

电工与电子技术 实验指导书

(计算机类)

哈尔滨工业大学 (深圳)

实验与创新实践教育中心

2023 年 3 月

目 录

实验一 叠加定理与戴维南定理	- 4 -
1.1 实验目的	- 4 -
1.2 预习要点	- 4 -
1.3 实验设备与元件	- 4 -
1.4 实验原理	- 4 -
1.4.1 叠加定理实验原理	- 4 -
1.4.2 戴维南定理实验原理	- 5 -
1.5 实验步骤	- 6 -
1.5.1 叠加定理实验步骤	- 6 -
1.5.2 戴维南定理实验步骤	- 7 -
1.6 注意事项	- 9 -
1.7 思考与分析	- 9 -
实验二 RLC 串联谐振及 RC 串并联选频网络	- 10 -
2.1 实验目的	- 10 -
2.2 预习要点	- 10 -
2.3 实验设备与元件	- 10 -
2.4 实验原理	- 10 -
2.4.1 RLC 串联谐振原理	- 10 -
2.4.2 RC 串并联选频网络	- 12 -
2.5 实验步骤	- 13 -
2.5.1 验证串联谐振电路	- 13 -
2.5.2 用示波器查看 RLC 串联谐振电路的波形相位关系	- 14 -
2.5.3 测量串联谐振曲线	- 14 -
2.5.4 RC 串并联选频网络	- 15 -
2.6 注意事项	- 16 -
2.7 思考与分析	- 16 -
实验三 单管交流电压放大电路	- 17 -
3.1 实验目的	- 17 -
3.2 预习要点	- 17 -
3.3 实验设备与元件	- 17 -
3.4 实验原理	- 17 -
3.5 实验步骤	- 19 -
3.5.1 判别晶体管的管型及管脚	- 19 -
3.5.2 调整静态工作点及测量电压放大倍数	- 20 -
3.5.3 观测静态工作点对输出电压波形的影响	- 21 -
3.6 注意事项	- 22 -
3.7 思考与分析	- 22 -
实验四 集成运算放大器的应用	- 23 -
4.1 实验目的	- 23 -
4.2 预习要点	- 23 -
4.3 实验设备与元件	- 23 -

4.4 集成运放基本原理	- 23 -
4.5 实验内容与步骤	- 24 -
4.5.1 电压跟随器	- 25 -
4.5.2 反相比例运算电路	- 25 -
4.5.3 同相比例运算电路	- 25 -
4.5.4 减法器设计	- 26 -
4.5.5 过零电压比较器	- 26 -
4.5.6 （选做）微积分运算电路	- 27 -
4.5.7 （选做）方波发生器	- 27 -
4.6 注意事项	- 28 -
4.7 思考与分析	- 29 -

实验一 叠加定理与戴维南定理

1.1 实验目的

- (1) 熟悉常用电工电子仪器仪表的用法；
- (2) 熟悉电流、电压参考方向的含义，掌握其应用；
- (3) 通过实验掌握并加深对叠加定理和戴维南定理的理解；
- (4) 了解戴维南定理是化简复杂电路的一种有效方法。

1.2 预习要点

- (1) 复习叠加定理和戴维南定理的理论知识，完成实验报告中的预习内容；
- (2) 观看实验仪器的使用视频，认真预习实验注意事项；
- (3) 完成实验报告中理论计算部分数据的填写。

1.3 实验设备与元件

实验所需要的设备、元件列表如表 1.1 所示。

表 1.1 实验设备与元件列表

名称	型号	数量
直流稳压电源	DP832A	1 台
手持万用表	Fluke17B+	1 台
直流电压表	30111047	1 块
电阻	宝徠电阻	若干
短接桥和连接导线	P8-1、50148	若干
实验用九孔插件方板	300mm×298mm	1 块

1.4 实验原理

1.4.1 叠加定理实验原理

叠加定理：在线性电路中，几个独立电源共同作用产生的响应等于各个独立电源单独作用时产生响应的代数和。

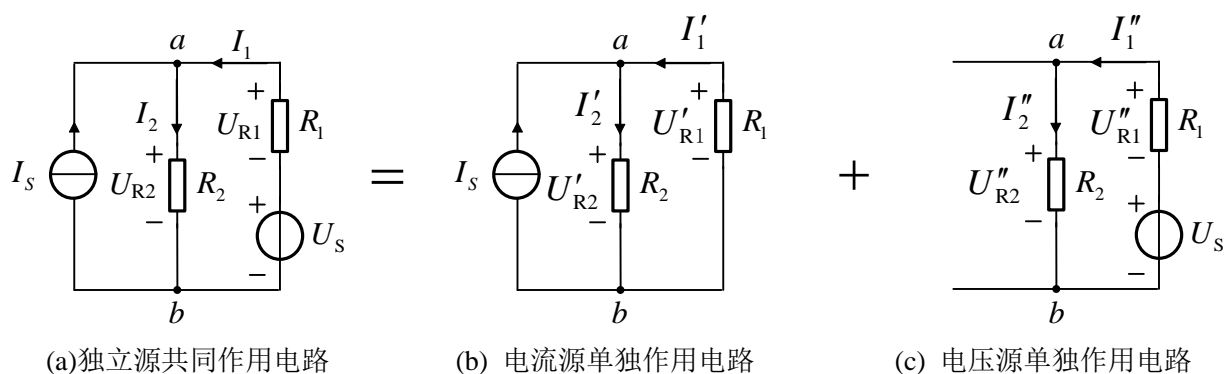


图 1.1 电压源，电流源共同作用与分别单独作用电路

在图 1.1(a)中，设 U_s 和 I_s 共同作用时，在电阻 R_1 上产生的电压、电流分别为 U_{R1} 、 I_1 ，在电阻 R_2 上产生的电压、电流分别为 U_{R2} 、 I_2 。当电压源 U_s 不作用，即 $U_s=0$ 时，在 U_s 处用短路线代替；当电流源 I_s 不作用，即 $I_s=0$ 时，在 I_s 处用开路代替；电源内阻保留。

(1) 令电流源 I_s 单独作用时引起的电压、电流分别为 U'_{R1} 、 U'_{R2} 、 I'_1 、 I'_2 ，电路如图 1.1(b)所示。

(2) 令电压源 U_s 单独作用时引起的电压、电流分别为 U''_{R1} 、 U''_{R2} 、 I''_1 、 I''_2 ，电路如图 1.1(c)所示。

电压、电流的参考方向如图示。叠加定理的验证公式如 (1.1) 所示，

$$\begin{cases} U_{R1} = U'_{R1} + U''_{R1} \\ U_{R2} = U'_{R2} + U''_{R2} \end{cases}, \quad \begin{cases} I_1 = I'_1 + I''_1 \\ I_2 = I'_2 + I''_2 \end{cases} \quad (1.1)$$

1.4.2 戴维南定理实验原理

线性含源一端口网络的对外作用可以用一个电压源串联一个电阻的电路来等效代替。其中电压源的电压等于此一端口网络的开路电压，而电阻等于从此一端口网络看进去所有独立电源置零后的等效电阻，如图 1.2 所示。

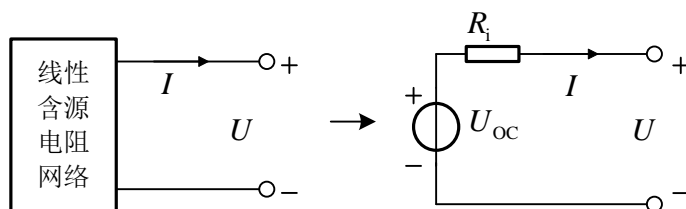


图 1.2 戴维南定理示意图

下面介绍测量等效电路参数的实验方法。

(1) 测量开路电压

将一端口网络开路，用直流电压表直接测量开路电压，如图 1.3 所示。

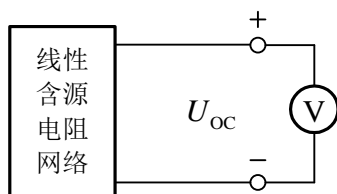


图 1.3 测开路电压示意图

(2) 测量等效电阻

将一端口网络内独立电源置零，用万用表的欧姆挡测出一端口网络的等效电阻，如图 1.4(a)，或在端口处外加一个电压源，通过测量端口电压 U_o 与电流 I_o ，计算 $U_o/I_o=R_s$ ，如图 1.4(b)。

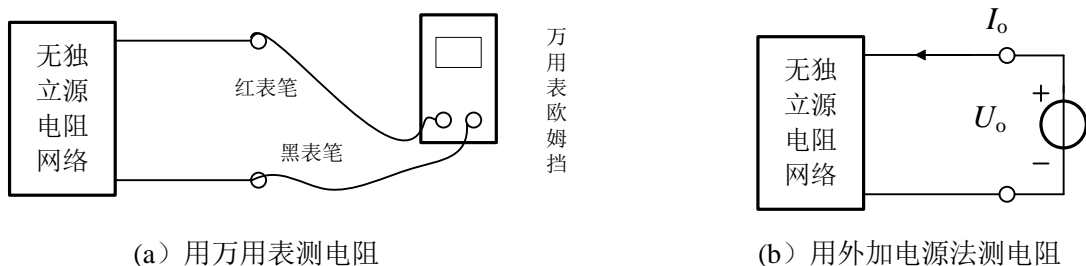


图 1.4 测量等效电阻的示意图

1.5 实验步骤

1.5.1 叠加定理实验步骤

实验前，应对设备及电路元器件检测，确保正常。检测范围如下：

- ① 直流稳压电源，恒流源工作是否正常；
- ② 用万用表检测电路中电阻、导线等元件是否正常；

完成上述工作后，才能进行实验。按图 1.5 接线，取直流电压源 $U_s=10V$ ，直流电流源 $I_s=20mA$ ，电阻 $R_1=220\Omega$ ， $R_2=100\Omega$ 。

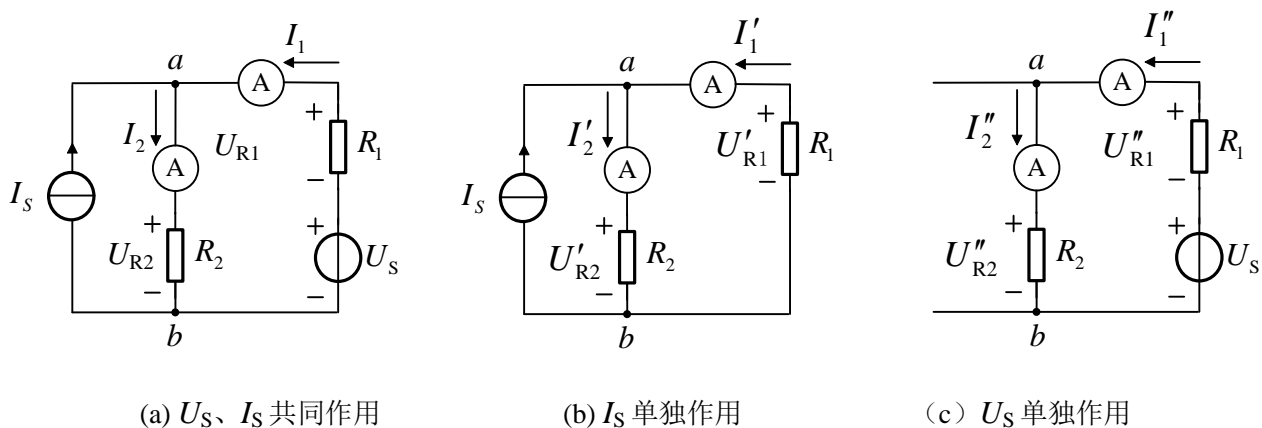


图 1.5 叠加原理验证线路图

实验前需要明确以下几点要求：

- ① 直流电压源或直流恒流源一般由电子元件组成，直接关掉后，将成为负载，不满足理想电压源内阻为零，理想电流源内阻无穷大的要求。
- ② 此实验中，如需将某个电源从电路中移除，则需遵循“移去电压源的支路短路，移去电流源的支路开路”的原则。
- ③ 在测量数据时，应按照图中的参考方向测量各电压、电流。测试电压、电流的大小，同时判断电压、电流的实际方向是否与参考方向一致，当测量出电压、电流为正值时，说明电压、电流的实际方向与参考方向相同，当测量出电压、电流为负值时，说明电压、电流的实际方向与参考方向相反。

按照如下顺序，测量各支路电流和电阻元件两端的电压值。

- (1) 当 U_S 、 I_S 共同作用时，测量电路如图 1.5 (a) 所示；
- (2) 当电源 I_S 单独作用时，电压源 U_S 置零，电压源处短路。测量电路如图 1.5 (b) 所示；
- (3) 当电源 U_S 单独作用时，电流源 I_S 开路，将电流源关闭。测量电路如图 1.5 (c) 所示。

使用实验台上的电流表测量各支路电流，使用万用表的 DC 电压档测量电阻元件两端的电压，其数据记入表 1.2 中相应位置。

表 1.2 验证叠加原理实验数据

理论计算数据	U_S, I_S 共同作用	$U_{R1} =$	$U_{R2} =$	$I_1 =$	$I_2 =$
	U_S 单独作用	$U'_{R1} =$	$U'_{R2} =$	$I'_1 =$	$I'_2 =$
	I_S 单独作用	$U''_{R1} =$	$U''_{R2} =$	$I''_1 =$	$I''_2 =$
	计算结果, 式(1.1)				
测量数据 电压单位: V 电流单位: mA	U_S, I_S 共同作用	$U_{R1} =$	$U_{R2} =$	$I_1 =$	$I_2 =$
	U_S 单独作用	$U'_{R1} =$	$U'_{R2} =$	$I'_1 =$	$I'_2 =$
	I_S 单独作用	$U''_{R1} =$	$U''_{R2} =$	$I''_1 =$	$I''_2 =$
	计算结果, 式(1.1)				

经过表 1.2 数据计算，判断叠加定理是否验证成功？

1.5.2 戴维南定理实验步骤

实验前，应对设备及电路元器件检测，确保正常。检测范围如下：

- ① 直流稳压电源，恒流源工作是否正常；
- ② 用万用表检测电路中电阻、导线等元件是否正常；

完成上述工作后，才能进行实验。戴维南定理的验证实验电路接线如图 1.6 所示。端口 ab 左边为含源一端口网络，其端口 ab 可以处于开路状态。

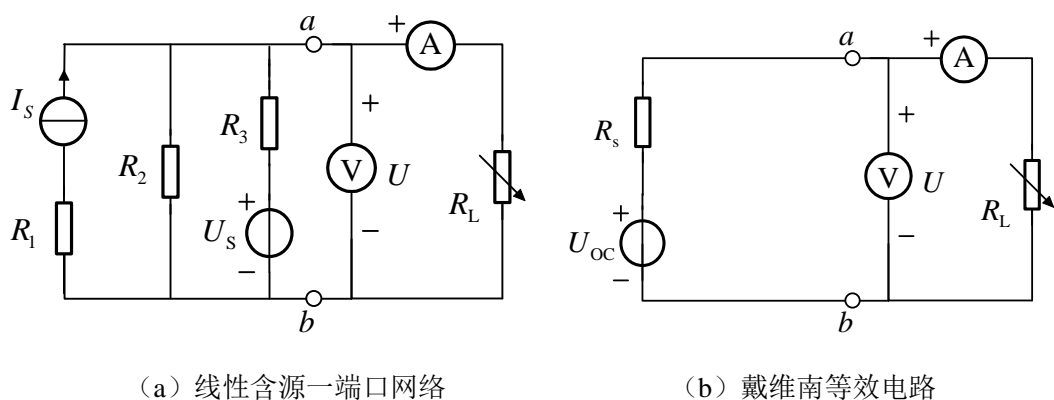


图 1.6 戴维南定理的验证电路

(1) 测量有源一端口网络的等效电路参数

按照图 1.6 (a) 接线, $U_s=5V$, $I_s=20mA$, $R_1=100\Omega$, $R_2=220\Omega$, $R_3=510\Omega$, R_L 是 $0\sim10k\Omega$ 的可调电阻, 先计算电路参数, 然后按照测量开路电压和等效内阻的方法, 测量 ab 一端口网络的戴维南等效电路参数, 填入表 1.3 中。

表 1.3 线性含源一端口电阻网络等效电路参数

等效参数	等效电路参数计算值	等效电路参数测量值
测量开路电压: 用万用表直流电压挡测量	$U_{OC} =$	$U_{OC} =$
测量等效内阻: 方法 1, 独立电源置零, 用万用表的欧姆挡测量。	$R_S =$	$R_S =$
测量等效内阻: 方法 2, 独立电源置零, 在 ab 端口外加 $U_O = 10V$ 的直流电压, 测量端口电流 I_O , 则 $R_S = U_O / I_O$ 。	$R_S =$	$R_S =$

(2) 测量有源一端口网络的外特性

将一端口网络接上 $10k\Omega$ 的可调负载 R_L , 如图 1.6 (a) 所示。调节负载 R_L 值, 测量 ab 端口的电压与电流, 填入表 1.3 中。

(3) 测定戴维南等效电路的外特性

- ①用前面测得的含源网络的开路电压 U_{OC} 和等效电阻 R_S 组成戴维南等效电路, 如图 1.6 (b) 所示。
- ②调节负载电阻 R_L , 令电流理论设定数值为表格所示, 测量 ab 端口的实际电压与电流, 填入表 1.4 中。

(4) 绘外特性曲线

在同一坐标纸上画出图 1.6 (a) 的一端口网络和图 1.6 (b) 的戴维南等效电路的外特性曲线, 分析比较两条曲线, 给出结论。

表 1.4 含源一端口网络及等效电路外特性数据

参数	改变 R_L		R_L 最大	R_L 变小	R_L 变小	R_L 变小	R_L 最小
含源一 端口网 络的外 特性	I/mA	理论值:		5	10	15	
		测量值:					
	U/V	理论值:					
		测量值:					
等效电 路的外 特性	I/mA	理论值:		5	10	15	
		测量值:					
	U/V	理论值:					
		测量值:					

1.6 注意事项

- (1) 遵守实验室的各项规章制度。
- (2) 电源接入电路前，需用电压表和电流表调好电压源和电流源的数值。
- (3) 在实验过程中，不允许带电换线、换元件、接线。
- (4) 在实验过程中，稳压电源不允许短路，恒流源不允许开路。
- (5) 电压表要与被测元件并联，电流表要与被测支路串联。
- (6) 离开实验室前，需关掉电源，拆线，整理实验台，元器件归原处。

1.7 思考与分析

- (1) 电阻上的功率是否也符合叠加原理？请通过对实验数据的计算来分析。
- (2) 电压源和电流源的装置上都有输出值显示，而在实验中为什么要使用电压表和电流表来校准电压源和电流源的输出电压值和输出电流值呢？请思考设定值和实际输出值之间的联系和区别？
- (3) 理论课中还学习了诺顿定理，如何参考戴维南定理的验证实验，设计完成诺顿定理的验证实验？
- (4) 等效电源定理简化复杂电路的适用范围有哪些？

实验二 RLC 串联谐振及 RC 串并联选频网络

2.1 实验目的

- (1) 通过实验进一步理解 RLC 串联电路的频率特性，了解串联谐振现象；
- (2) 研究电路参数对串联谐振电路的影响，学习函数发生器和双通道示波器的用法；
- (3) 理解串联谐振电路的选频特性及应用，以及 RC 选频网络的选频实际意义；
- (4) 掌握测试通用谐振曲线和品质因数的测量、计算方法。

2.2 预习要点

- (1) 复习正弦交流电路串联谐振及频率特性的相关知识；
- (2) 观看实验仪器的使用视频，认真预习实验注意事项；
- (3) 根据实验电路计算所要求测试的谐振频率理论值，填写在表格中。

2.3 实验设备与元件

实验所需要的设备、元件列表如表 2.1 所示。

表 2.1 实验设备与元件列表

名称	型号	数量
交流毫伏表	SM2030A	1 台
电感	10mH	1 只
电阻	1 Ω 、100 Ω 、510 Ω 、2k Ω 、15k Ω	6 只
电容	1 μ F、2200pF、0.01 μ F	4 只
信号发生器	TFG6960A	1 台
示波器	KEYSIGHT DSO2014A	1 台
短接桥和连接导线	P8-1 和 50148	若干
实验用九孔插件方板	300mm \times 298mm	1 块

2.4 实验原理

2.4.1 RLC 串联谐振原理

对于任何含有电感线圈和电容元件的一端口电路，在一定条件下，电路负载可呈现纯电阻性，端口电压与电流同相位，则称一端口电路发生谐振， RLC 串联电路中发生的谐振称为串联谐振。 RLC 串联谐振的频率特性测试电路原理图，如图 2.1 所示。当外加角频率为 ω 的正弦电压 \dot{U} 时，电路中的电流为 \dot{i} ，即

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{R_1 + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} \quad (2.1)$$

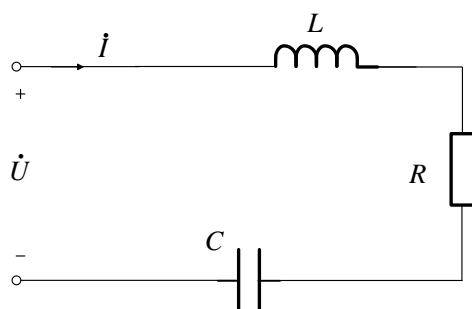


图 2.1 RLC 串联谐振电路原理图

式中， R_1 为线路总电阻， $R_1 = R + r$ ， r 为电感线圈电阻。由式（2.1）可以看出，当 $\omega L = 1/\omega C$ 时，电路发生串联谐振现象，电路负载性质变成纯阻性，谐振角频率为 $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ，谐振频率为

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.2)$$

式（2.2）即为产生串联谐振的条件。由此可见，改变 L 、 C 或电源频率 f 都可以实现谐振。谐振时，特性阻抗 $\rho = \omega_0 L = 1/\omega_0 C$ ，品质因数为 $Q = \omega_0 L/R_1 = 1/\omega_0 C R_1 = \sqrt{L/C}/R_1$ 。谐振时，阻抗达到最小值，等于电阻 R_1 ，电流达到最大值， $I = U/R_1$ 。此时有 $U_L = U_C$ ，引用特性阻抗和品质因数来表示电感电压和电容电压有效值，可得 $Q = U_C/U = U_L/U$ 。如果品质因数 $Q \gg 1$ ，谐振时的电感电压和电容电压应比电源电压大得多，端口电压即为电阻电压，因此串联谐振又称为电压谐振。

RLC 串联电路中的电流与外加电压角频率 ω 之间的关系称为电流的幅频特性，即 $I(\omega) = U/\sqrt{R_1^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$ 。以频率 f 为横坐标，电流 I 为纵坐标，绘制出的电流随频率变化的曲线，称为串联谐振的幅频特性曲线，当横坐标使用 f/f_0 ，纵坐标使用 I/I_0 ，谐振曲线称为归一化谐振曲线，对应公式如下（2.3）所示。

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{f}{f_0} - \frac{f_0}{f} \right)^2}} \quad (2.3)$$

品质因数 Q 值相同的任何 RLC 串联谐振电路，只有一条归一化谐振曲线，因此也称为通用串联谐振曲线。图2.2提供了不同 Q 值的通用串联谐振曲线。通频带 Δf 定义为，当 $I/I_0 = 1/\sqrt{2}$ 时，对应的频率 f_2 （上限频率）和 f_1 （下限频率）之间的宽度，通频带 Δf 与谐振频率 f_0 成正比，与品质因数 Q 成反比。由图2.2可见， Q 值越大，通频带越窄，电路的选择性越好。

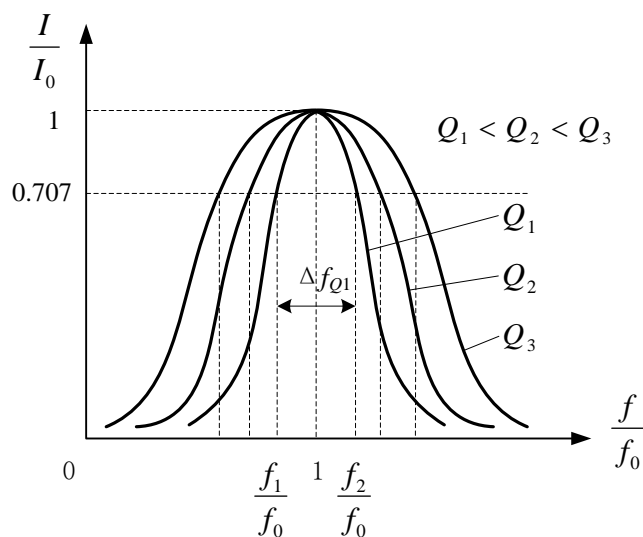


图 2.2 不同 Q 值的通用串联谐振曲线

2.4.2 RC 串并联选频网络

RC 串并联选频电路多用于 RC 振荡电路及信号发生器中。电路原理图如图 2.3 所示，由 R_1C_1 串联及 R_2C_2 并联网络组成，该电路输入信号 U_i 的频率变化时，其输出信号幅度 U_o 随着频率的变化而变化。

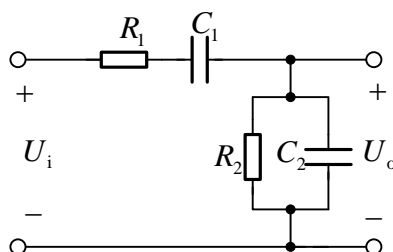


图 2.3 RC 选频网络电路原理图

在实验中一般取 $R_1=R_2=R$ ， $C_1=C_2=C$ ，令 $\omega_0=1/RC$ ，经过理论推导，得出公式 (2.4)。

$$\frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{3 + j(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})} \quad (2.4)$$

电压传输系数 K 如公式 (2.5) 所示。

$$K = \left| \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} \right| = \frac{1}{\sqrt{3^2 + (\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega})^2}} \quad (2.5)$$

当角频率为 $\omega_0=1/RC$ 时，频率 $f_0=\omega_0/2\pi$ ，幅频特性达到最大值 $1/3$ ，相频特性为零。因此称

之为选频网络。由理论推导可知，当 $f > f_0$ ($f/f_0 > 1$) 时，电路呈感性；当 $f < f_0$ ($f/f_0 < 1$) 时，电路呈容性；当 $f = f_0$ ($f/f_0 = 1$) 时， $K = K_0 = 1/3$ ，达到最大值，所以 $f = f_0 = 1/2\pi RC$ 为谐振频率。对应于不同的频率 $f = \omega/2\pi$ ，可以画出 RC 串并联网络的幅频特性曲线，如图 2.4 所示。

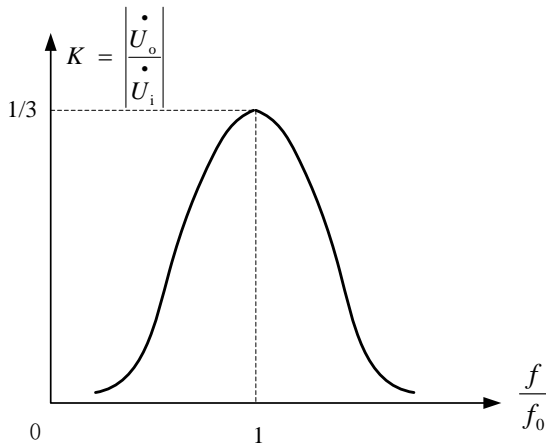


图 2.4 RC 串并联网络的幅频特性曲线

2.5 实验步骤

本次实验使用的信号发生器 TFG6960A 是根据实验需要定制的一款信号发生器，输出环节加入了一个功率输出单元，如果外部接线接入了此功率输出单元，则信号发生器的带载能力加强，输出信号电压会基本保持稳定，不会明显下降。注意：输出电压值是设定值的 2 倍。做实验前，请认真阅读注意事项。

2.5.1 验证串联谐振电路

根据 RLC 串联谐振电路原理图，正确接线，接线示意图如图 2.5 所示。

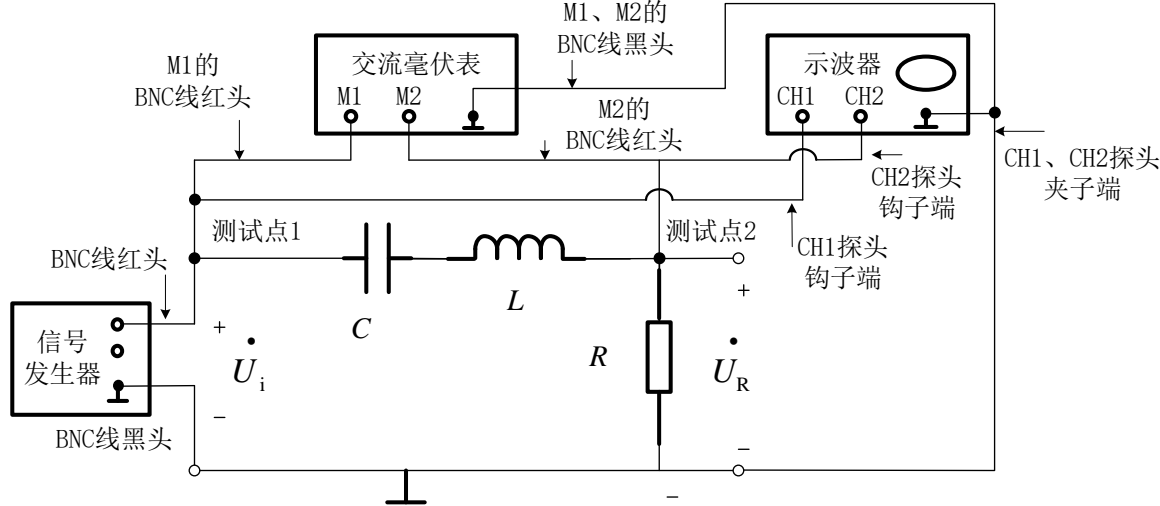


图 2.5 串联谐振实验线路

本次实验采用改变电压信号频率的方式来实现串联谐振，信号发生器选择正弦电压输出。元件取值为， $R=51\Omega$ ， $L=10\text{ mH}$ ， $C=0.022\mu\text{F}$ ，利用选取的元件参数计算出谐振频率 $f_{0\text{理}}$ 。信号发生器输

出电压调至 250mV 有效值，整个实验过程中，使用交流毫伏表监测信号源电压为 250mV 不变，如输出电压有效值有下降，请提高设定值。使用交流毫伏表测量电阻 R 上的电压有效值，使用示波器的双通道监测电阻 R 上的电压波形和信号源电压的波形。设定信号源频率在理论计算的谐振频率 $f_{0理}$ 附近，调节信号源电压的频率，观察 \dot{U}_R 的波形，当 \dot{U}_R 的波形和输入电压 \dot{U}_i 波形同相位时，电路达到谐振状态。此时，利用交流毫伏表测量出电压有效值 U_R 、 U_L 、 U_C ，并读取信号源谐振频率 f_0 ，记入表 2.2 中，同时记下元件参数 R 、 L 、 C 的实际数值。

表 2.2 串联谐振实验数据表格 $f_{0理} = \underline{\hspace{2cm}} \text{Hz}$

$R =$	$U_R =$	$f_0 =$
$L =$	$U_L =$	$I_0 = U_R/R =$
$C =$	$U_C =$	$Q =$

2.5.2 用示波器查看 RLC 串联谐振电路的波形相位关系

实验接线图如图 2.5 所示， R 取 510Ω 。双通道示波器的 CH1 通道与信号源的输出端连接，示波器显示出电路的输入电压 u 的波形。双通道示波器的 CH2 通道与电阻 R 连接，示波器显示出电阻 R 上电压的波形，此波形与电路中电流 i 的波形同相位，因此可以直接看作电流 i 的波形。接线时要注意，示波器和信号发生器的接地端必须连接在一起。信号发生器的输出频率取实际测得的谐振频率 f_0 ，输出电压取 250mV，调节示波器使屏幕上获得 2 个波形，将电流 i 和电压 u 的波形描绘下来。接下来，选择一个高于 f_0 的频率点，和一个低于 f_0 的频率点，信号发生器输出电压仍保持 250mV 有效值不变，画出 i 和 u 的波形。

调节信号发生器的输出频率，在 f_0 两侧缓慢变化，观察示波器屏幕上 i 和 u 波形的相位和幅度的变化，将其波形画入图 2.6 中，并分析其变化原因。

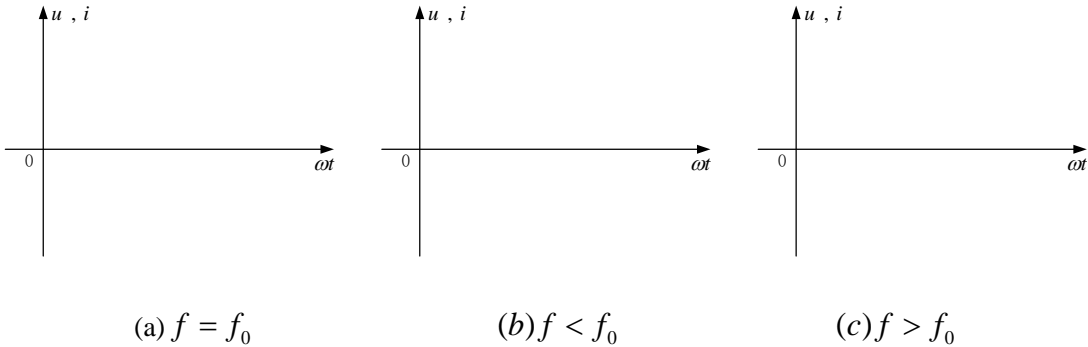


图 2.6 不同频率下的电压与电流波形

2.5.3 测量串联谐振曲线

实验接线图如图 2.5 所示，信号发生器输出电压调至 250mV，整个实验过程中，使用交流毫伏表监测信号源电压为 250mV 有效值不变，如输出电压有效值有下降，请提高设定值。在谐振频率两侧调节信号源输出电压的频率，分别测量各频率点的电阻上电压有效值 U_R ，记录于表 2.3 (a) 中（建议谐振点附近多测几组数据）。再将图 2.5 实验接线图中的 R 更换为 100Ω 、 510Ω ，重复上述测量过程，记录于表 2.3 (b)、2.3 (c) 中。然后整理数据，使用描点法画出其通用串联谐振曲

线，计算出各自曲线的品质因数 Q 。

表 2.3 (a) 测量通用串联谐振曲线数据 1

U_i =_____(V)

$R=51\Omega, L=10\text{ mH}, C=0.022\mu\text{F}, Q=$													
$f(\text{kHz})$	1	2	4	6	8	9	$f_0=$	11	12	14	16	18	20
$U_R(\text{mV})$													
$I(\text{mA})$													
I/I_0													
f/f_0													

表 2.3 (b) 测量通用串联谐振曲线数据 2

U_i =_____(V)

$R=100\Omega, L=10\text{ mH}, C=0.022\mu\text{F}, Q=$													
$f(\text{kHz})$	1	2	4	6	8	9	$f_0=$	11	12	14	16	18	20
$U_R(\text{mV})$													
$I(\text{mA})$													
I/I_0													
f/f_0													

表 2.3 (c) 测量通用串联谐振曲线数据 3

U_i =_____(V)

$R=510\Omega, L=10\text{ mH}, C=0.022\mu\text{F}, Q=$													
$f(\text{kHz})$	1	2	4	6	8	9	$f_0=$	11	12	14	16	18	20
$U_R(\text{mV})$													
$I(\text{mA})$													
I/I_0													
f/f_0													

2.5.4 RC 串并联选频网络

根据 RC 串并联选频网络原理图，正确接线，接线示意图如图 2.7 所示。将信号发生器的一个输出通道接到电路的输入端 AD，交流毫伏表的两个通道一个接到电路的输入端 AD，监测输入信号，另一个接到电路的输出端 CD，监测输出信号。 $R_1=R_2=15\text{k}\Omega, C_1=C_2=0.01\mu\text{F}$ 。

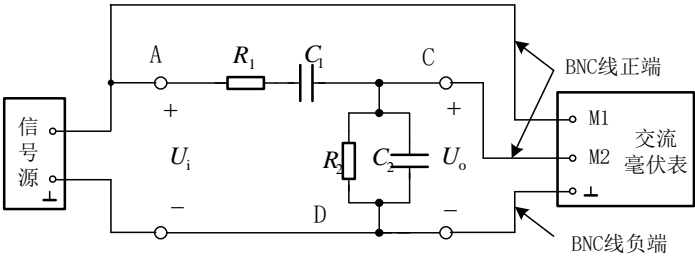


图 2.7 测量 RC 串并联选频特性实验线路

保持信号源输出电压有效值 $U_s = 9\text{V}$ ，改变信号源的频率 f ，用交流毫伏表测量相应频率点的输出电压有效值 U_0 ，记录数据填入表 2.4 中。

表 2.4 测量选频特性实验数据

 $U_i = \underline{\hspace{2cm}}$ (V)

$f(\text{Hz})$	90	600	850	950	1000	1100	1200	1500	1600	1800	2000
U_0											
$K = U_0 / U_i$											

2.6 注意事项

- (1) 遵守实验室的各项规章制度。
- (2) 在实验过程中不允许带电接线、换线、换元件。
- (3) 在实验过程中，信号源严禁短路，信号源的输出要使用交流毫伏表校准。
- (4) 信号源、交流毫伏表、示波器和实验电路要共地，即设备的黑色接线端要接在一个结点上。
- (5) 离开实验室前，需关掉电源，拆线，整理实验台，元器件归原处。

2.7 思考与分析

- (1) 在实验中，除了使用“判断信号源输出电压、电路电流同相位”方法判断串联谐振，还可用哪些方法来判断电路发生了串联谐振？
- (2) RC 串并联选频网络电路一般应用于何种场合？

实验三 单管交流电压放大电路

3.1 实验目的

- (1) 学习判别晶体管的工作状态，学习三极管的输入特性和输出特性的测量方法；
- (2) 掌握晶体管放大电路静态工作点的调试方法，了解静态工作点的改变对放大电路性能的影响；
- (3) 了解饱和失真和截止失真对放大电路输出电压波形的影响；
- (4) 进一步熟悉示波器、低频信号发生器、交流毫伏表的使用。

3.2 预习要点

- (1) 复习共发射极交流电压放大电路的组成、放大原理和指标计算方法。
- (2) 观看实验仪器的使用视频，及示例接线的实验视频；
- (3) 认真预习实验注意事项，完成所有计算值的计算，填写在实验指导书相应的栏目及表格中；
- (4) 考虑若提高电压放大倍数 A_u ，应采取哪些措施？

3.3 实验设备与元件

实验所需要的设备、元件列表如表 3.1 所示。

表 3.1 实验设备与元件列表

名称	型号	数量
直流稳压电源	DP832A	1 台
信号发生器	DG4062	1 台
示波器	TEK MSO 2012B	1 台
交流毫伏表	SM2030A	1 台
手持万用表	Fluke 287C	1 台
三极管	9013、9012	2 只
电阻	20k Ω 、1k Ω 、100 k Ω 、2.4 k Ω 、5 k Ω	若干
可变电阻器	220k Ω 、100 k Ω	2 只
电容	10 μ F/35V、47 μ F/35V	3 只
短接桥和连接导线	P8-1 和 50148	若干
实验用九孔插件方板	300mm \times 298mm	1 块

3.4 实验原理

半导体三极管，也称双极型晶体管、晶体三极管，是一种重要的非线性半导体器件，它具有放大作用和开关作用。晶体管有两个 PN 结，三个电极，发射极、基极和集电极，对温度敏感。晶体管的特性曲线有输入特性曲线和输出特性曲线，如图 3.1 所示。

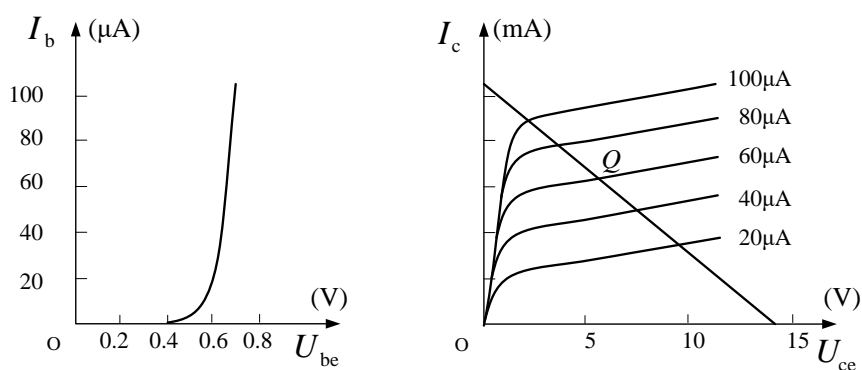


图 3.1 晶体管输入特性曲线和输出特性曲线

放大电路工作时，由于温度变化，晶体管参数发生变化，静态工作点会漂移，产生饱和失真或者截止失真，因此静态工作点要正确设置并且要设法稳定，避免受到温度影响。单管交流电压放大电路的最典型的工作点稳定电路，电路是共发射极分压偏置式交流电压放大电路，电路如图 3.2 所示。

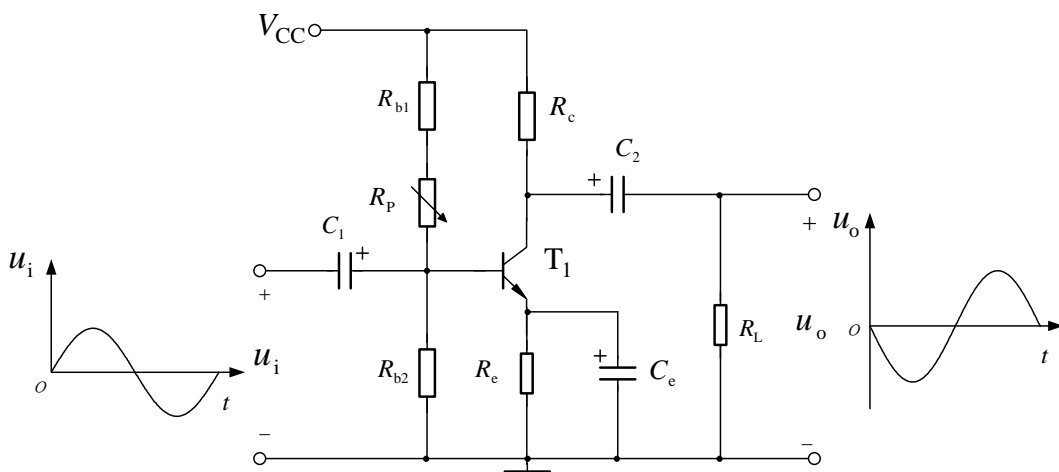


图 3.2 分压偏置式共发射极交流电压放大电路

晶体管为非线性元件，为使晶体管工作在放大区，可如图 3.2 设计电路。为避免温度影响，利用基极偏置电阻和射极电阻之间的配合，建立了一个稳定而合适的静态工作点，保证了晶体管的正常工作。从晶体管的输出特性曲线中可看出，如果 Q 点过高 (I_B 、 I_C 大， U_{CE} 小)，晶体管将进入饱和区，产生饱和失真；若 Q 点过低 (I_B 小，则 I_C 小， U_{CE} 大)，晶体管进入截止区，产生截止失真。调节基极偏置电阻（电位器） R_p 即可调整静态工作点。

图 3.2 中的电压放大倍数如公式 (3.1) 所示。

$$A_u = \frac{u_o}{u_i} = -\beta \frac{R_c // R_L}{r_{be}} \quad (3.1)$$

测量电压放大倍数应保证静态工作点在最佳位置，输出电压波形幅度最高且不失真的前提下进行。

3.5 实验步骤

做实验前，请认真阅读注意事项。

3.5.1 判别晶体管的管型及管脚

晶体管的结构可看做是两个背靠背的二极管，如图 3.3 所示。对 PNP 来说，基极是两个二极管的公共阴极；对 NPN 管来说，基极是两个二极管的公共阳极。因此，判别基极 B 是公共阳极还是公共阴极，即可知该管是 PNP 型还是 NPN 型。

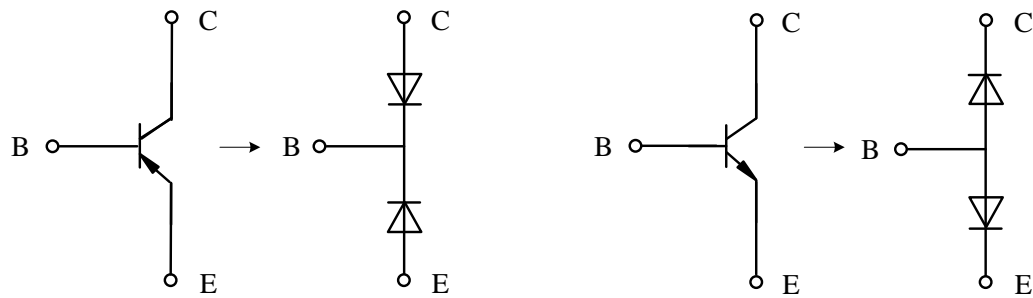


图 3.3 PNP 型晶体管与 NPN 型晶体管结构等效图

对于发射极 E 和集电极 C 的判别，可设计电路如图 3.4 所示， R_b 可取 $100\text{k}\Omega$ 及以上电阻。如果用万用表电阻测试端，将红表笔接于 N_1 端，黑表笔接于 N_2 端，测得的电阻小说明电流大，即 I_C 大；反之，如果红、黑表笔互换，则测得的电阻大，即 I_C 小，此时表明， N_1 端是集电极 C， N_2 端是发射极 E。用两只手分别捏住 B、C 两极(B、C 不可接触)，人体可代替图 3.4 中 R_b 的作用。

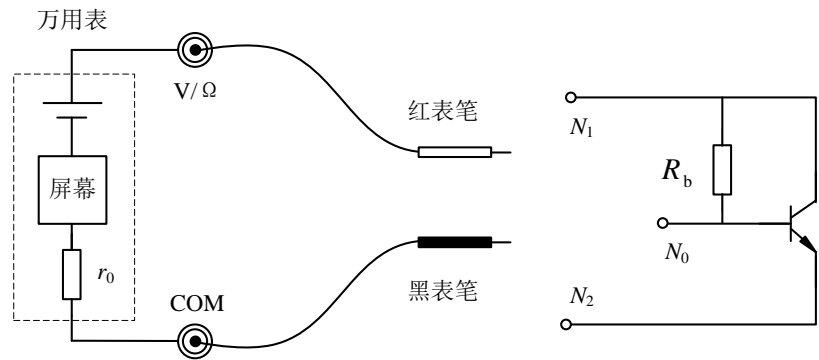


图 3.4 万用表电阻测试三极管发射极 E 和集电极 C 电路图

用万用表的二极管测试端判别晶体管 9013 和 9012 的管型，并将测试结果填入表 3.2 中，对比 9013 和 9012 的测试结果。

表 3.2 判别晶体管的管型及管脚记录表

极性判别	U_{BE}	U_{BC}	U_{CE}	U_{EB}	U_{CB}	U_{EC}	管型
9012							
9013							

3.5.2 调整静态工作点及测量电压放大倍数

实验电路按图 3.5 接线， $R_{b1}=20\text{k}\Omega$ ， $R_{b2}=20\text{k}\Omega$ ， $R_c=2.4\text{k}\Omega$ ， $R_e=1\text{k}\Omega$ ， $R_p=100\text{k}\Omega$ ， $C_1=10\mu\text{F}$ ， $C_2=10\mu\text{F}$ ， $C_e=47\mu\text{F}$ ， $V_{CC}=12\text{V}$ 。设输入信号 U_i 为正弦信号，其有效值 $U_i=10\text{mV}$ ，频率 $f=1\text{kHz}$ 。此信号从低频信号源取出，用交流毫伏表监测。直流电压 12V 从直流稳压电源中取出，用万用表的直流电压档监测。

按以下步骤调整静态工作点：

第一步，将 $U_i=10\text{mV}$ 输入信号接入电路中，将直流电压 12V 接入电路中。检查电路无误后，接通电源。

第二步，按图 3.5 所示接入示波器，通道 CH1 接放大电路的输入端，通道 CH2 接放大电路的输出端。注意：示波器和直流稳压电源、信号源要共地。用示波器观察放大电路的输出电压波形，等待稳定后，采用示波器的 AC 耦合，观察波形是否得到了放大。

第三步，关闭信号源，调节电位器 R_p ，将静态工作点调节到理论最佳位置（ $U_{CE}=6\text{V}$ 左右）。

第四步，工作点调好之后（信号源关闭状态），用万用表的直流电压挡分别测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 、 V_C 、电位器 R_p 的阻值，并计算 I_B 、 I_C 的数值，将相关数据计入表 3.3 中。

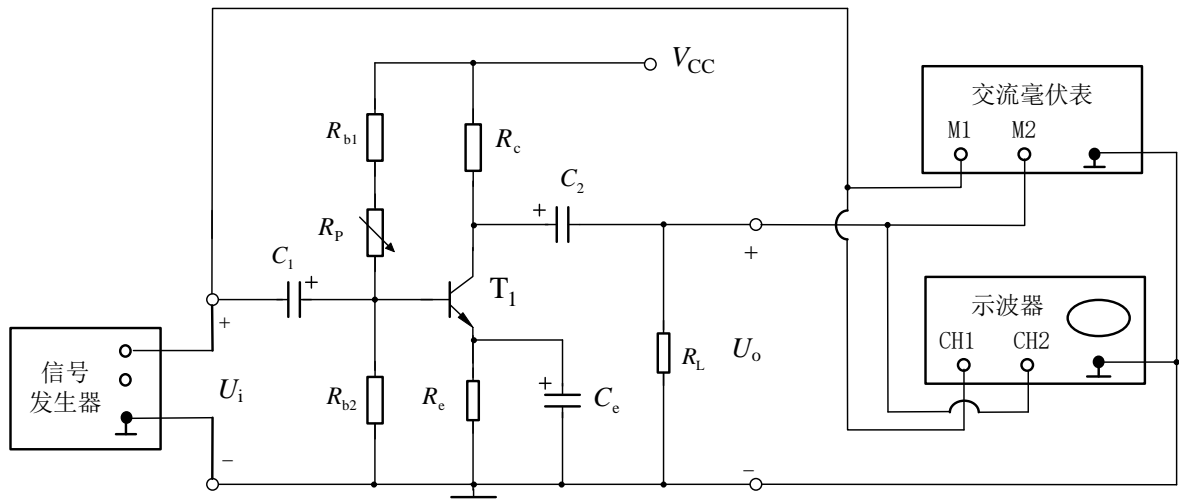


图 3.5 调整静态工作点实验电路接线图

表 3.3 测量静态工作点数据表格

实测数据						根据实测计算的数据		
U_{BE}/V	U_{CE}/V	V_B/V	V_C/V	$R_p/\text{k}\Omega$	$R_e/\text{k}\Omega$	$I_B/\mu\text{A}$	I_C/mA	β

在图 3.5 中，当静态工作点测量完毕之后，保持静态工作点不变（ R_p 不变），接通信号源。保持输入正弦信号电压有效值 $U_i=10\text{mV}$ ，频率 $f=1\text{kHz}$ 不变（用交流毫伏表监测）。分别用交流毫伏表测量负载开路和有载情况下的输出电压 U_o ，计算电压放大倍数填入表 3.4 中。

表 3.4 测量电压放大倍数数据表格

条件	$U_i(\text{mV})$	$U_o(\text{V})$	A_u
$R_L=\infty$ (R_P 不变)	10		
$R_L=10\text{ k}\Omega$ (R_P 不变)	10		
$R_L=1\text{ k}\Omega$ (R_P 不变)	10		

3.5.3 观测静态工作点对输出电压波形的影响

实验电路按图 3.5 接线，负载开路。按以下步骤调整静态工作点，测量数据填入表 3.5 中。

(1) 静态工作点合适的情况

按照调整静态工作点的步骤，调节 R_P ，使静态工作点在最佳位置时，观察输出电压波形，画在图 3.6 中。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 的电压值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 3.5 中。

(2) 饱和失真的情况

将 R_P 的阻值逐渐调小，输入信号保持不变，观察输出电压波形，使波形出现饱和失真，在图 3.6 中画出输出电压波形。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 的电压值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 3.5 中。

(3) 截止失真的情况

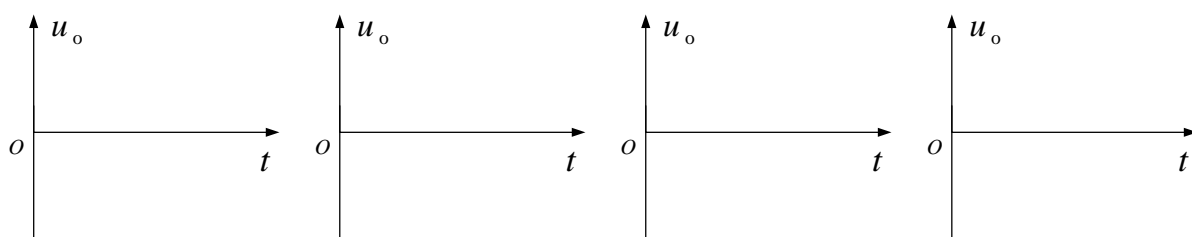
首先断开直流电源，更换两个电阻，令 $R_{b1}\geq 100\text{ k}\Omega$ ， $R_P=220\text{ k}\Omega$ ，按照调整静态工作点的步骤，调节 R_P ，将 R_P 的阻值逐渐调大，直至最大，输入信号保持不变，观察输出电压波形，使波形出现截止失真，在图 3.6 中画出输出电压波形。然后关断信号源，用万用表的直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 的电压值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 3.5 中。

(4) 输入信号增大情况

首先断电更换两个电路元件， $R_{b1}=20\text{ k}\Omega$ ， $R_P=100\text{ k}\Omega$ ，按照调整静态工作点的步骤，输入信号 $U_i=10\text{ mV}$ ，频率 $f=1\text{ kHz}$ ，调节 R_P ，使之达到最佳静态工作点。然后逐渐增大 u_i ，注意 $U_i<30\text{ mV}$ ，观察输出电压波形，使输出电压波形同时出现饱和失真与截止失真，在图 3.6 中画出输出电压波形。用万用表的直流电压挡测量 U_{BE} 、 U_{CE} 、 V_B 的电压值，计算 I_B 、 I_C ，填入表 3.5 中。

表 3.5 静态工作点对输出电压波形的影响实验数据

调节 R_P		静态工作点合适 $U_i=10\text{mV}$	R_P 减小 $U_i=10\text{mV}$	R_P 最大 $U_i=10\text{mV}$	静态工作点合适 $U_i=30\text{ mV}$
静态 工作 点	测量参数/V	$U_{\text{CE}} =$	$U_{\text{CE}} =$	$U_{\text{CE}} =$	$U_{\text{CE}} =$
		$U_{\text{BE}} =$	$U_{\text{BE}} =$	$U_{\text{BE}} =$	$U_{\text{BE}} =$
		$V_{\text{B}} =$	$V_{\text{B}} =$	$V_{\text{B}} =$	$V_{\text{B}} =$
		$V_{\text{C}}=$	$V_{\text{C}}=$	$V_{\text{C}}=$	$V_{\text{C}}=$
		$R_{\text{P}}=$	$R_{\text{P}}=$	$R_{\text{P}}=$	$R_{\text{P}}=$
	计算静态值	$I_{\text{B}}=$ μA	$I_{\text{B}}=$ μA	$I_{\text{B}}=$ μA	$I_{\text{B}}=$ μA
		$I_{\text{C}} =$ m A	$I_{\text{C}}=$ mA	$I_{\text{C}}=$ mA	$I_{\text{C}}=$ mA
波形失真情况					



(a) 静态工作点合适

(b) 饱和失真

(c) 截止失真

(d) 输入信号增大

图 3.6 输出波形失真情况波形

3.6 注意事项

- (1) 遵守实验室的各项规章制度。
- (2) 用交流毫伏表调好信号源的输出电压 10mV，信号源才能接入电路。
- (3) 实验过程中不允许带电接线、换线、换元件。
- (4) 实验过程中信号源不允许短路，耦合电容的极性不能接反。
- (5) 信号源、交流毫伏表、示波器和实验电路要共地，即各设备的黑色接线端要接在一个结点上。
- (6) 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。

3.7 思考与分析

- (1) 当输入信号合适的情况下，晶体管放大电路出现饱和失真或截止失真的原因是什么？电路中应调整哪个元件？
- (2) 如何提高放大电路的电压放大倍数？

实验四 集成运算放大器的应用

4.1 实验目的

- (1) 掌握集成运算放大器的基本运算功能及其正确使用；
- (2) 掌握集成运算放大器常用单元电路的设计和调试方法；
- (3) 进一步熟悉示波器、低频信号发生器、毫伏表的使用方法。

4.2 预习要点

- (1) 复习集成运算放大器的基本理论知识，观看实验仪器的使用视频，及示例接线的实验视频；
- (2) 预习实验注意事项，完成所有计算值的计算，填写在实验指导书相应的栏目及表格中；
- (3) 掌握正负 12V 电源的连接方法。

4.3 实验设备与元件

实验所需要的设备、元件列表如表 4.1 所示。

表 4.1 实验设备与元件列表

名称	型号	数量
直流稳压电源	DP832A	1 台
信号发生器	DG4062	1 台
示波器	TEK MSO 2012B	1 台
手持万用表	Fluke 287C	1 台
交流毫伏表	SM2030A	1 台
集成运算放大器	μ A741	1 块
直流信号模块	ST2016 -5V~+5V	1 块
电阻	20k Ω 、25k Ω 、10 k Ω 、47k Ω 、100k Ω	若干
电容	0.1 μ F、0.01 μ F	2 只
短接桥和连接导线	P8-1 和 50148	若干
实验用九孔插件方板	300mm \times 298mm	1 块

4.4 集成运放基本原理

集成运算放大器是最重要的模拟集成电路之一。它具有体积小、功耗低、可靠性高等优点，种类繁多，应用广泛。从工作原理上，集成运算放大器可分为线性应用和非线性应用两方面。在线性工作区内，其输出电压 u_o 与输入电压 u_i 的线性放大的关系为

$$u_o = A_{uo}(u_+ - u_-) = A_{uo}u_i \quad (4.1)$$

在工程应用情况下，将集成运放视为理想运放，就是将集成运放的各项技术指标理想化，满足下列条件的运算放大器称为理想运放，即

(1) 开环电压放大倍数 $A_{uo} = \infty$

(2) 输入阻抗 $r_i = \infty$

(3) 输出阻抗 $r_o = 0$

(4) 带宽 $f_{BW} = \infty$

(5) 失调与漂移均为零

理想运放工作在线性区的分析依据是，输入端的虚短（ $u_+ = u_-$ ），输入端的虚断（ $i_+ = i_- = 0$ ）和输入端的虚地（同相端接地时， $u_- = 0$ ）。

理想运放工作在非线性区的分析依据是， $u_+ > u_-$ ， $u_o = +U_{OM}$ ， $u_- > u_+$ ， $u_o = -U_{OM}$ 。

本实验中使用的集成运算放大器为通用集成运放 LM741 或者 $\mu A741$ ，其引脚及引脚功能如图 4.1 所示。2 脚为运放的反相输入端，3 脚为运放的同相输入端，6 脚为运放的输出端，7 脚为正电源引脚，4 脚为负电源引脚。1 脚和 5 脚为输出调零端，8 脚为空脚。

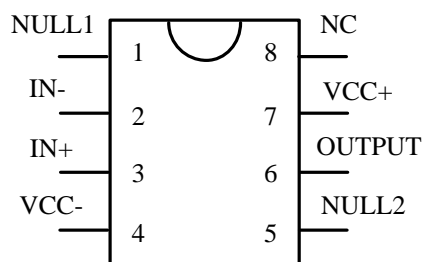


图 4.1 $\mu A741$ 的引脚排列图

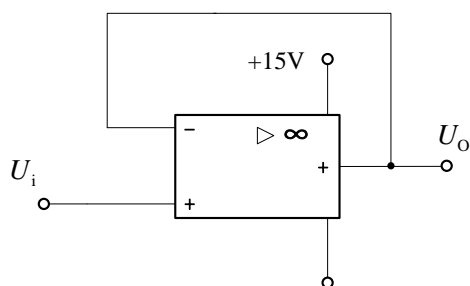


图 4.2 电压跟随器

4.5 实验内容与步骤

以下所有电路都要使用直流稳压电源的两路电压，向集成运放提供 $\pm 12V$ 的工作电压。直流信号源的原理是一个四路分压器，可提供四路 $-5V \sim +5V$ 的直流电压信号。做实验前，请认真阅读注意事项。

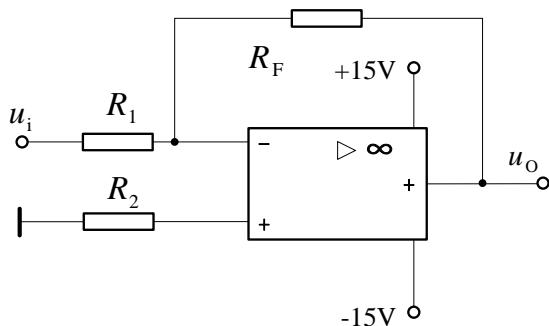


图4.3 反比例运算电路

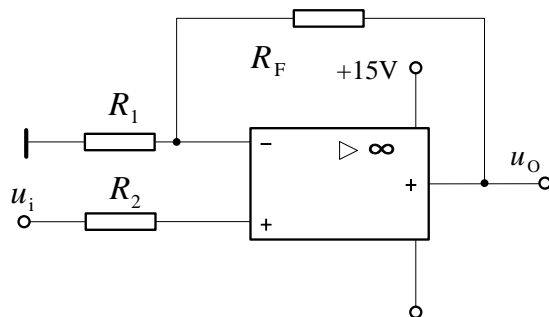


图4.4 同比例运算电路

4.5.1 电压跟随器

电压跟随器的实验电路如图 4.2 所示。测试电压跟随器的输出电压可以检查集成运放的好坏。按图 4.2 接线，接通 $\pm 12\text{V}$ 直流工作电源。输入信号 U_i 是直流， $U_i=1\text{V}$ 。使用万用表测量输入电压、输出电压的有效值，填入表 4.2 中，根据测量结果判定集成运放的好坏。

表 4.2 电压跟随器数据

输入电压 U_i (V)	1
输出电压 U_o (V)	

表 4.3 反相比例运算电路直流数据

输入电压 U_i	0.5V	1V	1.5 V	2.0 V	2.5 V
理论数据 U_o					
实际测量 U_o					
误差					

4.5.2 反相比例运算电路

反相比例电路如图 4.3 所示， $R_1=20\text{k}\Omega$ ， $R_F=100\text{k}\Omega$ ， $R_2=R_1 \parallel R_F$ 。实验步骤如下：

- (1) 按图 4.3 接线，接通直流工作电源 $\pm 12\text{V}$ 。
- (2) 输入信号 U_i 是直流，使用万用表测量输出电压 U_o 的大小，输入信号取值请看表格 4.3。
- (3) 接通信号发生器，输入信号是正弦波，其频率为 1kHz ，当输入电压的有效值分别是 1V ， 2V 和 3V 时，使用交流毫伏表，输出电压的有效值，填入表 4.4 中。
- (4) 用示波器观察输入电压和输出电压的波形，并记录 u_i 和 u_o 波形于图 4.5 中，要求体现相位关系，并标出各自峰峰值。
- (5) （选做）思考，如果将直流信号源和信号发生器的输入电压叠加后，反相比例运算电路输出电压是怎样的，请使用示波器观察分析。

表 4.4 反相比例运算电路交流数据

输入电压 U_i	1V	2V	3V
理论数据 U_o			
实际测量 U_o			
误差			

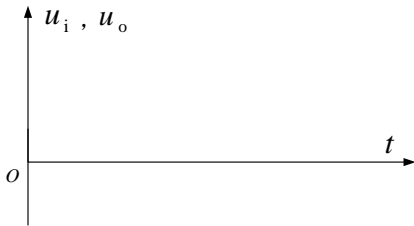


图 4.5 反相比例输入输出电压波形记录

4.5.3 同相比例运算电路

同相比例电路如图 4.4 所示， $R_1=20\text{k}\Omega$ ， $R_F=100\text{k}\Omega$ ， $R_2=R_1 \parallel R_F$ 。实验步骤如下：

- (1) 按图 4.4 接线，接通直流工作电源 $\pm 12\text{V}$ 。
- (2) 接通信号发生器，输入信号是正弦波，其频率为 1kHz 。用交流毫伏表分别测量，当输入电压的有效值分别是 0.5V ， 1V ， 2V 和 3V 时输出电压的有效值，填入表 4.5 中。
- (3) 用示波器观察输入电压和输出电压的波形，并记录 u_i 和 u_o 波形于图 4.6 中，要求体现相位关系，并标出各自峰峰值。

表 4.5 同相比例运算电路数据

输入电压 U_i	0.5V	1V	2V	3V
理论数据 U_o				
实际测量 U_o				
误差				

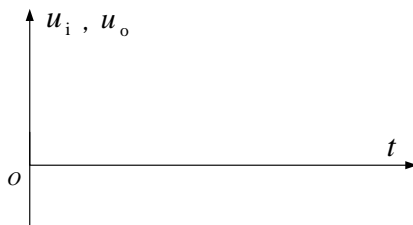


图 4.6 同相比例输入输出电压波形记录

4.5.4 减法器设计

减法运算电路可运用反相比例运算电路和同相比例运算电路结合搭建，请按照以下的关系式设计一个减法器，即 $u_o = -2(u_{i1} - u_{i2})$ 。

实验步骤如下：

- (1) 实验电路经过老师检查才能接线，接通 $\pm 12V$ 直流电源，画出实验电路图，建议采用 $10k\Omega$ 以上的电阻，请思考原因。
- (2) 输入信号是正弦波，其频率为 $1kHz$ ，请保证两个输入信号同相位。
- (3) 接通信号源，用交流毫伏表测量输出电压的有效值，填入表 4.6 中。

表 4.6 减法运算电路数据

U_{i1} 有效值 (V)	0.5V	0.5V	0.5V	0.5V
U_{i2} 有效值 (V)	1.0V	1.5V	2.0V	2.5V
U_o 理论值 (V)				
U_o 测量值 (V)				
U_o 误差				

4.5.5 过零电压比较器

过零电压比较器是对电压幅值进行比较的电路，是集成运放的典型非线性应用。电路图如图 4.7 (a) 所示， $R_1 = R_2 = 10k\Omega$ 。实验步骤如下：

- (1) 按图 4.7 接线，输入 u_i 为正弦波信号，其有效值为 $1V$ ，频率为 $1kHz$ 。
- (2) 接通直流电源 $\pm 12V$ ，用示波器观察输入输出电压波形，并将输入波形、输出波形画在图 4.7 (b) 中。
- (3) 使用示波器的 XY 显示功能，查看李萨如图形，在图 4.7 (c) 中画出电压传输特性。

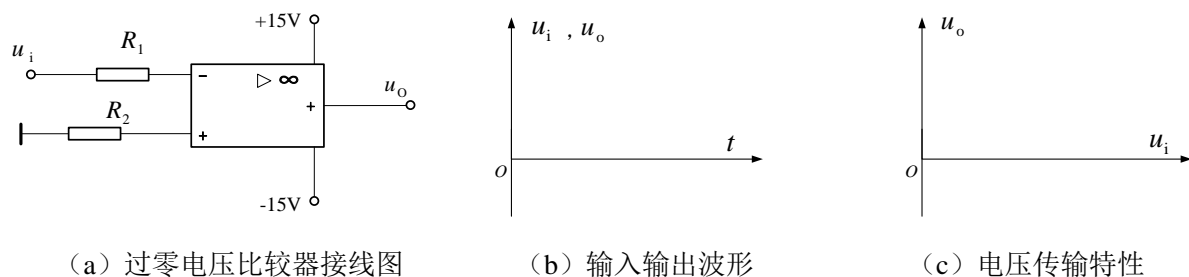


图 4.7 过零电压比较器实验线路与测量结果

4.5.6 （选做）微积分运算电路

微积分运算电路是同相输入和反相输入运算电路的线性运算，因此也是集成运放的线性应用，微分运算是积分运算的逆运算。典型微积分电路如图 4.8 所示，积分电路为降低电路的低频电压增益，消除积分电路的饱和现象，可在积分电容上并联一个电阻。微分电路为限制电路的高频增益，在输入端与电容 C 之间加入一个小电阻。积分电路元件参数可选 $R_1 = R_2 = 10\text{k}\Omega$, $R_f = 100\text{k}\Omega$, $C = 0.01\mu\text{F}$ ；微分电路元件参数可选 $R_1 = 100\Omega$, $R_2 = R_f = 1\text{k}\Omega$, $C = 0.1\mu\text{F}$ 。

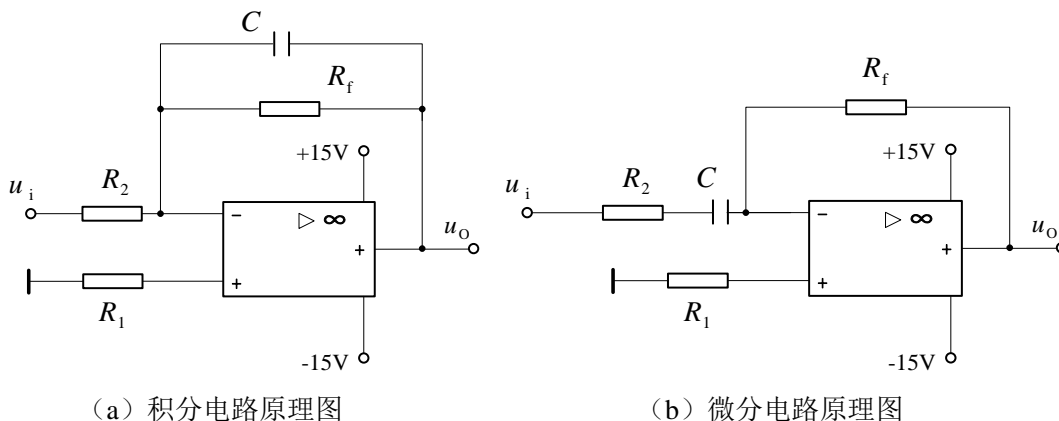


图 4.8 典型微积分电路

实验步骤如下：

- (1) 按电路图要求选择电路元件，接好电路。
- (2) 信号发生器提供输入方波电压 u_i ，频率为 1kHz ，峰峰值为 2V （幅值为 1V ）。
- (3) 检查后，接通 $\pm 12\text{V}$ 电源。
- (4) 画出积分电路和微分电路的输入电压和输出电压的波形。

4.5.7 （选做）方波发生器

方波发生电路如图 4.9 所示。

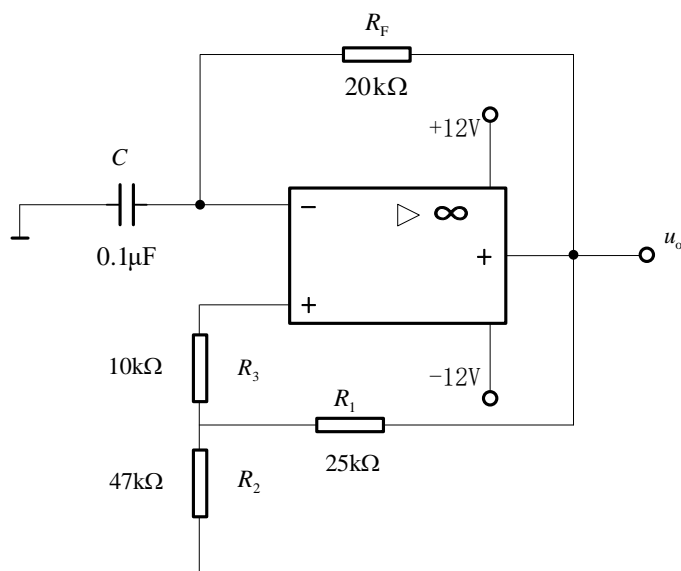


图4.9 方波发生器

实验步骤如下：

- (1) 按图 4.9 接线。
- (2) 接通 $\pm 12\text{V}$ 直流电压，用示波器观察输出电压波形，并测量周期、频率及幅度，填入表 4.7 中。
- (3) 按照表 4.7 改变参数后，使用示波器观察输出波形，并测量周期、频率及幅度，填入表 4.7 中。

表 4.7 方波振荡器数据

参数	$R_F = 20\text{k}\Omega, R_1 = 25\text{k}\Omega$ $R_2 = 47\text{k}\Omega, R_3 = 10\text{k}\Omega$ $C = 0.1\mu\text{F}$	$R_F = 10\text{k}\Omega, R_1 = 25\text{k}\Omega$ $R_2 = 47\text{k}\Omega, R_3 = 10\text{k}\Omega$ $C = 0.01\mu\text{F}$	$R_F = 10\text{k}\Omega, R_1 = 25\text{k}\Omega$ $R_2 = 100\text{k}\Omega, R_3 = 10\text{k}\Omega$ $C = 0.01\mu\text{F}$
T			
f			
$U_{\text{OP-P}}$			

4.6 注意事项

- (1) 遵守实验室的各项规章制度。
- (2) 为使集成运放正常工作，不要忘记接入直流工作电源。切记电源的正负极性不能接反或将输出端短路，否则将损坏集成芯片。
- (3) 实验过程中不允许带电接线、换线、换元件，每次更换电路时，必须首先断开电源，严禁带电操作。
- (4) 集成运放的输出端不允许短路，信号源不允许短路，手不要碰到芯片的管脚，防止静电损伤。
- (5) 信号源、示波器和实验电路要共地，即各设备的黑色接线端要接在一个结点上。
- (6) 在电路工作中，如果发现波形不对，或者异常声音或者异常发热，需要马上断电，检查电路。

(7) 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。

4.7 思考与分析

- (1) 集成运算电路的输入信号能否无限制的增大？为什么？
- (2) 为了防止集成运放的正、负电源的极性接反而损坏集成运放，应在集成运放的电源端加什么保护电路？请画出保护电路图。