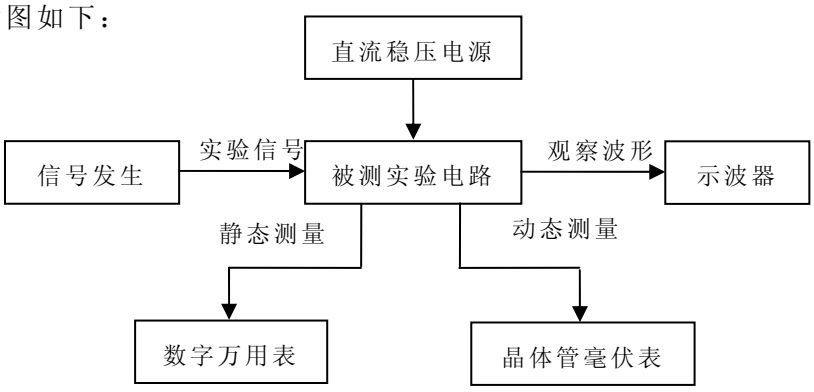


图 5-1 电路测试示意图

1．被测实验电路：即为在“电子技术基础”等课程中的各种电路。实验电路可以是一个单元电路，也可以是综合设计性电路。无论何种电路都要使用一些电子仪器及设备进行测量。测量分为两种：一是静态测试，二是动态测试。通过观察实验现象和结果，从而将理论和实践结合起来。

2．直流稳压电源：它是为被测实验电路提供能源的仪器，通常是输出电压。

3．测量仪器及仪表：如图中数字万用表和晶体管毫伏表，分别用来测量实验电路中的直流电压和交流电压，还可以用电流表、频率计等测量电路的电流、频率等参数。

4．信号发生器：即用来产生信号源的仪器，可以产生正弦波、三角波、方波等信号，输出的信号（频率和幅度）均可调节，可根据被测电路的要求选择输出波形。

5．双踪示波器：用来观察、测量实验电路的输入和输出信号。通过示波器可以显示电压或电流的波形，可以测量频率、周期及其他有关参数。

本实验中所用的仪器使用的方法参见本书的第三章有关内容。

四．实验内容和步骤

一．电子仪器的使用练习

接通示波器POWER，选择要显示的相应通道，按下相应输入端GND，即接地，输入信号与 Y 轴放大器断开，屏幕左下分度因子后显示符号。

1．　调节【INTEN】、【READOUT】、【FOCUS】、【SCALB】、水平和垂直位置【POSITION】等旋钮，使荧光屏中间出现清晰的扫描线，使扫描线位于屏幕中央，并且能上下左右移动自如。

2．　启动信号发生器，使其输出正弦电压（有效值）约为 3V，频率 f=1kHz，示波器观察波形。

将信号发生器信号通过专用电缆线引入选定的 CH1 或 CH2 通道，将 Y 轴输入耦合方式开关置于“AC”，调节触发源选择SOURCE，选择要显示的通道，如 CH1 或 CH2。调节 X 轴“扫描速率”开关【TIME / DIV】和 Y 轴“输入灵敏度”开关【VOLTS / DIV】，使示波器显示屏上显示出一个或数个周期稳定的正弦波形。不断改变频率，如频率高或低，练习用示波器观察波形。

调整触发电平【TRIG LEVEL】，可使图象稳定，当信号波形复杂，使用【TRIG LEVEL】不可获得稳定的触发，可按下HOLD–OFF，旋转【FUNCTION】钮，使信号波形稳定。

注意，信号发生器的地端（⊥）应与示波器的地端（⊥）相联，称为“共地”。

3．　启动晶体毫伏表测量信号发生器的输出电压。

4．　调节信号发生器，使输出不同频率不同幅值的正弦信号，信号频率分别改为 500Hz、1kHz、15kHz 及 100kHz，输出正弦电压的有效值分别为 5V、500mV、50mV 及 5mV。信号发生器输出小幅值时，注意练习使用“输出衰减”（dB）钮。用晶体管毫伏表和示波器同

时测量。设计表格 5-1 记录和计算数据。

注意，对于频率过高，示波器耦合应采用 LF；频率过低，耦合应采用 HF，才能正确测量。

5．用数字式万用表测量三极管的 β 值。

识别三极管的 E、B、C，将数字式万用表的量程开关拨到“HFE”位置，将三极管的 E、B、C 极正确插入测试孔，读取三极管的共发射极电流放大系数 β 的值。

6．用晶体管特性图示仪观测 NPN 和 PNP 管的输入、输出特性曲线。

二．元器件识别

参见第二章元器件的识别，学习识别实验室准备的一些三极管、二极管、稳压管、电阻、电容等器件。

D、实验报告要求

一、学习每一种仪器的使用说明，熟悉实验中旋钮的功能和使用方法。

二、说明实验内容，整理测试数据并对测量数据进行必要说明。

三、根据实验结果，说明示波器观察波形时，调节哪些按钮可使。

1.波形清晰

2.波形亮度适中

3.波形位于荧光屏中央

4.波形幅度适中

5.波形周期完整

6.波形稳定

五．预习要求与思考题

1．参照第三章内容，预习二踪示波器、信号发生器、晶体管毫伏表、数字万用表的使用说明，弄清楚各按键、开关、旋钮等的作用及使用注意事项。

2．预习本实验的内容和步骤。

3．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？

4．欲测量一个 20Hz 以内的正弦信号，应选用万用表、毫伏表、示波器中的哪一种仪器？

实验二　单管共射放大电路

一．实验目的

1．进一步掌握常用电子仪器的使用方法。

2．观察各电路参数对放大器性能的影响。

3．学习静态工作点和电压放大倍数的测试方法。

二．仪器及设备

二踪示波器（SS7802A 型）
晶体管毫伏表（HG2170 型）
信号发生器（GAG—809 型）
数字万用表（UT50 型）
模拟实验箱（TPE—A 型）
分立元件放大电路实验板

三．实验原理

1．实验参考电路如图 5-2。

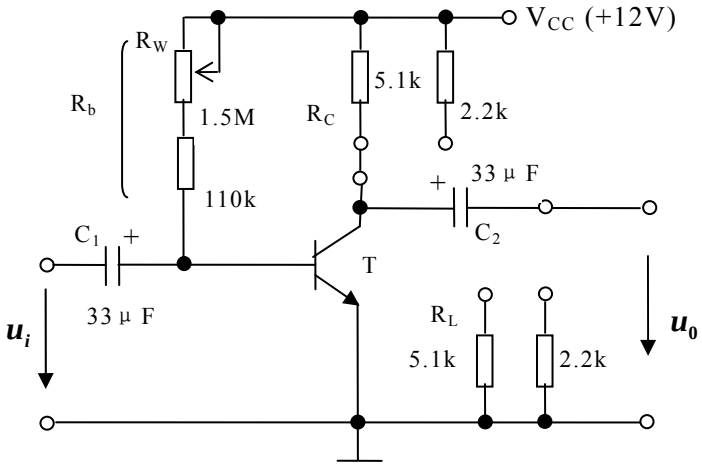


图 5-2 单管放大实验电路图

2．静态工作点的计算和调试

理论计算：$I_B = \dfrac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b}$

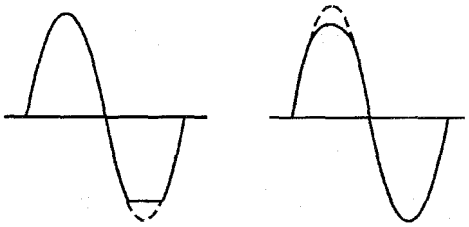
$$I_C = \beta I_B = \beta \cdot \frac{V_{CC} - U_{BE}}{R_b}$$

$$U_{CE} = V_{CC} - I_C R_C$$

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（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_0 半周将被削底，如图 5-3（a）所示；如工作点偏低则易产生截止失真，即 u_o 的正半周将被缩顶如图 5-3（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，检查输出电压 u_o 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。

改变电路参数 V_{CC}、R_c、R_b 都会引起静态工作点的变化，如图 5-4 所示。但通常多采用调节偏置电阻 R_b 的方法来改变静态工作点，如减小 R_b 可使静态工作点提高等。



（a）饱和失真　　(b)截止失真

图 5-3 失真波形

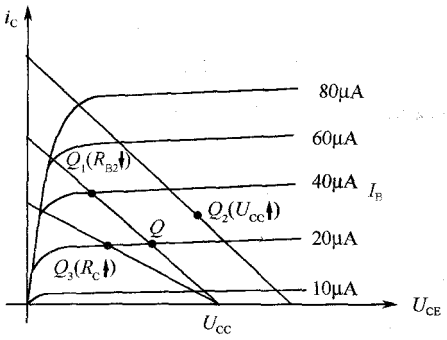


图 5-4 静态工作点的变化

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

3．电压放大倍数计算与测量

理论计算：$\dot{A}_u = \dfrac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} == \dfrac{-\beta R_c // R_L}{r_{be}}$

其中：$r_{be} = r_{bb'} + (1+\beta)\dfrac{U_T}{I_{EQ}}$

电压放大倍数测量：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

$$A_u = \frac{U_O}{U_I}$$

最大不失真输出电压 U_op-p 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_Op-p 来。

四．内容和步骤

1．熟悉实验线路板，了解各元件的位置，然后按实验要求接线，经检查无误之后方可接通电源。

2．观察静态工作点设置不合适时，输出波形的失真情况，设计表 5-2。

条件：R_c=5.1k，R_L=∞，U_i=10mV，f=1kHz。

（1）减小 R_b 直至输出波形 U_o 发生饱和失真，记下失真波形形状，断电后测量 R_b 的值并记录。

（2）增大 R_b 直至输出波形 U_o 发生截止失真，记下失真波形形状，断电后测量 R_b 的值并记录。若 R_b 调到最大仍无明显失真，则逐渐加大输入信号，直至输出波形有较明显失真为止。

注意观察失真应输入、输出波形同时观测，以确定是饱和或截止失真。

3．.观察 R_b，R_c，R_L 对静态工作点及电压放大倍数的影响，设计表 5-3。

（1） 使 R_c=5.1K，R_L=∞，调节 R_b 使 U_c=7V，测量静态工作点，填入表 5-3。

静态工作点的测量：关掉信号源，将放大器输入端短路，分别测出 B、C 二极对地电位 U_{BQ}、U_{CQ}；再断开 R_b 与其他的连接，测量 R_b 的阻值，即可算出 I_{BQ}、I_{CQ}。

（2）在上述 R_b、R_c、 R_L 不变的条件下，使 U_i 仍为 10mV，f=1KHz，测量静态工作点和 U_o 值，由测量值计算 A_u。

（3）在上述 R_b、R_c 不变情况下，使 R_L 分别为 5.1K 及 2.2K，观察输出波形的变化，测量静态工作点及 U_O。计算 Au，与 R_c=5.1k, R_L=∞时进行比较。

（4）在 R_b 不变，R_L=∞的情况下，使 R_c 为 2.2K，观察输出波形的变化，测量静态工作点及 U_O。计算 Au，与 R_c=5.1k, R_L=∞时进行比较。

4．观察“最大放大倍数”及“最大不失真输出幅度”。

条件：R_c=5.1k, R_L=5.1 k 不变，设计表格 5-4。

（1）输入 U_i=10mA, f=1KHz, 调节 R_b 使输出 U_o 幅度最大且不失真，这时 A_u 为最大。测量 U_o,计算 A_u 值。

（2）调节 R_b 及 U_i 幅度，使不失真的输出电压 U_o 达到最大。

逐步增大输入信号的幅度，用示波器观察 u_o，当输出波形出现削底或缩顶现象时，调节 R_b（改变静态工作点），使失真消失，再增大输入信号，使失真重新出现，再调节工作点，反复，直到输出波形饱和和截至失真同时出现，静态工作点 Q 已调在交流负载线的中点。测量 U_o，计算 A_u 值。

分清“最大放大倍数”与“最大不失真输出幅度”两个不同概念。

五． 实验报告

1．整理测量数据，完成要求的计算。

2．总结改变 R_b、R_c、R_L 等参数对静态工作点，Au 及输出波形的影响。

3．根据实测结果计算晶体管的 β 值，并对表 5-3 的 A_u 进行理论估算。

4．分析“最大放大倍数”与“最大不失真输出幅度”两个概念。

5．分析讨论在调试过程中出现的问题。

六． 预习要求及思考题

1．预习共射接法单管交流放大电路的工作原理及各元件作用。

2．电解电容 C_1、C_2 的作用是什么？极性应如何考虑？

3．如何测量 R_b？不断开 R_c 与集电极的连线行吗？不断开电源测量会产生什么后果？

4．分析图 5-5 波形各是什么失真？原因是什么？如何解决？

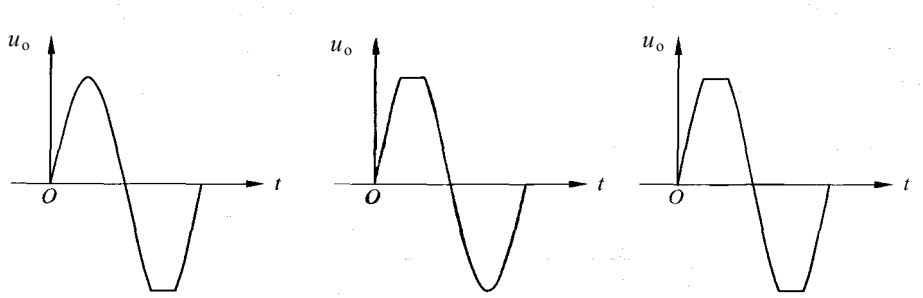


图 5-5　失真波形

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

实验三　多级放大电路

一．实验目的

1．学习合理设置静态工作点。

2．学习测量电压放大倍数与输入、输出阻抗。

3．学习频率特性的测量方法。

二．仪器与设备

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

多级放大电路实验板

三．实验原理

1．实验参考电路如图 5-6

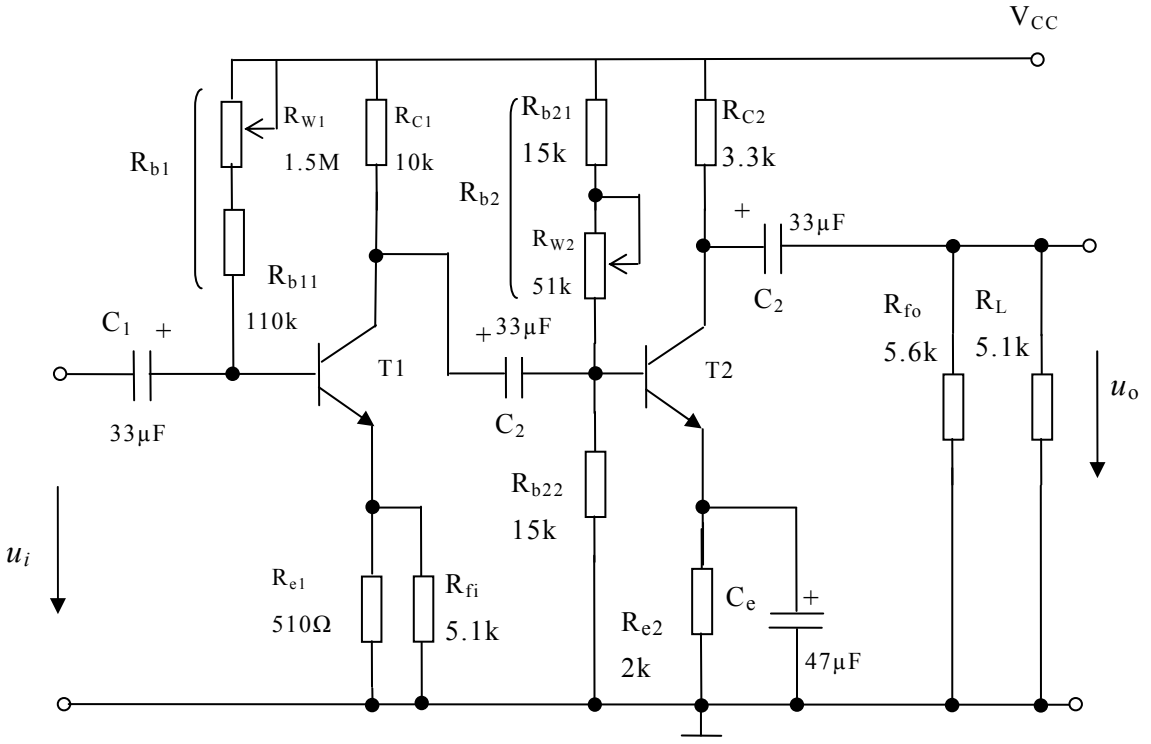


图 5-6 多级放大电路实验电路图

2．动态参数计算

阻容耦合多级放大器由于耦合电容的隔直作用，级与级之间的静态工作点是完全独立的，不会相互影响，因此，我们可以一级一级地调整各级的静态工作点至最佳位置。对交流信号而言，前级的输出电压就是后级的输入电压，后级的输入阻抗就是前级的负

载。

电压放大倍数：
$$A_u = A_{u1} \cdot A_{u2} = -\beta_1 \frac{R_{e1} // R_{i2}}{r_{be!} + (1+\beta_1)R_{e1}} \cdot (-\beta_2 \frac{R'_{L2}}{r_{be!}})$$

式中：
$$r_{be} = r_{bb'} + (1+\beta)\frac{U_T}{I_{EQ}}$$

$$R_{i2} = (R_{Wi2} + R_{b21}) // R_{b22} // r_{be2}$$

输入电阻：
$$R_i = R_{i1} = R_{b1} // [r_{be1} + (1+\beta_1)R_{e1}]$$

输出电阻：
$$R_0 = R_{01} = R_{C2}$$

3．输入、输出电阻的测量

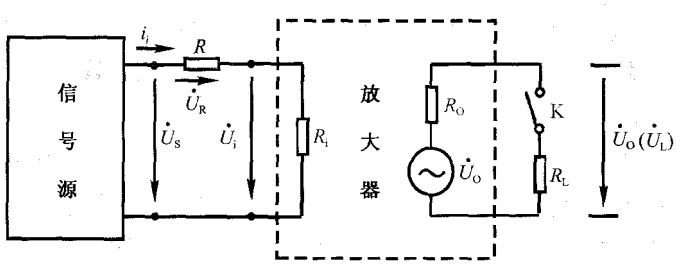


图 5-7 输入、输出电阻的测量原理图

（1）输入电阻 R_i 的测量：为了测量放大器的输入电阻，按图 5-7 所示电路在被测放大器的输入端与信号源之间串入已知电阻 R，在放大器正常工作的情况下，用交流毫伏表测出 U_S 和 U_i，则根据输入电阻的定义可得

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

测量时应注意：

- 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，然后按公式求出 R 值。
- 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。

（2）输出电阻 R_o 的测量：按图 5-7 电路，在放大器正常工作条件下，测出输出端不接负载 R_L 的输出电压 U_o 和接入负载后的输出电压 U_L，根据

$$U_L = \frac{R_L}{R_0 + R_L} U_0$$

即可求出：
$$R_o = \left(\frac{U_0}{U_L} - 1\right) R_L$$

四．实验内容与步骤

1．设置静态工作点

多级放大电路中，对各级的工作点往往有不同的要求。一般来说，前级的信号小，失真问题不突出，在满足放大倍数要求的情况下，工作点尽可能地低一些。对于末级放大器，信号已经比较大，为使输出幅度大、失真小，静态工作点应选在交流负载线的中点。

（1）设置 Q_2

满足下列二个式子，即可求出工作点位于交流负载线中点时的 U_{CEQ2} 和 I_{CQ2}：

$$\begin{cases} U_{CEQ2} = V_{CC} - I_{CQ2}\ (R_{c2}+R_{e2}) \\ U_{CEQ2} = I_{CQ2}\ (R_{c2}//R_{fo}//R_L)+U_{CES} \quad (\text{取 } 1\text{V}) \end{cases}$$

试根据图 5-6 的电路参数算出 U_{CEQ2}、I_{CQ2} 和 U_{CQ2} 的值。

按图 5-6 连线，调节 R_{w2} 使 U_{CQ2} 符合计算值，并测出静态的 U_{BQ2} 和 U_{EQ2} 填入表 5-5。

（2）设置 Q_1

输入交流信号（U_i=5mV, f=1KHz），接上 $R'_L=R_{fo}//R_L$，观察输出波形及输出交流 U_o 数值，要求在本级及两级输出交流波形无非线性失真的条件下，调节 R_{w1} 使 Q_1 点尽可能低一些，测出静态 U_{CQ1}、U_{BQ1} 和 U_{EQ1}，填入表 5-5。

关掉信号源，断开 R_{b1}、R_{b2} 与其他的连接，测量 R_{b1}、R_{b2} 填入设计表 5-5。

注意：测量静态值时，应关断交流信号源，并将放大器的输入端短路。

2．测量电压放大倍数

（1）两级电路串联

输入交流信号（U_i=5mV, f=1KHz），测量 U_{o1} 及 U_o 填入表 5-6，并由测量值计算 A_{u1}、 A_{u2} 和 A_u。

两级电路断开：在两个单级放大器输入端分别输入 U_{i1} (5mV, f=1kHz)，U_{i2}，U_{i2} 电压数值同两级串联时的 U_{o1}，f=1kHz，注意，U_{i2} 信号加到 C_2 前，保证阻容耦合。测 U_{o1} 及 U_o 填入设计表 5-6，并由测量值计算 A_{u1}、 A_{u2}。

3．测量输出电阻 R_o

在两级串联，R_L 取值如图所示，取 U_i=5mV, f=1kHz，测出 U_L，再断开 R_L（保留 R_{fo}），测出 U_o，填入表 5-7，由测量值根据公式 $R_o = \left(\frac{U_0}{U_L}-1\right)R_L$，计算 R_o。

4．测量输入电阻 R_i

方法：在放大电路输入端与信号源间串入 24kΩ 电阻(R)，加大信号源电压 U_S 使净输入 U_i 仍为 5mV，测出此时的 U_S，填入设计表 5-7，利用公式 $R_i = \frac{U_i}{U_S - U_i}R$，计算 R_i。

5．测量两级放大电路的幅频特性

接上 R_L=5.1kΩ，取交流信号的频率 f=1kHz，调节信号发生器的幅度使放大器的输出 U_o=1V，测量并记录 U_i 数值。然后增高及降低输入信号频率使 U_O 分别降至表 5-8 中的特殊值，同时记录所对应的信号频率，填入设计表 5-8，并根据测量值，计算 A_u。

五．**实验报告要求**

1．总结设置静态工作点的目的及方法。

2．根据所做的实验内容，整理所测数据，分析总结每个实验内容应该得到的结论。

3．根据静态测量计算 β 值，对动态参数估算其理论值，并与上述计算结果相比较。

4．画出本放大电路频率特性曲线，求出通频带。

六．预习要求与思考题

1．复习多级放大器有关计算 Au 的方法，级与级之间的相互影响及频率特性的理论知识。

2．图 5-6 中要求第二级放大电路的静态工作点位于交流负载的中点，计算 U_{CEQ2} 及 I_{CQ2} 值。

3．实验过程中若出现自激振荡，应如何消除？

4．测输出电阻时，应如何选用 R_L 的阻值，使测量误差最小？

注意：学生应妥善保管实验数据，本实验作为无反馈的基本放大器，将要与实验四交流负反馈放大器进行比较。

实验四 电压串联负反馈放大器

（一） 实验目的

1．进一步了解电压串联负反馈的工作原理。

2．掌握负反馈对放大器性能的影响。

3．掌握负反馈放大器性能的测试方法。

（二） 仪器与设备

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

分立元件放大电路实验板

（三）实验原理

实验电路如图 5-8。

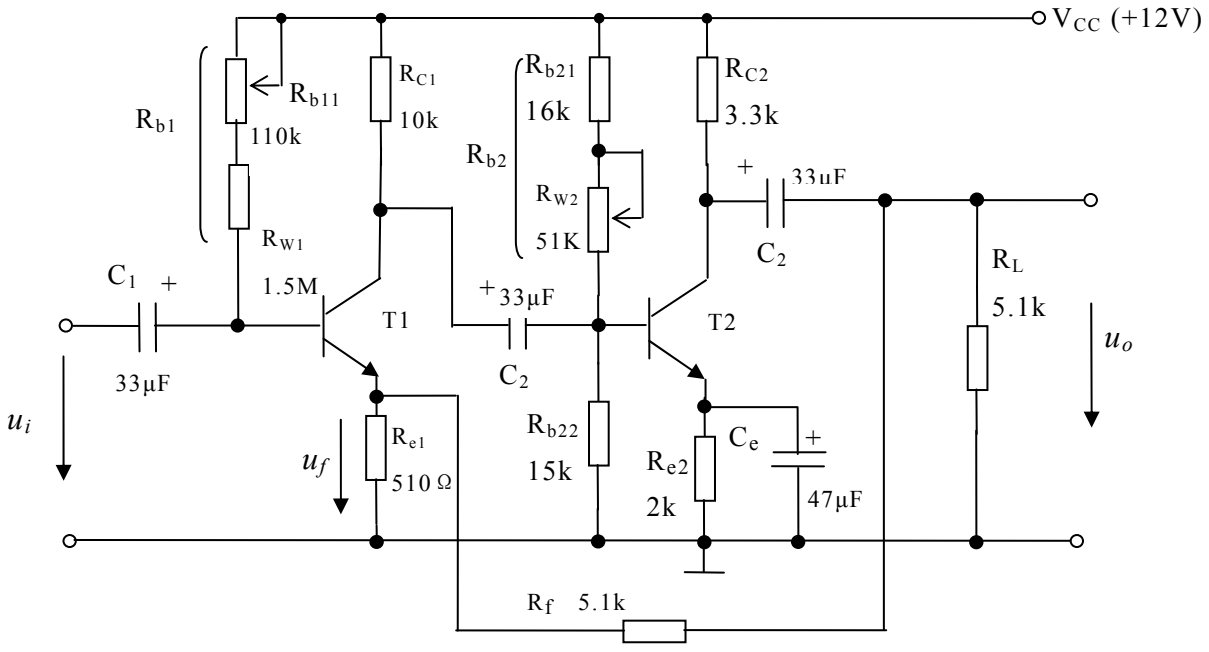


图 5-8 电压串联负反馈实验电路图

各项参数计算公式如下：

反馈系数 ：
$$\dot{F}_{uu}=\frac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o}=\frac{R_{e1}}{R_{e1}+R_f}$$

反馈深度为$1+\dot{A}_u\dot{F}_{uu}$，$\dot{A}_u$为基本放大电路放大倍数。

负反馈电压放大倍数计算值 ： $\dot{A}_{uf}=\dfrac{\dot{A}_u}{1+\dot{A}_u\dot{F}_{uu}}$

深度负反馈时电压放大倍数估算值 ： $\dot{A}_{uf}=1+\dfrac{R_f}{R_{e1}}$

输入电阻 ： $R'_{if}=(1+\dot{A}_u\dot{F}_{uu})R'_i$

R'_{if} 和 R'_i 分别为基本放大电路和反馈放大电路中不含 R_{b1} 时的输入电阻。分别由 $R_i=R_{b1}//R'_i$ 和 $R_{if}=R_{b1}//R'_{if}$ 得到。

输出电阻 ： $R_{of}=\dfrac{R_o}{(1+\dot{A}_{uo}\dot{F}_{uu})}$

$\dot{A}_{uo}$ 为取走 R_L 后的基本放大电路放大倍数， $\dot{A}_{uo}=\dot{A}_u\cdot\dfrac{R_{c2}//R_{fo}}{R_{c2}//R_{fo}//R_L}$

截止频率： $f_{Lf}=\dfrac{f_L}{1+\dot{A}_u\dot{F}_{uu}}$ ， $f_{Hf}=(1+\dot{A}_u\dot{F}_{uu})f_H$

（四）实验内容与步骤

1．设置静态工作点

按图 5-8 电路接线。调节 R_{w1}、R_{w2} 使 U_{CQ1}、U_{CQ2} 数值与实验三中设计表 5-5 的值相同，并填入表 5-9。

2．测量电压放大倍数

输入信号 U_i = 5mV、f = 1kHz，在 R_L=5.1kΩ 时测出开环和闭环时的 U_o，开环放大电路如实验三图 5-6，计算 A_u 和 A_{uf}，填入设计表 5-10。

3．观察电压负反馈对输出电压的稳定作用

仍令 U_i = 5mv、f = 1kHz，改变 R_L 测 U_o，将所得结果填入设计表 5-11。

4．测量放大电路的输出电阻 R_{of} 和输入电阻 R_{if}

测量步骤参照多级放大电路，填入设计表 5-12。R'_{if} 为不含 R_{b1} 在内的输入电阻，由 $R_{if}=R_{b1}//R'_{if}$ 计算出来。

思考：

1）现有 R_L 为 5.1k 和 110Ω 二种负载电阻，在测量输出电阻 R_{of} 时,应选用哪一个合适?

2) 现有 R 为 24kΩ 及 100kΩ 二种输入端串联电阻,在测量输入电阻 R_{if} 时，应选用哪一个合适？净输入信号是否应为 U_i=5mV、f=1kHz。

5．测量负反馈放大器的幅频特性

测量步骤同实验三。将所得数值填入设计表 5-13

6、观察负反馈对非线性失真的改善

实验电路改接成基本放大器形式，在输入端加入 f＝1KHz 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，此时将实验电路改接成负反馈放大器形式，观察输出波形的变化。

（五）总结报告要求

1、计算反馈深度 $1+A_{u}F_{uu}$。

A_u 是基本放大电路的放大倍数，实验三的电路即为本反馈电路的基本放大电路。

把实验值 A_u 与计算值 $F_{uu}=\dfrac{R_{e1}}{R_{e1}+R_f}$ 代入即得到反馈深度。

2、比较本实验中电压放大倍数 A_{uf} 的实验值、计算值 $A_{uf}=A_{uf}/(1+A_{u}F_{uu})$ 以及深度负反馈时的估算值。

3．比较实验三中基本放大器和本实验中负反馈放大器的实验数据，总结电压串联负反馈对放大器性能的影响。

（六）预习要求与思考题

1、预习电压串联负反馈放大器的原理与特点

2、复习实验三的基本放大器，基本放大电路是由负反馈放大电路去掉反馈但考虑了反馈网络的负载效应后得到的，观察它是怎样从实验四的反馈放大器中划分出来的。

3、如何将图 5-8 电路该接成电压并联、电流串联、电流并联三种负反馈形式？

实验五 差分放大电路

一、实验目的

1．熟悉差分放大电路工作原理。

2．掌握差分放大电路的基本测试方法。

二、仪器与设备

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

差分放大电路实验板

三、实验原理

差分放大电路是模拟电路基本单元电路之一，具有放大差模信号、抑制共模干扰信号和零点漂移的功能。具有恒流源的差分放大电路，应用十分广泛，特别是在模拟集成电路中，常作为输入级或中间放大级。本实验采用图 5-9 所示带恒流源的差分放大电路，三极管 T_1 和 T_2 为差分对管，以使电路高度对称，从而具有很高的共模抑制比，在要求不高的情况下，也可采用两只特性相近的三极管，通过调节 R_{P1} 而使电路尽可能对称。

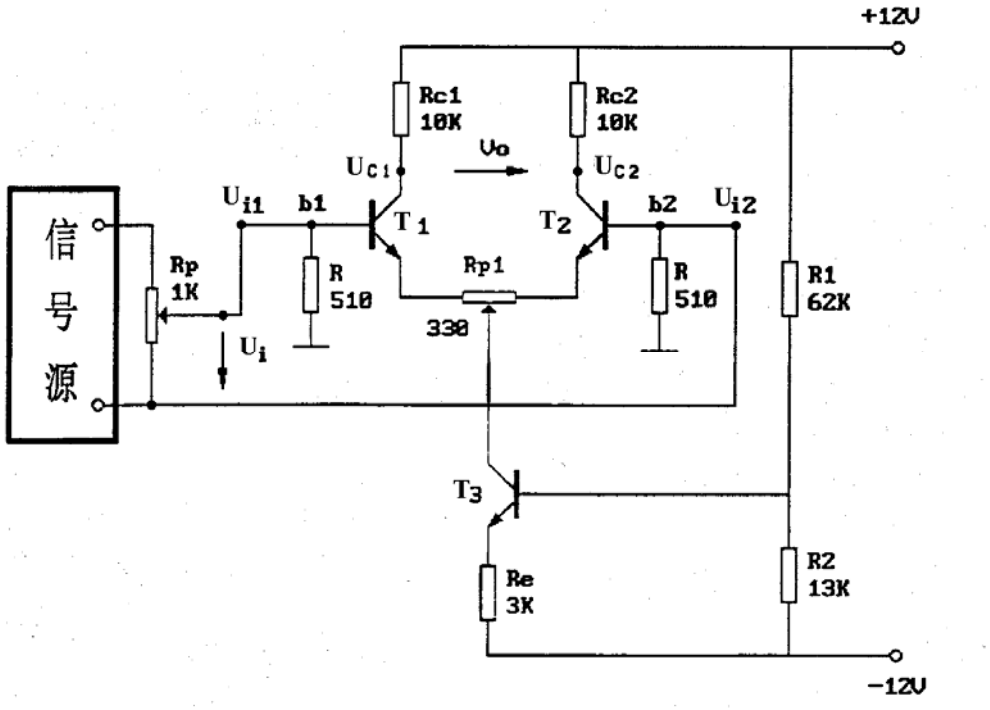


图 5-9 差分放大电路实验图

双端输出时，差模电压放大倍数：$A_{ud}=\dfrac{U_0}{U_{id}}=\dfrac{-\beta R_{C1}}{r_{be}+(1+\beta)R_{P1}/2}$

对典型差分电路，双端输出时，共模输出电压 $U_{oc}=0$，故 $A_{uc}=0$。

共模抑制比：$K_{CMR}=\dfrac{A_{ud}}{A_{uc}}\approx\infty$

单端输出时，差模电压放大倍数：$A_{ud1}=\dfrac{U_{01}}{U_{id}}=\dfrac{-\beta R_{C1}}{2\left[r_{be}+(1+\beta)R_{P1}/2\right]}$

共模电压放大倍数：$A_{uc1}=\dfrac{U_{0c1}}{U_{ic}}=\dfrac{-\beta R_{C1}}{r_{be}+(1+\beta)\left[2R_e+R_{P1}/2\right]}$

共模抑制比：$K_{CMR1}\approx\dfrac{r_{be}+2\beta R_e}{2\left[r_{be}+\beta R_{P1}/2\right]}$

对带有恒流源的差分电路，其共模放大倍数很小，可看做为零；共模抑制比很大，可看做无限大。

四．实验内容及步骤

实验电路如图 5-9 示

1．测量静态工作点，

（1）调零

将输入端短路并接地，接通直流电源，调节电位器 R_{pl} 使双端输出电压 $U_o=0$。

（2）测量静态工作点

测量 U_1、U_2、U_3 各极对地电压填入表 5-14 中

表 5-14

对地电压	U_{c1}	U_{c2}	U_{c3}	U_{b1}	U_{b2}	U_{b3}	U_{e1}	U_{e2}	U_{e3}
测量值									

2．测量差模电压放大倍数。

在输入端加入直流电压信号 $U_{id}=\pm0.1$V 按表 5-15 要求测量并记录，由测量数据算出单端和双端输出的电压放大倍数。注意：先将 DC 信号源 OUT1 和 0UT2 分别接入 U_{i1} 和 U_{i2} 端，然后调节 DC 信号源，使其输出+0.1V 和-0.1V。

3．测量共模电压放大倍数。

将输入端 b_1、b_2 短接，接到信号源的输入端，信号源另一端接地。DC 信号分先后接 0UTl 和 0UT2，分别测量并填入表 5-15。由测量数据算出单端和双端输出的电压放大倍数。进一步算出共模抑制比 $CMRR=\left|\dfrac{A_d}{Ac}\right|$。

表 5-15

测量及计算值 / 输入信号 U_i	差模输入						共模输入						共模抑制比
	测量值（V）			计算值			测量值（V）			计算值			计算值
	U_{c1}	U_{c1}	$U_{0双}$	$A_{d单}$	A_{d2}	$A_{d双}$	U_{c1}	U_{c1}	$U_{0双}$	$A_{d单}$	A_{d2}	$A_{d双}$	K_{CMR}
+0.1V													
-0.1V													

4．在实验板上组成单端输入的差放电路进行下列实验。

（1）在图 1 中将 b_2 接地，组成单端输入差分放大器，从 b_1 端输入直流信号 U=±0.1V，测量单端及双端输出，填表 5-16 计算单端输入时，单端及双端输出的电压放大倍数。并与双端输入时的单端及双端差模电压放大倍数进行比较。

表 5-16

测量及计算值 / 输入信号	电压值			电压放大倍数		
	U_{c1}	U_{c1}	U_0	$A_{d单}$	A_{d2}	$A_{d双}$
直流+0.1V						
直流-0.1V						
正弦信号（50mV、1kHz）						

（2）从 b_1 端加入正弦交流信号 U_i=0.05Ⅴ，f=1000Hz 分别测量、记录单端及双端输出电压，填入表 5-16 单端及双端的差模放大倍数。

（注意：输入交流信号时，用示波器监视 U_{c1}、U_{c2} 波形，若有失真现象时，可减小输入电压值，使 U_{c1}、U_{c2} 都不失真为止）。

五、实验报告要求

1．根据实测数据计算图 5-9 电路的静态工作点，与预习计算结果相比较。

2．整理实验数据，计算各种接法的 A_d，并与理论计算值相比较。

3．计算实验步骤 3 中 A_c 和 K_{CMR} 值。

4．总结差放电路的性能和特点。

六、预习要求与思考题

1．复习差分放大电路的工作原理，计算图 5-9 的静态工作点（设 r_{be}＝3K，β＝100）及电压放大倍数。

2．熟悉本实验内容和测试方法。

3．在图 5-9 基础上画出单端输入和共模输入的电路。

4．加入交流信号时，双端输出时，为什么不能用毫伏表跨接在两个输出端直接测双端输出电压？

5．为什么差动放大器既可以加交流信号，也可以加直流信号进行测试？

实验六 集成运算放大器的基本运算电路

一． 实验目的：

1．进一步理解运算放大器的基本原理，熟悉由运算放大器组成的比例、跟随、加法、减法、积分等基本运算。

2．了解运算放大器在实际应用中应注意的一些问题。

二．仪器与设备：

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

集成运放实验板

三．实验原理

集成运算放大器（简称运放）是一种高输入阻抗、低输出阻抗、高放大倍数且便于调试的优质放大器。集成运放内部电路通常由偏置电路、差动输入电路、中间放大电路、输出及过载保护电路组成。当它构成闭环负反馈放大电路时，其电压放大倍数只取决于外加电阻值的大小，与运放本身参数无关，安装调试十分简单。

在分析运放时，一般将它看成理想运放。我们认为理想运放的开环放大倍数为无穷大（A_u=∞），输入偏置电流为零，输入电阻为无穷大（R_i=∞），输出电阻为零（R_o=0）。

实验中常用运放为通用型运放 μA741、LM324 和低失调低温漂运放 OP07。μA741 和 OP07 为单运放，其引脚图如图 5-10。 LM324 是四运放集成电路，它采用 14 脚双列直插塑料封装，其引脚图如图 5-11 所示。它的内部包含四组形式完全相同的运算放大器，除电源共用外（也可单电源使用），四组运放相互独立。

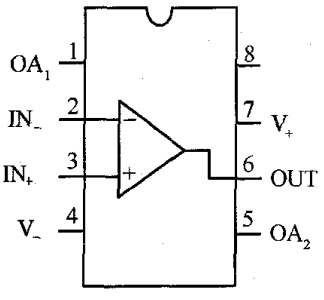


图 5-10 μA741、OP07 引脚图

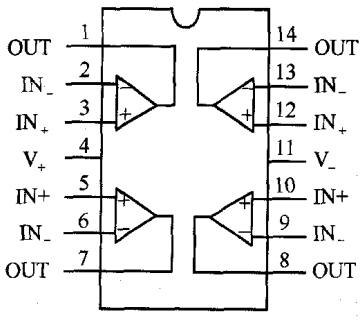
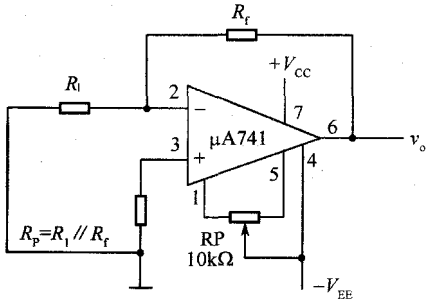


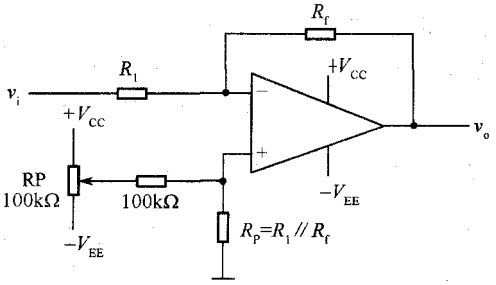
图 5-11 LM324 引脚图

集成运算放大器在需要放大含有直流分量信号的应用场合，必须进行调零，即对运放本身（主要是差分输入级）的失调进行补偿，以保证运放闭环工作后，输入为零时输出也为零。μA741 和 OP07 已经引出有补偿端，只需按照器件手册的规定接入调零电路即可，调零电路分别如图 5-12（a）所示。调零必须细心，千万不要使电位器的滑动端与地线或电源线相碰，否则会损坏运放。对于没有设调零端的运放，可参照图 5-12（b）（反相放大器调零电路）、

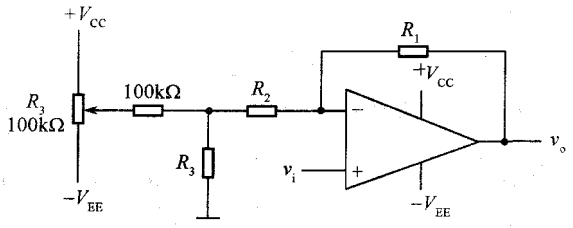
5-12（c）（同相放大器调零电路）所示的调零电路进行调零，*RP* 也可采用 10k 多圈电位器。调零时，将电路的输入端接地，用万用表直流电压档或示波器的 DC 耦合档接在电路的输出端，调节电位器，使输出为零。



（a）μA741 或 OP07 调零电路



（b）反相放大器调零电路



（c）同相放大器调零电路

图 5-12 常见的调零电路

运放构成的基本运算关系如下：

1．反相比例放大器

电路如图 5-13，放大电路的反馈形式为电压并联负反馈。

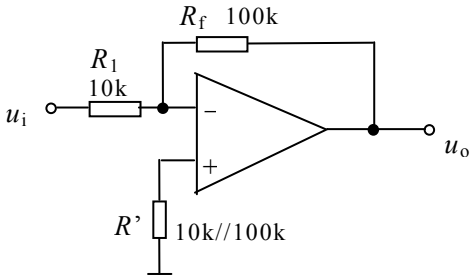


图 5-13 反相比例放大器

反向输入端为虚地点，同时有虚断，所以：

$$\frac{u_i}{R_1}=-\frac{u_o}{R_f} \qquad \text{得出：} \quad u_o=-\frac{R_f}{R_1}u_i$$

2．同相比例放大器

电路如图 5-14，放大电路的反馈形式为电压串联负反馈。

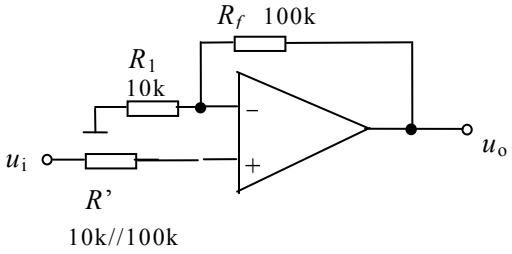


图 5-14 同相比例放大器

由虚短：$u_+ = u_- = u_i$；由虚断：$\dfrac{u_o - u_i}{R_f} = \dfrac{u_i}{R_1}$

所以：$u_o = (1 + \dfrac{R_f}{R_1})u$

3．电压跟随器

电路如图 5-15，由同相比例放大器，得$u_0 = u_i$。

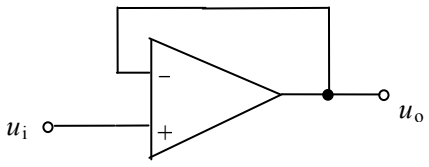


图 5-15 电压跟随器

4．反相求和电路

电路如图 5-16， 反相求和电路的函数关系为：$u_o = -(\dfrac{R_f}{R_1}u_{i1} + \dfrac{R_f}{R_2}u_{i2} + \dfrac{R_f}{R_3}u_{i3})$。

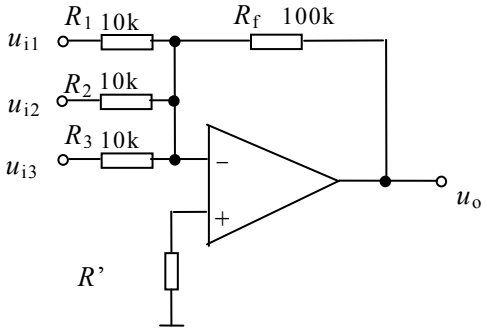


图 5-16 反相求和电路

5．双端输入求和电路

电路如图 5-17，双端输入求和的关系：$u_o = R_f(-\frac{u_{i1}}{R_1} - \frac{u_{i2}}{R_2} + \frac{u_{i3}}{R_3} + \frac{u_{i4}}{R_4})$。

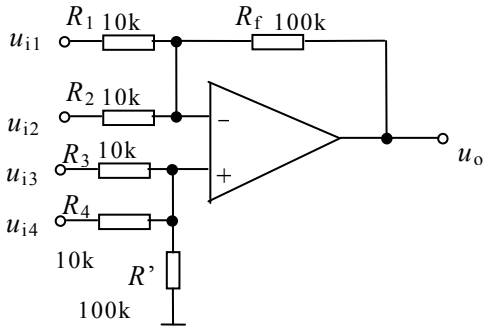


图 5-17 加减电路

6．积分运算电路

反相积分电路如图 5-18 所示。

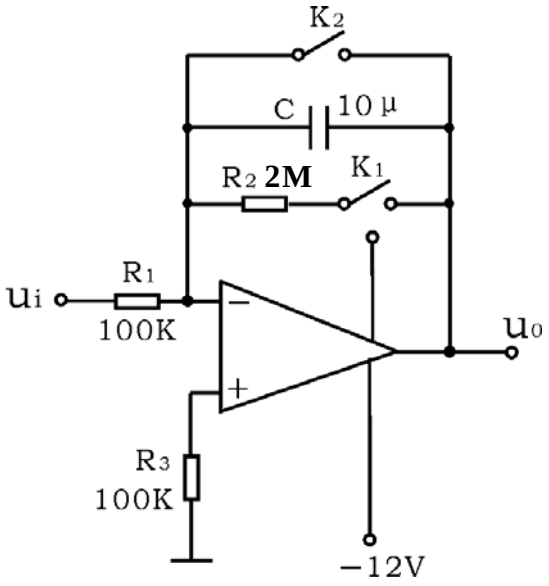


图 5-18 积分运算电路

在理想化条件下，输出电压 u_o 等于：$u_O(t) = -\frac{1}{RC}\int_0^t u_i(t)dt + u_C(0)$

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 U_i 的阶跃电压，并设 $u_C(o)=0$，则

$$u_O(t) = -\frac{1}{R_1C}\int_0^t U_i(t)dt = -\frac{U_i}{R_1C}t$$

即输出电压 $u_O(t)$随时间增长而线性下降。显然 R_1C 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。

7．微分运算电路

微分运算电路如图 5-18 所示。

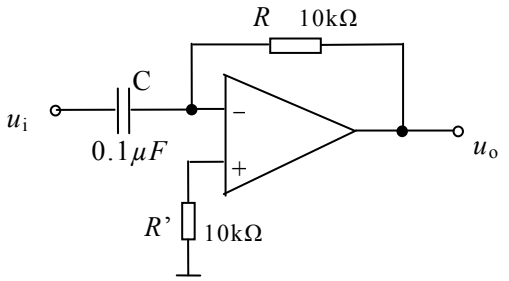


图 5-18　微分电路

输出电压等于：$u_O(t) = -RC\dfrac{du_i}{dt}$

输出电压与输入电压的变化率成比例。

在图 5-18 中也可与电容 C 串联一个电阻 R=100Ω，限制高频噪声和输入变突电压，以免运放堵塞而自锁，此时电路为近似微分电路。

四．实验内容及步骤

每个实验，必须先进行以下二项步骤：

（1）按电路图接线，检查并确保无误；

（2）调零：各输入端接地，调节调零电位器使输出电压为零（用数字万用表 200mV 档测量，若不能使输出电压为零，则要求输出电压的绝对值尽可能的小）。

1．反相比例放大器

（3）按图 5-13 接线。（1），（2）步按上述二项先行步骤进行。

（4）将反相输入端接直流信号源的输出端，调节直流信号源的输出电压 u_i，并测出相应的 u_o 值填入设计表 5-17，并与理论计算值比较。

2．同相比例放大器

（3）按图 5-14 接线，（1），（2）步按上述二项先行步骤进行。

（4）调 u_i，并测出相应的 u_o 值，填入设计表 5-18，并与理论计算值比较。

3．电压跟随器

（3）按图 5-15 接线。（1），（2）步按上述二项先行步骤进行。

（4）调 u_i，并测出相应的 u_o 值填入设计表 5-19，并与理论计算值比较。

4．反相求和电路

（3）按图 5-16 接线，（1），（2）步按上述二项先行步骤进行。

（4）输入各值，测出相应的 u_o 值填入设计表 5-20，并与理论计算值比较。

5．加减电路

（3）按图 5-17 接线，（1），（2）步按上述二项先行步骤进行。

（4）输入各值，测出相应的 u_o 值填入设计表 5-21，并与理论计算值比较。

6．积分运算电路

（1）按图 5-18 接线。

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 $u_C(0)=0$。

（2）对阶跃电压积分：

预先调好直流输入电压 $U_i=0.5V$，接入实验电路，再打开 K_2，然后用直流电压表测量输出电压 U_O，每隔 5 秒读一次 U_O，记入设计表 5-22，直到 U_O 不继续明显增大为止。

（3）对方波、正弦波积分：

将 R_1 和 R_3 改为 10kΩ，电容改为 0.1μF。

①重新调零后松开按钮，将输入端接频率为 160Hz，峰-峰 U_{ip-p} 为 2V 方波，用双踪示波器观察 U_o 和 U_i 的波形并记录表 5-23。

②将输入端接频率为 160Hz，有效值为 1V 的正弦波，用双踪示波器观察 U_o 和 U_i 的波形与相位差，记录波形，用毫伏表测量输出电压的有效值，填入表 5-23。

③改变正弦信号的频率（50Hz-300Hz），观察 U_o 和 U_i 的相位关系是否变化？U_o 和 U_i 的幅值比是否变化？

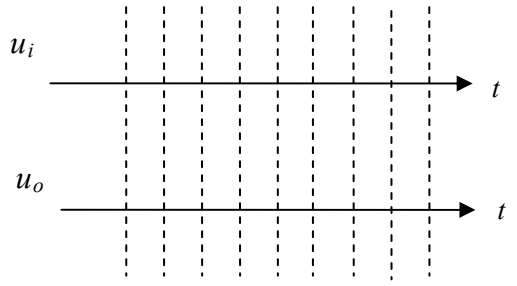
7．微分电路

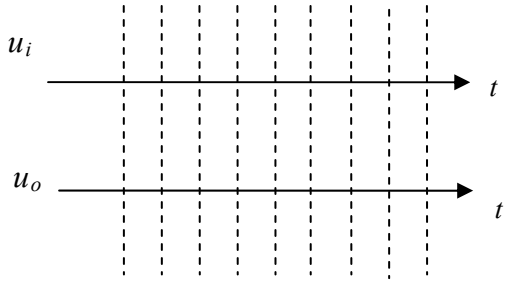
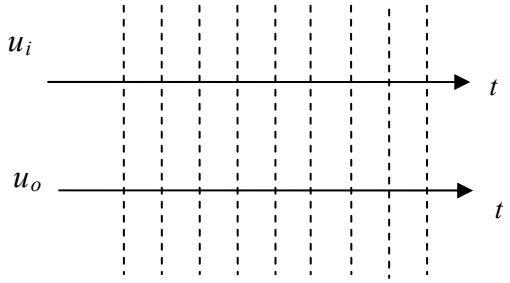
（1）按图 5-18 接线。

（2）输入端接频率为 160Hz，有效值为 1V 的正弦信号 u_i，用双踪示波器观察 u_o 与 u_i 的相位差，记录波形于表 5-23 中，并用毫伏表测量输出电压 u_o 的有效值。

（3）改变正弦波的频率（50Hz-300Hz），观察 u_o 与 u_i 的相位关系及幅度变化。

表 5-23

电路	输入	波形
积分电路	方波 U_i=2V（幅值） f=160Hz	

	正弦波 U_i=1V（有效值） f=160Hz		U_o（V）（有效值） =
微分电路	正弦波 U_i=1V（有效值） f=160Hz		U_o（V）（有效值） =

五．实验报告要求

整理各实验所测数据，将各部分所测结果与理论分析相比较。根据实验结果讨论思考题。

六、预习要求与思考题

1）分析图 5-12 到图 5-18 放大器的主要特点，求出各图中的理论计算值。

2）试说明比例、求和等运算电路中运放两输入端的外接电阻为什么要对称？

3）做比例、求和等运算电路实验时，如不先调零行吗？为什么？

4）比较反相求和电路与双端输入求和电路中集成运放的共模输入电压，试说明哪个电路的运算精度更高。

5）对于微分电路，若输入信号 u_i 为方波时，输出信号 u_0 是什么波形？若输入信号 u_i 为三角波时，输出信号 u_0 又是什么波形？

实验七 RC正弦波振荡器

一．实验目的

1、进一步学习文氏桥式振荡器的工作原理及选频网络的选频作用。

2、验证文氏桥式振荡器振荡条件。

二．仪器与设备

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

集成运放实验板

三、实验原理

图 5-19 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_f元件构成负反馈。调节电位器 R_f，可以改变负反馈深度，以满足振荡的振幅条件和改善波形。

电路的振荡频率 ： $f_0 = \dfrac{1}{2\pi RC}$

起振的幅值条件： $\dfrac{R_2 + R_f}{R_1} \geq 2$

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

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

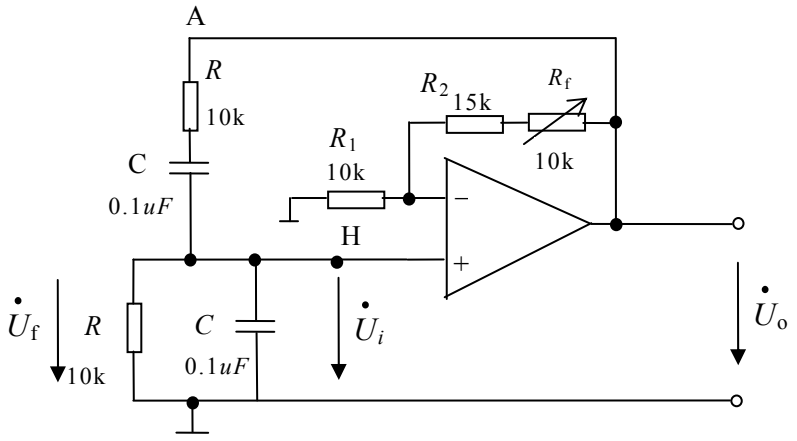


图 5-19 *RC* 桥式正弦波振荡器

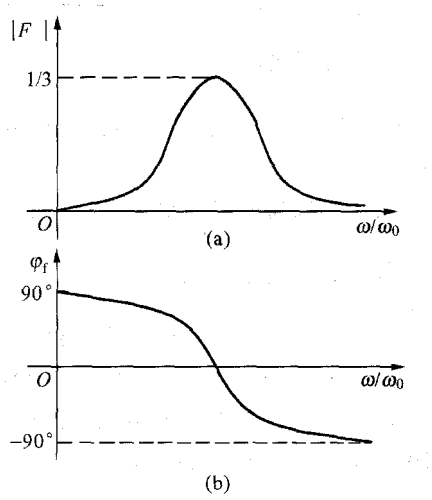
对 RC 串并联选频网络：$\dot{F}_u = \dfrac{\dot{U}_f}{\dot{U}_o} = \dfrac{1}{3 + j\left(\dfrac{\omega}{\omega_o} - \dfrac{\omega_o}{\omega}\right)}$，　　$\omega_o = \dfrac{1}{RC}$

幅频特性：$\left|\dot{F}_u\right| = \dfrac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\dfrac{\omega}{\omega_o} - \dfrac{\omega_o}{\omega}\right)^2}}$

相频特性：$\varphi_f = -arctan\dfrac{\dfrac{\omega}{\omega_o} - \dfrac{\omega_o}{\omega}}{3}$

当 $\omega = \omega_o$ 时，幅频特性的幅值最大：$\left|\dot{F}_u\right| = \dfrac{1}{3}$　，　$\varphi_f = 0^\circ$

幅频特性曲线和相频特性曲线如图 5-20。



（a）幅频特性　（b）相频特性

图 5-20　RC 串并联选频网络的频率特性

四、实验内容和步骤

1. 按图 5-19 接线，检查无误后通电实验。

2. 用示波器观察输出波形，调节 R_f 阻值，使不失真的正弦输出幅度达到最大值，测量以下各项，填入设计表 5-24。

（1）测量振荡频率，并与计算值相比较，f_o 可用示波器直接读出 。

（2）测量 $\dot{U}_i$、$\dot{U}_o$ 并计算负反馈放大器的放大倍数 Au_f 。

（3）关断电源并使 R_f 与振荡电路脱离后测量 R_f 的数值，计算放大器的放大倍数，

$A_{uf}=\frac{1}{F}=1+\frac{R_2+R_f}{R_1}$，将此值与上述 Au_f 比较，并验证是否满足 $A_{uf}\geq 3$ 的条件。

4、测量 *RC* 网络的幅频、相频特性。

从 A 点和输出断开，从 A 和地之间输入信号与步骤 2 测得的 U_o 的值相同，其信号与 U_o、U_f 用毫伏表测量，将数据记入设计表 5-25 内。

五．实验报告要求

1、总结文氏桥振荡器的振荡条件。

2、分析振荡器的稳幅条件。

3、绘出振荡器的幅频特性曲线，U_f 为纵轴，横轴采用 $20lgf/f_o$ 坐标。

六、预习要求与思考题

1、文氏桥式振荡器由几个部分组成？

2、振荡器中的正反馈支路由哪些元件组成？这个网络具有什么特性？改变哪个参数即可改变振荡器的频率？

3、振荡器中的负反馈网络由什么元件组成？怎样调节负反馈放大器的放大倍数？若 R_f 断开，该振荡器能否正常工作，会输出什么？

4、测量 $\dot{U}_i$ 时若发生停振现象，你认为是何原因引起的？应如何解决？

实验八 功率放大电路

一、实验目的

1、加深功率放大器的理解。

2、熟悉集成功率放大电路的特点。

3．掌握输出功率、效率的测试方法。

二、仪器及设备

SS7802A 型二踪示波器

HG2170 型晶体管毫伏表

GAG—809 型信号发生器

数字万用表

TPE—A5II 模拟实验箱

功率放大器实验板

三、实验原理

1．OTL 低频功率放大器

图 5-21 所示为 OTL 低频功率放大器实验电路。

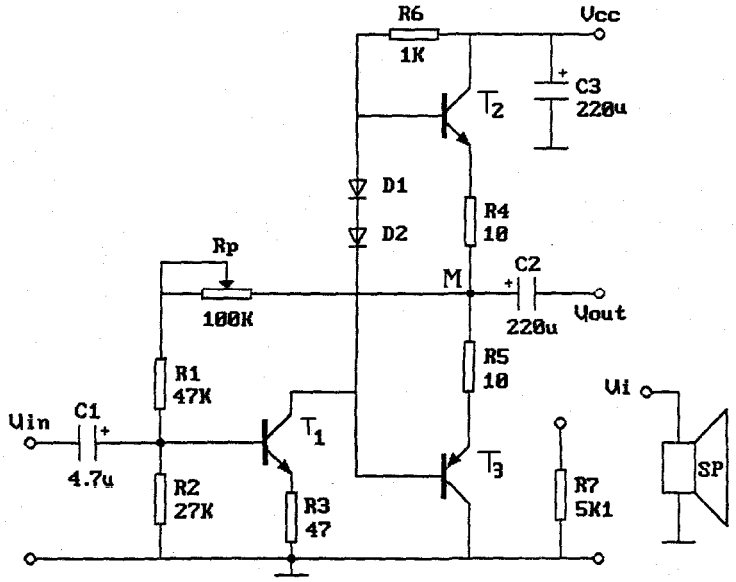


图 5-21 互补对称功率放大器

该电路是一个甲乙类单电源互补对称电路，其中由晶体三极管 T_1（9013）组成推动级（也称前置放大级），T_2（9013）、T_3（9012）是一对参数对称的 NPN 型和 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，适用于功率输出级。T_1 管工作于甲类状态，其集电极电流 I_{c1} 由电位器 Rp 进行调节。I_{c1} 的一部分流经二极管，给 T_1、T_2 提供偏压。调节 R_P 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 M 的

电位$U_M=\frac{1}{2}V_{CC}$，这可以通过调节 R_P 来实现。又由于 R_P 的一端接在 M 点，因此在电路中引入交、直流电压并联反馈，一方面能够稳定放大器的静态工作点，另一方面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 充电，在 u_i 的正半周，T_3 导通（T_2 截止），则已充好电的电容器 C 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。

OTL 电路的主要参数如下：

（1）最大不失真输出功率 P_{om}：

忽略饱和压降，理想情况下（$U_{om}=\frac{1}{2}V_{CC}$），OTL 互补对称功率放大电路最大输出功率：

$$P_{om}=\frac{I_{om}}{\sqrt{2}}\times\frac{U_{om}}{\sqrt{2}}=\frac{1}{2}\cdot\frac{V_{CC}}{2R_L}\times\frac{V_{CC}}{2}=\frac{V_{CC}^2}{8R_L}。$$

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）直流电源供给的平均功率 P_V：

理想情况下，电源一周内通过电流的平均值为：$I_{av}=\frac{1}{2\pi}\int_0^{\pi}\frac{V_{CC}}{2R_L}\sin\omega td(\omega t)=\frac{V_{CC}}{2\pi R_L}$

直流电源供给的平均功率：$P_V=V_{CC}\cdot I_{av}=\frac{V_{CC}^2}{2\pi R_L}$

（2）效率 $\eta=\frac{P_{om}}{P_V}\times100\%$，

理想情况下，$\eta=78.5\%$。在实际应用中，可测量电源供给的平均电流 I，从而求得 $P_V=V_{CC}\cdot I$，负载的交流功率已用上述方法求出，因而就可以计算实际效率了。

三极管管耗为：$P_T=P_V-P_{om}$

2．集成功率放大器

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。

实验电路如图 5-22 所示，本实验采用集成功放 LM386，其内部电路和引脚排列如图 5-23。

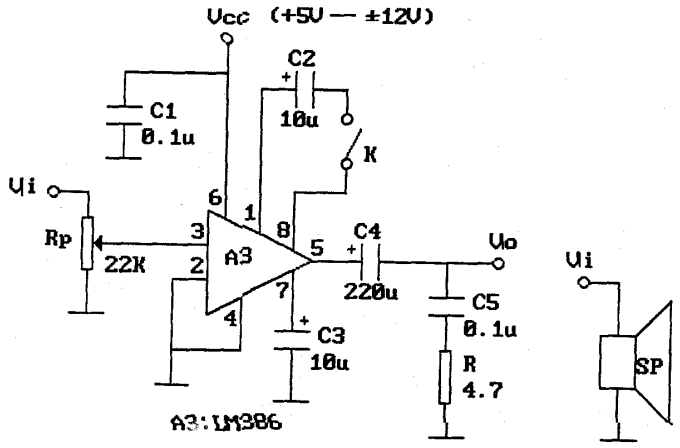


图 5-22 电路图

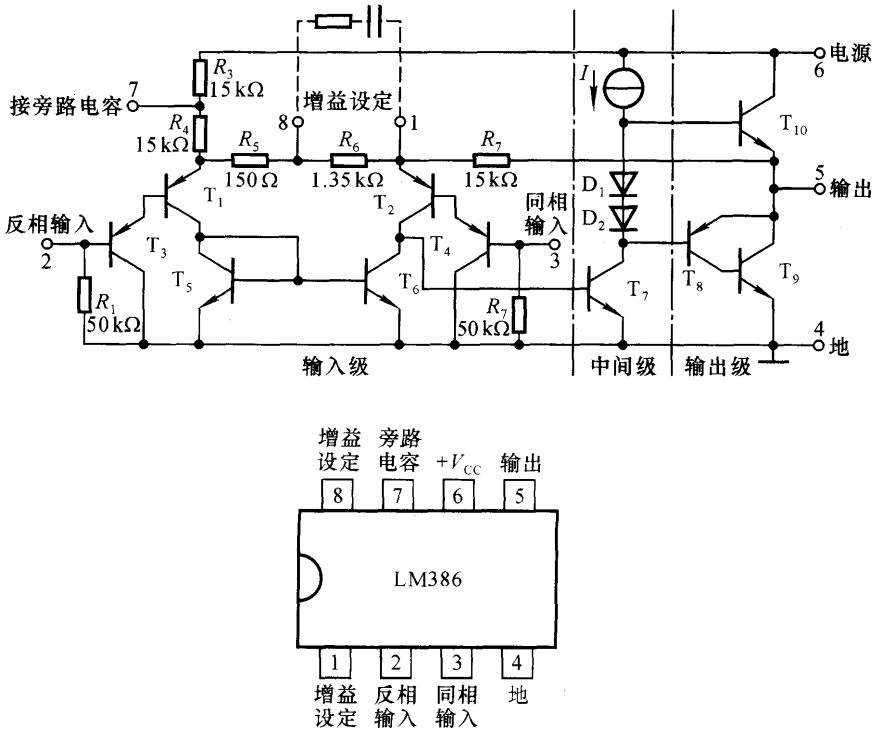


图 5-23 LM386 低压音频功率放大器内部电路及引脚排列

集成功放 LM386 的第一级为差分放大电路，T_1 和 T_3、T_2 和 T_4 分别构成复合管，作为差分放大电路的放大管；T_5 和 T_6 组成镜像电流源作为 T_1 和 T_2 的有源负载；信号从 T_3 和 T_4 管的基极输入，从 T_2 管的集电极输出，为双端输入单端输出差分电路。根据关于镜像电流源作为差分放大电路有源负载的分析可知，它可使单端输出电路的增益近似等于双端输出电路的增益。

第二级为共射放大电路，T_7 为放大管，恒流源作有源负载，以增大放大倍数。

第三级中的 T_8 和 T_9 管复合成 PNP 型管，与 NPN 型管 T_{10} 构成准互补输出级。二极管 D_1 和 D_2 为输出级提供合适的偏置电压，可以消除交越失真。

利用瞬时极性法可以判断出，引脚 2 为反相输入端，3 为同相输入端。电路由单电源供电，故为 OTL 电路。输出端（引脚 5）应外接输出电容后再接负载。

电阻 R_7 从输出端连接到 T_2 的发射极，形成反馈通路，并与 R_5 和 R_6 构成反馈网络，从

而引入了深度电压串联负反馈，使整个电路具有稳定的电压增益。

应当指出，在引脚 1 和 8（或者 1 和 5）外接电阻时，应只改变交流通路，所以必须在外接电阻回路中串联一个大容量电容。外接不同阻值的电阻时，电压放大倍数的调节范围为 20～200，即电压增益的调节范围为 26～46 dB，引脚 1 和 8 为电压增益设定端。使用时在引脚 7 和地之间接旁路电容，通常取 10μF。

四、实验内容和步骤

1．OTL 功率放大器的测量

1）调整图 5-21 的直流工作点，使 M 点电压为 0.5V_{CC}。

2）测量最大不失真输出功率与效率

接通信号源，使其输出 f=1kHz 的正弦波信号，接在电路的输入端。

输出端接 5.1kΩ 电阻，将示波器接在电路的输出端，调节信号源的幅度旋钮，当输出电压为最大不失真输出时，用毫伏表测量输入输出电压 U_i、U_0 电压。用直流毫安表(也可用数字万用表)测出电源电流 I，此电流即为直流电源供给的平均电流（有一定误差）。

测量放大电路在带 8Ω 负载（扬声器）时的功率和效率。

3）改变电源电压（例如由＋12V 变为＋6V），测量并比较输出功率和效率。

以上测量数据填入表 5-26。

表 5-26

条件		测量			计算		
		U_i（mV）	U_0（mV）	I（mA）	P_{om}（mW）	P_V（mW）	η
V_{CC}=12V	R_L=5.1k						
	R_L=8Ω						
V_{CC}=6V	R_L=5.1k						
	R_L=8Ω						

4）观察交越失真

调节信号源幅度，直至输出波形欲出现失真，将串联二极管两端短路，观察并绘制波形。

2．集成功率放大器的测量

1）按图 5-22 电路在实验板上插装电路。不加信号时（U_i=0），用万用表测静态工作电流。

2）在输入端接 1kHz 信号，幅度有效值为几十毫伏的正弦波信号，用示波器观察输出波形、逐渐增加输入电压幅度，直至出现失真为止。

用交流毫伏表测量输入电压、输出电压有效值，用数字万用表测量电源电压 V_{CC} 值和电源输入到集成功放的总电流的平均值 I，填入表格 5-27，并按表格内容计算。

3）去掉 10μF 电容，重复上述实验，实验数据填入表格 5-27。

4）改变电源电压（选 5V、9V 两档）重复上述实验，实验数据填入表格 5-27。

表 5-27

条件	测量			计算		
	U_{in}（mV）	U_o（V）	I（A）	P_{om}（W）	P_V（W）	η
V_{CC}（V）=12V，K 闭合						
V_{CC}（V）=12V，K 断开						
V_{CC}（V）=5V，K 闭合						
V_{CC}（V）=9V，K 闭合						

五、 实验报告要求

1、分析实验结果，计算实验内容要求的参数，与理论值比较。

2、总结功率放大电路特点及测量方法。

3、讨论实验中发生的问题及解决办法。

六. 预习要求及思考题

1、分析图 5-21 电路中各三极管工作状态及交越失真情况。

2、电路中若不加输入信号，T_2、T_3 的功耗是多少。

3、电阻 R_4，R_5 的作用是什么？

4．复习集成功率放大电路工作原理，对照图 5-23 分析电路工作原理。

5．在图 5-22 电路中，若 V_{CC}＝12V，R_L＝8Ω，估算该电路的 P_{om}、P_V 值。

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

七．注意

1．电源电压不能太高，需调整并测试为规定值后，才能接入电路，否则容易使 T_2、T_2 管子击穿。

2．电源电压不允许超过极限值，不允许极性接反， 否则集成块将遭损坏。

3．电路工作时绝对避免负载短路，否则将烧毁集成块。

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

5．输入信号不要过大。

实验九 有源滤波器的设计

一．实验目的

1．进一步理解有源滤波器的工作原理，学习几种有源滤波器的设计方法。

2．学习有源滤波器的调测方法和步骤。

二、实验仪器

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

集成运放实验板

三、实验原理

滤波器是一种只传输指定频段信号，抑制其他频段信号的电路。有源滤波器一般由集成运放与 RC 网络构成，它具有体积小、性能稳定等优点，同时，由于集成运放的增益和输入阻抗很高，输出阻抗很低，故有源滤波器还兼有放大与缓冲作用。利用有源滤波器可以突出有用频率的信号，衰减无用频率的信号，抑制干扰和噪声，以达到提高信噪比或选频的目的，因而有源滤波器被广泛应用于通信、测量及控制技术中的小信号处理。

从功能上有源滤波器分为低通滤波器（LPF）、高通滤波器（HPF）、带通滤波器（BPF）、带阻滤波器（BEF）和全通滤波器（APF）。前 4 种滤波器间互有联系，LPF 与 HPF 间互为对偶关系。当 LPF 的通带截止频率高于 HPF 的通带截止频率时，将 LPF 与 HPF 相串联，就构成了 BPF，而 LPF 与 HPF 并联，就构成 BEF。在实用电子电路中，还可能同时采用几种不同形式的滤波电路。滤波电路的主要性能指标有通带电压放大倍数 A_{up}、通带截止频率 f_o 及阻尼系数 α 等。

本实验对二阶有源低通滤波器和二阶有源高通滤波器的做一般设计。

1、二阶有源低通滤波器（二阶压控电压源 LPF）

典型的二阶有源低通滤波器电路如图 5-24（a）所示，其幅频特性如图（b）所示。电路特点是在组件前加了二阶 RC 低通网络，在阻带区能提供－40 dB / 十倍频程的衰减。电路的选频特性基本上取决于 RC 网络，电路还兼有同相放大功能，调节 R_F，R 即可调节电路增益。由于运算放大器在同相工作时输入端有较高的共模电压，故应选用共模输入电压较高的运算放大器。该滤波器有如下的关系式：

电压放大倍数：$\dot{A}_u = \dfrac{\dot{A}_{up}}{1-(\dfrac{f}{f_o})^2 + j\dfrac{1}{Q}\dfrac{f}{f_o}}$

其中：Q 称为品质因数，取 $\alpha = \dfrac{1}{Q}$，称为阻尼系数，

阻尼系数：$\alpha=\frac{1}{Q}=\sqrt{\frac{R_2C_2}{R_1C_1}}+\sqrt{\frac{R_1C_2}{R_2C_1}}+\sqrt{\frac{R_1C_1}{R_2C_2}}\left(1-A_{up}\right)$

当 $f=f_o$，$\left|\dot{A}_u\right|=Q\left|\dot{A}_{up}\right|$，则 Q 是 $f=f_o$ 时的电压放大倍数与通带放大倍数之比。

通带电压放大倍数：$A_{up}=1+\frac{R_F}{R}$

特征频率：$f_o=\frac{1}{2\pi\sqrt{R_1R_2C_1C_2}}$

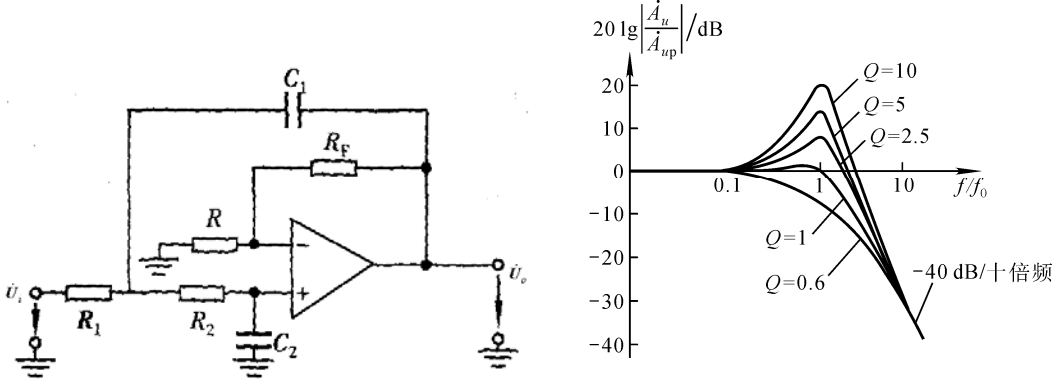
比例常数：$K=\frac{C_2}{C_1}$

由阻尼系数、特征频率和比例常数公式，得：

$$R_2=\frac{\alpha}{2K\omega_oC_1}\left[1+\sqrt{1+\frac{4\left(A_{up}-1-K\right)}{\alpha^2}}\right]$$

$$R_1=\frac{1}{KR_2\omega_o^2C_1^2}$$

比例常数 K 的取值应满足条件：$K\le A_{up}-1+\frac{\alpha^2}{4}$。



(a)　　(b)

图 5-24　二阶有源低通滤波器电路和幅频特性

由以上关系式可知，二阶有源低通滤波器的性能主要由 Q（α）和 f_o 决定。在 f_o 处，改变 Q 值，将影响滤波器在 f_o 处附近的形状，当 $Q=\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时，$\left|\dot{A}_u\right|=0.707\left|\dot{A}_{up}\right|$，此时 f_o 也为截止频率；当 $Q>1$ 时，在 f_o 处产生凸峰，截止频率大于特征频率，曲线按-40dB/十倍频下降。见图 5-24（b）。当 $Q=\frac{1}{\sqrt{2}}$ 时的滤波器称为巴特沃思滤波器，其特点是通带幅频特性平坦；当 $Q=0.56$ 时的滤波器称为贝塞尔滤波器，过渡特性最好；当 $Q=1$ 时的滤波器称为切比雪夫滤波器，其在 f_o 截止特性最好，曲线的衰减斜率最陡。在设计滤波电路时，应根据主要技术

指标选择相应的电路形式，然后计算电路元件参数，并反复进行校核和试验。

例 1　已知 A_{uP}，ω_o 和 Q（α），设计二阶有源低通滤波器步骤如下：

① 选定电容比例常数 K，K 一般取整数，如 1，2，3 等，且满足条件 $K \le A_{up} - 1 + \frac{\alpha^2}{4}$。

② 选择电容 C_1。在滤波器设计中，常有各类图表及元件参数的参考值可供查阅，如当 A_{up}＜10 时，即可根据特征频率与 C_1 的对应关系从下表初选 C_1 值。

表 5-28　频率 f_o 与电容 C 的对应范围

f_o/Hz	C/μF	f_o/Hz	C/μF
1~10	20~1	10^3~10^4	10^4~10^3
10~10^2	1~0.1	10^4~10^5	10^3~10^2
10^2~10^3	0.1~0.01	10^5~10^6	10^2~10

③ 按关系式计算 RC 网络各元件值

$$C_2 = KC_1$$

$$R_2 = \frac{\alpha}{2K\omega_o C_1}\left[1 + \sqrt{\frac{4\left(A_{up} - 1 - K\right)}{\alpha^2}}\right]$$

$$R_1 = \frac{1}{KR_2\omega_o^2 C_1^2}$$

④ 计算反馈网络 R，R_F 值

$$\because R_1 + R_2 = R_f \,//\, R_F,$$

$$A_{uP} = 1 + \frac{R_F}{R}$$

$$\therefore R_F = A_{uP}\left(R_1 + R_2\right),$$

$$R = \frac{R_F}{A_{uP} - 1}$$

⑤ 根据计算出的元件参数值选择元件。应按标称值选用，同时校核是否满足 ω_o 的指标要求，若不满足，须重新设计一组参数。

⑥ 校核选用的运算放大器，检查放大器的开环直流增益 A_o 以及增益带宽积 $A_o\omega_o$ 是否满足要求（在运放中，增益带宽积基本为一常数）。

2．二阶有源高通滤波器（二阶压控电压源 HPF）

高通滤波器用于通过高频信号，抑制或衰减低频信号（或直流成分）。将图 5-24（a）中的 R 与 C 互换，即成为二阶有源高通滤波器电路，如图 5-25 所示。它能在阻带区提供 40dB / 十倍频程的正斜率。在二阶有源高通滤波器中，有如下关系式：

电压放大倍数：$\dot{A}_u = \dfrac{\dot{A}_{up}}{1 - (\dfrac{f_o}{f})^2 + j\dfrac{1}{Q}\dfrac{f_o}{f}}$，$Q$ 称为品质因数。

通常取：$C_1 = C_2 = C$，

通带放大倍数：$A_{up} = 1 + \dfrac{R_F}{R}$

特征频率：$f_o = \dfrac{1}{2\pi C\sqrt{R_1 R_2}}$

阻尼系数：$\alpha = \dfrac{1}{Q} = 2\sqrt{\dfrac{R_1}{R_2}} + \left(1 - A_{up}\right)\sqrt{\dfrac{R_2}{R_1}}$

由阻尼系数和特征频率公式，得：

$$R_1 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8\left(A_{uP} - 1\right)}}{4C\omega_0}$$

$$R_2 = \frac{1}{\omega_o^2 C^2 R_1}$$

同理，二阶有源高通滤波器的性能主要由 Q（α）和 f_o 决定。

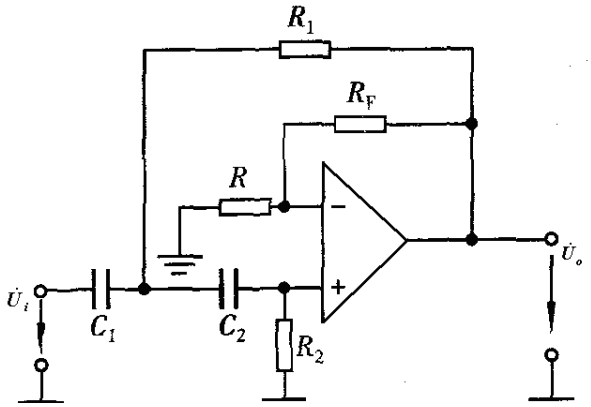


图 5-25 二阶有源高通滤波器电路图

例 2 已知 A_{up}，ω_o 和 Q（α）值，其设计步骤如下：

① 已知 ω_o，从相应表格中初选电容 $C_1 = C_2 = C$ 的值。

② 按关系式计算 R_1，R_2 值：

$$R_1 = \frac{\alpha + \sqrt{\alpha^2 + 8\left(A_{uP} - 1\right)}}{4C\omega_0}$$

$$R_2 = \frac{1}{\omega_o^2 C^2 R_1}$$

③ 计算反馈网络 R，R_F 值

由 $A_{up}=1+\frac{R_F}{R}$，$R_2=R\ //R_F$，

得：$R_F=\frac{R_2}{R_2(A_{up}-1)+1}$ ，$R=\frac{R_F}{A_{up}-1}$

以下校核步骤与二阶有源低通滤波器相同。

四、实验内容及步骤

1.（1）设计一个二阶有源低通滤波器。已知 A_{up}＝10，f_o＝1000 Hz，$\alpha=\frac{1}{\sqrt{2}}$，计算并选择滤波元件 R_1，R_2，C_1，C_2 及反馈元件 R、R_F 的值。

（2）设计一个二阶有源高通滤波器。A_{up}＝2，f_o＝100 Hz，$\alpha=\frac{1}{\sqrt{2}}$，$C_1$＝$C_2$=0.1μF，计算并选择滤波元件 R_1，R_2 及反馈元件 R，R_F 的值。

2．按照所设计的实验电路图在实验箱上进行接插元件。按要求连接正、负电源，并用数字式万用表核对集成运放电源，使 V_{CC}＝±12V。

3．接通电源，使输入端 U_i（对地短路），对运放进行调零。

4．送入 U_i=1V 的交流正弦信号，在 20 Hz～200 kHz 范围内改变信号源频率。用示波器监视输出波形，用交流毫伏表测量输出电压 U_o（在 f_o 附近多测一些点，改变信号源频率时要保持 U_i 不变）。观察电路是否具有高通特性或低通特性，并记录相应的频率及输出电压幅值；并绘制出电路的幅频特性；并在幅频特性图中找出 f_o 的准确值。

5．参照上述实验原理和步骤，查资料自行设计一带阻滤波器，要求画出实验电路图，自拟实验步骤和表格，实际测出电路中心频率，同时以实测中心频率为中心，测量并画出电路的幅频特性。

五、实验报告要求

1．整理实验数据和波形，列表填写。

2．用坐标纸绘出实验电路的幅频特性曲线，找出 f_o 的值。

3．将实验数据与计算值对比，若有差异，分析其原因。

六、预习要求及思考题

1．复习教材中有源低通滤波器及有源高通滤波器的工作原理和主要性能。

2．阅读本实验全部内容。

3．在二阶高通滤波器中，要使滤波器增益保持到较高频率，应怎样选择所用运算放大器的带宽？

4．有源滤波电路与无源滤波电路各有哪些优缺点？

实验十　电压比较器的设计

一．实验目的

1．进一步理解由集成运算改大器组成的电压比较器的工作原理。

2．掌握电压比较器的电路的构成及特点。

3．学习自行设计和调试电压比较器的方法。

二．仪器与设备

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

集成运放实验板

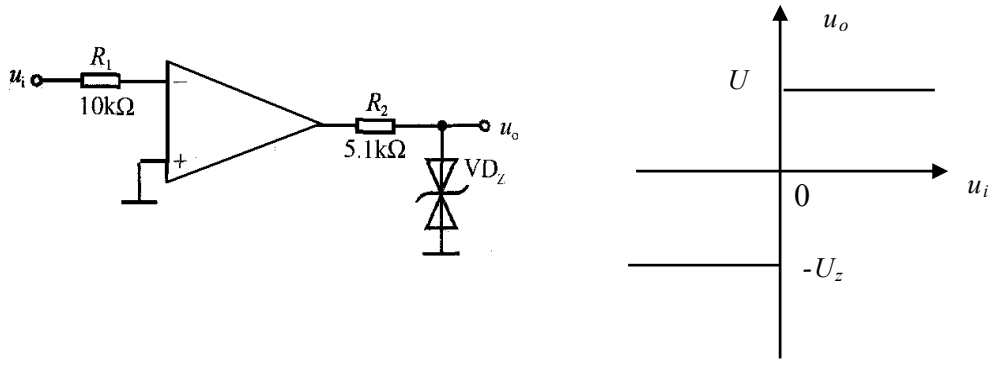
三．实验原理

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

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

1．过零比较器。电路如图 5-26 所示，为加限幅电路的过零比较器，VDz 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 $u_o=-U_Z$，当 $u_i<0$ 时，$u_o=+U_Z$。其电压传输特性如图 5-26（b）所示。

过零比较器结构简单，灵敏度高，但抗干扰能力差。



（a）　　（b）

图 5-26 过零比较器及电压传输特性

2．滞回过零比较器

过零比较器在实际工作时，如果 u_i 恰好在过零值附近，则由于零点漂移的存在，u_o 将不

断由一个极限值转换到另一个极限值，这在控制系统中，对执行机构将是很不利的。为此，就需要输出特性具有滞回现象。如图 5-27 所示，从输出端引一个电阻分压正反馈支路到同相输入端，若 u_o 改变状态，同相输入端也随着改变电位，使过零点离开原来位置，阈值电压为 $\pm U_T = \pm \dfrac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_Z$，则当 $u_i > +U_T$ 后，u_o 由 $+U_Z$ 变为 $-U_Z$，故只有当 u_i 下降到 $-U_T$ 以下，才能使 u_o 再度回升到 U_Z，于是出现图 5-27（b）中所示的滞回特性。$-U_T$ 与 $+U_T$ 的差别称为回差，改变 R_2 的数值可以改变回差的大小。

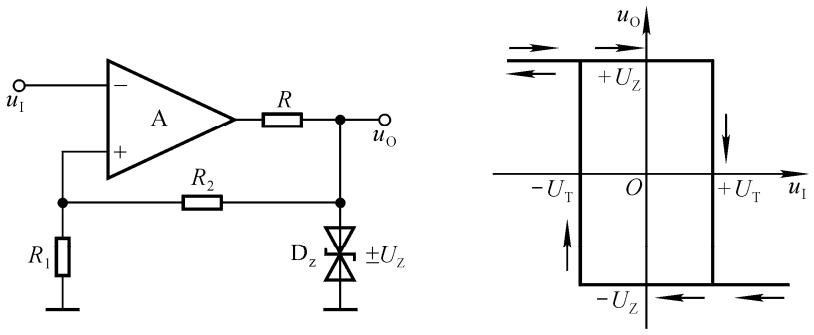


图 5-27 滞回比较器及其电压传输特性

3．窗口（双限）比较器

窗口（双限）比较器是由两个简单比较器组成，双限比较器及其电压传输特性如图 5-28 所示。

当 $u_I \rangle U_{RH} : u_{O1} = U_{OH}, u_{O2} = U_{OL}$，D1 通，D2 止，$u_O = U_{OH}$；

当 $u_I \langle U_{RL} : u_{O1} = U_{OL}, u_{O2} = U_{OH}$，D1 通，D2 止，$u_O = U_{OH}$；

当 $U_{RL} \langle u_I \langle U_{RH} : u_{O1} = U_{OL}, u_{O2} = U_{OH}$，$D_1$ 及 D_2 止，$u_O = 0$。

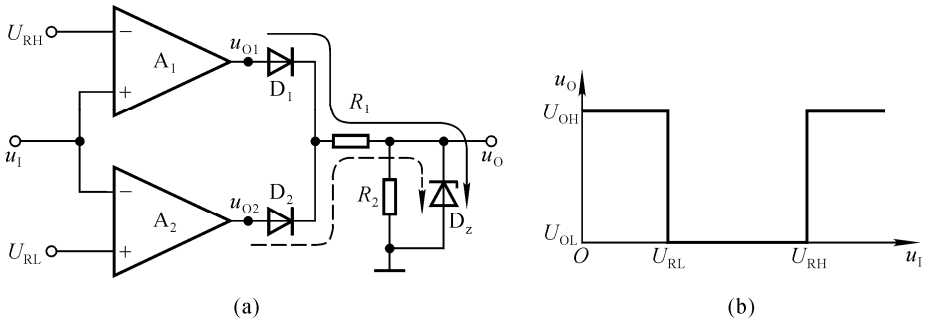


图 5-28　双限比较器及其电压传输特性

四．内容和步骤

1．过零电压比较器

（1）。反相输入过零电压比较器

实验电路如图 5-26 所示。

A．输入端悬空，用数字万用表测量 u。的值。

B．正弦信号 U_i=1V，f＝500 Hz，信号从反相端输入，观察输入与输出电压波形的相位关系，测量输出信号电压的幅值，绘制波形图。

C．改变正弦信号电压的幅值、观察输出信号电压的变化。

（2）、同相输入过零电压比较器

自行设计同相输入过零电压比较器（带限幅的），正弦信号信号 U_i=1V，f＝500 Hz，且信号从同相端输入，观察输入与输出电压波形的相位关系，测量输出信号电压的幅值，绘制波形图。

2、滞回电压比较器：

（1）、反相输入滞回电压比较器

实验参考电路如图 5-27 图所示，自己设计 R_1、R_2 的值。

A．正弦信号 U_i=1V，f＝500 Hz，信号从反相端输入，观察输入与输出电压波形的相位关系，测量输出信号电压的幅值，绘制波形图。

B．u_i 接 DC 电压源，分别测出 u_o 由$+U_Z \sim -U_Z$ 以及由$-U_Z \sim +U_Z$ 时，u_i 的临界值。

C．画出反相输入滞回电压比较器的电压传输特性。

（2）、同相输入滞回电压比较器

自行设计同相输入滞回电压比较器的电路及实验步骤，正弦信号 U_i=1V，f＝500 Hz，且信号从同相端输入，观察输入与输出电压波形的相位关系，且用示波器测量输出信号电压 u_o 的幅值，分别绘制输入与输出电压的波形图。并绘制该电路的电压传输特性曲线图。

2、窗口电压比较器

自己设计一窗口比较器电路．自行拟定实验步骤，要求画出电路图，测出门限电压，并绘制其电压传输特性曲线图（参考电路如图 5-28）。

五．实验报告要求

1．整理实验数据，列表填入。

2．说明自行设计的电压比较器的原理，画出其实验电路及其传输特性曲线。

3．将实验数据与计算值比较，若有误差，分析其原因。

六．预习要求及思考题

1．预习比较器的原理。

2．设计实验内容要求设计的电路。

3．比较器是否需要调零和消振？为什么？

4．能否用交流毫伏表直接测量非正弦波形的电压幅值？

5．如何提高简单电压比较器的灵敏度和抗干扰性能？

实验十一　电压/频率及电流/电压转换电路设计

一．实验目的

1．学习电压—频率、电流—电压转换电路的工作原理及设计方法；

2．学习电路参数的调整方法。

二．仪器与设备

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）2 块（或毫安衰一块，电压衰一块）

模拟实验箱（TPE—A 型）

集成运放实验板

三．实验原理

1．电压/频率转换电路（Voltage Frequency Convelter，VFC）：其功能是将输入直流电压转换成频率与其数值成正比的输出电压，故称为电压控制振荡电路（Voltage Controlled Oscillator，VCO），简称压控振荡电路。可以认为电压—频率转换电路是一种模拟量到数字量的转换电路。压控振荡器的用途较广。为了使用方便，一些厂家将压控振荡器做成模块，有的压控振荡器模块输出信号的频率与输入电压幅值的非线性误差小于 0.02%，但振荡频率较低，一般在 100Kz 以下。

实验参考电路如图 5-29 所示，运算放大器接±12V 电源：该电路实际上为典型的 V－F 转换电路。

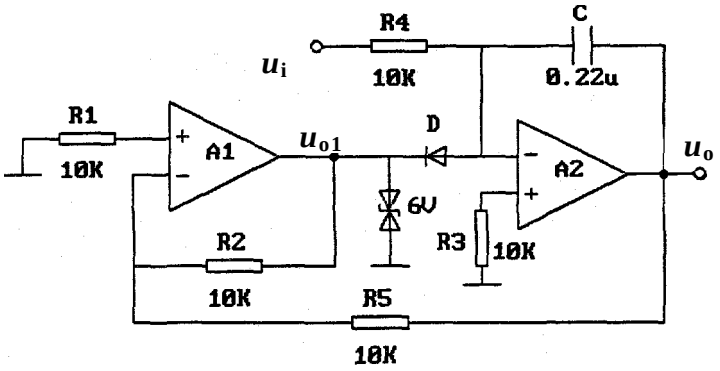


图 5-29 电压频率转换电路

当输入信号为直流电压时 U_i，输出 u_o 将出现与其有一定函数关系的频率振荡波形（锯齿波）。通过改变输入电压 u_i 的大小来改变波形频率，从而将电压参量转换成频率参量。

2．电流—电压转换电路

电流—电压转换电路的参考电路见图 5-30。该电路输入几 mA～几十 mA 的电流源，可输出±10V 的电压信号。

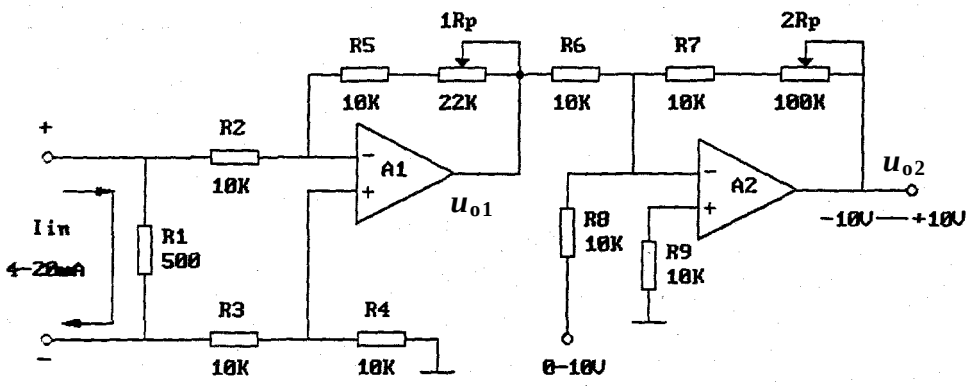


图 5-30 电流—电压转换电路

四、实验内容与步骤

1．电压－频率转换电路

（1）分析电路 5-29 的工作原理。

（2）按图 5-29 接线，用示波器监视 u_o 波形。按表 5-29 内容，测量电压—频率转换关系。可先用示波器测量频率。

（3）电阻 R_4 和 R_5 的阻值如何确定？当要求输出信号幅值为 $12V_{P\text{-}P}$，输入电压值为 3V，输出频率为 3000Hz，计算电阻 R_4 和 R_5 的值。

表 5-29

u_i（V）	0	1	2	3	4	5
f（Hz）						

2．电流—电压转换电路

（1）分析电路 5-30 的工作原理。

（2）按实验箱面版图，设计一个能产生 4mA～20mA 电流的电流源（提示：利用可调电源 317L 电路单元串接适当电阻）。画出电路实际接法。

（3）在工业控制中需要将 4mA～20mA 的电流信号转换成±10V 的电压信号，以便送到计算机进行处理。这种转换电路以 4mA 为满量程的 0%对应-10V；12mA 为 50%对应 0V；20mA 为 100%对应＋10V。调整输入电流，测量输出电压，满足这一要求。将测量结果记入表 5-30。

表 5-30

I_i（mA）	0	2	4	8	12	16	20
u_{o1}（V）							
u_{o2}（V）							

五、实验报告要求

1．分析实验原理。

2．做出电压（输入）—频率（输出）关系曲线。

3．做出电流（输入）—电压（输出）关系曲线。

六．预习要求与思考题

1．分析电路图 5-29、5-30 的工作原理

2．根据工作原理选择图中元器件参数。

3．设计调试方法和步骤。

4．指出图 5-29 电路中电容 C 的充电和放电回路。

5．按本实验思路设计一个电压／电流转换电路，将±10V 电压转换成 4mA～20mA 电流信号。试分析并画出电路图。

实验十二 直流稳压电源综合实验

一、实验目的

1．掌握和比较单相半波、全波、桥式整流电路。

2．观察电容滤波作用。

3．掌握分立元件稳压电路、集成稳压电路原理及其测试方法

二、仪器及设备

二踪示波器（SS7802A 型）

晶体管毫伏表（HG2170 型）

信号发生器（GAG—809 型）

数字万用表（UT50 型）

模拟实验箱（TPE—A 型）

稳压电源实验版

三、实验原理

1．半波整流

电路如图 5-31 所示。

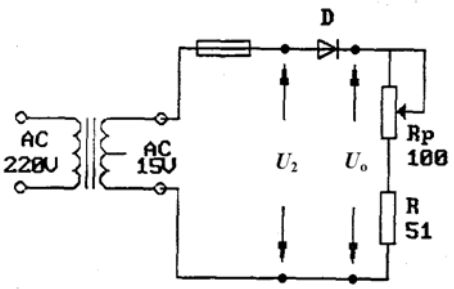


图 5-31 半波整流电路

整流输出电压的大小以其平均值表示，设输出的半波电压 u_o，在一周期内的平均值为 U_0，等于输入的交流电压（即变压器次级电压）有效值的 0.45 倍。

$$U_0 = 0.45U_2$$

通过负载的直流电流为

$$I_0 = \frac{U_0}{R_L} = 0.45\frac{U_2}{R_L}$$

通过二极管的正向电流等于通过负载的电流，即

$$I_D = I_0$$

二极管截止时所承受的最大反向电压等于变压器次级电压的幅值，即

$$U_{DRM} = \sqrt{2}U_0 = 1.41U_0$$

2．桥式全波整流电路

电路如图 5-32 所示。

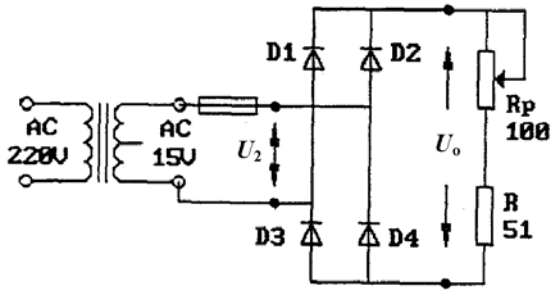


图 5-32 桥式全波整流电路

全波整流输出的直流电压为半波整流的两倍，即

$$U_0 = 0.9U_2$$

通过负载的直流电流平均值为

$$I_0 = 0.9\frac{U_2}{R_L}$$

由于每个周期内，D_1、D_4 串联与 D_2、D_3 串联各轮流导通半周，所以每个二极管中流过的平均电流只有负载电流的一半，即

$$I_D = \frac{1}{2}I_0$$

二极管截止时，每个二极管承受的最高反向电压就是变压器次级交流电压 u_2 的最大值 U_{2m}，即

$$U_{DRM} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2$$

I_D 和 U_{DRM} 是选择整流二极管的主要依据。

3．电容滤波电路

电路如图 5-33 所示。

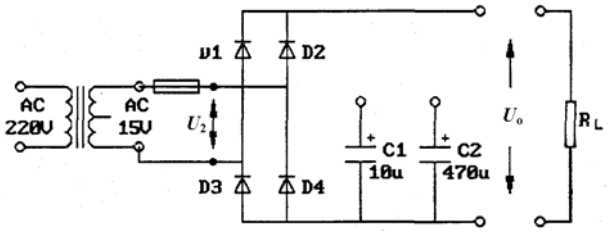


图 5-33　电容滤波电路

整流电路并联滤波电容 C 后输出电压的脉动程度大大减少，而且输出电压平均值 U_0 提高了。在同样电容情况下，R_L 愈大，电容放电愈慢，当 R_L 趋于∞时，$U_0 = \sqrt{2}U_2$。随着 R_L 减小，放电加快，U_0 减小，U_0 的最小值为 0.9 U_2。在整流电路的内阻不太大和时间常数比较大的情况下，工程上常取：

$$U_0 = 1.2\ U_2$$

流过二极管的平均电流：

$$I_D = \frac{1}{2} I_O \approx \frac{1.2U_2}{2R_L}$$

每只二极管承受的最大反向电压为：

$$U_{DRM} = \sqrt{2}U_2$$

4．稳压管稳压电路

电路如图 5-34 所示。

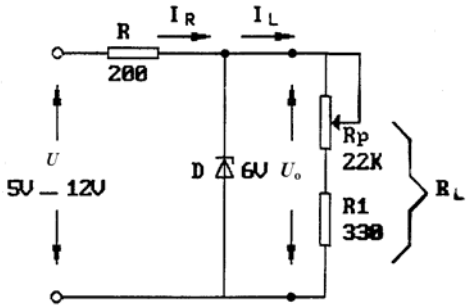


图 5-34 稳压管稳压电路

稳压电路由稳压管 D 和限流电阻 R 组成，限流电阻用以保护稳压管，同时二者配合起稳压作用。稳压电路接在滤波电路之后，稳压电路的输入电压 U 是整流滤波电路输出的直流电压，而稳压电路的输出电压 U_0 即稳压管的稳定电压 Uz。

稳压电路的工作原理：当交流电网电压升高引起输入电压 U 升高时，输出电压 U_0 也将升高。由稳压管特性曲线可知，当 U_0 稍有增加时，稳压管的工作电流就显著增大。这时，电路电流增大，在电阻 R 上的压降也增大，以抑制输出电压的升高，从而使输出电压 U_0 基本上保持不变。反之，当电网电压波动引起 U 降低时，通过稳压管与电阻 R 的调节作用，电阻 R 上的压降将减小，同样使 U_0 基本上保持不变。同理如果电网电压不变而负载发生变化时，该电路也能起稳压作用。

5．分立元件串联稳压电路

实验原理图如图 5-35 所示，在图中 T_1 和 T_2 为复合管，T_3 为比较管，R_L 为负载电阻，稳压管 D 为基准电压标准。R_3 为稳压管提供电流，R_4、R_P、R_5 为取样电阻，R_2 为分流电阻，可提供温度稳定性，电容 C 有防止自激及一定的滤波作用。

当电源或负载变动而使 U_0 降低时，由于取样电阻分压作用使 T_3 基极电压降低，则 T_3 集电极电位升高，而 T_3 集电极同 T_2 基极相接，从而导致 T_1 管压降减少，使输出电压有所回升，使 U_0 得到补偿。反之 U_0 升高时，T_1 管压降增大，使 U_0 减少，从而保证输出电压基本稳定。

输出电压：$U_0 = \dfrac{R_4 + R_P + R_5}{R_5}(U_Z + U_{BE})$

最大值：$U_{0max} = \dfrac{R_4 + R_{Pmax} + R_5}{R_5}(U_Z + U_{BE})$

最小值：$U_{0min} = \dfrac{R_4 + R_5}{R_5}(U_Z + U_{BE})$

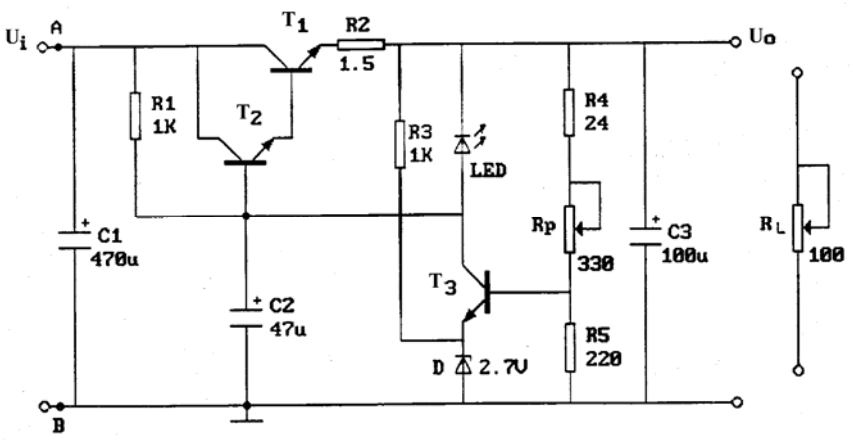


图 5-35 串联稳压电路

6．三端集成稳压器

W7800、W7900 系列三端式集成稳压器的输出电压是固定的，在使用中不能进行调整。W7800 系列三端式稳压器输出正极性电压，一般有 5V、6V、9Ⅴ、12V、15V、18V、24V 七个挡位，输出电流最大可达 1.5A（加散热片）。同类型 78M 系列稳压器的输出电流为 0.5A，78L 系列稳压器的输出电流为 0.1A。若要求负极性输出电压，则可选用 W7900 系列稳压器，

图 5-36 为 W7800 系列的外形和接线。

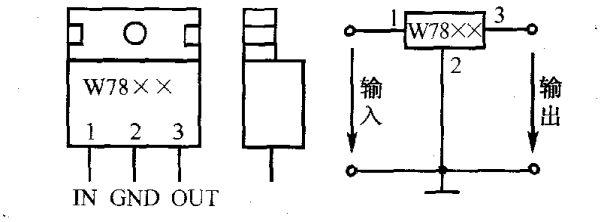


图 5-36　W7800 系列稳压器外形及接线

它有 3 个引出端为：

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”。

当集成稳压器本身的输出电压或输出电流不能满足要求时，可通过外接电路来进行性能扩展。

除固定输出三端稳压器外，尚有可调式三端稳压器。图 5-37 为可调输出正三端稳压器 W317 外形及接线。

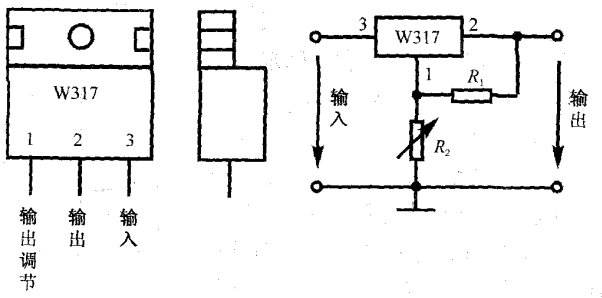


图 5-37　W317 稳压器外形及接线

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

最大输入电压：U_{in}=40V

输出电压范围：U_0＝ 1.25～37V

有时用电压调整率和电流调整率来描述稳压性能。在额定负载且输入电压产生最大变化的条件下，输出电压产生的变化量 ΔU_o 称为电压调整率；在输入电压一定且负载电流产生最大变化的条件下，输出电压产生的变化量 ΔU_o 称为电流调整率。

四、实验内容与步骤

（一）整流滤波与并联稳压

1．半波整流、桥式整流电路实验电路分别如图 5-31、图 5-32。

分别接二种电路，用示波器观察 U_2 及 U_L 的波形。并测量 U_2、U_D、U_L，填入表 5-31。

表 5-31

类型	U_2（V）	U_D（V）	U_L（V）	波形
半波				
桥式				

2．电容滤波电路

实验电路如图 5-33。

（1）分别用不同电容接入电路，R_L 先不接，用示波器观察波形，用电压表测 U_L 并记录。

（2）接上 R_L，先用 R_L＝1KΩ，重复上述实验并记录。

（3）将 R_L 改为 150Ω，重复上述实验。以上测量填入表 5-32。

表 5-32

条件	C_1 $R_L=\infty$	C_2 $R_L=\infty$	C_1 R_L=1k	C_2 R_L=1k	C_1， R_L=150Ω	C_2， R_L=150Ω
U_L						
波形						

3．并联稳压电路

实验电路如图 5-34 所示。

（1）电源输入电压不变，负载变化时电路的稳压性能。

改变负载电阻 R_L 使负载电流 I_L＝1mA，5mA，10mA 分别测量 U_L，U_R，I_L，I_R，计算电源输出电阻，填入表 5-33。

表 5-33

条件	U_L（V）	U_R（V）	I_R（mA）
I_L=1mA			
I_L=5mA			
I_L=10mA			

（2）负载不变，电源电压变化时电路的稳压性能。

用可调的直流电压变化模拟 220V 电源电压变化，电路接入前将可调电源调到 10V，然后调到 8V、12 V，按表 5-34 内测量填表，并根据 $S=\dfrac{\Delta U_0/U_0}{\Delta U_I/U_I}$ 计算稳压系数。

表 5-34

U_I（V）	U_L（V）	I_R（mA）	I_L（mA）
10V			
8 V			
12V			

（二）串联稳压电路

实验电路如图 5-35 所示。

1．静态调试。

① 看清楚实验电路板的接线，查清引线端子。

② 按图 5-35 按线，负载 R_L 开路，即稳压电源空载。

③ 将＋5Ⅴ～＋27Ⅴ电源调到 9Ⅴ，接到 U_i 端。再调电位器 R_p，使 U_0＝6V。测量各三极管的 Q 点，填入表 5-35。

表 5-35

U_{B2}（V）	U_{B3}（V）	U_{E3}（V）

④ 调试输出电压的调节范围。调节 Rp，观察输出电压 U_0 的变化情况。记录 U_0 的最大和最小值。

表 5-36

U_{omax}（V）	U_{omin}（V）

2．动态测量

① 测量电源稳压特性。使稳压电源处于空载状态，调节电位器，模拟电网电压波动±10%：即 U_i 由 8V 变到 10V。测量相应的ΔU。根据 $S=\dfrac{\Delta U_0/U_0}{\Delta U_I/U_I}$ 计算稳压系数。

表 5-37

U_i（V）	U_o（V）	S
8V		
10V		

② 测量稳压电源内阻。稳压电源的负载电流 I_L 由空载变化到额定值 I_L=100mA 时，测量输出电压 U_0 的变化量，即可求出电源内阻 $r_0=\left|\dfrac{\Delta U_0}{\Delta I_L}\times 100\%\right|$。测量过程中使 U_i＝9V 保持不变。

表 5-38

I_L	U_0（V）	r_0（Ω）
0		
100mA		

③ 测试输出的纹波电压。将图 5-35 的电压输入端 U_i 接到图 5-33(C=470μF)的整流滤波电路输出端（即接通 A—a，B—b），在负载 I_L＝100mA 条件下，用示波器观察稳压电源输入输出中的交流分量 u_0，描绘其波形，用晶体管毫伏表，测量交流分量的大小。

3．输出保护

① 在电源输出端接上负载 R_L 同时串接电流表。并用电压表监视输出电压，逐渐减小 R_L 值，直到短路，注意 LED 发光二极管逐渐变亮，记录此时的电压、电流值。

② 逐渐加大 R_L 值，观察并记录输出电压、电流值。注意：此实验内容短路时间应尽量短（不超过 5 秒），以防元器件过热。

（三）．集成稳压电路

1．稳压器的测试

实验电路如图 5-38 所示

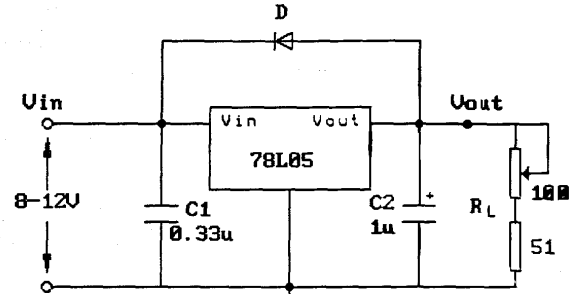


图 5-38 三端稳压器参数测试

测试内容：

① 电压调整率。

测试条件及数据按表格 5-39。

表 5-39

U_{in}（V）	R_L（Ω）	I_o（mA）	U_o（V）	电压调整率 ΔU_o（mV）
8V				
12V				

② 电流调整率。

测试条件及数据按表格 5-40。

表 5-40

U_{in}（V）	R_L（Ω）	I_o（mA）	U_o（V）	电流调整率 ΔU_o（mV）
12V	151			
12V	51			

③ 纹波电压（有效值或峰值）。

2．稳压电路性能测试

仍用图 5-37 的电路，测试直流稳压电源性能。

① 保持稳定输出电压的最小输入电压。

② 输出电流最大值及过流保护性能。

3．三端稳压电路灵活应用（选做）

① 改变输出电压

实验电路如图 5-39 所示。按图接线，测量上述电路输出电压及变化范围。

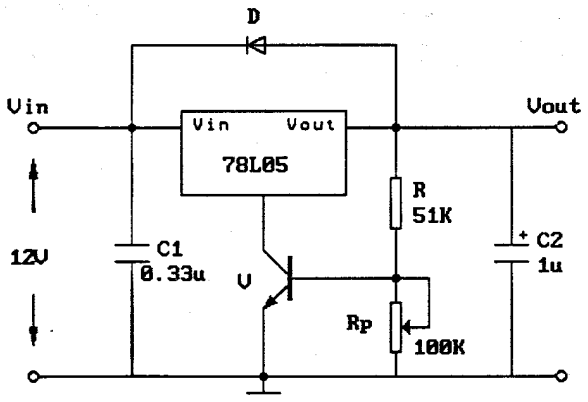


图 5-39 输出电压可调

② 组成恒流源

实验电路如图 5-40 所示，按图接线，并测试电路恒流作用。

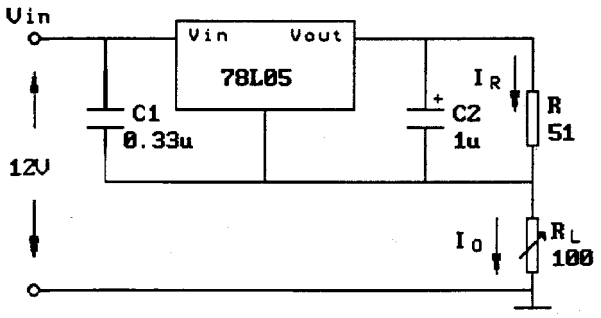


图 5-40　组成恒流源电路

③ 可调稳压电路

A．实验电路如图 5-41 所示，LM317L 最大输入电压 40V， 输出 1.25V～37V 可调最大输出电流 100mA。（本实验只加 12V 输入电压）

B．按图接线，并测试电压输出范围；测试电压调整率、电流调整率等指标。测试时将输出电压调到最高输出电压。

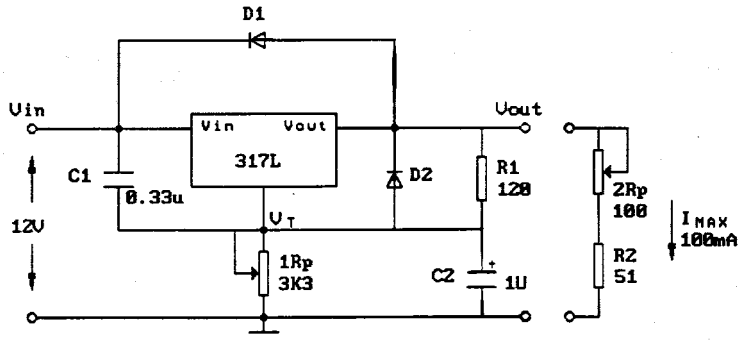


图 5-41 可调稳压电路

五、实验报告要求

1．整理实验数据并按实验内容计算。

2．图 5-34 所示电路能输出电流最大为多少？为获得更大电流应如何选用电路元器件及参数？

3．对串联稳压电路，对静态调试及动态测试进行总结计算。

4．总结本实验所用两种三端稳压器的应用方法。

5．对部分思考题进行讨论。

六、预习要求及思考题

1、复习教材直流稳压电源部分关于电源主要参数及测试方法。

2、估算图 5-35 电路中各三极管的 Q 点（设：各管的 β=100，电位器 Rp 滑动端处于中间位置）。

3、分析图 5-35 电路，电阻 R_2 和发光二极管 LED 的作用是什么？

4、估算图 5-39 电路输出电压范围。

5、如果把图 5-35 电路中电位器的滑动端往上（或是往下）调，各三极管的 Q 点将如何变化？可以试一下。

6、图 5-35，调节 R_L 时，U_3 的发射极电位如何变化？电阻 R？两端电压如何变化？可以试试。