

前 言

南京润众科技有限公司是专业从事通信工程与电子信息专业实验教学设备研发、生产、销售和技术服务的高新技术企业。公司坐落在著名的历史文化名城—中国南京市，枕紫金、挽玄武，踞光华门之宝地、映秦淮河之碧波，依托地区教育，信息，产业优势，经过润众人不懈的努力，公司已经发展成为国内知名的通信教育综合服务厂商。

公司主要研制生产数字电路与 EDA 系列、高频电子系列、信号系统与信号处理系列、通信原理系列、现代交换系列、光纤通信系统、SDH 光传输与 EPON 光接入系统、移动通信系列、无线通信系列、电磁场电磁波与天线系列、微波与射频通信系列、软件无线电系列、电子通信创新设计开发系列、RZ-NGN 通信网络综合实训系统、NGN 软交换实训系统、基于 4G 的移动互联网实训系统、物联网、虚拟仪器系列、通信仪表设备、可视通信系统等二十大系列六十多种型号的通信与电子教学设备，品种之多样，型号之齐全，堪称通信电子教仪生产公司之最。

公司紧随新技术发展，及时将先进的信息与网络技术应用于实验教学，新近研制了“模拟通信演示系统”、“数字通信演示系统”、“远程微处理器应用开发实验平台”、“远程虚拟实体无线通信系统实验平台”等产品，有效地解决了实验场地与学生实验时间冲突的矛盾，实验平台在管理软件和虚拟实体操作软件的支持下，学生能在远端**随时、随地、随兴**完成课程实验，进行设计创新开发；提升了教学效果、激发了学生的学习兴趣，受到专家好评；

专家教授领其衔，栋梁英才集于斯。公司拥有一支由一线资深教授、高级工程师、高级实验师和年轻硕士、博士组成的研发队伍，研发能力强，产品科技含量高。可为各类院校提供个性化服务，量身定做各种适用的通信电子教学实验设备。公司设有专业的焊接生产调试基地，生产设备良好，通过严格的生产调试工艺，保证产品质量稳定可靠。经过公司多年信誉积累，销售及服务网络遍及全国，产品已在超过 200 多所高校投入使用，为各高校的实验教学发挥了重大作用。

润众公司任重道远，公司非常感谢教育界同仁多年来对南京润众科技的关心和大力支持，热忱欢迎广大用户莅临公司参观、考察、指导。我们期待您的到来！

技术支持及联系方式：

电 话: 025-84585075

E-Mail: njrzkj@126.com

Http:// www.njrzkj.com

润众教材编写组 2020 年 06 月版

目 录

模拟信号源使用说明	3
实验一 单级放大电路	7
实验二 两级放大电路	15
实验三 负反馈放大电路	18
实验四 射极跟随器	22
实验五 差动放大电路	26
实验六 比例求和运算电路	30
实验七 积分与微分电路	34
实验八 波形发生电路	37
实验九 有源滤波器	41
实验十 电压比较器	46
实验十一 集成电路 RC 正弦波振荡器	50
实验十二 集成功率放大器	53
实验十三 RC 正弦波振荡器	57
实验十四 LC 振荡器及选频放大器	59
实验十五 电流/电压转换电路	63
实验十六 电压/频率转换电路	65
实验十七 波形变换电路	67
实验十八 互补对称功率放大器	71
实验十九 整流滤波与并联稳压电路	75
实验二十 串联稳压与集成电路稳压	79

模拟信号源使用说明

一、信号源液晶屏幕界面

1、信号源上电后，出现图 1 润众公司界面



图 1 信号源润众公司界面

2、点击图 1 界面（触摸屏），进入图 2 信号源控制界面



图 2 信号源主界面

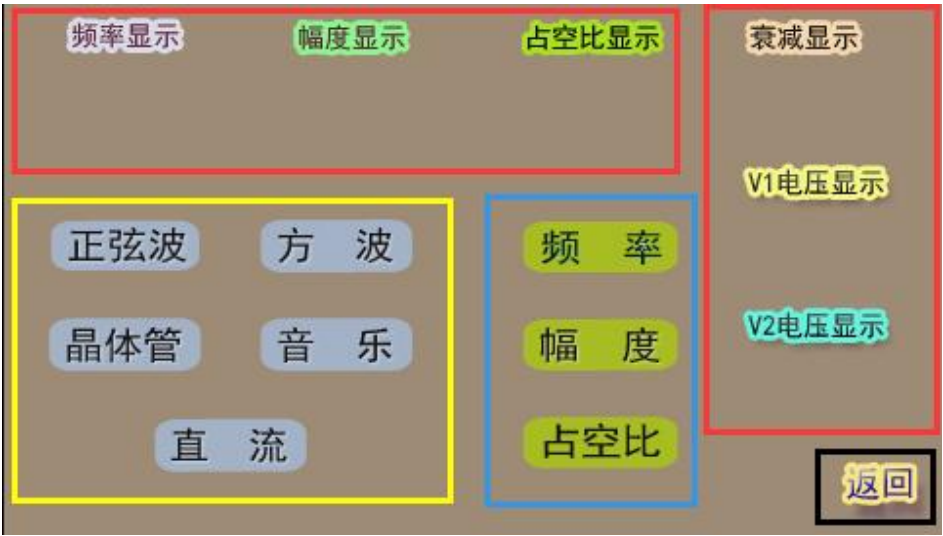


图 3 信号源主界面区域划分

3、如图 3，信号源界面包括如下 3 个部分：

- ① 红框区域：信号源当前各参数显示（包括：DDS 频率、DDS 幅度、DDS 占空比{只限方波}、衰减 db、锚孔 V1 电压、锚孔 V2 电压）；
- ② 黄框区域：DDS（锚孔）输出信号类型选择；
- ③ 蓝框区域：DDS 参数控制选择；
- ④ 黑框区域：返回润众公司界面按钮。

二、信号源模块操作



图 4 信号源模块硬件操作部分区域划分

1、红框区域：触摸屏控制及显示部分；

2、黄框区域：信号输入锚孔（ATI、CHA）和输出锚孔（DDS、V1、V2、ATO）；

3、黑框区域：4 个旋转编码开关，从左->右方向，各旋转编码开关作用如下：

第 1 个旋转编码开关：当触摸屏选择“正弦波”、“方波”、“音乐信号”时，根据参数类型选择（有频率、幅度、占空比），可控制 DDS 锚孔输出信号的频率（音乐不可调）、幅度和占空比（仅方波可用），向左旋转减小，向右旋转增加。

第 2、3 个旋转编码开关：当触摸屏选择“直流”时，可分别控制 V1 锚孔、V2 锚孔输出电压，向左旋转减小，向右旋转增加。

第 4 个旋转编码开关：独立通道，当锚孔 ATI 输入信号时，可控制信号按照 db 衰减，从锚孔 ATO 输出，具体衰减多少可以从屏幕右上角显示出来，向左旋转减小，向右旋转增加。

4、橙框区域：晶体管测试区域。插入 NPN 晶体管硬件，信号类型选择“晶体管”，可用示波器测量测量针 X、Y。

三、信号源各参数变化范围

信号类型（锚孔 DDS 输出）	频率范围	步进	幅度范围（相对值） 最小：0 最大：73	可改变参数类型	控制的旋转编码开关编号， 从左->右
正弦波	0~80Khz	100hz	0~73	频率、幅度	第 1 个
方波	0~40Khz	100hz	0~73	频率、幅度、 占空比	第 1 个
晶体管	固定	无	50	无	第 1 个
音乐	无	无	0~73	幅度	第 1 个

锚孔标号（输出） 信号类型：直流	幅度范围（V）	步进	控制的旋转编码开关 编号，从左->右
V1	±3V	0.1V	第 2 个
V2	±3V	0.1V	第 3 个

锚孔 ATI 输入信号，锚孔 ATO 输出信号，第 4 个旋转编码开关控制衰减输出，范围“1~23db”

举例：（1）设置 DDS 输出方波信号、频率 5K、幅度 60（相对值）、占空比 60%

首先选中信号类型“方波”（选中会有对号显示），然后选中参数类型“频率”（选中会有对号显示），旋转第一个编码开关（从左至右），调整频率到 5K（可以从液晶屏幕上

面频率显示读出当前频率值)；

接着选中参数类型“幅度”(选中会有对号显示)，旋转第一个编码开关(从左至右)，调整幅度到 60(可以从液晶屏幕上面幅度显示读出当前幅度值)；

最后选中参数类型“占空比”(选中会有对号显示)，同样选中第一个编码开关(从左至右)，调整占空比到 60%(可以从液晶屏幕上面占空比显示读出当前占空比值)

(2) 设置锚孔 V1 输出 2.0V

首先选中信号类型“直流”(选中会有对号显示)，直接旋转第 2 个旋转编码开关(从左至右)，调整输出电压为 2.0V(可以从液晶屏幕上面读出当前 V1 输出的电压值)。

(3) 设置锚孔 V2 输出 -1.0V

首先选中信号类型“直流”(选中会有对号显示)，直接旋转第 3 个旋转编码开关(从左至右)，调整输出电压为-1.0V(可以从液晶屏幕上面读取当前 V2 输出的电压值)。

(4) 设置从锚孔 ATI 口输入的信号，衰减 4db 后从锚孔 ATO 输出

用锚孔线从锚孔 DDS 处引出正弦波信号(幅度 50)到锚孔 ATI，直接旋转第 4 个旋转编码开关(从左至右)，设置衰减为 4db(可以从液晶屏幕上面读出当前设置的衰减值)，用示波器测量锚孔 ATO，观察是否衰减 4db 左右。

实验一 单级放大电路

一、实验目的

- 1、熟悉电子元器件和模拟电路实验箱。
- 2、掌握放大器静态工作点的调试方法及其对放大器性能的影响。
- 3、学习测量放大器 Q 点， A_v ， r_i ， r_o 的方法，了解共射极电路特性。
- 4、学习放大器的动态性能。

二、实验原理

图 1-1 为电阻分压式单管放大器实验电路图。它的偏置电路采用 R_1 和 R_2 组成的分压电路，并在发射极中接有电阻 R_F ，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。

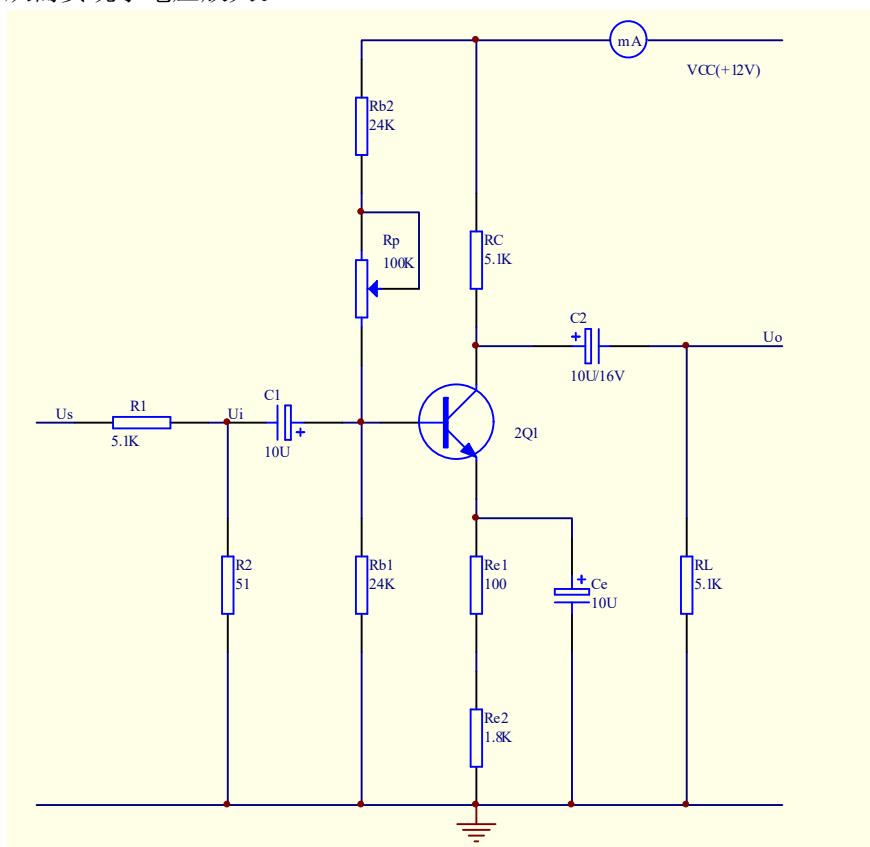


图 1-1 共射极单管放大器实验电路

在本实验电路中，在交流信号输入端有一个由 R_1 、 R_2 组成的 1/101 的分压器，这是因为，信号源是有源仪器，当其输出电压较小时，其输出的信噪比随输出信号的减小而降

低，所以输出信号电压幅值有下限，例如，目前使用的 Agilent33210A0 数字式信号源输出正弦电压的最小幅值为 50mV，若直接将其作为输入，本实验用的放大器将严重限幅，电阻是无源元件，而且阻值较小，由分压器增加的噪声甚少，所以用电阻分压器可得到信噪比较高的小信号。

若要对放大倍数做精确的测量，也常用电阻做输入分压器，具体的做法和原因可叙述如下：若要求放大器的放大倍数为 A_V ，用电阻做 $1/A_V$ 的分压器，信号源输出电压可为几百 mV ，调整放大器的参数，使输出电压等于输入电压，这样对输入、输出测量的仪器在测量过程中就不用换档，放大倍数本来就是输出/输入的相对关系。虽然仪器测量示数往往有绝对误差，用同一档测量两个值，使其相等，这就避免了仪器测量示数具有的绝对误差，这种测量的误差仅包含对两个分压电阻测量的误差，通常可很小，若直接用小信号做输入，则测量输入、输出将使用不同的档位，即使用了仪器中的不同电路，而仪器中不同电路的测量精度是有差别的，由此而来的误差通常比上述用电阻分压器的要大。

在图 1-1 电路中，当流过偏置电阻 R_1 和 R_2 的电流远大于晶体管 Q_1 的基极电流 I_B 时（一般 5~10 倍），则它的静态工作点可用下式估算

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

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

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

$$\text{电压放大倍数} \quad A_V = -\beta \frac{R_C // R_L}{r_{be}}$$

$$\text{输入电阻} \quad R_i = R_{B1} // R_{B2} // r_{be}$$

$$\text{输出电阻} \quad R_o \approx R_C$$

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，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，即输入端不接信号，然后选用量程合适的直流毫安表和直流电压表，分别测量晶体管的集电极电流 I_C 以及各电极对地的电位 U_B 、 U_C 和 U_E 。一般实验中，为了避免断开集电极，通常采用测量电压 U_E

或 U_C ，然后算出 I_C 的方法，例如，只要测出 U_E ，即可用

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

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

为了减小误差，提高测量精度，应选用内阻较高的直流电压表。

(2) 静态工作点的调试

放大器静态工作点的调试是指对管子集电极电流 I_C （或 U_{CE} ）的调整与测试。静态工作点是否合适，对放大器的性能和输出波形都有很大影响。如工作点偏高，放大器在加入交流信号以后易产生饱和失真，此时 u_o 的负半周将被削底，如图 1-2(a) 所示；如工作点偏低则易产生截止失真，即 u_o 的正半周被缩顶（一般截止失真不如饱和失真明显），如图 1-2(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。

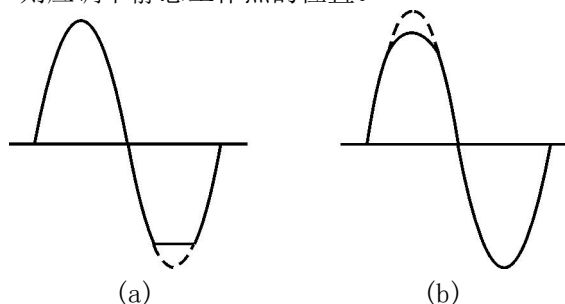


图 1-2 静态工作点对 u_o 波形失真的影响

改变电路参数 U_{CC} 、 R_C 、 R_B （ R_{B1} 、 R_{B2} ）都会引起静态工作点的变化，如图 1-3 所示。但通常多采用调节偏置电阻 R_{B2} 的方法来改变静态工作点，如减小 R_{B2} ，则可使静态工作点提高等。

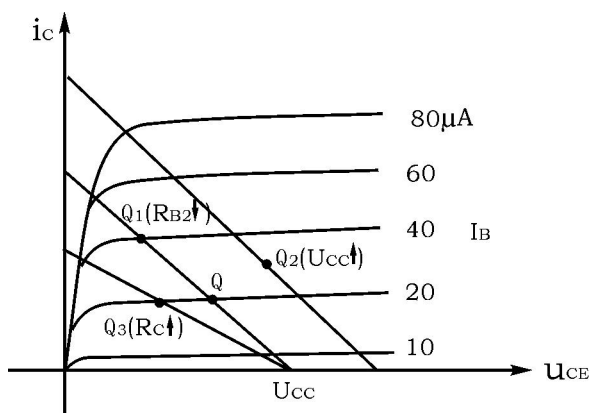


图 1-3 电路参数对静态工作点的影响

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

2、放大器动态指标测试

放大器动态指标包括电压放大倍数、输入电阻、输出电阻、最大不失真输出电压（动态范围）和通频带等。

(1) 电压放大倍数 A_v 的测量

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

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

(2) 输入电阻 R_i 的测量

为了测量放大器的输入电阻，按图 1-4 电路在被测放大器的输入端与信号源之间串入一已知电阻 R ，在放大器正常工作的情况下，用交流毫伏表测出 U_s 和 U_i ，则根据输入电阻的定义可得

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

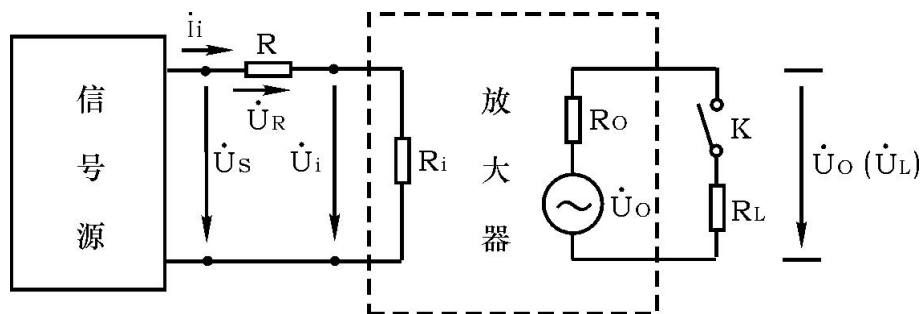


图 1-4 输入、输出电阻测量电路

测量时应注意以下几点：

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，本实验取 $R=5.1k\Omega$ 。

(3) 输出电阻 R_o 的测量

按图 1-4 电路，在放大器正常工作条件下，测出输出端不接负载 R_L 的输出电压 U_o 和

接入负载后的输出电压 U_L ，根据

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

即可求出

$$R_0 = \left(\frac{U_0}{U_L} - 1 \right) R_L$$

在测试中应注意，必须保持 R_L 接入前后输入信号的大小不变。

(4) 最大不失真输出电压 U_{opp} 的测量（最大动态范围）

如上所述，为了得到最大动态范围，应将静态工作点调在交流负载线的中点。为此在放大器正常工作情况下，逐步增大输入信号的幅度，并同时调节 R_W （改变静态工作点），用示波器观察 U_0 ，当输出波形同时出现削底和缩顶现象（如图 1—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_0 （有效值），则动态范围等于 $2\sqrt{2}U_0$ 。或用示波器直接读出 U_{opp} 来。

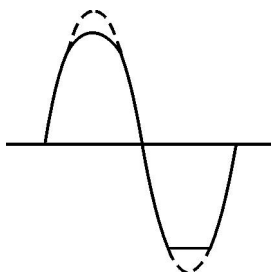


图 1—5 静态工作点正常，输入信号太大引起的失真

(5) 放大器幅频特性的测量

放大器的幅频特性是指放大器的电压放大倍数 A_u 与输入信号频率 f 之间的关系曲线。单管阻容耦合放大电路的幅频特性曲线如图 1—6 所示， A_{um} 为中频电压放大倍数，通常规定电压放大倍数随频率变化下降到中频放大倍数的 $1/\sqrt{2}$ 倍，即 $0.707A_{um}$ 所对应的频率分别称为下限频率 f_L 和上限频率 f_H ，则通频带 $f_{BW} = f_H - f_L$ 。

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

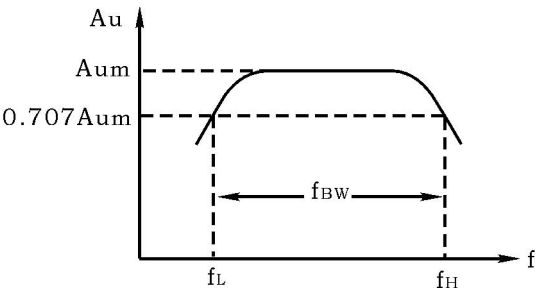


图 1—6 幅频特性曲线

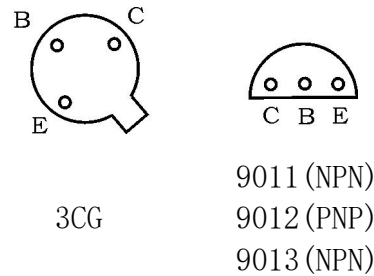


图 1—7 晶体三极管管脚排列

三、实验仪器

- 1、双踪示波器
- 2、函数发生器
- 3、数字万用表
- 4、频率计
- 5、交流毫伏表
- 6、直流毫伏表
- 7、分立元件放大电路模块

四、预习要求

- 1、三极管及单管放大器工作原理。
- 2、放大器动态及静态测量方法。

五、实验内容及步骤

1、实验电路：图 1—1 共射极单管放大器实验电路

- (1) 用万用表判断实验箱上三极管 2Q1 的极性和好坏，电解电容 C 的极性和好坏。
- (2) 按图 1-1 所示连接电路，然后将信号源模块上+12V 接入 2Q1 电源端。
- (3) 接线完毕仔细检查,确定无误后接通电源。改变 Rp 记录 Ic 分别为 1mA、1.5 mA

时三极管 2Q1 的 β 值(注意: $\beta = \frac{I_C}{I_B}, I_B + \frac{V_B}{R_{b1}} = \frac{V_{CC} - V_B}{R_{b2} + R_P}$)。

2、静态调整

调整 Rp, 使 $V_E=2.2V$, 测量并计算填入表 1-1。

表 1-1

测量值					计算值	
V_C (V)	V_B (V)	R_C (K Ω)	R_{b1} (K Ω)	$R_{b2} + R_P$ (K Ω)	I_B (μ A)	I_C (mA)

根据公式 $I_C = \frac{V_{CC} - V_C}{R_C}$, $I_B + \frac{V_B}{R_{b1}} = \frac{V_{CC} - V_B}{R_{b2} + R_P}$, 计算出 I_C 和 I_B 。

注意：测量 R_{b1} ， $R_{b2} + R_p$ 时，要断开电源，且电阻要与电路断开后测量。

3、动态研究

(1) 将低频信号设置为正弦波 $f=1\text{KHz}$ ，峰-峰值为 2000mV ，接到放大器输入端 U_s ，用示波器观察 U_i 和 U_o 端波形，并比较相位（因 U_i 幅度太小，不易测出，可直接测 U_s 端）。

(2) 不接负载电阻 R_L ，信号源频率不变，逐渐加大信号幅度，调整电位器 R_p 观察 U_o 不失真时的最大值，并填入表 1-2（由于 U_i 幅值太小，示波器测不清楚，因为 U_i 是由 U_s 衰减 100 倍后得到，这样 U_i 可直接由 U_s 来折算，后面的实验都可采用这种方法）。

表 1-2 $R_L=\infty$

测量值		计算值
U_i (mV)	U_o (V)	A_v

(3) 保持 $U_s=2000\text{mV}$ 不变，放大器接入负载 R_L ，在改变 R_c 数值的情况下测量，注意调 R_p 使输出最大且不失真，并将计算结果填入表 1-3。

表 1-3

给定参数		测量值		计算值
R_c	R_L	U_i (mV)	U_o (V)	A_v
470Ω	5.1K			
470Ω	2.2K			
5.1K	5.1K			
5.1K	2.2K			

(4) 保持 $U_s=2000\text{mV}$ 不变， $R_c = 5.1\text{K}$ ， $R_L = 5.1\text{K}$ 增大和减小 R_p ，用示波器观察 U_o 波形变化，测量三极管各级直流电压并填入表 1-4。

表 1-4

R_p 值	U_B	U_C	U_E	U_o 输出波形情况
最大				
合适				
最小				

注意：若失真观察不明显可增大或减小 U_i 幅值重测。

4、测放大器输入，输出电阻。参照 图 1-4 输入、输出电阻测量电路

(1) 输入电阻测量

在输入端串接一个电阻 $R=5.1\text{K}$ ，测量 U_s 与 U_i ，即可计算 R_i 。

(2) 输出电阻测量

在输出端接入可调电阻作为负载，选择合适的 R_L 值使放大器输出不失真(接示波器监视)，测量有负载和空载时的 U_o ，即可计算 R_o 。

将上述测量及计算结果填入表 1-5 中。

表 1-5

测输入电阻 $R_i=5.1K$			测输出电阻		
测量值		计算值	测量值		计算值
U_s	U_i	R_i	U_o $R_L=\infty$	U_L $R_L=$	R_o

六、实验报告

- 1、列表整理测量结果，并把实测的静态工作点、电压放大倍数、输入电阻、输出电阻之值与理论计算值比较（取一组数据进行比较），分析产生误差原因。
- 2、总结 R_c ， R_L 及静态工作点对放大器电压放大倍数、输入电阻、输出电阻的影响。
- 3、讨论静态工作点变化对放大器输出波形的影响。
- 4、分析讨论在调试过程中出现的问题。

实验二 两级放大电路

一、实验目的

- 1、掌握如何合理设置静态工作点。
- 2、学会放大器频率特性测试方法。
- 3、了解放大器的失真及消除方法。

二、实验原理

1、对于二极放大电路，习惯上规定第一级是从信号源到第二个晶体管 Q_2 的基极，第二级是从第二个晶体管的基极到负载，这样两级放大器的电压总增益 A_v 为：

$$A_v = \frac{V_{O2}}{V_{i1}} = \frac{V_{O2}}{V_{i2}} \cdot \frac{V_{O1}}{V_{i1}} = A_{v1} \cdot A_{v2}$$

式中电压均为有效值，且 $V_{O1} = V_{i2}$ ，由此可见，两级放大器电压总增益是单级电压增益的乘积，由结论可推广到多级放大器。

当忽略信号源内阻 R_S 和偏流电阻 R_b 的影响，放大器的中频电压增益为：

$$A_{v1} = \frac{V_{O1}}{V_{i1}} = -\frac{\beta_1 R'_{L1}}{r_{be1}} = -\beta_1 \frac{R_{C1} // r_{be2}}{r_{be1}}$$

$$A_{v2} = \frac{V_{O2}}{V_{i2}} = \frac{V_{O2}}{V_{O1}} = -\frac{\beta_2 R'_{L2}}{r_{be2}} = -\beta_2 \frac{R_{C2} // R_L}{r_{be2}}$$

$$A_v = A_{v1} \cdot A_{v2} = \beta_1 \frac{R_{C1} // r_{be2}}{r_{be1}} \cdot \beta_2 \frac{R_{C2} // R_L}{r_{be2}}$$

必须要注意的是 A_{v1} 、 A_{v2} 都是考虑了下一级输入电阻（或负载）的影响，所以第一级的输出电压即为第二级的输入电压，而不是第一级的开路输出电压，当第一级增益已计入下级输入电阻的影响后，在计算第二级增益时，就不必再考虑前级的输出阻抗，否则计算就重复了。

2、在两级放大器中 β 和 I_E 的提高，必须全面考虑，是前后级相互影响的关系。

3、对两级电路参数相同的放大器其单级通频带相同，而总的通频带将变窄。

三、实验仪器

- | | |
|--------------|----------|
| 1、双踪示波器。 | 2、数字万用表。 |
| 3、信号发生器。 | 4、毫伏表 |
| 5、分立元件放大电路模块 | |

四、预习要求

- 1、复习教材多级放大电路内容及频率响应特性测量方法。
- 2、分析图 2-1 两级交流放大电路。初步估计测试内容的变化范围。

五、实验内容

1、实验电路见图 2-1

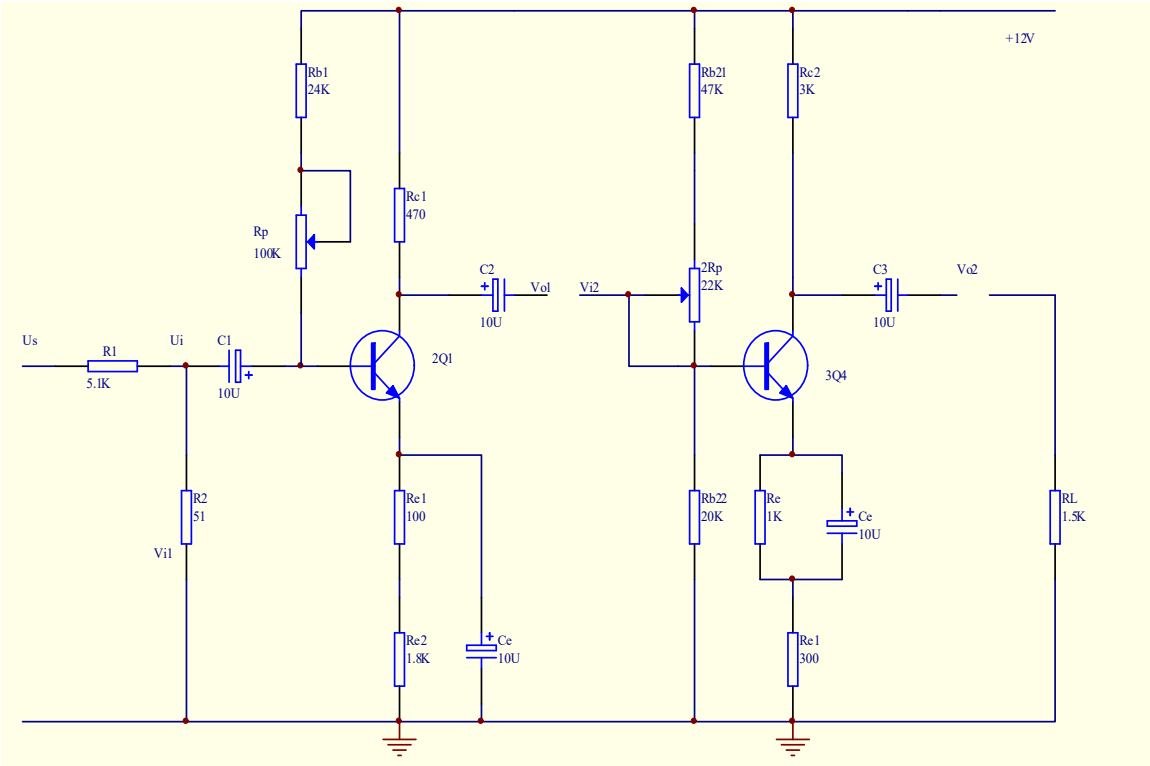


图 2-1 两级交流放大电路

2、设置静态工作点

- (1) 按图接线，注意接线尽可能短。将信号源模块上+12V 接入 2Q1 和 3Q4 电源端。
- (2) 静态工作点设置：要求第二级在输出波形不失真的前提下幅值尽量大，第一级为增加信噪比，静态工作点尽可能低。
- (3) 在输入端 V_i 加上 1KHz 幅度为 10mV 的交流信号 (一般采用实验箱上加衰减的办法，即信号源用一个较大的信号，例如 1000mV，加在 U_s 端经 100:1 衰减电阻降为 10mV)，用示波器观察 V_{o2} 波形，调整两级工作点 (调 R_p 和 $2R_p$) 使输出信号幅度 V_{o2} 最大且不失真。

注意：如发现有寄生振荡，可采用以下措施消除：

- ①重新布线，尽可能走线短。
- ②可在三极管 eb 间加几 p 到几百 p 的电容。

3、不接 R_L (1.5K)，在上述工作点调整的基础上，按表 2-1 要求测量并计算，注意测静态工作点时应断开输入信号，测输出电压时， U_s 幅值为 1000mv， $f=1KHz$ 。

表 2-1

静态工作点						输入/输出电压 (mV)			电压放大倍数		
第 1 级			第 2 级						第 1 级	第 2 级	整体
V_{c1}	V_{b1}	V_{e1}	V_{c2}	V_{b2}	V_{e2}	V_i	V_{o1}	V_{o2}	A_{v1}	A_{v2}	A_v

4、接入负载电阻 $R_L=1.5K\Omega$ ，按表 2-1 测量并计算，并比较其实验结果。

5、测两级放大器的频率特性

(1) 将放大器负载断开，先将输入正弦信号频率调到 10KHz，调整 R_p 和 $2R_p$ 使输出最大，幅度调到使输出幅度最大而不失真。

(2) 保持输入信号幅度不变，改变频率，（实验箱内信号源频率范围不够，需另配信号源）。按表 2-2 测出放大器输出幅度 V_{o2} 并记录。

(3) 接上负载，重复上述实验。

表 2-2

f (Hz)		100	300	500	1000	2500	5000	10000	20000	40000
V_{o2}	$R_L=\infty$									
	$R_L=1.5K$									

(4) 按照表格画出频率特性曲线。

六、实验报告

- 1、整理实验数据，分析实验结果。
- 2、画出实验电路的频率特性曲线，说明频率增大时，输出幅度为什么增大。
- 3、写出增加频率范围的方法。

实验三 负反馈放大电路

一、实验目的

- 1、研究负反馈对放大器性能的影响。
- 2、掌握反馈放大器性能的测试方法。

二、实验原理

放大器中采用负反馈，在降低放大倍数的同时，可使放大器的某些性能大大改善，负反馈的类型很多，本实验以一个输出电压、输入串联负反馈的两级放大电路为例，如图 3-2 所示。 C_F 、 R_F 从第二级 Q_2 的集电极接到第一级 Q_1 的发射极构成负反馈。

下面列出负反馈放大器的有关公式，供验证分析时作参考。

1、放大倍数和放大倍数稳定度

负反馈放大器可以用图 3-1 方框图来表示：

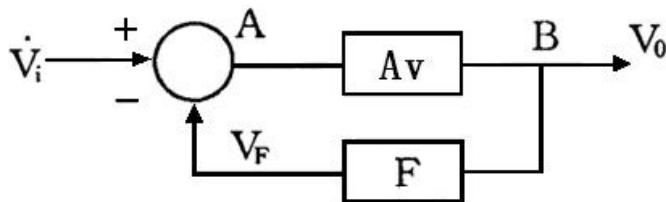


图 3-1 负反馈放大器框图

负反馈放大器的放大倍数为： $A_{VF} = \frac{A_v}{1 + A_v F}$

式中 A_v 称为开环放大倍数，反馈系数为： $F = \frac{R_{e1}}{R_{e1} + R_F}$

反馈放大器反馈放大倍数稳定度与无反馈放大器反馈放大倍数稳定度有如下关系：

$$\frac{\Delta A_{vf}}{A_{vf}} = \frac{\Delta A_v}{A_v} \cdot \frac{1}{1 + A_v F}$$

式中 $\frac{\Delta A_{vf}}{A_{vf}}$ 称负反馈放大器的放大倍数稳定度。

$\frac{\Delta A_v}{A_v}$ 称无反馈放大器的放大倍数稳定度。

由上式可知，负反馈放大器比无反馈的放大器的稳定度提高了 $(1 + A_v F)$ 倍。

2、频率响应特性

引入负反馈后，放大器的频响曲线的上限频率 f_{HF} 比无反馈时扩展 $(1 + A_v F)$ 倍。即： $f_{HF} = (1 + A_v F) f_H$

而下限频率比无反馈时减小到 $(\frac{1}{1+A_vF})$ 倍，即 $f_{Lf} = \frac{f_L}{1+A_vF}$

由此可见，负反馈放大器的频带变宽。

3、非线性失真系数

按定义： $D = \frac{V_d}{V_1}$

式中 V_d ----信号内容包含的谐波成分总和 ($V_d = \sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}$ ，其中 V_2 ， V_3 ……分别为二次、三次……谐波成分的有效值)；

V_1 ----基波成分有效值。

在负反馈放大器中，由非线性失真产生的谐波成分比无反馈时减小到 $(\frac{1}{1+A_vF})$ 倍，

即 $V_{df} = \frac{V_d}{1+A_vF}$

同时，由于保持输出的基波电压不变，因此非线性失真系数 D 也减小到 $(\frac{1}{1+A_vF})$ 倍，

即 $D_f = \frac{D}{1+A_vF}$

三、实验仪器

- | | |
|----------|--------------|
| 1、双踪示波器。 | 2、音频信号发生器。 |
| 3、数字万用表。 | 4、分立元件放大电路模块 |

四、预习要求

- 1、认真阅读实验内容要求，估计待测量内容的变化趋势。
- 2、图 3-2 电路中晶体管 β 值 120，计算该放大器开环和闭环电压放大倍数。

五、实验内容

- 1、负反馈放大器开环和闭环放大倍数的测试。实验电路如图 3-2。

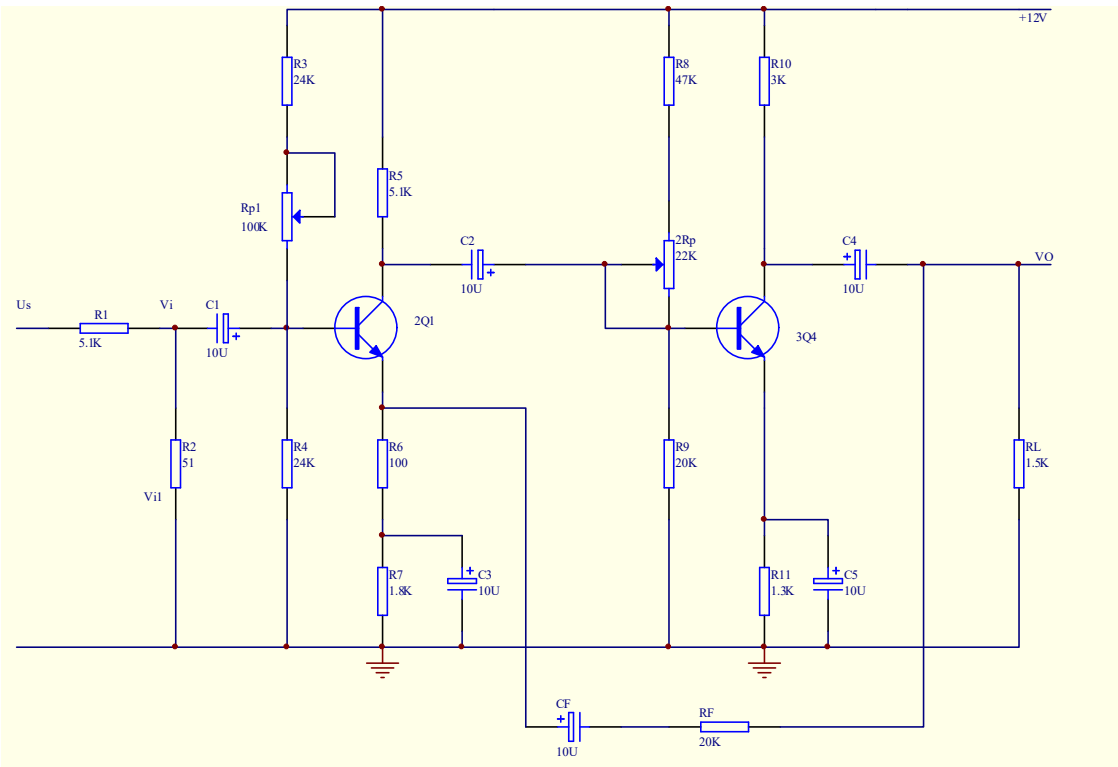


图 3-2 反馈放大电路

(1) 开环电路

①按图 3-2 接线， R_F 、 C_F 先不接入，将信号源模块上+12V 接入 2Q1 和 3Q4 放大器电源端。

②输入端接入 $V_i=20\text{mV}$ ， $f=1\text{KHz}$ 的正弦波(注意输入 20mV 信号采用输入端衰减法即 U_s 端接 2000mV，经 100 倍衰减后 $V_i=20\text{mV}$)。调整 R_{P1} 和 R_{P2} 电位器使输出不失真且无自激振荡。

③按表 3-1 要求进行测量并填表（用示波器测量 V_o 值）。

④根据实测值计算开环放大倍数 A_v ($A_v = \frac{V_o}{V_i}$)。

(2) 闭环电路

①接通 R_F 、 C_F ， U_s 端接入 2000mV 的 1KHZ 正弦波。

②按表 3-1 要求测量并填表，计算 A_{vF} ($A_{vF} = \frac{V_o}{V_i}$)；

表 3-1

	R_L (K Ω)	V_i (mV)	V_o (mV)	A_v (A_{vF})
开环	∞	20		
	1.5K	20		
闭环	∞	20		
	1.5K	20		

2、负反馈对失真的改善作用

(1) 将图 3-2 电路开环, 即不接 R_F 、 C_F , U_s 端送入 $f=1\text{KHZ}$ 的正弦波, 逐步加大 U_s 幅度, 使输出信号 V_o 出现失真(注意不要过分失真)记录输出波形失真时输入信号的幅度。

(2) 将电路闭环, 观察输出情况, 并适当增加 U_s 幅度, 使输出幅度 V_o 接近开环时失真波形幅度, 记录输入信号幅度, 并与开环输入幅度作比较。

(3) 将电路闭环, 改变信号源幅度, 使放大器输出 V_o 不失真。将电路闭环, 然后将 R_F 接入 $2Q_1$ 的基极, 会出现什么情况?实验验证之。

(4) 画出上述各步实验的波形图。

3、测放大器频率特性

(1) 将图 3-2 电路先开环, 选择 V_i 适当幅度(频率为 1KHz) 使输出信号 V_o 在示波器上幅度最大且不失真。

(2) 保持输入信号幅度不变逐步增加频率, 直到波形幅度减小为原来的 70%, 此时信号频率即为放大器的 f_H (注意: 实验箱上信号源频率范围不够, 需另配信号源)。

(3) 条件同上, 但逐渐减小频率, 测得 f_L 。

(4) 将电路闭环, 重复 1~3 步骤, 并将结果填入表 3-2 (注意: 电路闭环后, V_o 会减小, 此时可增加输入信号 U_s 的幅度使 V_o 与开环时 V_o 相等)。

表 3-2

	$f_H(\text{Hz})$	$f_L(\text{Hz})$
开环		
闭环		

六、实验报告

- 1、将实验值与理论值比较。分析误差原因;
- 2、根据实验内容总结反馈对放大电路的影响。

实验四 射极跟随器

一、实验目的

- 1、掌握射极跟随器的特性及测量方法。
- 2、进一步学习放大器各项参数的测量方法。

二、实验原理

图 4-2 为射极跟随器实验电路。它具有输入电阻高输出电阻低，电压放大倍数接近于 1 和输出电压与输入电压同相的特点。输出电压能够在较大的范围内跟随输入电压作线性变化，而具有优良的跟随特性——故又称跟随器。

以下列出射极跟随器特性的关系式，供验证分析时参考。

1、输入电阻 R_i

设图 4-2 电路的负载为 R_L ，则输入电阻为： $R_i = [r_{be} + (1 + \beta)R'_L] // R_B$

式中 $R'_L = R_L // R_e$

$\because R_B$ 很大 $\therefore R_i = r_{be} + (1 + \beta)R'_L \doteq \beta R'_L$

若射极输出器不接负载 R_L ， R_B 又很大。

则： $R_i = \beta R_e$

而实际测量时，是在输入端串接一个已知电阻 R_1 ，在 A 端输入的信号是 V_A ，在 B 端的输入信号是 V_B ，显然射极输出器的输入电流为： $I'_i = \frac{V_A - V_B}{R_1}$

I'_i 是流过 R 的电流，于是射极输出器之输入电阻为：

$$R_i = \frac{V_B}{I'_i} = \frac{V_B}{\frac{V_A - V_B}{R_1}} = \frac{V_B R_1}{V_A - V_B}$$

所以只要测得图 4-2 中 A、B 两点信号电压的大小就可按上式计算出输入电阻 R_i 。

2、输出电阻 R_0

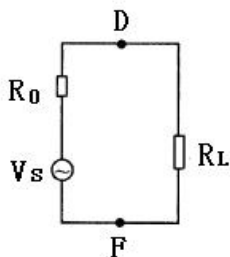


图 4-1 求输出电阻的等效电路

在放大器的输出端（如图 4-1）的 D、F 两点，接上负载 R_L ，则放大器的输出信号电压 V_L 将比不带负载时的 V_0 有所下降，因此放大器的输出端 D、F 看进去整个放大器相当于一个等效电源，该等效电源的电动势为 V_S ，内阻即为放大器的输出电阻 R_0 ，按图 4-1 等效电路先使放大器开路，测出其输出电压为 V_0 ，显然 $V_0=V_S$ ，再使放大器带上负载 R_L ，由于 R_0 的影响，输出电压将降为：

$$V_L = \frac{R_L V_S}{R_0 + R_L}$$

$$\because V_0 = V_S \quad \text{则} \quad R_0 = \left(\frac{V_0}{V_L} - 1 \right) R_L$$

所以在已知负载 R_L 的条件下，只要测出 V_0 和 V_L ，就可按上式算出射极输出器的输出电阻 R_0 。

3、电压跟随范围

电压跟随范围，是指跟随器输出电压随输入电压作线性变化的区域，但在输入电压超过一定范围时，输出电压便不能跟随输入电压作线性变化，失真急剧增加。

我们知道，射极跟随器的

$$A_V = \frac{V_0}{V_i} \doteq 1$$

由此说明，当输入信号 V_i 升高时，输出信号 V_0 也升高，反之，若输入信号降低，输出信号也降低，因此射极输出器的输出信号与输入信号是同相变化的，这就是射极输出器的跟随作用。

所谓跟随范围就是输出电压能够跟随输入电压摆动到的最大幅度还不至于失真，换句话说，跟随范围就是射极的输出动态范围。

三、实验仪器

- | | |
|---------|--------------|
| 1、示波器 | 2、信号发生器 |
| 3、数字万用表 | 4、分立元件放大电路模块 |

四、预习要求

- 1、参照教材有关章节内容，熟悉射极跟随器原理及特点。
- 2、根据图 4-2 中元器件参数，估算静态工作点，画交、直流负载线。

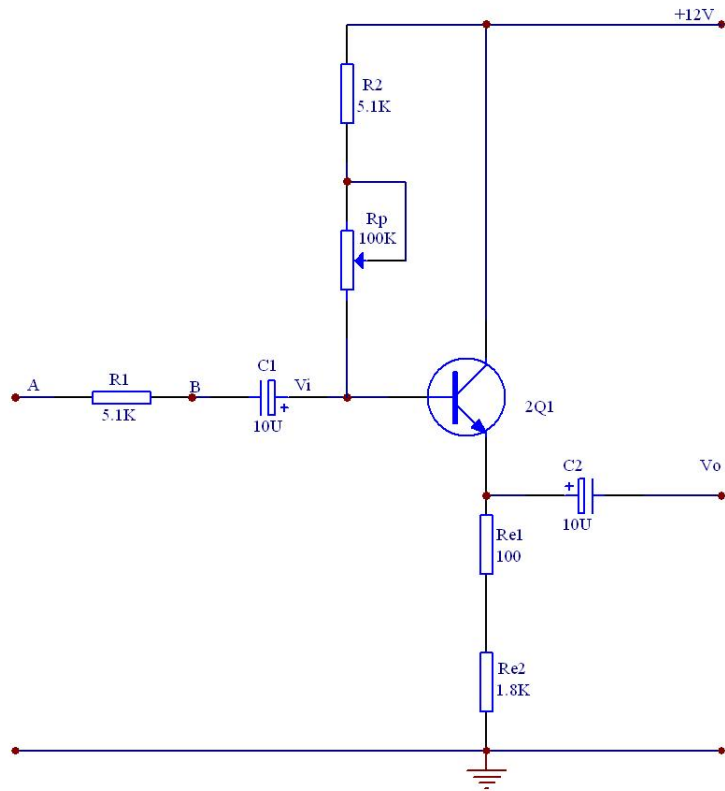


图 4-2 射极跟随器电路图

五、实验内容与步骤

- 1、按图 4-2 电路接线
- 2、直流工作点的调整

将电源+12V 接上，与信号源模块上+12V 相连，在 B 点加入 $f=1\text{KHz}$ 正弦波信号，输出端用示波器监视，反复调整 R_p 及信号源输出幅度，使输出幅度在示波器屏幕上得到一个最大不失真波形，然后断开输入信号，用万用表测量晶体管各极对地的电位，即为该放大器静态工作点，将所测数据填入表 4-1

表 4-1

V_e (V)	V_b (V)	V_c (V)	$I_e = V_e / R_e$

3、测量电压放大倍数 A_v

接入负载 $R_L=2.2\text{K}\Omega$ ，在 B 点接入 $f=1\text{KHz}$ 正弦信号，调输入信号幅度(此时偏置电位器 RP 不能再旋动)，用示波器观察，在输出最大不失真情况下测 V_i ， V_o 值, 将所测数据填入表 4-2 中。

表 4-2

V_i (V)	V_o (V)	$A_v = V_o / V_i$

4、测量输出电阻 R_0

在 B 点加入 $f=1\text{KHz}$ 正弦波信号，幅度峰-峰值 2000mV 左右，接上负载 $R_L=2.2\text{K}\Omega$ 时，用示波器观察输出波形，测空载输出电压 $V_0(R_L=\infty)$ ，有负载输出电压 V_L ($R_L=2.2\text{K}\Omega$) 的值。

则 $R_0 = \left(\frac{V_0}{V_L} - 1\right) R_L$ 。

将所测数据填入表 4-3 中。

表 4-3

V_0 (mV)	V_L (mV)	$R_0 = (V_0/V_L - 1) R_L$

5、测量放大器输入电阻 R_i (采用换算法)

在输入端串入 $5.1\text{K}\Omega$ 电阻，A 点加入 $f=1\text{KHz}$ 的正弦信号，幅度峰-峰值 2000mV ，用示波器观察输出波形，用毫伏表分别测 A，B 点对地电位 V_A 、 V_B 。

则 $R_i = \frac{V_B}{V_A - V_B} \cdot R_1$

将测量数据填入表 4-4。

表 4-4

V_A (V)	V_B (V)	R_i

6、测量射极跟随器的跟随特性。

接入负载 $R_L=2.2\text{K}\Omega$ ，在 B 点加入 $f=1\text{KHz}$ 的正弦信号，逐点增大输入信号幅度 V_i (自行选择 4 个幅值)，用示波器监视输出端，在波形不失真时，测量所对应的 V_L 值。计算出 A_v ，将所测数据填入表 4-5。

表 4-5

	1	2	3	4
V_i				
V_L				
A_v				

六、实验报告

- 1、绘出实验原理电路图，标明实验的元件参数值。
- 2、整理实验数据及说明实验中出现的各种现象，得出有关的结论；画出必要的波形及曲线。
- 3、将实验结果与理论计算比较，分析产生误差的原因。

实验五 差动放大电路

一、实验目的

- 1、熟悉差动放大器工作原理。
- 2、掌握差动放大器的基本测试方法。

二、实验原理

差分放大电路是采用两个对称的单管放大电路组成的，如图 5-1 所示，它具有较大的抑制零点漂移的能力。当静态时，由于电路对称，两管的集电极电流相等，管压降也相等，所以总的输出变化电压 $\Delta V_0 = 0$ 。当有信号输入时，因每个均压电阻 R 相等，所以在两个晶体管 Q_1 和 Q_2 的基极是加入两个大小相等方向相反的差模信号电压即：

$$\Delta V_{i1} = -\Delta V_{i2}$$

放大器总输出电压的变化 $\Delta V_0 = \Delta V_{o1} - \Delta V_{o2}$

$$\text{因为 } \Delta V_{o1} = A_{V1} \Delta V_{i1}$$

$$\Delta V_{o2} = A_{V2} \Delta V_{i2}$$

其中 A_{V1} 、 A_{V2} 为 Q_1 、 Q_2 组成单管放大器的放大倍数，在电路完全对称的情况下， $A_{V1} = A_{V2}$ 。

$$\text{所以 } \Delta V_0 = \Delta V_{o1} - \Delta V_{o2} = A_{V1} \Delta V_{i1} - A_{V2} \Delta V_{i2} = A_{V1} (\Delta V_{i1} - \Delta V_{i2}) = 2A_{V1} \Delta V_{i1}$$

$$\text{由于整个放大器的输入信号为 } \Delta V_i = \Delta V_{i1} - \Delta V_{i2} = 2\Delta V_{i1}$$

$$\text{因此，整个放大器的电压增益为： } A_V = \frac{\Delta V_0}{\Delta V_i} = \frac{2A_{V1} \Delta V_{i1}}{2\Delta V_{i1}} = A_{V1}$$

由此可见差分放大器的放大倍数与单管放大器相同。

实际上要求电路参数完全对称是不可能的，实际中我们采用了图 5-1 电路，图中 Q_3 用来作恒流源，使其集电极电流 I_{C3} 基本上不随 V_{CE3} 而变。其抑制零漂的作用原理，假设温度升高，静态电流 I_{C1} 、 I_{C2} 都增大。 I_{C3} 增大，引起 R_e 上压降增大，但是 V_{B3} 是固定不变的，于是迫使 V_{BE3} 下降，随着 V_{BE3} 下降，并抑制了 I_{C3} 的增大，因为 $I_{C3} = I_{C1} + I_{C2}$ ，同样， I_{C1} 和 I_{C2} 也受到抑制，这就达到了抑制零漂的目的。

为了表征差分放大器对共模信号的抑制能力，引入共模抑制比 $CMRR$ ，其定义为放大器对差模信号的放大倍数 A_d 与共模信号的放大倍数 A_c 之比。

$$CMRR = \frac{A_d}{A_c}$$

三、实验仪器

- 1、双踪示波器
- 2、数字万用表
- 3、信号源
- 4、差分放大模块

四、实验内容及步骤,

实验电路如图 5-1 所示

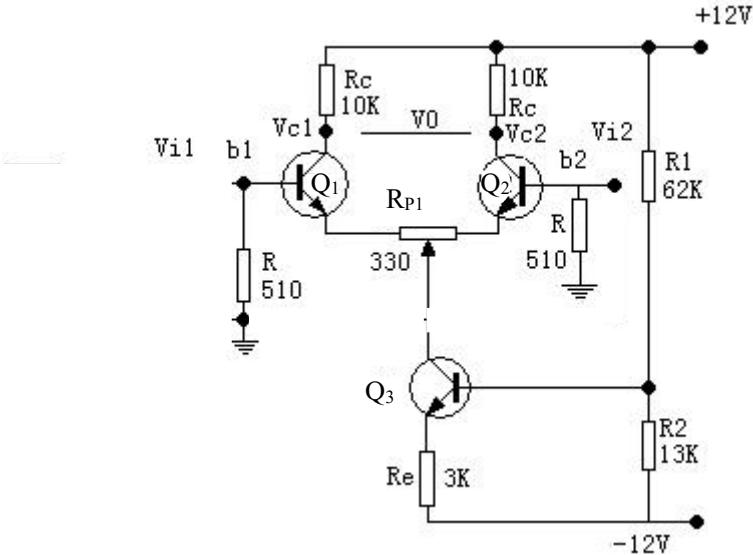


图 5-1 差动放大原理图

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，与信号源模块上+12V 和-12V 相连，调节电位器 R_{p1} 使双端输出电压 $V_0=0$ 。

(2) 测量静态工作点：测量 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 各极对地电压填入表 5-1 中。

表 5-1

对地电压	V_{c1}	V_{b1}	V_{e1}	V_{c2}	V_{b2}	V_{e2}	V_{c3}	V_{b3}	V_{e3}
测量值 (V)									

2、 测量双端输入差模电压放大倍数

将输入端的短路接地去掉，在实验箱模电信号源模块上调整 DC 信号源（调 S2 和 S3），V1 为 0.1V，V2 为-0.1V，然后分别接至 V_{i1} 、 V_{i2} ，用直流电压表测量 U_{c1} 、 U_{c2} 、 U_0 ，计算 A_{D1} 、 A_{D2} 、 A_D 并填写表 5-2。

表 5-2 双端输入差模电压放大倍数

测量值 (V)			计算值		
U_{c1}	U_{c2}	U_0	A_{D1}	A_{D2}	A_D

这里双端输入差模电压单端输出的差模放大倍数应用下式计算（下式 V_{C1} 、 V_{C2} 为静态时的电压）：

$$A_{D1} = \frac{U_{C1} - V_{C1}}{V_{i1}} \quad A_{D2} = \frac{U_{C2} - V_{C2}}{V_{i2}}$$
$$A_D = \frac{U_0}{V_{i1} - V_{i2}}$$

3、测量双端输入共模抑制比 CMRR

将两个输入端接在一起，，然后依次与模电信号源模块上 V1（+0.1V）和 V2（-0.1V）相连，记共模输入为 V_{IC} 。测量、计算并填写表 5-3，若电路完全对称，则 $U_{C1} - U_{C2} = U_{C0} = 0$ ，实验电路一般并不完全对称，若测量值有四位有效数字，则 V_{C0} 应近似等于零。

表 5-3 测量双端输入共模抑制比 CMRR

输入(V_{ic}) (V)	测量值 (V)			计算值			
	U_{C1}	U_{C2}	U_{C0}	A_{C1}	A_{C2}	A_{C0}	CMRR
+0.1							
-0.1							

这里，双端输入共模电压单端输出的共模放大倍数应用下式计算：

$$A_{C1} = \frac{U_{C1} - V_{C1}}{V_{IC}}$$

式中 V_{C1} 为静态时电压。

建议 CMRR 用 dB 表示：

$$CMRR=20\lg \left| \frac{A_D}{A_C} \right|dB$$

4、测量单端输入差模电压放大倍数

将 V_{i2} 接地， V_{i1} 分别与信号源模块上 V1（+0.1V）、V2（-0.1V）和 DDS 信号源，频率 $f=1KHZ$ ，有效值为 100mV 的正弦信号相连，测量、计算并填写表 5-4，若输入正弦信号，在输出端， V_{C1} ， V_{C2} 的相位相反，所以双端输出 V_0 的模是 V_{C1} 、 V_{C2} 的模的和，而不是差。

5-4 单端输入差模电压放大倍数

输入	测量值 (V)			单端输入放大 倍数 A_D
	V_{C1}	V_{C2}	V_{C0}	
直流+0.1V				
直流-0.1V				
正弦信号				

五、实验报告

- 1、根据实测数据计算图 5-1 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 CMRR 值。
- 4、总结差动电路的性能和特点。

实验六 比例求和运算电路

一、实验目的

- 1、掌握用集成运算放大器组成比例、求和电路的特点及性能。
- 2、学会上述电路的测试和分析方法。

二、实验原理

1、比例运算放大电路包括反相比例，同相比例运算电路，是其他各种运算电路的基础，我们在此把它们的公式列出：

$$\text{反相比例放大器} \quad A_f = \frac{V_o}{V_i} = -\frac{R_F}{R_1}$$

$$\text{同相比例放大器} \quad A_f = \frac{V_o}{V_i} = 1 + \frac{R_F}{R_1}$$

在同相比例放大器中

当 $R_F = 0$ 和 $R_1 = \infty$ 时， $A_f = 1$ ，这种电路称为电压跟随器

2、求和电路的输出量反映多个模拟输入量相加的结果，用运算实现求和运算时，可以采用反相输入方式，也可以采用同相输入或双端输入的方式，下面列出他们的计算公式。

$$\text{反相求和电路} \quad V_o = -\left(\frac{R_F}{R_1} \cdot V_{i1} + \frac{R_F}{R_2} \cdot V_{i2}\right)$$

$$\text{若 } R_1 = R_2 = R, \text{ 则 } V_o = -\frac{R_F}{R}(V_{i1} + V_{i2})$$

$$\text{双端输入求和电路} \quad V_o = \left(\frac{R_3}{R_2 + R_3} + \frac{R_3}{R_2 + R_3} \frac{R_F}{R_1}\right)V_{i2} - \frac{R_F}{R_1}V_{i1}$$

三、实验仪器

- 1、数字万用表
- 2、示波器
- 3、信号发生器
- 4、集成运算放大电路模块

四、预习要求

- 1、计算表 6-1 中的 V_o 和 A_f
- 2、估算表 6-2、6-3 的理论值
- 3、估算表 6-4、表 6-5 中的理论值

- 4、计算表 6-6 中的 V_0 值
- 5、计算表 6-7 中的 V_0 值

五、实验内容

1、电压跟随器

实验电路如图 6-1 所示.

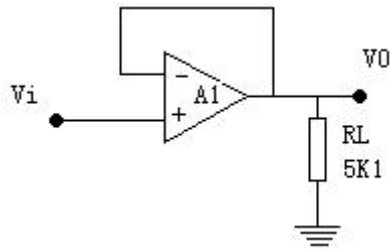


图 6-1 电压跟随器

按表 6-1 内容实验并测量记录 (V_i 由信号源模块上 V_1 取得)。

表 6-1

V_i (V)		-2	-0.5	0	0.5	1
V_0 (V)	$R_L = \infty$					
	$R_L = 5.1K$					

2、反相比例放大器

实验电路如图 6-2 所示。

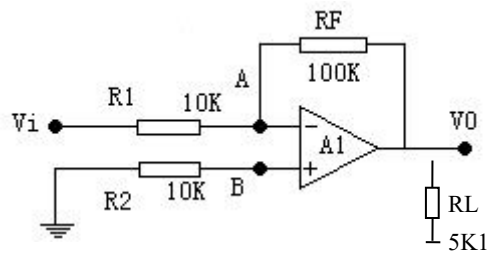


图 6-2 反相比例放大器

(1) 按表 6-2 内容实验并测量记录 (V_i 由信号源模块上 V_1 输出)

表 6-2

直流输入电压 V_i (mV)		-100	-500	-1000	+100	+500	+1000
输出电压 U_0	理论估算 (mV)						
	实测值 (mV)						
	误差						

(2) 按表 6-3 要求实验并测量记录.

表 6-3

测试条件	理论估算值			实测值		
	V_a	V_b	V_o	V_a	V_b	V_o
RL 开路 $V_i=0V$						
RL 开路 $V_i=800mv$						
RL=5.1K $V_i=800mv$						

3、同相比例放大器

实验电路如图 6-3 所示。

(1) 按表 6-4 和 6-5 实验测量并记录 (V_i 由信号源模块上 V1 提供)。

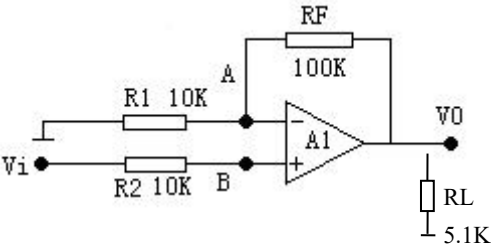


图 6-3 同相比例放大器

表 6-4

直流输入电压 U_i (mV)		-100	-500	-1000	+100	+500	+1000
输出电压 U_o	理论估算 (mV)						
	实测值 (mV)						
	误差						

表 6-5

测试条件	理论估算值			实测值		
	V_a	V_b	V_o	V_a	V_b	V_o
RL 开路 $V_i=0V$						
RL 开路 $V_i=800mv$						
RL=5.1K $V_i=800mv$						

4、反相求和放大电路.

实验电路如图 6-4 所示。

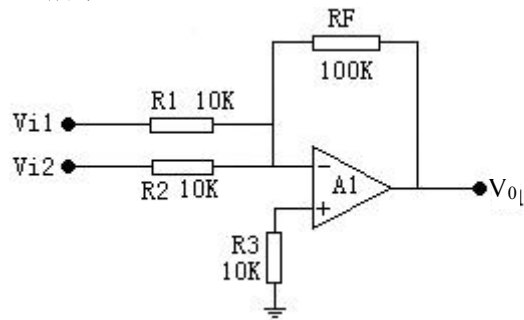


图 6-4 反相求和放大电路

按表 6-6 内容进行实验测量，并与预习计算比较（ V_{i1} 由信号源模块上 V1 提供， V_{i2} 由信号源模块上 V2 提供）。

表 6-6

V_{i1} (V)	0.3	-0.3
V_{i2} (V)	0.2	0.2
V_o (V)		

5、双端输入求和放大电路

实验电路如图 6-5 所示

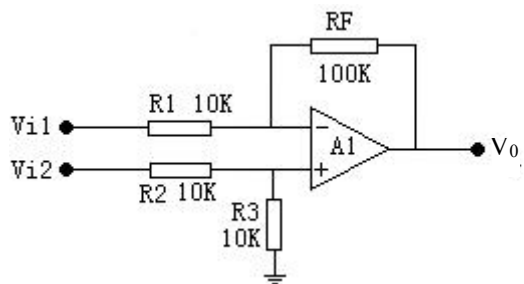


图 6-5 双端输入求和电路

按表 6-7 要求实验并测量记录（ V_{i1} 由信号源模块上 V1 提供， V_{i2} 由信号源模块上 V2 提供）。

表 6-7

V_{i1} (V)	1	2	0.2
V_{i2} (V)	0.5	1.8	-0.2
V_o (V)			

六、实验报告

- 1、总结本实验中 5 种运算电路的特点及性能。
- 2、分析理论计算与实验结果误差的原因。

实验七 积分与微分电路

一、实验目的

- 1、学会用运算放大器组成积分、微分电路。
- 2、学会积分、微分电路的特点及性能。

二、实验原理

1、积分电路是模拟计算机中的基本单元。利用它可以实现对微分方程的模拟，同时它也是控制和测量系统中的重要单元。利用它的充、放电过程，可以实现延时、定时以及产生各种波形。

图 7-1 的积分电路，它和反相比例放大器的不同之处是用 C 代替反馈电阻 R_f ，利用

虚地的概念可知 $i_i = \frac{V_i}{R}$

$$V_0 = -V_C = -\frac{1}{C} \int i_i dt = -\frac{1}{R_C} \int V_i dt$$

即输出电压与输入电压成积分关系。

2、微分电路是积分运算的逆运算。图 7-2 为微分电路图，它与图 7-1 的区别仅在于电容 C 变换了位置。利用虚地的概念则有：

$$V_0 = -i_R R = -i_C R = -RC \frac{dV_C}{dt} = -RC \frac{dV_i}{dt}$$

故知输出电压是输入电压的微分。

三、实验仪器

- 1、数字万用表
- 2、信号发生器
- 3、双踪示波器
- 4、集成运算放大电路模块

四、预习要求

1、分析图 7-1 电路，若输入正弦波， V_0 与 V_i 相位差是多少？当输入信号为 100Hz，有效值为 2V 时， $V_0 = ?$

2、分析图 7-2 电路，若输入方波， V_0 与 V_i 相位差多少？当输入信号为 160Hz，幅值为 1V 时，输出 $V_0 = ?$

3、拟定实验步骤、做好记录表格。

五、实验内容

1、积分电路

实验电路如图 7-1 所示

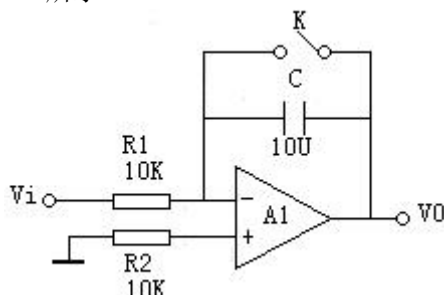


图 7-1 积分电路

(1) 取 $V_i = -1V$ 直流电压，断开与接通开关 K (开关 K 用一连线代替，拔出连线一端作为断开。) 用示波器直流电压档观察 V_0 变化；

(2) 使图 7-1 中积分电容改为 0.1μ ，断开 K， V_i 分别输入 100Hz 幅值为 2V 的方波和正弦波信号，观察 V_i 和 V_0 大小及相位关系，并记录波形；

(3) 改变图 7-1 电路输入信号 V_i 的频率，观察 V_i 与 V_0 的相位、幅值关系。

2、微分电路

实验电路如图 7-2 所示。

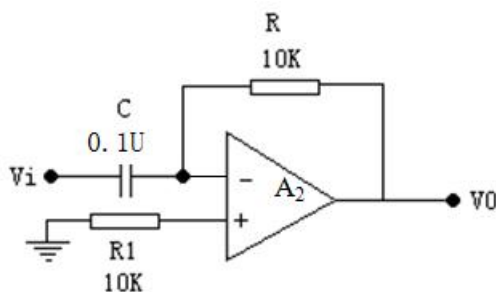


图 7-2 微分电路

(1) 输入正弦波信号 $f=200Hz$ 有效值为 1V，用示波器观察 V_i 与 V_0 波形并测量输出电压。

(2) 改变正弦波频率 (100Hz~800Hz) 观察 V_i 与 V_0 的相位、幅值变化情况并记录。

(3) 输入方波， $f=200Hz$ ， $V=2V$ ，用示波器观察 V_0 波形，改变输入信号频率和幅度，观察 V_0 波形有何变化。

3、积分-微分电路

实验电路如图 7-3 所示

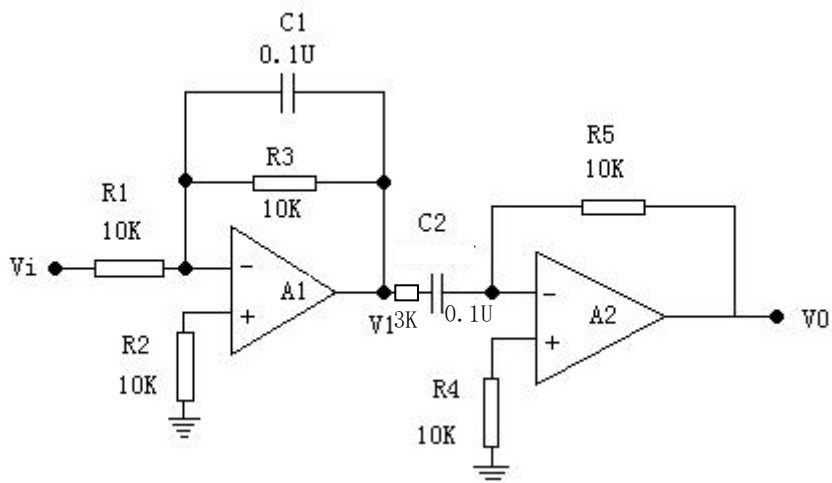


图 7-3 积分-微分电路

- (1) 在 V_i 输入 $f=400\text{Hz}$, $V=5\text{V}$ 的方波信号, 用示波器观察 V_i 和 V_o 波形并记录。
- (2) 改变 V_i 的频率 f , 观察 V_o 的波形有何变化。

六、实验报告

- 1、整理实验中的数据及波形, 总结积分, 微分电路特点。
- 2、分析实验结果与理论计算的误差原因。

实验八 波形发生电路

一、实验目的

- 1、掌握波形发生电路的特点和分析方法。
- 2、熟悉波形发生器设计方法。

二、实验原理

在自动化设备和系统中，经常需要进行性能的测试和信息的传送，这些都离不开一定的波形作为测试和传送的依据，在模拟系统中，常用的波形有正弦波、方波和锯齿波等。

当集成运放应用于上述不同类型的波形时，其工作状态并不相同。本实验研究的方波，三角波、锯齿波的电路，实质上是脉冲电路，它们大都工作在非线性区域。常用于脉冲和数字系统中作为信号源。

1、产生方波的电路

方波电路见图 8-1 所示。电路由集成运放与 R_1 、 R_2 及一个滞回比较器和一个充放电回路组成。稳压管和 R_3 的作用是钳位，将滞回比较器的输出电压限制在稳压管的稳定电压值。

我们知道滞回比较器的输出只有两种可能的状态，高电平或低电平。滞回比较器的两种不同的输出电平使 RC 电路进行充电或放电，于是电容上的电压将升高或降低，而电容上的电压又作为滞回比较器的输入电压，控制其输出端状态发生跳变，从而使 RC 电路由充电过程变为放电过程或相反。如此循环往复，周而复始，最后在滞回比较器的输出端即可得到一个高低电平周期性交替的矩形波即方波。该矩形波的周期可由下式求得：

$$T_{\text{矩}} = 2RCL_n \left(1 + \frac{2R_1}{R_2} \right)$$

2、产生三角波的电路

三角波电路如同 8-3 所示。电路由集成运放 A1 组成滞回比较器，A2 组成积分电路，滞回比较器输出的矩形波加在积分电路的反相输入端，而积分电路输出的三角波又接到滞回比较器的同相输入端，控制滞回比较器输出端的状态发生跳变，从而在 A2 的输出端得到周期性的三角波。调节 R_1 、 R_2 可使幅度达到规定值，而调节 R_4 可使振荡满足要求。该三角形的周期可由下式求得：

$$T = \frac{4R_1R_4C}{R_2}$$

3、锯齿波发生电路

在示波器的扫描电路以及数字电压表等电路中常常使用锯齿波。图 8-4 为锯齿波发生电路，它在原三角波发生电路的基础上，用二极管 D1、D2 和电位器 RP 代替原来的积分电阻，使积分电容的充电和放电回路分开，即成为锯齿波发生电路。其周期为：

$$T_{\text{矩}} = \frac{2R_1R_P C}{R_2}$$

三、实验仪器

- 1、双踪示波器
- 2、数字万用表
- 3、集成运算放大电路模块

四、预习要求

- 1、分析图 8-1 电路的工作原理，定性画出 V0 和 VC 波形。
- 2、若图 8-1 电路 R=10K，计算 V0 的频率。
- 3、在图 8-2 电路如何使输出波形占空比变大？利用实验箱上所标元器件画出原理图。
- 4、在图 8-3 电路中，如何改变输出频率？设计 2 种方案并画图表示。
- 5、在图 8-4 电路中如何连续改变振荡频率？画出电路图。（利用实验箱上的元器件）

五、实验内容

1、方波发生电路

实验电路如图 8-1 所示，双向稳压管稳压值一般为 5~6V。

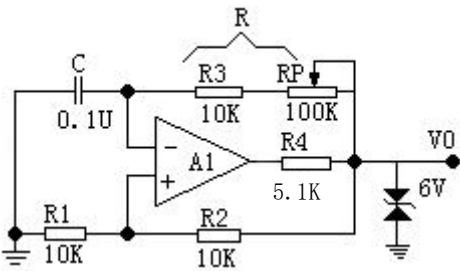


图 8-1 方波发生电路

- (1) 按电路图接线，观察 VC、V0 波形及频率，与预习比较。
- (2) 分别测出 R=10KΩ，110KΩ 时的频率，输出幅值，与预习比较。
- (3) 要想获得更低的频率应如何选择电路参数？试利用实验箱上给出的元器进行实验并观测之。

2、占空比可调的矩形波发生电路

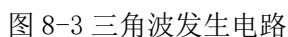
实验电路如图 8-2 所示。

- (1) 按图接线，观测并测量电路的振荡频率、幅值及占空比。改变 1RP 和 2RP，看



(2) 若要使占空比更大, 应如何选择电路参数并用实验验证。

实验电路如图 8-3 所示。



(1) 按图连线，分别观测 V01 及 V02 的波形并记录。改变 RP 看波形有何变化。

(2) 如何改变输出波形的频率? 按预习方案分别实验并记录。

实验电路如图 8-4 所示。



- (1) 按图接线，调整 RP 观测电路输出波形和频率。
- (2) 按预习时的方案改变锯齿波频率并测量变化范围。
- (3) 将 100K 电位器改成 22K，看波形有何变化。

六、实验报告

- 1、画出各实验的波形图。
- 2、画出各实验预习要求的设计方案，电路图。写出实验步骤及结果。
- 3、总结波形发生电路的特点，并回答。
 - (1) 波形产生电路需调零吗？
 - (2) 波形产生电路有没有输入端。

实验九 有源滤波器

一、实验目的

1. 熟悉滤波器的构成及其特性；
2. 学会测量滤波器幅频特性的方法。

二、实验原理说明

滤波器是一种能使有用频率信号通过而同时抑制（或大幅衰减）无用频率信号的电子装置。工程上常用它作信号处理、数据传送和抑制干扰等。这里主要是讨论模拟滤波器。以往这种滤波电路主要采用无源元件 R、L 和 C 组成，60 年代以来，集成运放获得了迅速发展，由它和 R、C 组成的有源滤波电路，具有不用电感、体积小、重量轻等优点。此外，由于集成运放的开环电压增益和输入阻抗均很高，输出阻抗又低，构成有源滤波电路后还具有一定的电压放大和缓冲作用。但是，集成运放的带宽有限，所以目前有源滤波电路工作频率难以做得很高，这是它的不足之处。

基本概念及初步定义

1. 初步定义

滤波电路的一般结构如图 9-1 所示。图中的 $v_i(t)$ 表示输入信号， $v_o(t)$ 为输出信号。

假设滤波器是一个线形时不变网络，则在复频域内有：

$$A(s) = V_o(s)/V_i(s)$$

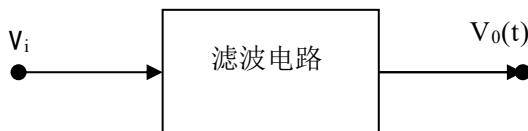


图 9-1 滤波电路的一般结构图

式中 $A(s)$ 是滤波电路的电压传递函数，一般为复数。对于实际频率来说 ($s=j\omega$) 则有：

$$A(j\omega) = |A(j\omega)| e^{j\phi(\omega)}$$

这里 $|A(j\omega)|$ 为传递函数的模， $\phi(\omega)$ 为其相位角。

此外，在滤波电路中关心的另一个量是时延 $\tau(\omega)$ ，它定义为：

$$\tau(\omega) = - \frac{d\phi(\omega)}{d\omega} (s)$$

通常用幅频响应来表征一个滤波电路的特性，欲使信号通过滤波器的失真很小，则相位和时延响应亦需考虑。当相位响应 $\phi(\omega)$ 作线性变化，即时延响应 $\tau(\omega)$

为常数时，输出信号才可能避免失真。

2. 滤波电路的分类

对于幅频响应，通常把能够通过的信号频率范围定义为通带，而把受阻或衰减的信号频率范围称为阻带，通带和阻带的界限频率称为截止频率。

理想滤波电路在通带内应具有零衰减的幅频响应和线性的相位响应，而在阻带内应具有无限大的幅度衰减（ $|A(j\omega)| = 0$ ）。通常通带和阻带的相互位置不同，滤波电路通常可分为以下几类：

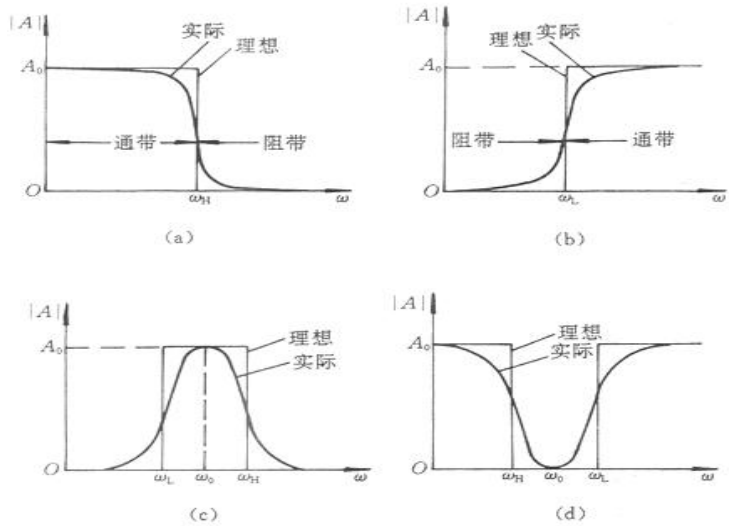
低通滤波电路：其幅频响应如图 9-2（a）所示，图中 A_0 表示低频增益 $|A|$ 增益的幅值。由图可知，它的功能是通过从零到某一截止角频率 ω_H 的低频信号，而对大于 ω_H 的所有频率完全衰减，因此其带宽 $BW = \omega_H$ 。

高通滤波电路：其幅频响应如图 9-2（b）所示，由图可以看到，在 $0 < \omega < \omega_L$ 范围内的频率为阻带，高于 ω_L 的频率为通带。从理论上来说，它的带宽 $BW = \infty$ ，但实际上，由于受有源器件带宽的限制，高通滤波电路的带宽也是有限的。

带通滤波电路：其幅频响应如图 9-2（c）所示，图中 ω_L 为低边截止角频率， ω_H 高边截止角频率， ω_0 为中心角频率。由图可知，它有两个阻带： $0 < \omega < \omega_L$ 和 $\omega > \omega_H$ ，因此带宽 $BW = \omega_H - \omega_L$ 。

带阻滤波电路：其幅频响应如图 9-2（d）所示，由图可知，它有两个通带：在 $0 < \omega < \omega_H$ 和 $\omega > \omega_L$ ，和一个阻带： $\omega_H < \omega < \omega_L$ 。因此它的功能是衰减 ω_L 到 ω_H 间的信号。同高通滤波电路相似，由于受有源器件带宽的限制，通带 $\omega > \omega_L$ 也是有限的。

带阻滤波电路抑制频带中点所在角频率 ω_0 也叫中心角频率。



(a) 低通滤波电路 (LPF) (b) 高通滤波电路 (HPF)
(c) 带通滤波电路 (BPF) (d) 带阻滤波电路 (BEF)

图 9-2 各种滤波电路的幅频响应

三、仪器及设备

- 1、示波器
- 2、信号发生器
- 3、集成运算放大电路模块

四、预习要求

- 1、预习教材有关滤波器内容；
- 2、分析图 9-1、图 9-2、图 9-3 所示电路。
- 3、大致画出三个电路的幅频特性曲线。

五、实验内容

1、测量低通滤波器的频响特性

实验电路如图 9-1 所示。

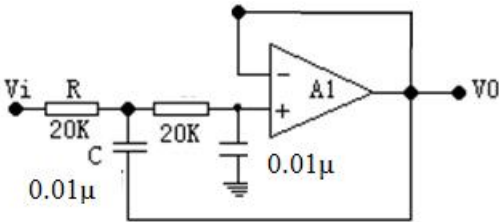


图 9-1 低通滤波器

(1) 逐点测量法

- 1) 按实验电路连线；
- 2) 将信号源 ($f=100\text{HZ}$ 正弦波，幅度峰-峰值为 2V) 与低通滤波器的 V_i 相连；
- 3) 用示波器测量低通滤波器输出 V_0 的幅度；
- 4) 保持输入信号不变，按照表 9-1 调节输入信号频率，测出与之相对应的输出信号 V_0 的幅度，并填入表中；
- 5) 以横轴为频率 f , 纵轴为输出电压幅度 V_0 ，按照表格画出频响特性。

(2) 扫频法测量

如果有扫频仪，可直接利用扫频仪测量滤波器的幅频响应及截止频率。

表 9-1

V_i (V)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
f (Hz)	100	200	300	400	500	700	800	1000	1200	1400
V_0 (V)										

2、测量高通滤波器的频响特性

实验电路如图 9-2 所示

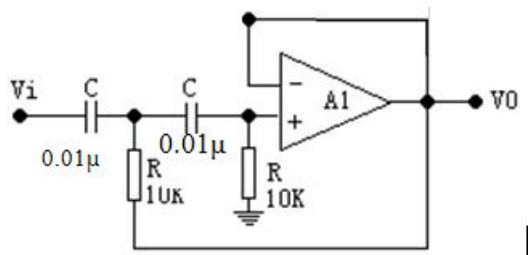


图 9-2 高通滤波器

- (1) 逐点测量法
- 1) 按实验电路连线；
 - 2) 将信号源 ($f=200\text{HZ}$ ，幅度峰-峰值为 2V 的正弦波) 加到高通滤波器输入端 V_i ；
 - 3) 用示波器测量高通滤波器输出 V_o 的幅度；
 - 4) 保持输入信号幅度不变，按照表 9-2 调节输入信号频率，测出与之对应的输出信号 V_o 的幅度，并填入表 9-2 中；
 - 5) 以横轴为频率 f ，纵轴为输出电压幅度 V_o ，按照表 9-2 中的数据，画出频响特性曲线。

- (2) 扫频法测量
- 如果有扫频仪，可直接利用扫频仪测量滤波器的幅频响应及截止频率。

表 9-2

V_i (V)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
f (Hz)	200	400	600	800	1000	1200	1600	2000	2400	2800
V_o (V)										

3、测量带阻滤波器的频响特性

实验电路如图 9-3 所示

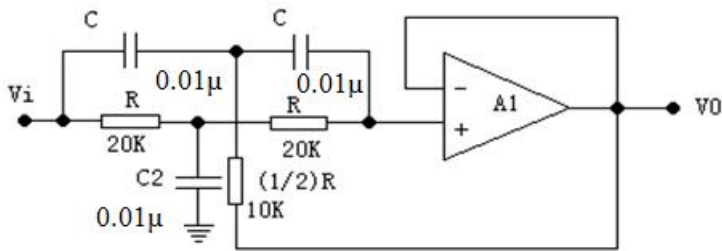


图 9-3 带阻滤波器

- (1) 按照上述方法，测出带阻滤波器幅频特性。
- (2) 实测电路中心频率。

六、实验报告

- 1、整理实验数据，画出各电路曲线，并与计算值对比，分析误差；

- 2、如何组成带通滤波器?试设计一中心频率为 300HZ、带宽 200Hz 的带通滤波器。

实验十 电压比较器

一、实验目的

- 1、掌握比较器的电路构成及特点。
- 2、学会测试比较器的方法。

二、实验原理

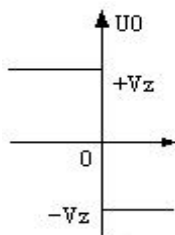
电压比较就是将一个模拟量的电压信号去和一个参考电压相比较，在二者幅度相等的附近，输出电压将产生跃变，通常用于越限报警，模数转换和波形变换等场合。

1、过零比较器

如图 10-1 所示为反相输入方法的过零比较器，利用两个背靠背的稳压管实现限幅。集成运放处于工作状态，由于理想运放的开环差模增益 $A_{od} = \infty$ 。

因此，当 $V_i < 0$ 时， $V_o = +V_{opp}$ （为最大输出电压） $> V_Z$ ，导致上稳压管导通下稳压管反向击穿 $V_o = +V_Z = +6V$ 。

当 $V_i > 0$ 时， $V_o = -V_{opp}$ ，导致上稳压管反向击穿，下稳压管正向导通 $V_o = -V_Z = -6V$ ，其比较器的传输特性为：



2、反相滞回比较器

如图 10-2 所示，利用叠加原理求得同相输入端的电位为：

$$V_+ = \frac{R_F}{R_2 + R_F} V_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} V_o$$

若原来 $V_o = -V_Z$ ，当 V_i 逐渐增大时，使 V_o 从 $-V_Z$ 跳变到 $+V_Z$ 所需的门限电平用 V_{T+} 表示，

$$V_{T+} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} V_{REF} + \frac{R_2}{R_2 + R_F} V_Z$$

若原来的 $V_o = +V_Z$ ，当 V_i 逐渐减小，使 V_o 从 $+V_Z$ 跳变为 $-V_Z$ 所需的门限电平用 V_{T-} 表示，

$$\text{则 } V_{T-} = \frac{R_F}{R_2 + R_F} V_{REF} - \frac{R_2}{R_2 + R_F} V_Z$$

上述两个门限电平之差称为门限宽度线回差，用 ΔV_T 表示

$$\Delta V_T = V_{T+} - V_{T-} = \frac{2R_2}{R_2 + R_F} V_Z$$

门限宽度 ΔV_T 的值取决于 V_Z 及 R_2 、 R_F 的值与参考电压 V_{REF} 无关, 改变 V_{REF} 的大小可同时调节 V_{T+} 、 V_{T-} 的大小, 滞回比较器的传输特性可左右移动, 但滞回曲线的宽度将保持不变。

3、同相输入滞回比较器

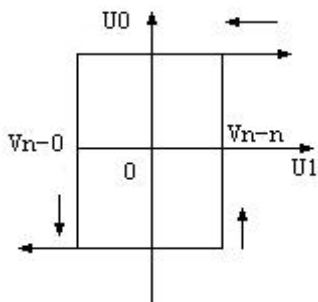
如图 10-3, 由于 $V_- = V_{REF} = 0$ 故 $V_+ = V_- = 0$ 利用叠加原理可得:

$$V_+ = \frac{R_F}{R_1 + R_F} V_1 + \frac{R_1}{R_1 + R_F} V_0 \quad \therefore V_1 = -\frac{R_1}{R_F} V_0$$

$$V_1 \text{ 即为阈值 } V_{T+} = \frac{R_1}{R_F} V_Z \quad V_{T-} = -\frac{R_1}{R_F} V_Z$$

$$\therefore \Delta V_T = V_{T+} - V_{T-} = \frac{R_1}{R_F} V_Z - \left(-\frac{R_1}{R_F} V_Z \right) = 2 \frac{R_1}{R_F} V_Z$$

滞回曲线图示:



三、仪器设备

- 1、双踪示波器
- 2、信号发生器
- 3、数字万用表
- 4、集成运算放大电路模块

四、预习要求

1、分析图 10-1 电路, 弄清以下问题:

- (1) 比较器是否要调零? 原因何在?
- (2) 比较器两个输入端电阻是否要求对称? 为什么?
- (3) 运放两个输入端电位差如何估计?

2、分析图 10-2 电路, 计算:

- (1) 使 V_o 由 $+V_{om}$ 变为 $-V_{om}$ 的 V_i 临界值；(V_{om} 为稳压管上稳定后的电压)
- (2) 使 V_o 由 $-V_{om}$ 变为 $+V_{om}$ 的 V_i 临界值；
- (3) 若由 V_i 输入有效值为 1V 正弦波，试画出 V_i - V_o 波形图；

3、分析图 10-3 电路，重复 2 的各步。

4、按预习内容准备记录表格及记录波形的坐标纸。

五、实验内容

1、过零比较器

实验电路如图 10-1 所示

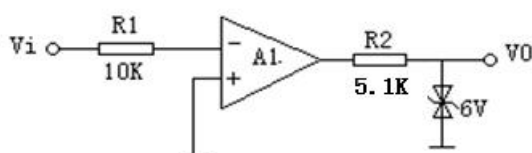


图 10-1 过零比较器

- (1) 按图接线，将 V_i 悬空时测 V_o 电压；
- (2) V_i 输入 500Hz 有效值为 1V 的正弦波，观察 V_i - V_o 波形并记录(注意 V_o 的正负值)；
- (3) 改变 V_i 幅值，观察 V_o 变化。

2、反相滞回比较器

实验电路如图 10-2 所示

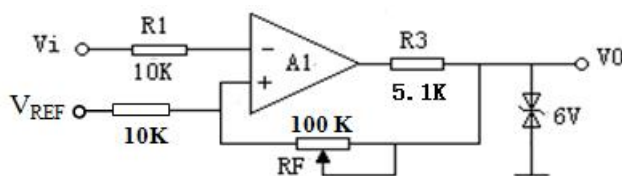


图 10-2 反相滞回比较器

(1) 按图接线，将 V_{REF} 接地并将 R_F 调为 100K， V_i 接 DC 电压源（信号源模块上 V1），调整 V_i 测出 V_o 由 $+V_{om} \rightarrow -V_{om}$ 时 V_i 的临界值（测 V_o 可用示波器直流档来测，也可用三用表的直流档）。

(2) 同上， V_o 由 $-V_{om} \rightarrow +V_{om}$ 。

(3) V_i 接 500Hz 有效值 2V 的正弦信号，观察并记录 V_i - V_o 波形。

(4) 将电路中 R_F 调为 50K，重复上述实验。

3、同相滞回比较器。实验电路为图 10-3 所示

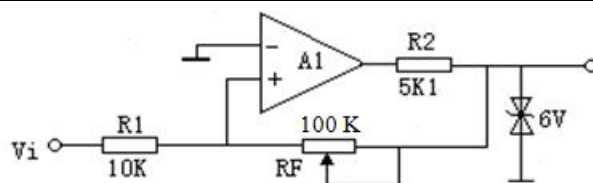


图 10-3 同相滞回比较器

- (1) 参照反相滞回比较器的实验方法自拟实验步骤及方法。
- (2) 将结果与反相滞回比较器相比较。

六、实验报告

- 1、整理实验数据及波形图。并与预习计算值比较。
- 2、总结几种比较器特点。

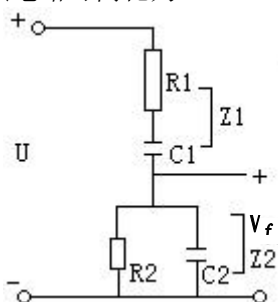
实验十一 集成电路 RC 正弦波振荡器

一、实验目的

- 1、掌握桥式 RC 正弦波振荡器的电路构成及工作原理；
- 2、熟悉正弦波振荡器的调整、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、实验原理

文氏振荡电桥见图 11-1，反馈电路可简化为：



其频率特性表示式为：

$$\begin{aligned}\dot{F} = \frac{\dot{V}_f}{\dot{V}} &= \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{\frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}}{R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + \frac{R_2}{1 + j\omega R_2 C_2}} \\ &= \frac{1}{\left(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_2}{C_1}\right) + j\left(\omega C_2 R_1 - \frac{1}{\omega C_1 R_2}\right)}\end{aligned}$$

为了调节振荡频率的方便，通常使 $R_1 = R_2 = R$ ， $C_1 = C_2 = C$ ，令 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$

则上式可简化为：

$$\dot{F} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{W}{W_0} - \frac{W_0}{W}\right)}$$

其幅度特性为：

$$|\dot{F}| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + \left(\frac{W}{W_0} - \frac{W_0}{W}\right)^2}}$$

相频特性为：

$$\varphi_F = -\arctg \left[\frac{\left(\frac{W}{W_0} - \frac{W_0}{W}\right)}{3} \right]$$

$$\text{当 } \omega = \omega_0 = \frac{1}{RC} \text{ 时, } |\dot{F}|_{\max} = \frac{1}{3}, \quad \dot{\phi} = 0$$

就是说当 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, \dot{V}_f 的幅值达到最大, 等于 \dot{V} 幅值的 1/3, 同时 \dot{V}_f 与 \dot{V} 同相。

其起振条件: 必须使 $|\dot{A}\dot{F}| > 1$, 因此文氏振荡电路的起振条件为: $\left| \dot{A} \frac{1}{3} \right| > 1$,

即 $|\dot{A}| > 3$

因同相比运算电路的电压放大倍数为: $A_{uf} = 1 + R_f/R_i$, 因此实际振荡电路中负反馈支路的参数应满足以下关系:

$$R_F > 2R' \quad (R' = RR_F = 2R_P)$$

三、实验仪器

- 1、双踪示波器
- 2、低频信号发生器
- 3、频率计
- 4、集成运算放大电路模块

四、预习要求

- 1、复习 RC 桥式振荡器的工作原理。
- 2、完成下列填空题

(1) 图 11-1 中, 正反馈支路是由_____组成, 这个网络具有_____特性, 要改变振荡频率, 只要改变_____或_____的数值即可。

(2) 图 11-1 中, $1R_P$ 和 R_1 组成_____反馈, 其中_____是用来调节放大器的放大倍数, 使 $A_{uf} \geq 3$ 的。

五、实验内容

- 1、按图 11-1 接线。注意电阻 $1R_P = R_1$ 需预先调好再接入。
 - 2、用示波器观察输出波形。
 - 3、用频率计测量上述电路输出频率。
 - 4、改变振荡频率: 调节 $1R_P$ 即可改变振荡频率, 测振荡频率 f_0 之前, 应适当调节 $2R_P$ 使 V_0 无明显失真后, 再测频率。
 - 5、测定运算放大器放大电路的闭环电压放大倍数 A_{uf} 。
- 先测出图 11-1 电路输出电压 V_0 值后, 关断实验箱电源, 保持 $2R_P$ 不变, 断开图 11-1 中 “A” 点接线, 把低频信号发生器的输出电压接至一个 $1K\Omega$ 的电位器上, 再从这个 $1K\Omega$

电位器的滑动接点取 V_i 接至运放同相输入端, 如图 11-2 所示, 将低频信号源频率调至上面测出的 f_0 上, 再调节 V_i 使 V_0 等于原值。测出此时的 V_i 值。则:

$A_{uf}=V_0/V_i= \underline{\hspace{2cm}}$ 倍

6、自拟详细步骤, 测定 RC 串并联网路的幅频特性曲线。

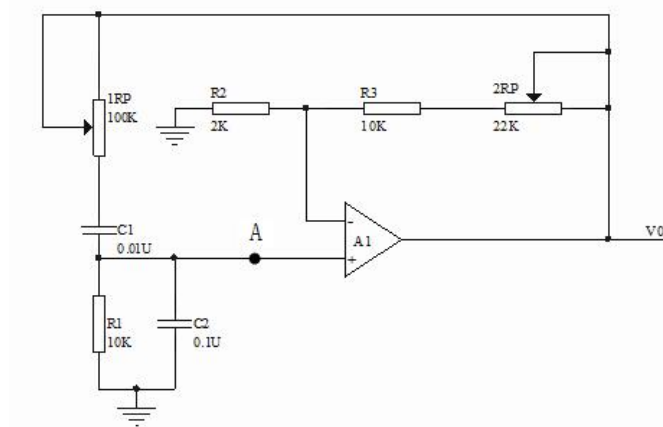


图 11-1

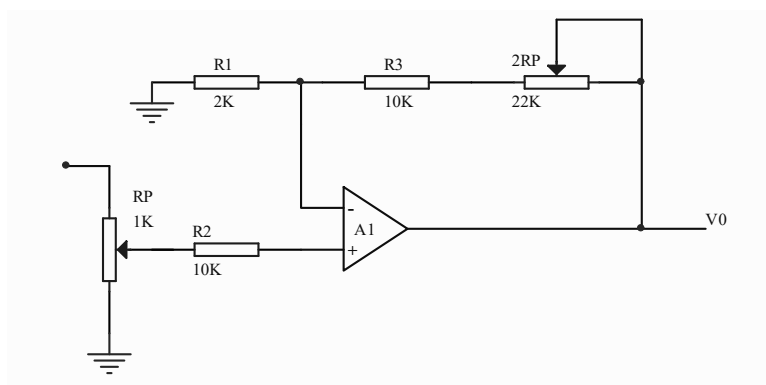


图 11-2

思考:

- 1、若元件完好, 接线正确, 电源电压正常, 而 $V_0=0$, 原因何在? 应怎么办?
- 2、有输出但出现明显失真, 应如何解决?

六、实验报告

1、电路中哪些参数与振荡频率有关? 将振荡频率的实测值与理论估算值比较, 分析产生误差的原因。

2、总结改变负反馈深度对振荡器起振的幅值条件及输出波形的影响。

3、完成预习要求中第 2、3 项内容。

4、作出 RC 串并联网路的幅频特性曲线。

实验十二 集成功率放大器

一、实验目的

- 1、熟悉集成功率放大器的特点。
- 2、掌握集成功率放大器的主要性能指标及测量方法。

二、实验原理

图 12-1 为 LM386 内部电路。

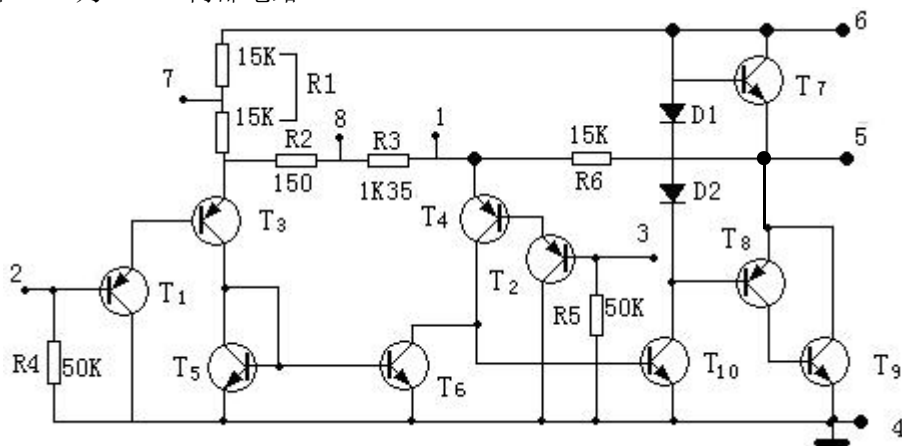


图 12-1 LM386 内部电路

图中 $T_1 \sim T_6$ 管为输入极，其中 T_1 、 T_3 和 T_2 、 T_4 管接成共集-共射组合差分放大电路。 T_5 、 T_6 为镜像电流源，作为有源负载， R_2 、 R_3 为发射极反馈电阻，差放中 T_3 管的静态电流 I_{CQ3} ($\approx I_{EQ3}$) 由 V_{CC} 通 R_1 设定， T_4 管的静态电流 I_{CQ4} ($\approx I_{EQ4}$) 由输出静态电位 V_{OQ} 通过反馈电阻 R_6 设定，设定管导通电压相等，且忽略 R_4 、 R_5 上的压降 ($V_{BQ1}=V_{BQ2} \approx 0$)

$$\text{则: } I_{CQ3} = \frac{V_{CC} - V_{EB(OW)3} - V_{EB(OW)1}}{R_1} \approx \frac{V_{CC} + 2V_{RE(OW)}}{R_1}$$

$$I_{CQ4} = \frac{V_{OQ} - V_{EB(OW)4} - V_{EB(OW)2}}{R_6} \approx \frac{V_{OQ} + 2V_{BE(OW)}}{R_6}$$

静态时差放两侧电流相等 $I_{CQ3}=I_{CQ4}$ ，且已知

$$R_1 = 30K = 2R_6 = 2 \times 15 = 30K$$

$$\text{求得: } V_{OQ} = V_{OC} / 2 - V_{BE(OW)} \doteq V_{OC} / 2$$

由于 R_6 的负反馈作用 V_{OQ} 始终维持在 $V_{OC}/2$ 附近。

当各管工作在放大区时， T_1 (或 T_2) 管发射极最低瞬时电位 $V_{E3} = V_{EC3} + V_{BE5} = V_{EC(SAT)} + V_{EC(OW)} = 0.3 + 0.7 = 1V$ ，相应地， T_1 (或 T_2) 管发射极最

低瞬时电位 $V_{E1} = V_{E3} - V_{ER3} = 1 - 0.7 = 0.3\text{V}$ ，因而 T_1 （或 T_2 ）管基极允许最低瞬时电位可达到 -0.4V ($V_{B1} = V_{E1} - V_{EB1} = 0.3 - 0.7 = -0.4\text{V}$)，可见，幅度小于 0.4V 的交流信号电压加到任一输入端，都可保证各管工作在放大区。同时 R_4 、 R_5 已为 T_1 、 T_2 管基极提供了直流通路，因此，可允许输入信号通过隔直电容加到任一输入端。

中间级由 T_{10} 和 I_0 组成有源负载共发射极放大器的激励级对电压进行放大，由 $T_7 \sim T_9$ 管接成互补推挽电路的功率输出级， D_1 、 D_2 给 T_7 、 T_8 提供偏置电压。

在整个放大器中， R_6 不仅是直流负反馈电阻，也是交流负反馈电阻，当 1、8 脚之间加上电容 C_2 时，输出交流信号电压通过 R_6 通过 R_2 、 R_3 之间产生反馈信号电压，电压反馈系数：

$$K = \frac{R_2}{R_2 + R_6} = \frac{150}{150 + 1500} = \frac{1}{100}$$

在深度负反馈条件下，放大器的电压增益 $A_{vf} \doteq \frac{1}{K_{fv}} = 100$ 倍，负反馈不仅稳定了

电压增益，还有效地减小了非线性失真。

三、实验仪器及材料

- 1、示波器
- 2、信号发生器
- 3、万用表
- 4、集成功放模块

四、预习要求

- 1、复习集成功率放大器工作原理，对照图 12-2 分析电路工作原理。
- 2、在图 12-2 电路中，若 $V_{CC}=12\text{V}$ ， $R_L=8\Omega$ ，估算该电路的 P_{cm} 、 P_V 值。
- 3、阅读实验内容，准备记录表格。

五、实验内容

- 1、图 12-2 电路为集成功率放大器实验电路。

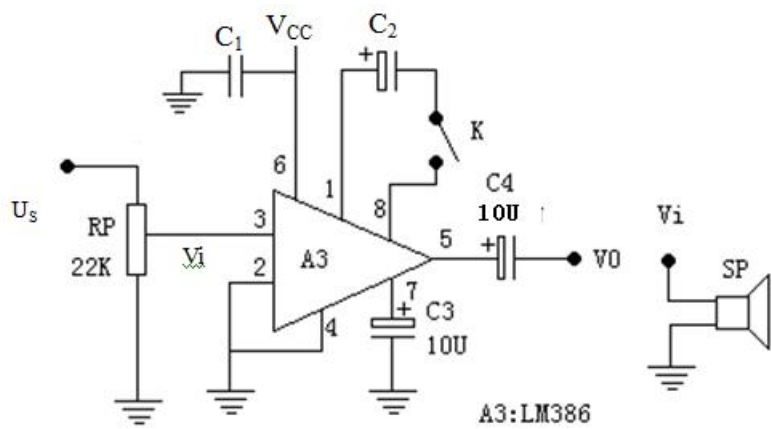


图 12-2

2、实验内容

本实验电路用的是 LM386，其最大输出功率为 0.5W，实验中“1”，“8”端开路，LM386 的电压放大倍数约为 20 倍，负载为 8Ω 的喇叭。为减少损坏，加在图 12-2 所示电位器 R_p 上端的电压不得超过有效值 500mV。

(1) 输入交流信号 $f=1\text{KHZ}$ ，有效值 $U_s=500\text{mV}$ ，调 R_p 电位器使 $V_i=300\text{mV}$ ，不接负载，改变频率，测量功放的幅频特性，绘制幅频特性曲线。

(2) 接负载 $R_L=8\Omega$ 的喇叭，重复 1) 中的实验步骤，将 1) 和 2) 中得到的幅频特性曲线绘制在同一张图上。

(3) 输入交流信号 $f=1\text{KHZ}$ ， U_s 峰-峰值 1000mv，不接负载，按表 12-1 输入电压 V_i ，调整电位器 RP 测出与输入电压 V_i 对应的输出电压，画出功放的输入—输出特性曲线。

表 12-1 测量输入—输出特性曲线

输入 V_i	50mV	100mV	200mV	300mV	400mV	500mV
空载输出 (V)						
接载输出 (V)						

(4) 接负载 $R_L=8\Omega$ 的喇叭，重复 3) 中的实验步骤，将 3) 和 4) 中得到的输入—输出特性曲线绘制在同一张图上, 建议按表 12-1 要求测得。

(5) 输入交流信号， $f=1\text{KHZ}$ ，有效值 $V_i=200\text{mV}$ ，接上负载 $R_L(8\Omega)$ ，测量并估算功放的输出交流功率 P ，直流电源消耗功率 P_V （忽略 LM386 中电压放大电路的功耗，仅计及功率放大电路的功耗）和效率 η 。

对于正弦信号，在正半周 T_7 导通， T_8 、 T_9 组成的复合管截止， T_7 集电极上的功耗为：

$$\begin{aligned}
 P_{T7} &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{V_{CC}}{2} - v_0 \right) \frac{v_0}{R_L} d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{V_{CC}}{2} - v_{om} \sin \omega t \right) \frac{v_{om} \sin \omega t}{R_L} d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \left(\frac{V_{CC} V_{om}}{2} \sin \omega t - v_{om}^2 \sin^2 \omega t \right) d(\omega t) \\
 &= \frac{1}{R_L} \left(\frac{V_{CC} V_{om}}{2\pi} - \frac{V_{om}^2}{4} \right)
 \end{aligned}$$

在负半周 T_7 截止， T_8 、 T_9 组成的复合管导通，复合管等效集电极上的功耗

$P_{T8-9} \approx P_{T7}$ 。负载在一个周期中得到的功率为：

$$P_0 = \frac{V_{om}^2}{2R_L} = \frac{V_{rms}^2}{R_L},$$

其中 V_{om} 为输出正弦信号的幅值， V_{rms} 为正弦信号的有效值， V_{CC} 为电源电压（+12V）

所以直流电源的功耗为：

$$P_V \approx 2P_{T7} + P_0 = \frac{V_{CC} V_{om}}{\pi R_L}$$

效率近似为：

$$\eta = \frac{P_0}{P_V} = \frac{\pi V_{om}}{2V_{CC}}$$

六、实验报告

- 1、根据实验测量值、计算各种情况下 PCM、PV，及 η 。
- 2、试述负载对功放性能的影响。

实验十三 RC 正弦波振荡器

一、实验目的

- 1、了解双 T 网络振荡器的组成与原理，及振荡条件。
- 2、学会测量、调试振荡器。

二、实验原理

RC 正弦波振荡器是指只在一个频率下满足振荡条件，从而产生单一频率的正弦波信号。RC 正弦波振荡器实际为一正反馈放大电路，本实验采用的双 T 网络振荡器，如图 13-1 所示。

当振荡电路的电源刚接通时，电路中出现一个电冲击，由于这种扰动的不规则性，因此它包含着频率范围很宽的各次谐波。其中所有不符合振荡条件的谐波都逐渐衰减而最终消失，只有符合振荡条件，频率为 f_0 的谐波能够建立起稳定的振荡。设该次谐波在放大电路的输入端 A' 产生一个微弱电压 V_{i1} 经过 Q_1 放大，在 Q_1 的集电极得到 V_{O1} ， V_{O1} 通过反馈网络，在 A 点得到 V_{f2} ，因为满足起振条件，即，所以 $V_{f2} > V_{i1}$ ，这个反馈电压 V_{f2} 作为放大电路的输入电压再一次经过放大然后再反馈到输入端，如此不断地经过放大→反馈→再放大……的变化过程，当反馈后的电压与原来的输入电压相等，即 $V_{fA} = V_{iA}$ 时，于是电路达到稳幅振荡。

三、实验仪器

- 1、示波器
- 2、信号发生器
- 3、分立元件放大电路模块

四、预习要求

- 1、复习 RC 串并联振荡器的工作原理。
- 2、计算图 13-1 电路的振荡频率。

五、实验内容

按图 13-1 所示搭建电路。

1、双 T 网络先不接入 (A 、 B 处先不与 A' 、 B' 连接)，接上 +12V 电源（与信号源模块上 +12V 相连）调整 $2R_p$ 电位器使 Q_1 静态工作点即 Q_1 的基极电压 V_b 为 2V 左右。

2、按图 13-1 接入双 T 网络，用示波器测量放大器输出，若无振荡输出，应调整 $1R_p$ 。

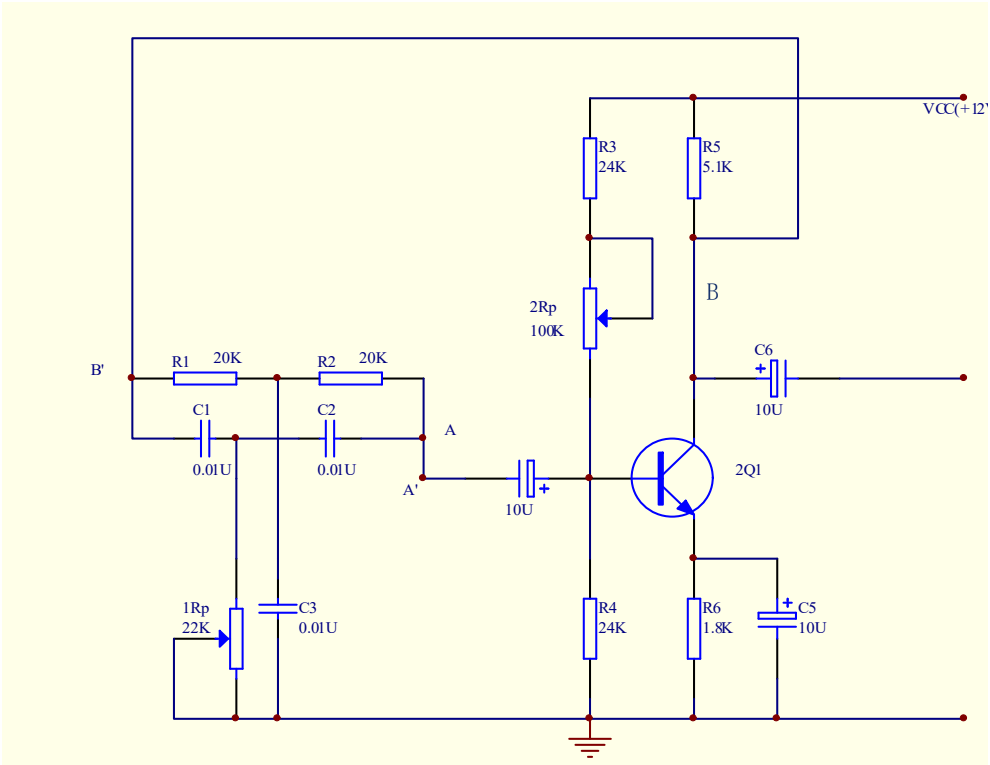


图 13-1 RC 正弦波振荡器

- 3、用示波器测量振荡频率并与预习值比较。
- 4、由小到大调节 1Rp 观察输出波形，并测量电路刚开始振荡时 1Rp 的阻值 (测量时断电并断开连线)。
- 5、将图 13-1 中双 T 网络与放大器断开，用信号发生器的信号注入双 T 网络，观察双 T 网络输出波形。保持输入信号幅度不变，频率由低到高变化，找出输出信号幅值最高的频率，看是否与构成振荡器的频率一致。

六、实验报告

- 1、整理实验测量数据和波形。
- 2、回答问题
 - (1) 图 13-1 所示电路是何种形式反馈。
 - (2) R5 在电路中起什么作用。

实验十四 LC 振荡器及选频放大器

一、实验内容

- 1、了解 LC 正弦波振荡器的组成与原理及振荡条件。
- 2、掌握 LC 选频放大器幅频特性的测试方法。

二、实验原理

图 14-2 为三极管 LC 选频放大电路。R3、1R_p、R4、2R_p、R6、C2 为放大器偏置元件，为三极管提供静态工作点使其工作在放大区。

LC 并联谐振回路（谐振频率 f₀）作放大器集电极负载，主要作用是选频，为振荡器产生正弦波。

输入信号 S_i 经 R₁、R₂ 分压后（ $V_{bc} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_S$ ）经 C1 耦合送至 Q₁ 的 b-e 之间，

经放大后，通过 LC 选频，选出频率为 f₀ 的信号送到负载 R₇ 或 R₈ 上。

1、LC 选频放大器的品质因数。

在 LC 并联谐振电路中，无负载时电路的品质因数 Q' 近似和电感线圈的品质因数 Q

相等，即 $Q' = Q = \frac{R}{\omega_0 L} = \frac{1}{g' \omega_0 L}$

当并联谐振回路接在选频放大器的集电极，并在次级接有负载时，谐振电路的有载品质因数为：

$$Q_L = \frac{1}{g W'_0 L}$$

$$g = g'_0 + g'_L + g'$$

其中 $g'_0 = h_{oe}$ 为晶体管输出电导； $g'_L = \frac{1}{R_L}$ 为负载电导； g' 为线本身的电导。

此时谐振电路的谐振频率 f₀ 为 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC'}}$

2、LC 选频放大器的电压放大倍数

LC 选频放大器的放大倍数与频率有关，若在频率 f₀ 时放大倍数为 A₀，而在其它频率上放大倍数为 A，则放大器的相对放大倍数为

$$\left| \frac{A}{A_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + Q_L^2 \frac{4(f-f_0)^2}{f_0^2}}}$$

在高于或低于 f_0 时，放大器的相对放大倍数都有减小，离 f_0 越远放大倍数越小，随 Q_L 的不同，放大器的相对放大倍数和频率之间关系如图 14-1 所示。

放大器的相对放大倍数 $\left| \frac{A}{A_0} \right| = \frac{1}{\sqrt{2}}$ 的两个频率之间的频率范围定义为放大器的通频带。

$$2\Delta f = f_H - f_L = \frac{f_0}{Q_L}$$

通频带与 Q_L 成反比， Q_L 越高，通频带越窄，曲线越尖锐，选择性越好。

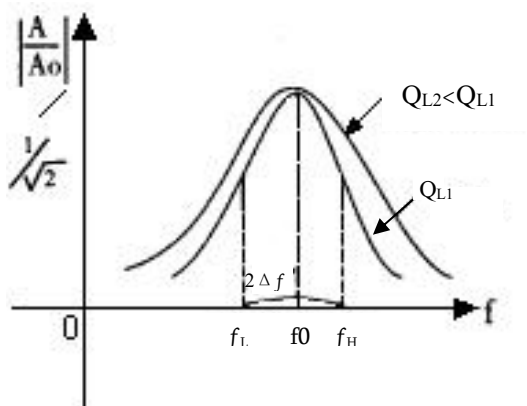


图 14-1 选频特性曲线

三、实验仪器

- 1、正弦波信号发生器
- 2、示波器
- 3、频率计（若无频率计，可由示波器测量波形周期再进行换算。）
- 4、分立元件放大电路模块

四、预习要求

- 1、复习 LC 电路三点式振荡器振荡条件及频率计算方法，计算图 14-2 所示电路中当电容 C 分别为 $0.047 \mu F$ 和 $0.01 \mu F$ 时的振荡频率。
- 2、复习 LC 选频放大器幅频特性。

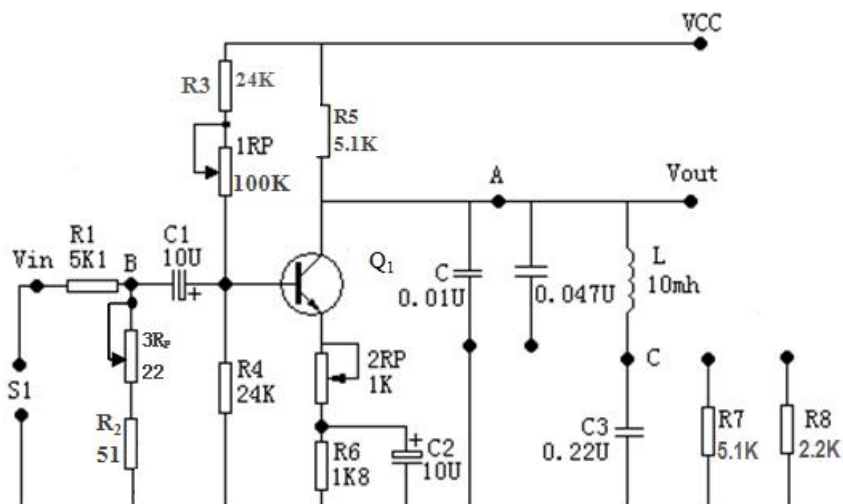


图 14-2

五、实验内容及步骤

1、测选频放大器的幅频特性曲线

- (1) 按图 14-2 接线，先选电容 C 为 $0.01 \mu\text{F}$ 。
- (2) 接上 +12V 电源（与信号源模块 +12V 相连），调 $1R_p$ 使晶体管 Q_1 的集电极电压为 6V。
- (3) 调信号源幅度和频率，使 $f \approx 16\text{KHz}$ ， $U_s = 3V_{p-p}$ ，接到放大器输入端 V_{in} ，用示波器监视 V_{out} 输出波形，调 $2R_p$ 和 $3R_p$ 使失真最小，输出幅度最大，测量此时 A 点和 B 点幅度，计算放大倍数 $A_U = \frac{U_A}{U_B}$ 。

(4) 微调信号源频率（信号源输入幅度不变）使 V_{out} 最大，并记录此时的 f_0 及输出信号幅值 V_{out} 。

(5) 改变信号源频率，使 f 分别为 (f_0-6) ， (f_0-4) ， (f_0-2) ， (f_0-1) ， (f_0+1) ， (f_0+2) ， (f_0+4) ， (f_0+6) ，（单位：KHz），分别测出相对应频率的输出幅度，然后按照所测数据画出幅频特性曲线。

(6) 将电容 C 改接为 $0.047 \mu\text{F}$ ，重复上述实验步骤（输入信号信号频率改为 8KHz 左右）。

2、LC 振荡器的研究

图 14-2 去掉信号源，先将 $C = 0.01 \mu\text{F}$ 接入，断开 R_2 。在不接通 B、C 两点的情况下，令 $2R_p = 0$ ，调 $1R_p$ 使 V 的集电极电压为 6V。

(1) 振荡频率

① 接通 B、C 两点，用示波器观察 A 点波形，调 $2R_p$ 使波形不失真，测量此时振荡频率，并与前面实验的选频放大器谐振频率 f_0 比较。

② 将 C 改为 $0.047 \mu\text{F}$ ，重复上述步骤。

(2) 振荡幅度条件

①在上述形成稳定振荡的基础上，测量 C 点和 A 点的电压 V_C 、 V_A 。求出 $Au = \frac{V_A}{V_C}$ 值，

验证 $Au = \frac{V_A}{V_C}$ 是否等于 1。

②调 $2R_p$ ，加大负反馈，观察振荡器是否会停振。

③在恢复振荡的情况下，在 A 点分别接入 5.1K、2.2K 负载电阻，观察输出波形的变化。

3、影响输出波形的因素

(1) 在输出波形不失真的情况下，调 $2R_p$ ，使 $2R_p \rightarrow 0$ ，即减小负反馈，观察振荡波形的变化。

(2) 在波形不失真的情况下，调 $1R_p$ 观察振荡波形变化。

六、实习报告

- 1、由实验内容 1 作出选频的 $|AU| \sim f$ 曲线。
- 2、记录实验内容 2 的各步实验现象，并解释原因。
- 3、总结负反馈对振荡幅度和波形的影响。
- 4、分析静态工作点对振荡条件和波形的影响。

实验十五 电流/电压转换电路

一、实验目的

- 1、了解反相输入集成运放在各种转换电路中的应用，熟悉电流/电压转换电路的设计。
- 2、学会各种转换电路的调试方法，加深对集成运放在各种实际电路应用中的认识。

二、实验原理

在工业控制中需要将 4mA~20mA 的电流信号转换成 $\pm 10V$ 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。参考电路见图 15-1。

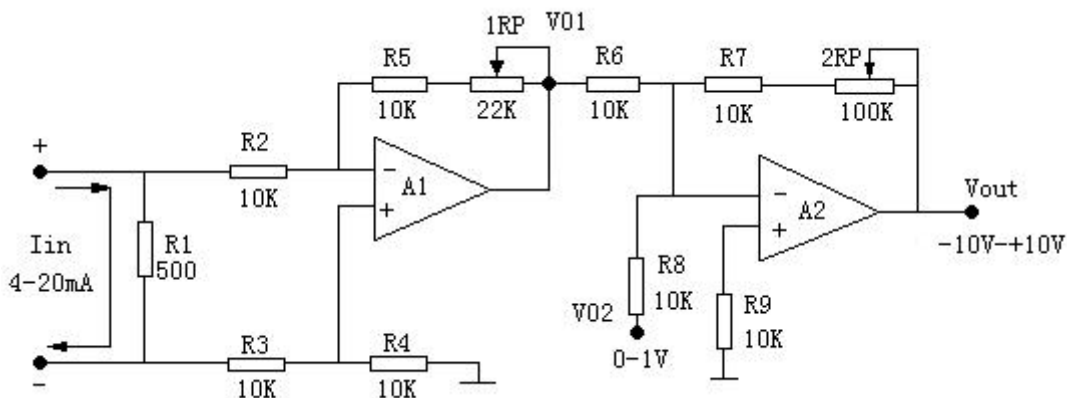


图 15-1 电流电压转换电路

该电路由 A1 单运放加减运算电路和 A2 反相求和电路组成。

$$\frac{V_{01}}{R_6} + \frac{V_{02}}{R_8} = -\frac{V_{OUT}}{R_7 + 2R_P}$$

$$\therefore V_{OUT} = -\frac{R_7 + 2R_P}{R_6} (V_{01} + V_{02}) \quad (\because R_6 = R_8 = 10K)$$

A1 输入端电压 $V_g = I_g R_1$ ，可等效为图 15-2

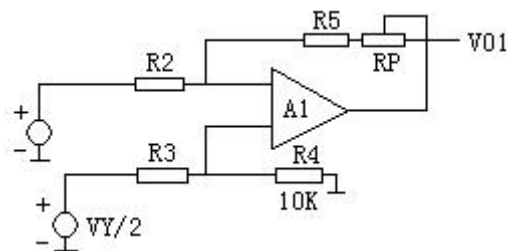


图 15-2

$$\therefore V_t = \frac{R_4}{R_2 + R_4} \left(-\frac{1}{2} V_g \right) = -\frac{1}{4} V_g = V - \frac{\frac{1}{2} V_g - V^-}{R_2} = \frac{V^- - V_{01}}{R_5 + 1R_P}$$

$$\therefore \frac{\frac{1}{2} V_g - \left(-\frac{1}{4} V_g \right)}{R_2} = \frac{-\frac{1}{4} V_g - V_{01}}{R_5 + 1R_P}$$

$$\text{求得: } V_{01} = -\frac{1}{4} V_g \left[4 + \frac{3 \times 1R_P}{R_2} \right]$$

$$\begin{aligned} \therefore V_{OUT} &= -\frac{R_7 + 2R_P}{R_6} \left[-\frac{1}{4} V_g \left(4 + \frac{3 \times 1R_P}{R_2} \right) + V_{02} \right] \\ &= -\frac{R_7 + 2R_P}{R_6} \left[-\frac{1}{4} I_g R_1 \left(4 + \frac{3 \times 1R_P}{R_2} \right) + V_{02} \right] \end{aligned}$$

选取不同参数值, 可实现电流→电压的转换。

三、实验仪器

- 1、数字万用表 2 台 (或毫安表一块, 电压表一块)
- 2、集成运算放大电路模块

四、预习内容

1、按实验箱面板图, 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。

2、分析图 15-1 电路的工作原理, 根据实验箱面板图中元器件参数选择图中元器件参数。

3、设计调试方法和步骤。

五、实验内容

- 1、按预习内容 1 接线, 并调试好毫安信号源。
- 2、参照图 15-1, 按预习 2 设计图接线, 并调试。

六、选做与思考

- 1、本实验电路可否改为电压/电流转换电路? 试分析并画出电路图。
- 2、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。

实验十六 电压/频率转换电路

一、实验目的

- 1、了解波形发生器中频率变换的方法。
- 2、掌握电压/频率转换电路的原理及测试方法。

二、实验原理

实验电路如图 16-1 所示。该图实际上就是锯齿波发生电路，只不过这里是通过改变输入电压 V_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。

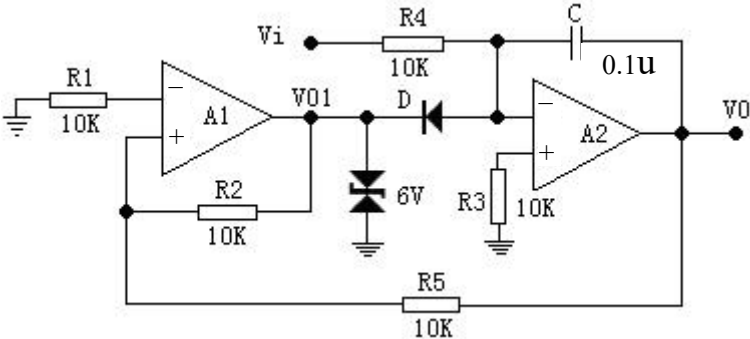


图 16-1 电压频率转换电路

A1 为同相输入滞回比较器，A2 组成积分电路，滞回比较器输出的矩形波加在二极管 D 的负端， V_i 输入信号加在积分电路的反相端，而积分电路输出的锯齿波接到滞回比较器的同相输入端，控制滞回比较器输出端的状态发生跳变。

假设 $t=0$ 时滞回比较器输出为高电平即 $V_{01}=+V_Z$ ，则 D 截止积分电容上的初始电压为 0， V_i 对 C 充电，积分电路的输出电压 V_0 将随着时间往负方向线性增长，由于 V_0 接到 A1 的正相输入端，故 A1 的正相输入随之减小，当减小至某一负值时，滞回比较器的输出端将发生跳变使 $V_{01}=-V_Z$ ，此时 D 导通，C 放电， V_0 随时间往正方向线性增长，如图 16-2 所示。当 V_i 大小改变时，可控制 D 导通与截止，使 C 充放电路径不同，从而使锯齿波频率改变。

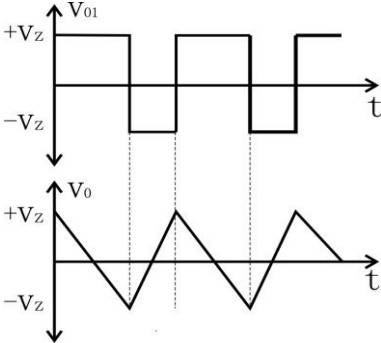


图 16-2

三、实验仪器

- 1、示波器
- 2、数字万用表
- 3、集成运算放大电路模块

四、预习内容

- 1、指出图 16-1 中电容 C 的充电和放电回路。
- 2、定性分析用可调电压 V_i 改变 V_O 频率的工作原理。

五、实验内容

按图 16-1 接线，用示波器监视 V_{O1} 、 V_O 波形。

按表 16-1 内容，测量电压-频率转换关系。可先用示波器测量周期，然后再换算成频率（表中 V_i 由信号源模块上 V_1 提供）。

表 16-1

V_i (V)	0	1	2	3	4	5
T (ms)						
F (Hz)						

六、实验报告

做出频率-电压关系曲线。

实验十七 波形变换电路

一、实验目的

- 1、熟悉波形变换电路的工作原理及特性。
- 2、掌握上述电路的参数选择和调试方法。

二、实验仪器及材料

- 1、双踪示波器
- 2、函数发生器
- 3、数字万用表
- 4、集成运算放大电路模块

三、预习要求

- 1、分析图 17-1 电路的工作原理，这种变换电路对工作频率要求如何？
- 2、定性画出图 17-2 电路的 V_a 和 V_o 的波形图。
- 3、设计实验内容 3 要求的正弦波变方波电路。
- 4、自拟全部实验步骤与记录表格。

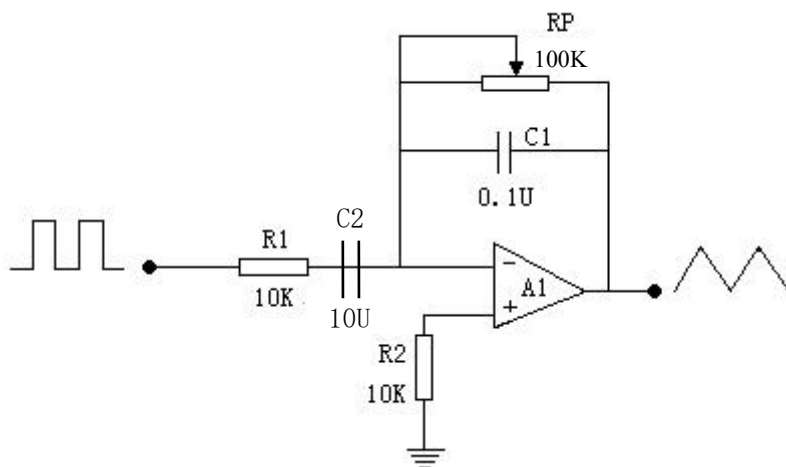


图 17-1

四、实验内容

1、方波变三角波

实验电路如图 17-1 所示。

- (1) 按图接线，输入 $f=500\text{Hz}$ 、幅值为 $+4\text{V}$ 的方波信号，用示波器观察并记录 V_o 的波形。

(2) 改变方波频率，观察波形变化。如波形失真应如何调整电路参数？试在实验箱元件参数允许范围内调整，并验证分析。

(3) 改变输入方波的幅度，观察输出三角波的变化。

2、精密整流电路

电路原理：

若直接用二极管整流，由于普通二极管门限电压为零点几伏，所以只能用于大信号整流。若要求检波器件的门限电压尽可能地小，例如 1mV，则可利用运放和二极管构成这样的检波器件，如图 17-2 (1) 所示，在图 17-2 (1) 中，若运放输入 V_i 为很小的负电压，由于运放的开环增益很大，运放输出 V_o 趋向于很大的正电压，D1 导通，D1 导通后有 $V_o \approx V_i$ 。可见，图 17-2 (1) 等效为一个理想检波二极管，这样等效理想检波二极管也可用图 17-2 (2) 表示。

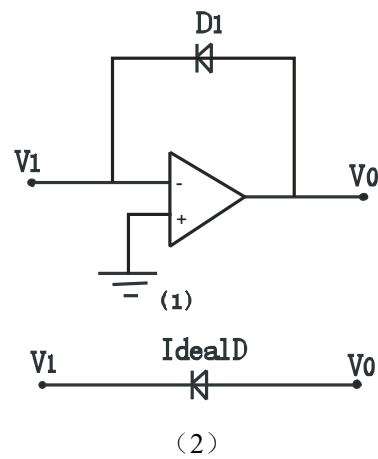


图 17-2 理想二级检波管

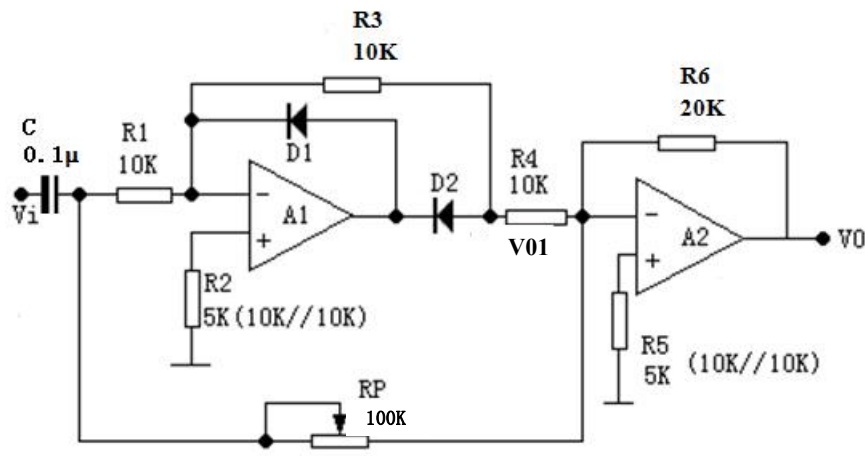


图 17-3 精密整流电路

图 17-3 就是利用这样的等效理想检波二极管组成的精密全波整流电路。以正弦波输

入为例，介绍其工作原理。

在正半周期， V_i 为正，运放 A_1 的反相输入端电压为 0^+ ，输出趋向于很大的负电压，二极管 D_1 截止，这里先假设 D_2 导通。那么，由 R_1 ， R_2 ， R_3 ， A_1 ， D_1 ， D_2 组成的电路等效放大倍数为 -1 的放大器， V_{01} 输出的波形如图 17-4(2) 所示。当运放 A_1 的反相输入端电压为 0^+ 时，输出趋向于很大的负电压，而输出 V_{01} 为 A_1 反相输入端电压，且为有限的负电压，所以 D_2 导通， D_2 导通后，运放 A_1 输出端电压 V_{01} 为 $-V_i - V_{D2th}$ ，其中 V_{D2th} 为 D_2 导通时的电压降。可见，先前假设 D_2 导通是正确的。 V_{01} 经由 R_4 ， R_5 ， R_6 ， A_2 组成的放大倍数为 -2 放大器，即正半周期输入 V_i 经 A_1 ， A_2 组成的两级放大器放大，形成的输出为 V_{012} [如图 17-4(3) 所示]，幅值为输入的两倍的正半周期正弦波。与此同时，输入 V_i 经 R_p (理论上其阻值应为 $20k\Omega$)， R_6 ， R_5 ， A_2 组成的放大倍数为 -1 的放大器放大，形成的输出为 V_{02} ，如图 17-4(4) 所示，输入为正半周期时的输出 V_0 为 V_{012} 与 V_{02} 的线性叠加，如图 17-4(5) 所示，显然，输出波形与输入波形时完全相同的。

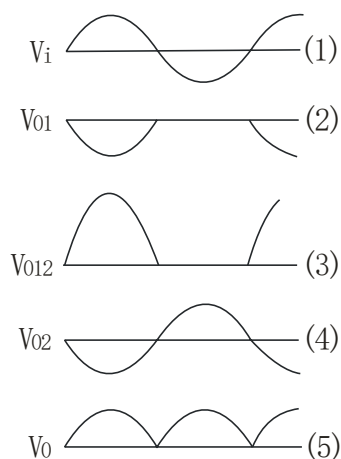


图 17-4 电路各点输出波形分析

在负半周期， V_i 为负，运放 A_1 的反相输入端电压为 0^- ，输出趋向于很大的正电压，二极管 D_1 导通，这里先假设 D_2 截止，那么，运放 A_1 输出端开路。由于 A_1 的反相输入端电压 0^- ， A_2 反相输入端电压为 0 ，所以没有电流流过 R_3 ， V_{01} 为 0 ，如图 17-4(2) 所示。当运放 A_1 的反相输入端电压为 0^- 时，输出趋向于很大的正电压，而输出 V_{01} 为 0 ，可见，先前假设 D_2 截止是正确的。 V_{01} 再经由 R_4 ， R_5 ， R_6 ， A_2 组成的放大器，输出 V_{012} 仍为 0 ，如图 17-4(3) 所示。与此同时，输入 V_i ；经 R_p (理论上其阻值应为 $20k\Omega$)， R_6 ， R_5 ， A_2 组成的放大倍数为 -1 的放大器放大，形成的输出为 V_{02} ，如图 17-4(4) 所示。输入为负半周期时输出 V_0 为 V_{012} 与 V_{02} 的线性叠加，如图 17-4(5) 所示。显然，输出波形与输入波形的幅值是完全相同的，但相位相反。

可见，在图 17-3 所示电路中，若运放为理想运放， $R_p = R_6 = 2R_1$ ， $R_1 = R_3 = R_4$ ，则输出是对输入的全波整流，如图 17-4(5) 所示。由于实际元件数值并不等于标称值，所以实验电

路中设置了电位器用于调整。。

实验内容：

(1) 取输入 V_i ，有效值为 1V， $f=500\text{Hz}$ 的正弦波，调整 $R_P=20\text{K}$ ，观察输出波形 V_o ，该波形应为全波整流波形，如图 17-4 (5)。如果波形不对称，应微调电位器 R_P 。

(2) 调整输入信号的幅度和频率，看输出波形有何变化。

五、实验报告

- 1、整理全部预习要求的计算及实验步骤、电路图、表格等。
- 2、总结波形变换电路的特点。

实验十八 互补对称功率放大器

一、实验目的

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

二、实验原理

图 18-1 所示为互补对称（OTL）低频功率放大器。

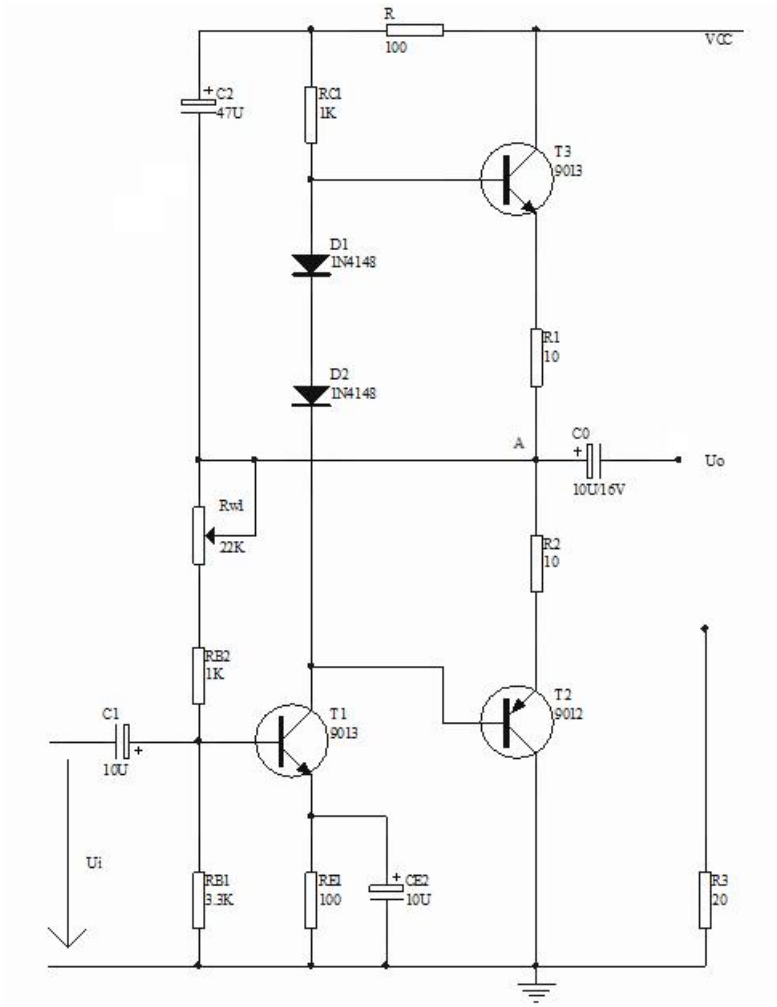


图 18-1 互补对称功率放大器

其中由晶体三极管 T_1 组成推动级（也称前置放大级）， T_2 、 T_3 是一对参数对称的 NPN 和 PNP 型晶体三极管，它们组成互补推挽 OTL 功放电路。由于推挽两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，它的集电极电流 I_{C1} 由电位器 R_{W1} 进行调节。 I_{C1} 的一部分流经二极管 D1、D2，给 T_2 、 T_3 提供偏压，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_3 管导通（ T_2 管截止），有电流通过负载 R_L ，在 u_i 的正半周， T_2 导通（ T_3 截止），电流反方向通过负载 R_L ，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

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

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

详见实验步骤中有关部分内容

4、输入灵敏度

输入灵敏度是指输出最大不失真功率时，输入信号 U_i 之值。

三、实验设备与器件

- | | |
|------------|---------|
| 1、双踪示波器 | 2、直流电压表 |
| 3、直流毫安表 | 4、频率计 |
| 5、分立功放电路模块 | |

四、预习要求

- 1、 复习有关 OTL 工作原理部分内容。
- 2、 为什么引入自举电路能够扩大输出电压的动态范围？
- 3、 交越失真产生的原因是什么？怎样克服交越失真？
- 4、 电路中电位器 R_{W2} 如果开路或短路，对电路工作有何影响？
- 5、 为了不损坏输出管，调试中应注意什么问题？
- 6、 如电路有自激现象，应如何消除？

五、实验内容

在整个测试过程中，电路不应有自激现象。

1、 调节输出端中点电位 U_A

按图 18-1 连接实验电路，输入端 U_i 不接信号 ($u_i=0$)，接通 +5V 电源。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、 最大输出功率 P_{om} 和效率 η 的测试

1) 测量 P_{om}

输入端接 $f=1\text{KHz}$ 的正弦信号 u_i ，输出端用示波器观察输出电压 u_o 波形。由于本实验箱的信号源最小输出 50mV 以上，信号较小时，相对噪声会较大，直接用该信号加到放大器输入端时，将会使放大器输出产生严重失真。为此，先将信号源经过一个 1/100 的分压器，（实验一中已介绍过该分压器），经分压后再接入本实验放大器的输入端。逐渐增大 u_i 的幅度，使输出电压达到最大不失真输出，用交流毫伏表测出负载 R_L 上的电压 U_{om} （或

用示波器测出幅值，然后换算成有效值），则 $P_{om} = \frac{U_{om}^2}{R_L}$ 。

2) 测量 η

当输出电压为最大不失真输出时，在电源进线端串入直流毫安表，读出直流毫安表中的电流值，此电流即为直流电源供给的平均电流 I_{dc} （有一定误差），由此可近似求得 $P_E = U_{CC}I_{dc}$ ，再根据上面测得的 P_{om} ，即可求出 $\eta = \frac{P_{om}}{P_E}$ 。

3、 输入灵敏度测试

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

4、 频率响应的测试

(1) 连接负载 R_L (20Ω)，将输入正弦信号频率调制到 1KHZ，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 V_i 为恒定值，且输出波形不得失真。

(2) 保持输入信号不变, 按表 18-2 改变频率, 测出与频率对应的输出幅度 V_0 , 并填入表中。

(3) 按照表格画出频率响应特性曲线。

表 18-2 $U_i =$ mV

f (Hz)	100	200	400	600	800	1000	2500	5000	10000	20000	30000
U_0 (V)											
A_v											

5、研究自举电路的作用

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

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

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

6、噪声电压的测试

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

7、试听

输入信号改为音乐信号输出, 输出端接喇叭及示波器。开机试听, 并观察音乐信号的输出波形。

六、实验总结

1、 整理实验数据, 计算静态工作点、最大不失真输出功率 P_{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。

实验十九 整流滤波与并联稳压电路

一、实验目的

- 1、熟悉半波、全波、桥式整流电路。
- 2、观察了解电容滤波作用。
- 3、了解并联稳压电路。

二、实验原理

直流电路是利用二极管的单向导电性，将平均值为零的交流电变换为平均值不为零的脉动直流电路。

1、半波整流 图 19-1 所示电路为带有纯阻负载的单相半波整流电路，当变压器次级电压为正时，二极管正向导通，电流经过二极管流向负载，在负载上得到一个极性为上正下负的电压，而当次级电压为负的半个周期内，二极管反偏，电流基本上等于零。所以在负载电阻两端得到的电压极性是单方向的。

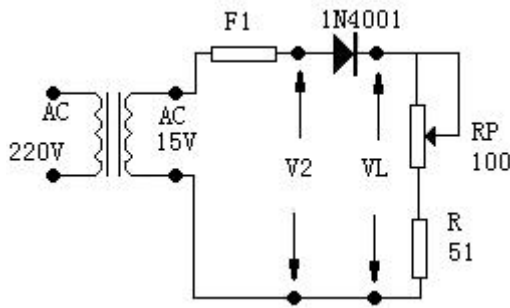


图 19-1

2、桥式整流 图 19-2 所示电路为桥式整流电路。整流过程中，四个二极管两两轮流导通，因此正、负半周内都有电流流过 R_L ，从而使输出电压的直流成份提高，脉动系数降低。在 V_2 的正半周内， D_2D_3 导通， D_1D_4 截止，负半周时， D_1D_4 导电， D_2D_3 截止，但是无论在正半周或负半周，流过 R_L 的电流方向是一致的。

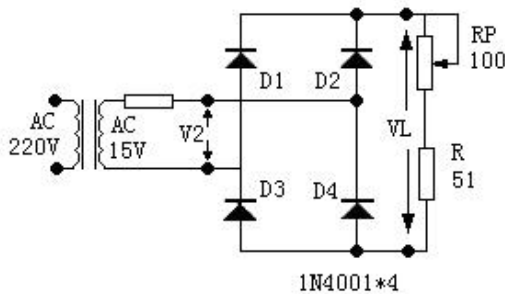


图 19-2

3、电容滤波

在整流电路的输出端并联一个容量很大的电容器，就是电容滤波电路。加入滤波电容后，整流器的负载具有电容性质，电路的工作状态完全不同于纯电阻的情况。

图 19-3 中，我们知道接通电源后，当 V_2 为正半周时，D2D3 导通， V_2 通过 D2D3 向电容器 C 充电， V_2 为负半周时，D1D4 导通， V_2 经 D1D4 向电容 C 充电，充电过程中，电容两端电压 V_C 逐渐上升，使得 $V_C = \sqrt{2}V_2$ ，接入 R_L 后，电容 C 通过 R_L 放电，故电容两端的电压 V_C 缓慢下降，因此，电源 V_2 按正弦规律上升，当 $V_2 > V_C$ 时，二极管 D2D3 受正向电压而导通，此时， V_2 经 D2D3 一方面向 R_L 提供电流，另一方面向电容 C 充电，当 V_C 随 V_2 升高到 $\sqrt{2}V_2$ 。然后由于 V_2 按正弦规律下降，当 $V_2 < V_C$ 时，二极管又受反向电压而截止，电容 C 再次经 R_L 放电，电容 C 如此周而复始地充放电，负载上便得一滤波后的锯齿波电压 V_C ，使负载电压的波动减少了。如图 19-4。

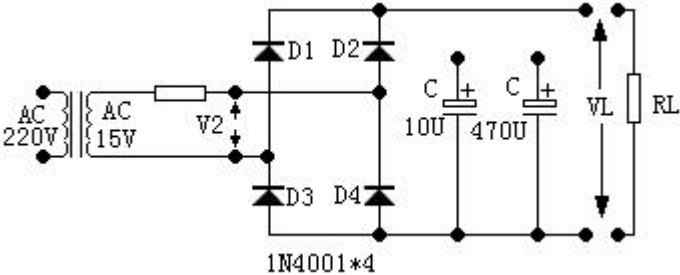
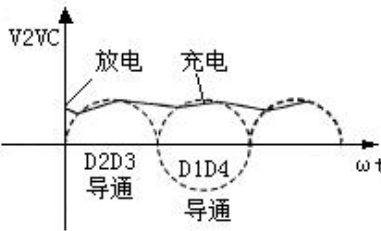


图 19-3



19-4 电容滤波波形图

4、并联稳压电路

图 19-6 为并联稳压电路，稳压管作为一个二极管处于反向接法，R 作为限流电阻，用来调节当输入电压波动时，使输出电压基本不变。

电路的稳压原理如下：

A、假设稳压电路的输入电压 V_i 保持不变，当负载电阻 R_L 减少， I_L 增大时，由于电流在电阻 R 上的压降升高，输出电压 V_L 将下降，而稳压管并联在输出端，由其伏安特性可见，当稳压管两端电压略有下降，流经它上面的电流将急剧减少，亦即由 I_z 的减少来补偿 I_L 的增加，最终使 I_R 保持基本不变。上述过程简明表示为：

$$R_L \downarrow \rightarrow I_L \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow V_o \downarrow \rightarrow I_z \downarrow \rightarrow I_R \downarrow \rightarrow V_o \uparrow$$

B、假设负载电阻保持不变，由于电网电压升高而使 V_i 升高时，输出电压 V_o 也将随之上升，但此时稳压管的电流 I_z 急剧增加，则电阻 R 上的压降增大，以此来抵消 V_i 的升高，从而使输出电压保持不变，上述过程要简明表示为：

$$V_i \uparrow \rightarrow V_o \uparrow \rightarrow I_z \uparrow \rightarrow I_R \uparrow \rightarrow V_R \uparrow \rightarrow V_o \downarrow$$

三、实验仪器及材料

- 1、示波器
- 2、数字万用表
- 3、整流滤波电路模块

四、实验内容及步骤

1、半波整流与电容滤波实验电路如图 19-5 所示。

因为本实验箱的交流信号源幅度不够大，如果将该交流信号直接加到二极管 D 进行整流，效果较差。为此，先将实验箱的交流信号源加到由集成块构成的放大电路上，然后再加到二极管上进行整流。“集成块放大”电路如图 19-5（B）所示。

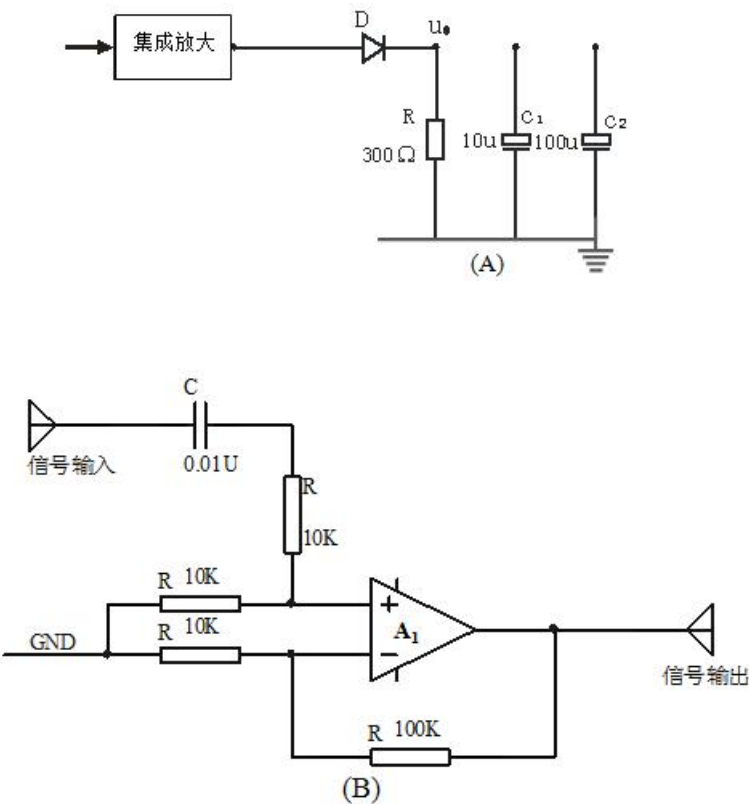


图 19-5 半波整流与电容滤波电路

(1) 按图 19-5 (B) 所示连接好信号放大电路，将集成放大电路信号输出端与半波整流电路二极管相连，将 $f=1\text{KHZ}$ ，幅度峰-峰值 1V 的正弦波加到信号输入端，用示波器测量整流输出端 u_0 的波形。

(2) 分别将 C_1 、 C_2 电容接入电路，用示波器观察 u_0 波形，示波器放直流档位，可观察直流电压的大小。

2、并联稳压电路

实验电路如图 19-6 所示。

(1) 电源输入电压不变 (9V)，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 $I_L=1\text{mA}$ 、5mA、10mA 分别测量 V_L 、 V_R 、 I_L 、 I_R 。

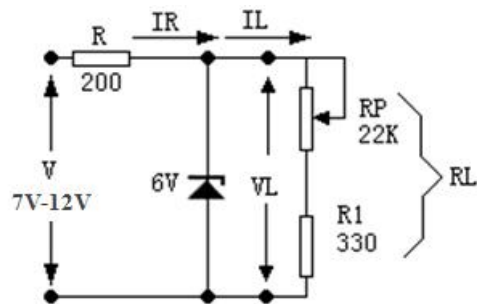


图 19-6 并联稳压电路

(2) 负载不变，设 $R_L=1\text{K}\Omega$ ，电源电压变化时电路的稳压性能。

用可调直流电源的电压变化模拟 220V 电源电压的变化，电路接入前可将电源调到 10V，然后调到 8V、9V、11V、12V，按表 15-1 内容测量并填表，并计算稳压系数。

表 15-1

V_i	V_L (V)	I_R (mA)	I_L (A)
10V			
8V			
9V			
11V			
12V			

五、实验报告

1、整理实验数据并按实验内容计算。

2、图 19-6 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?

实验二十 串联稳压与集成电路稳压

一、实验目的

- 1、研究稳压电源的主要特性，掌握串联稳压电路与集成电路稳压的工作原理。
- 2、学会稳压电源的调试及测量方法。

二、实验原理

（一）串联稳压电路

图 20-1 为串联稳压电路。它包括四个环节：调压环节、基准电压、比较放大器和取样电路。

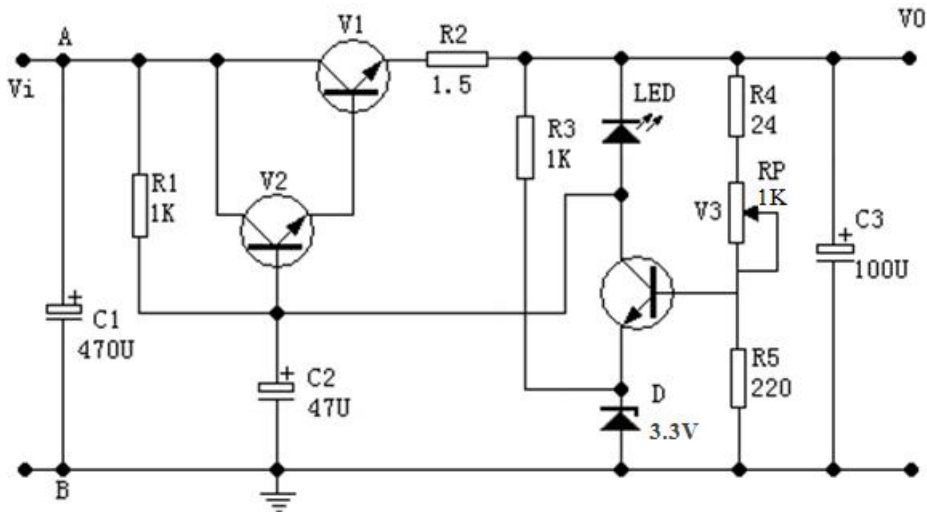


图 20-1 串联稳压电路

当电网或负载变动引起输出电压 V_0 变化时，取样电路取输出电压 V_0 的一部分送入比较放大器与基准电压进行比较，产生的误差电压经放大后去控制调整管的基极电流，自动地改变调整管的集-射极间电压，补偿 V_0 的变化，使以维持输出电压基本不变，例如：当 V_0 上升时，经分压后 V_3 的基极电压上升，由于 V_3 发射极电压不变，就会使得 V_3 集电极电流上升，从而使 V_3 集电极电压下降，即 V_2 基极电压下降，导致 V_2 、 V_1 发射极电流减小，使得输出电压 V_0 减小，从而使输出电压基本不变。

稳压电源的主要指标

1、特性指标

（1）输出电流 I_L （即额定负载电流）。它的最大值决定于调整管最大允许功耗 P_{CM} 和最大允许电流 I_{CM} 。要求： $I_L(V_{i_{max}} - V_{o_{min}}) \leq P_{CM}$ ， $I_L \leq I_{CM}$ ，式中 $V_{i_{max}}$ 是输入电压最大可能值， $V_{o_{min}}$ 是输出电压最小可能值。

(2) 输出电压 V_o 和输出电压调节范围。在固定的基准电压条件下，改变取样电压比就可以调节输出电压。

2、质量指标

(1) 稳压系数 S

当负载和环境温度不变时，输出直流电压的相对变化量与输入直流电压的相对变化量之比值定义为 S ，即

$$S = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_i / V_i} \bigg|_{\substack{\Delta I_L = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

通常稳压电源的 S 约为 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 。

(2) 动态内阻 R_o

假设输入直流电压 V_i 及环境温度不变，由于负载电流 I_L 变化 ΔI_L 引起输出直流电压 V_o 相应变化 ΔV_o ，两者之比值称为稳压器的动态内阻，即：

$$r_o = \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} \bigg|_{\substack{\Delta I_L = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

从上式可知， R_o 越小，则负载变化对输出直流电压的影响越小，一般稳压电路的 R_o 约为 $(10 \sim 10^{-2})$ 欧姆。

(3) 输出纹波电压是指 50Hz 和 100Hz 的交流分量通常用有效值或峰峰值来表示，即当输入电压 220V 不变，在额定输出直流电压和额定输出电流的情况下测出的输出交流分量，经稳压作用可使整流滤波后的纹波电压大大降低，降低的倍数反比于稳压系数 S 。

(二) 集成电路稳压

图 20-2 为 XL6009 集成电路构成的稳压电路。

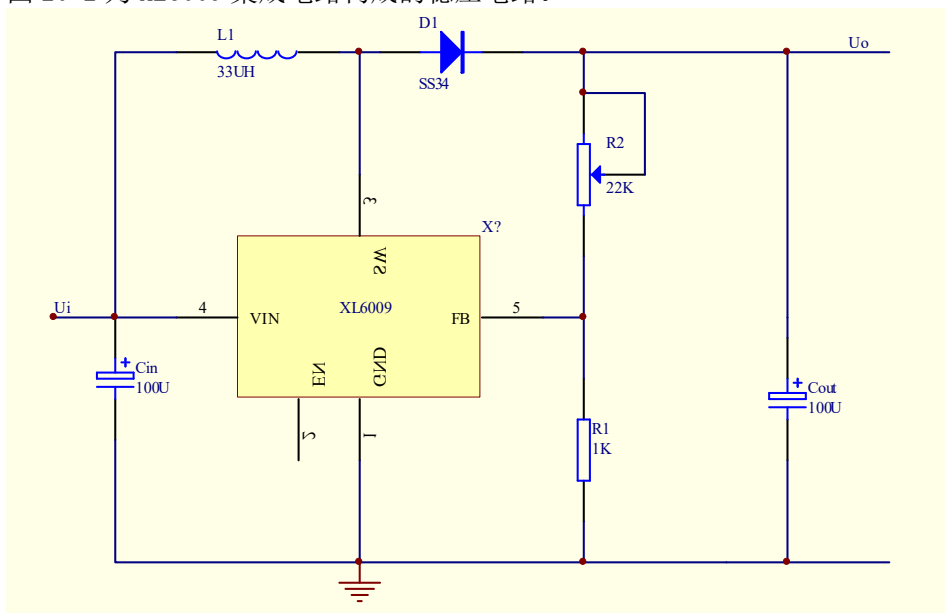


图 20-2 XL6009 典型应用电路

XL6009 是一个宽输入电压范围（5V 至 32V 输入电压范围），大电流（可达 3A 输出电流），可升压（输出高于输入）的稳压器。

XL6009 引脚功能：

1 脚（GND）接地引脚。

2 脚（EN）：使能引脚，EN 引脚为低电平时，关闭器件，稳压器不工作。EN 引脚为高电平时，稳压器工作。浮动（悬空）默认为高电平。

3 引脚（SW），电源开关输出引脚

4 引脚（Vin），电源电压输入引脚

5 引脚（FB），反馈引脚，通过一个分压器网络，FB 监测输出电压并对其进行调节，该反馈阈值电压为 1.25V。

当 XL6009 输入端（4 脚）接上电源后，3 脚输出的是方波信号，该信号作为开关，当引脚输出低电平时，D1 截止，电感 L1 作为储能元件储存电压，输出端电容与 R1 和 R2 组成一个回路放电，使输出电压下降。当 3 脚输出高电平时，D1 导通，电感 L1 向输出电容两端充电，使输出电压升高。R1 与 R2 是 XL6009 内部电压放大器的负反馈电路，用于稳定输出电压。由电阻 R2 和 R1 控制电压放大倍数，其输出电压 V_o 由下式确定：

$$u_o = 1.25 \times \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right)$$

三、实验仪器

- | | |
|-----------------------|---------|
| 1、直流电压表 | 2、直流毫安表 |
| 3、示波器 | 4、数字万用表 |
| 5、串联稳压电路与 XL6009 稳压模块 | |

四、预习要求

- 1、估算图 20-1 电路中各三极管的 Q 点（基极电压）（设：各管的 $\beta=100$ ，电位器 R_p 滑动端处于中间位置）。
- 2、分析图 20-1 电路，电阻 R_2 和发光二极管 LED 的作用是什么？
- 3、了解 XL6009 功能及工作原理。

五、实验内容

（一）串联稳压电路测试

1、静态测试

- （1）看清楚实验电路板的接线，查清引线端子。
- （2）按图 20-1 接线，负载 R_L 开路，即稳压电源空载。
- （3）将 12V 电源接到 V_i 端，再调电位器 R_p ，使 $V_o=6V$ 。测量各三极管的 Q 点（基极）电压。
- （4）调试输出电压的调节范围。

调节 R_p ，观察输出电压 V_o 的变化情况。记录 V_o 的最大和最小值。

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，调可调电源电位器，模拟电网电压波动 $\pm 10\%$ ，测量相应的 ΔV_o ，根据 $S = \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_i / V_i}$ ，计算稳压系数。

(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 $I_L = 100\text{mA}$ 时，测量输出电压 V_o 的变化量即可求出电源内阻 $r_o = \left| \frac{\Delta V_o}{\Delta I_L} \times 100\% \right|$ 。测量过程，使 $V_i = 12\text{V}$ 保持不变。

思考题一：

A：如果把图 20-1 电路中电位器的滑动端往上(或是往下)调，各三极管的 Q 点（基极电压）将如何变化？可以试一下。

B：输出端接一可调电位器 22K 作为负载 R_L ，调节 R_L 时，V3 的发射极电位如何变化？电阻 R_L 两端电压如何变化？可以试一下。

C：如果把 C3 去掉(开路)，输出电压将如何？

D：这个稳压电源哪个三极管消耗的功率大？

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，短路时间应尽量短(不超过 5 秒)，以防元器件过热。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。

(二) XL6009 稳压电路测试

1、按图 20-2 连接好电路。

2、将 +5V 电压接入输入端，用三用表直流电压档（量程应放大一些，防止电压过大烧坏电表）测量稳压器输出电压。

3、去掉输入电压，测量此时的 R_1 和 R_2 ，计算输出电压 $u_o = 1.25 \times (1 + \frac{R_2}{R_1})$ ，与实际测量值相比较。

4、将输入电压改接为 +12V，用三用表测量输出电压，调整电位器，看输出电压有何变化。

六、实验报告

1、对串联稳压电路静态调试及动态测试进行总结。

2、计算串联稳压电路稳压电源内阻 $r_o = \Delta V_o / \Delta I_L$ ，以及稳压系数 S_r 。

3、试分析集成稳压电路中电位器的作用是什么，输出电压为什么不受输入电压的影响。