

目录

第一章 实验要求及注意事项	- 1 -
第二章 实验内容	- 2 -
实验一 常用电工仪表的使用及减小仪表测量误差的方法	- 2 -
实验二 常用电路元件的简易测试	- 8 -
实验三 电路元件伏安特性的测定	- 12 -
实验四 电路基本测量	- 17 -
实验五 基尔霍夫定律的验证	- 21 -
实验六 叠加原理	- 24 -
实验七 互易定理	- 27 -
实验八 戴维南定理与诺顿定理	- 30 -
实验九 电压源与电流源等效变换及最大功率传输定理	- 35 -
实验十 受控源特性研究	- 40 -
实验十一 典型电信号的观察与测量	- 48 -
实验十二 RC 一阶电路的响应及其应用	- 52 -
实验十三 二阶动态电路的响应及其测试	- 56 -
实验十四 R、L、C 元件阻抗特性的测定	- 62 -
实验十六 RC 电路的频率响应及选频网络特性测试	- 66 -
实验十七 RLC 串联谐振电路	- 72 -
实验十八 双口网络研究	- 77 -
实验十九 负阻抗变换器及其应用	- 83 -
实验二十 回转器及其应用	- 89 -

第一章 实验要求及注意事项

一、实验前必须充分预习，完成指定的预习任务。预习要求如下：

- 1、熟悉实验系统使用说明及相关注意事项；**
- 2、复习与实验相关的课本内容，了解实验目的；**
- 3、认真阅读实验指导书，分析、掌握实验电路的工作原理，并进行必要的估算；**
- 4、了解实验中所用各仪器，使用仪器和实验系统前必须了解其性能、操作方法及注意事项，在使用时应严格遵守。**

二、实验操作注意事项：

- 1、实验时需要把相应的实验模块插到主实验板的相应插座上，插拔实验模块时，通过操作实验模块四个接线柱，均匀力插拔，切勿蛮横用力，以免损坏；**
- 2、实验系统中的连接线的使用方法为：连线插入时要垂直，切忌用蛮力，拔出时用手捏住连线靠近插孔的一端，然后左右轻轻晃动几下，连线自然会轻松拔出，切忌用力向上拉线，以免造成连线和插孔的损坏；**
- 3、实验接线完毕后，要认真仔细检查，确定无误后才能接通电源，初学或没有把握者应经指导教师审查同意后再接通电源；**
- 4、电源的打开顺序是：先开总电源开关，再开模块电源开关，电源关掉的顺序刚好与此相反；本实验系统已加入短路过流保护，如果实验过程中电源指示灯突然熄灭，很有可能是某些地方产生短路或其它故障，此时应立即关闭电源开关，切断电源，检查电路找到事故原因，排除故障后实验。**
- 5、实验中应该严格按照老师的要求和实验指导书来操作，若非实验明确要求，不要随意乱动开关，芯片及其它元器件，以免造成实验系统的损坏。**
- 6、用户在熟练掌握本设备使用后，可选择本设备配备的开发模块，开发出新的电路功能，也可接入自己开发的模块，与现有模块一起使用，建议做创新实验时，在老师指导下进行。**

第二章 实验内容

实验一 常用电工仪表的使用及减小仪表测量误差的方法

一、实验目的

- 1、掌握电压表、电流表的使用方法。
- 2、了解电压表、电流表内阻的测量方法。
- 3、了解电压表、电流表内阻对测量结果的影响及减小仪表内阻产生测量误差的方法。

二、实验内容

- 1、用标准表校验 20mA 量程的直流毫安表和 5V 量程的万用表直流电压档。
- 2、用分压法测定万用表(MF30)直流电压 1V 和 5V 档量限的内阻。
- 3、用分流法测定直流毫安表 2mA 和 20mA 档量限的内阻。
- 4、采用同一量程两次测量法测量电路负载 RL 上的电流。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
2	可调直流恒流源	0~200mA	1	实验箱
3	万用表	MF-30 或其他	1	自配
4	标准电流表		1	万用表或其他标准仪表
5	标准电压表		1	
6	直流毫安表		1	万用表
7	可调电阻	10KΩ	1	实验箱
8	电阻		若干	DLM01

四、实验原理

1、根据被测量的性质选择仪表的类型

被测量分为直流量和交流量，交流量又分为正弦交流量和非正弦交流量。应选择相应的直流仪表和交流仪表。如果是正弦交流电压（或电流），采用任何一种交流电压表（或电流表）均可，一般从仪表直接读出有效值。如果被测量是非正弦交流电压（或电流），则在测有效值时可用电磁系或电动系仪表，测平均值可用整流系仪表，测瞬时值可用示波器，从波形中可求出各点的瞬时值和最大值，测最大值还可用峰值表。

测量交流量时，还应考虑被测量的频率。一般电磁系、电动系和感应系仪表，适用频率范围较窄，但特殊设计的电动系仪表可用于中频。整流系仪表适用频率可以高一些。

2、根据被测线路和被测负载阻抗的大小选择内阻合适的仪表

对电路进行测量时，仪表的接入对电路工作情况的影响尽可能小，否则测量出来的数据将不反映电路的实际情况。因此用电压表测量负载电压时，电压表内阻越大越好。一般若电

压表内阻 $RV \geq 100R$ (R 为被测负载的总电阻)，就可以忽略电压表内阻的影响。电流表串联接入电路进行测量时，其内阻越小，对电路的影响也越小。一般当电流表内阻 $RA \leq \frac{1}{100} R$ (R 是与电流表串联的总电阻) 时，即可忽略电流表内阻的影响。

电压表、电流表内阻大小与仪表的测量机构（即表头）的灵敏度有关，磁电系仪表灵敏度高，作电压表时内阻常在 $2000\Omega/V$ 以上，高的可达 $100K\Omega/V$ ，用作电流表时，因灵敏度高的表头所用分流电阻的阻值小，故磁电系电流表内阻小。电磁系和电动系电压表、电流表内阻的情况则与磁电系相反。

3、根据测量的需要合理选择仪表的准确度等级

我国目前生产的电工仪表，其准确度有 8 级，即 0.05、0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 级。仪表准确度就是仪表在规定条件下工作，其标度尺的工作部分的全部分度线上，可能出现的最大基本误差的百分数值。例如标称的准确度为 1.0 的表头，相应量程的最大相对误差为 $\pm 1.0\%$ 。仪表准确度等级数值越小，准确度越高，基本误差越小。一般电工仪表中，单向标度尺的仪表用的最多，以此为例，其准确度以标度尺工作部分上量限的百分数表示。若以 K 表示其准确度等级，则有 $\pm K\% = \frac{\Delta_m}{A_m} \times 100\%$ ，式中 Δ_m ——以绝对误差表示的最大基本误差；

A_m ——测量上限。在电工仪表的表盘上一般都标出了仪表的准确度等级符号。仪表的准确度越高，测量误差越小。结果越可靠。但并不是说测量时要尽量选用准确度高的仪表。因为仪表的准确度越高，价格越贵，维修也困难。在准确度较低的仪表可以满足测量要求的情况下，就不必选用准确度高的仪表。通常准确度为 0.1 级和 0.2 级的仪表作标准表和精密测量用；0.5~1.5 级的仪表用于实验室一般测量，1.0~5.0 级的仪表用于一般工业生产。

仪表的准确度等级应该定期进行校验。比较法校验直流电流表、直流电压表，选取一块比被校表的准确度等级高 1~2 级的仪表作为标准表。校验电压表，将标准表与被校表并联接入电路中；校验电流表，将标准表与被校表串联接入电路中，如图 1.1 所示。在表的整个刻度范围内，逐点比较被校表与标准表的差值，并作出校正曲线，横坐标是被校表的读数，纵坐标是被校表读数与标准表读数之差。从校正曲线可查出被校表读数的校正量 Δ 。根据 Δ 最大值的绝对值与量程之比的百分数，确定被校表的等级。

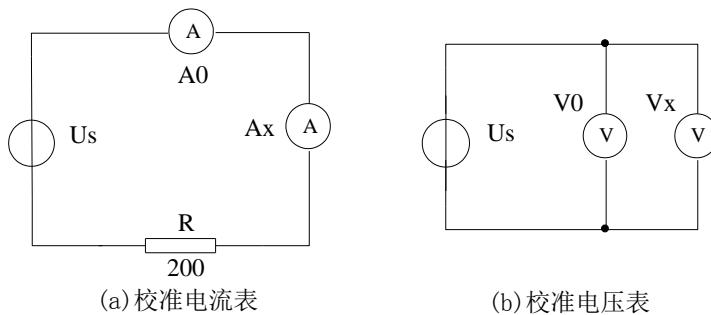


图 1.1 比较法校验仪表电路

4、按照被测量的大小选用量限合适的仪表

选择仪表时，一般应使被测量的大小为仪表量限的 $\frac{1}{2}$ 或 $\frac{2}{3}$ 以上，如果被测量的大小不到仪表量限的 $\frac{1}{3}$ ，那就是不合理的。如果用量限比被测量数值大得多的仪表进行测量，则测量误差很大。当然，被测量的大小也不能超过仪表的量限，特别是对灵敏度高的电工仪表，这可能造成仪表的损坏。

5、电流表、电压表内阻的测量

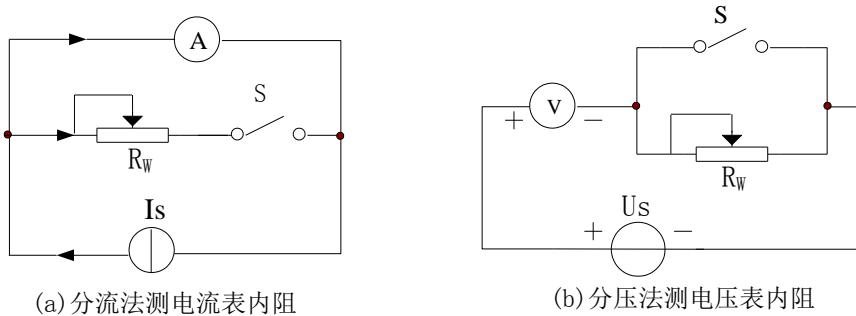


图 1.2 测量仪表内阻电路

(1) 电流表的内阻测量可采用分流法，如图 1.2(a)所示。**A**为被测电流表，内阻设为 R_A 。首先断开开关 **S**，调节电流源的输出电流 I_S ，使电流表指针满偏转。然后合上开关 **S**，并保持 I_S 值不变，调节可调电阻 R_W ，使电流表的指针在 $1/2$ 满偏转位置，此时有 $I_A = I_R = \frac{1}{2} I_S$ 则 $R_A = R_W$ ，再测量可调电阻的阻值 R_W 即为电流表的内阻。

(2) 电压表的内阻测量可采用分压法，如图 1.2(b)所示。**V**为被测电压表，内阻设为 R_V 。首先合上开关 **S**，调节电压源的输出电压 U_S ，使电压表指针满偏转。然后断开开关 **S**，并保持 U_S 值不变，调节可调电阻 R_W ，使电压表的指针在 $1/2$ 满偏转位置，此时有 $U_V = U_R = \frac{1}{2} U_S$ ， $R_V = R_W$ ，再测量可调电阻的阻值 R_W 即为电压表的内阻。

6、减小仪表测量误差的方法

若电流表或电压表的内阻不理想，可采用同一量程两次测量法减小由此造成的误差。其中，第一次测量与一般的测量并无两样，只是在进行第二次测量时，必须在电路中串入一个已知阻值的附加电阻 R 。

(1) 电压测量——测量如图 1.3 所示电路的开路电压 U_0

图 1.3 是两次测量某电路开路电压的示意图。第一次测量，电压表的读数为 U_1 ，(设电压表的内阻为 R_V)，第二次测量时应与电压表串接一个已知电阻值的电阻 R ，电压表读数为 U_2 ，由图 1.3 可知

$$U_1 = \frac{R_V}{R_{in} + R_V} U_{OC}$$

$$U_2 = \frac{R_V}{R_{in} + R_V + R} U_{OC}$$

解以上两式，可得 $U_{OC} = \frac{R_U U_1 U_2}{R_V (U_1 - U_2)}$

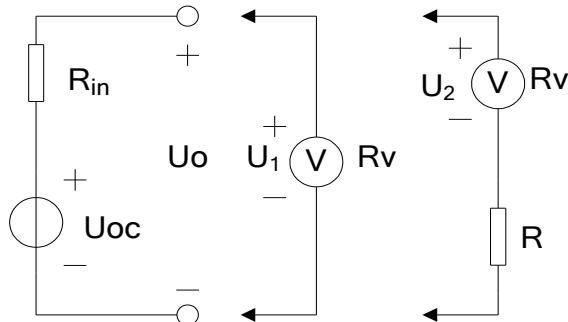


图 1.3 两次测量法测开路电压

(2) 电流测量——测量图 1.4 所示短路电流 I

第一次测量电流表的读数为 I_1 ，(设电流表内阻为 R_A)，第二次测量时应与电流表串接一个已知电阻值的电阻 R ，电流表读数为 I_2 ，由图 1.4 可知

$$I_1 = \frac{U_{OC}}{R_{in} + R_A} \quad I_2 = \frac{U_{OC}}{R_{in} + R_A + R}$$

$$\text{解以上两式可得 } I = \frac{U_{OC}}{R_{in}} = \frac{RI_1 I_2}{I_2(R_A + R) - I_1 R_A}$$

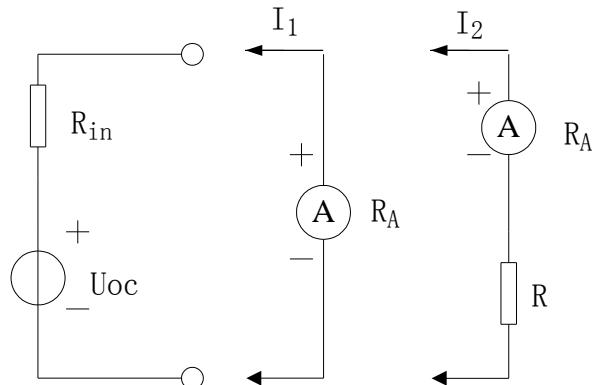


图 1.4 两次测量法测短路电流

五、实验注意事项

1、直流稳压源和直流恒流源均可通过旋钮调节其输出量，并由仪表显示其输出量的大小，启动实验装置电源之前，应使其输出旋钮置于零位，实验时再缓慢地增、减输出。

2、直流稳压源的输出不允许短路，恒流源的输出不允许开路。

3、电压表应与电路并联使用，电流表应与电路串联使用，并且都要注意极性与量限的合理选择。

六、实验内容与步骤

1、按图 1.1 接好电路， U_S 接可调直流稳压电源，调节输出旋钮，使电压从零缓慢地增加。选取一块比被校表的准确度等级高 1~2 级的仪表作为标准表。用标准表校验 20mA 量程的直流毫安表和 5V 量程万用表直流电压档。在表的整个刻度范围内，逐点比较被校表与标准表的差值，记录校验数据于下列表中。

表 1.1 校验直流毫安表数据

被校直流毫安表	I_X/mA	1	5	10	15	20
标准数字电流表	I_0/mA					
绝对误差 $\Delta I = I_X - I_0 $						

表 1.2 校验直流电压表（万用表直流电压档）数据

被校直流电压表	U_X/V	1	2	3	4	5
标准数字电压表	U_0/V					
绝对误差 $\Delta U = U_X - U_0 $						

2、根据“分压法”原理测定万用表(MF30)直流电压 1V 和 5V 档量限的内阻。（数字电压表测量精度高，内阻很大，因而测定指针式万用表的电压档内阻）

实验线路如图 1.2 (b) 所示，其中 R_W 为可调电阻。先将开关 S 闭合，万用表置 1V 档，调节可调电压源输出 U_S ，使电压表满偏；再将开关 S 断开，分压电阻 R_W 接入电路，保持可调电压源输出 U_S 不变，调节可调电阻 R_W ，使电压表指示为满偏时的一半，数据记入表 1.3 中，计算电压表内阻 R_V 。改变万用表量程，重复上述步骤。测试内容见表 1.3，并将实验数据记入表中。

表 1.3 分压法测电压表内阻

被测表量程	电压表满偏值 (V)	电压表半偏值 (V)	R_W ($\text{K}\Omega$)	计算内阻 R_V ($\text{K}\Omega$)
1V				
5V				

3、根据“分流法”原理测定直流毫安表 2mA、20mA 档量限的内阻。

实验线路如图 1.2 (a) 所示，其中 R_W 为可调电阻。先将开关 S 断开，直流毫安表置 2mA 档，调节可调恒流源输出 I_S ，使电流表满偏；再将开关 S 闭合，分流电阻 R_W 接入电路，保持可调恒流源输出 I_S 不变，调节可调电阻 R_W ，使电流表指示为满偏时的一半，数据记入表 1.4 中，计算电流表内阻 R_A 。改变直流毫安表量程，重复上述步骤。测试内容见表 1.4，并将实验数据记入表中。

表 1.4 分流法测电流表内阻

被测表量程	电流表满偏值 (mA)	电流表半偏值 (mA)	R_w (Ω)	计算内阻 R_A (Ω)
2mA				
20mA				

4、用直流毫安表 20mA 档，采用同一量程两次测量法测量图 1.5 所示电路负载 R_L 上的电流。(直流毫安表 20mA 档量限的内阻 R_A 用实验内容 3 的测定结果)

第一次测量，电流表直接串接到负载 R_L 支路上，读数记为 I_1 ，(设电流表内阻为 R_A)，第二次测量时应与电流表串接一个已知电阻值的电阻 R ，再串接到负载 R_L 支路上，电流表读数记为 I_2 ，根据两次测量结果，计算电路负载 R_L 上的电流。

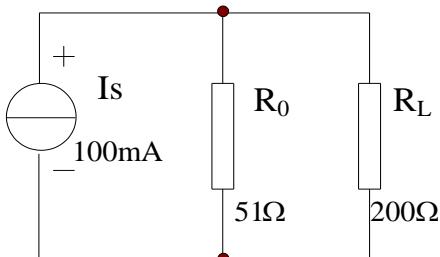


图 1.5 两次测量法测负载电流

七、实验报告要求

- 1、做出直流电流表 (20mA 档) 的校验报告，标定仪表的等级、内阻。
- 2、做出直流电压表 (5V 档) 的校验报告，标定仪表的等级、内阻。
- 3、做出图 1.5 同一量程两次测量法测试负载电阻电流的测试报告，给出误差分析。
- 4、回答实验思考题。

八、实验思考题

- 1、用 200mA 档量程、0.5 级电流表测量电流时，可能产生的最大绝对误差为多少？
- 2、用量程为 20A 的电流表测试实际值为 16A 电流时，仪表读数为 16.1A，求测量的绝对误差和相对误差。
- 3、计算图 1.5 所示电路负载电阻上的电压和电流，并与测量值相比较。
- 4、设计一个记录理论计算和两次测量法测量图 1.5 所示电路电阻 R_L 上的电流数据的表格。

实验二 常用电路元件的简易测试

一、实验目的

- 1、学会万用表欧姆档的基本使用方法。
- 2、学会用万用表判别电容器的好坏。
- 3、学会晶体管类型与极性的简易判别方法。

二、实验内容

- 1、电阻的测量。
- 2、电容器好坏的判别。
- 3、用万用表判断 DLM01 上的两个三极管的类型及其极性。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
2	万用表	MF-30 或其他	1	
3	电阻	51Ω、10KΩ、100KΩ 等	若干	DLM01
4	电容器	0.1 μF、0.47 μF、2.2 μF	2	DLM01
5	晶体管	NPN、PNP	2	DLM01

四、实验原理

电阻、电容、电感线圈、半导体二极管、晶体三极管等都是电路中常用的元器件，利用多功能电工测量仪表——万用表，不仅可以用来测量直流电流、交直流电压、电阻等参量值，还可以判别元器件的好坏及其极性。

1、万用表欧姆档结构原理与电阻的测量。

从原理上讲，欧姆档电路主要是由表头和电池等组成，如图 2.1 所示。用万用表测电阻值，实质上是以测定在一定电压下通过表头的电流大小来实现的。由于通过表头的电流与被测电阻 R_X 不是正比关系，所以表盘上的电阻标度尺是不均匀的。万用表欧姆档分为 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 1K$ 等数档位置，刻度盘上欧姆的刻度只有一行，其中 1、10、1K 等数值为欧姆档的倍率。被测电阻的实际值等于标度尺上读数乘以倍率。

由于电池电动势会因使用而下降，所以在测量以前，先将两表笔短接，转动调零电位器，使指针指在 0 欧姆位置，然后再进行测量。

2、电容器好坏的简易判别

电容的好坏和容量的大小可根据电容器放电时电流电压的变化及其时间常数的大小用万用表进行简易测试。对于 $1 \mu F$ 以上的固定电容，用万用表欧姆档便可检测出好坏；对于 $1 \mu F$ 以下的小容量电容，因其时间常数甚小，需外加直流电源，用万用表相应的直流电压档检测之。

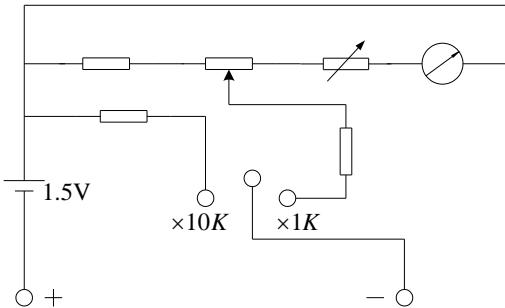
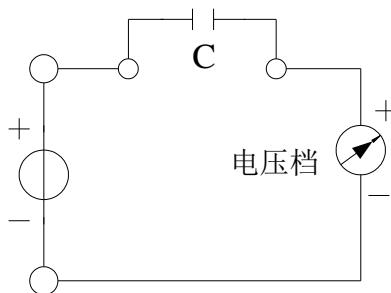


图 2.1 欧姆档原理电路

$1\mu F$ 以上电容的欧姆档检测：选用 $1K$ 的欧姆档位，用两表笔接触电容器两电极，与此同时，观察表针摆动情况。若表针向阻值小的方向摆出，然后又较慢地摆回无穷大处，则电容是好的。交换表笔再测一次，看表针的回摆情况。摆幅越大的电容，其电容量也越大。若表笔一直接触电容器两电极，表针总在无穷大处，或交换表笔后仍然如此，则表明该电容器断路，即已失去容量。若表笔摆出后根本不回摆，则为电容器短路，即已击穿。若表针摆出后回不到无穷大处，则为电容器漏电，质量不佳。

若在电路上检查电容器故障，一定要切断电源，并拆开电容一脚检测之。

$1\mu F$ 以下电容器的电压辅助检测：对于容量很小的电容器，用欧姆档检测往往看不出指针的摆动。此时可借助于一个外加直流电压用万用表电压档进行检测。具体方法如图 2.2 所示，注意表笔极性和所加直流电压的大小，需与相应的电压档对应，切不可使外加电压超出所测电容器的耐压。性能良好的电容器，接通电源时，万用表电压值有较大的摆动，然后缓慢地返回零位。摆幅越大的电容器，电容量也越大。若接通电源时，电压值为零，表针不摆动，交换电容器两电极与电源的连接，表针仍不摆动，则为电容器断路。若指针一直指示某一电压值而不回摆，则为击穿短路。若摆动后不返回零位，说明电容器漏电。且所指示的电压值越高，漏电量越大。

图 2.2 $1\mu F$ 以下电容器检测电路

3、晶体管类型与极性的判别

由欧姆档原理电路图可知，插入“-”接线孔的黑表笔是内部电源的正极，而红表笔则是电源的负极。由于半导体元件的正向耐压和电流之限，判别其极性时常用 $\times 10$ 、 $\times 100$ 和 $\times 1K$ 档，而禁用 $\times 1$ 和 $\times 10K$ 档。

利用 PN 结正向电阻小，反向电阻大的原理，用万用表欧姆档便可判别出基极 b，同时确定出晶体管的类型。判别出基极后，利用晶体管的放大原理（以 NPN 为例），只有当晶体管

满足 $V_c > V_b > V_e$ 时，才有放大能力，然后根据其满足 $V_c > V_b > V_e$ 时电流放大系数 β 较大，反之电流放大系数很小的原理，便可判别出晶体管的集电极 c 和发射极 e。

(1) 由晶体管结构判别其类型与基极 b：任意假设管子的某极为基极，据基极对 c 和 e 呈对称的情况，即仅当基极才会有对 c 和 e 的电阻“要小都小，要大都大”，如图 2.3 所示。如果满足这种条件，说明假设的基极就是实际的基极。否则，换一个极重复测试，直到满足上述条件为止。

基极确定后，看两电阻都小时，是红表笔还是黑表笔接基极，若为黑表笔接基极，则为 NPN 型管，否则，便为 PNP 型晶体管。

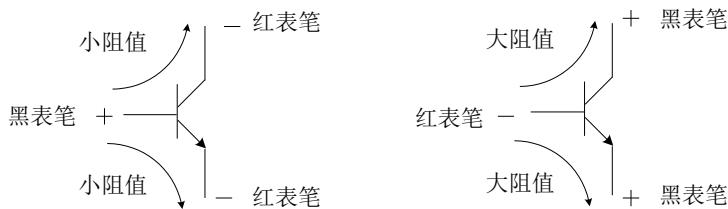


图 2.3 晶体管类型与基极判别依据

(2) 由放大原理判别集电极 c 和发射极 e：以 NPN 型晶体管为例，将万用表两表笔分别接在两未知管脚上，用一约 100K 欧姆左右的电阻在黑表笔与 b 间接触一下，相当于给基极加了一个偏置电流，观察表针的回摆幅度；对调红、黑两表笔，仍用 100K 欧姆电阻碰触黑笔与 b，再看回摆幅度的大小，如图 2.4 所示。显然回摆幅度大的一次时黑表笔所接为集电极 c，另一极便为 e。实际操作时，利用人体电阻代替 100K 欧姆电阻，用手指触 b 与黑表笔便可实现之。

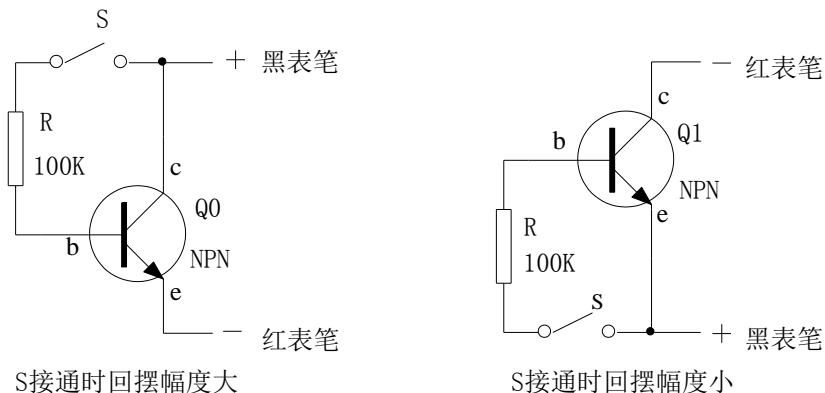


图 2.4 c 和 e 判别原理示意图

PNP 型晶体管的测试方法类似，只需用手指触及 b 与红表笔即可。回摆幅度大时的那次，红表笔所接为 c 极。

该实验使用指针式万用表，若使用数字显示万用表，红、黑表笔和指针式万用表指针的使用恰好相反。

五、实验注意事项

- 测电阻前，先进行零欧姆调节，每换一次档位，都要重新调零。

2、绝不能在带电线路上测量电阻，这样做实际上是把欧姆表当电压表使用，极易烧坏万用表。

3、检测 $1\mu F$ 以下电容器时，注意表笔极性和所加直流电压的大小，需与相应的电压档对应，切不可使外加电压超出所测电容器的耐压。

六、实验内容与步骤

1、电阻的测量

在 DLM01 上任选两个档位的电阻测量，根据电阻标称值估计所用万用表欧姆档量限。指针愈接近欧姆刻度中心读数，测量结果越准确。

按表 2.1 要求，将测量结果记入表内。

表 2.1 电阻测量结果记录表

电阻	R1 (Ω)	R2 (Ω)	R1//R2 (Ω)	R1+R2 (Ω)
标称值（计算值）				
实测值				

2、电容器好坏的判别

根据实验原理部分（ $1\mu F$ 以上电容的欧姆档检测）的描述步骤，用万用表欧姆档 $\times 1K$ 档检测 DLM01 上 $2.2\mu F$ 、 $4.7\mu F$ 的电容器；根据实验原理部分（ $1\mu F$ 以下电容器的电压辅助检测）的描述步骤，用万用表电压档检测 DLM01 上 $0.1\mu F$ 、 $0.47\mu F$ 的电容器。

3、三极管的类型及其极性的判别

用万用表判别 DLM01 上的两个三极管的类型及其极性。根据实验原理部分的描述步骤，先判断三极管类型，再判断极性。

七、实验报告要求

- 1、结合本实验，将万用表欧姆档使用方法及其注意事项作一小结。
- 2、记录电阻测量结果。
- 3、回答实验思考题。

八、实验思考题

1、用万用表欧姆档检测一未知电容的好坏时，若表针一直指在 ∞ 处，是否该电容一定断路？为什么？

2、用最简洁的语言叙述晶体管类型与极性的判别过程。

实验三 电路元件伏安特性的测定

一、实验目的

- 1、掌握线性、非线性电阻的概念，以及理想、实际电源的概念。
- 2、学习线性电阻元件和非线性电阻元件伏安特性的测试方法。
- 3、学习电源外特性的测量方法。
- 4、掌握应用伏安法判定电阻元件类型的方法。
- 5、学习直流稳压电源、直流电压表、直流电流表等仪器的正确使用。

二、实验内容

- 1、电阻元件伏安特性的测量。
- 2、测定整流二极管的伏安特性。
- 3、测定稳压二极管的伏安特性。
- 4、测定理想电压源伏安特性。
- 5、测定实际电压源的伏安特性。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
2	直流数字电压表		1	万用表
3	直流数字电流表		1	万用表
4	电位器	10KΩ	1	实验箱
5	整流二极管	1N4007	1	DLM01
6	稳压二极管	1N4727/3V	1	DLM01
7	电阻	51Ω, 200Ω 等	若干	DLM01

四、实验原理

二端电阻元件的伏安特性是指元件的端电压与通过该元件电流之间的函数关系。独立电源和电阻元件的伏安特性可以用电压表、电流表测定，称为伏安测量法，由测得的伏安特性可了解被测元件的性质。

1、电阻元件

线性电阻元件的伏安特性满足欧姆定律，在关联参考方向下，可表示为 $u=Ri$ ，其中 R 为常量，称为电阻的阻值。其伏安特性曲线是一条过坐标原点的直线，具有双向性。

非线性电阻元件的阻值 R 不是一个常量，其伏安特性曲线是一条过坐标原点的曲线。非线性电阻的种类很多，而且应用也很广泛。钨丝灯泡、普通二极管、稳压二极管、恒流管和隧道二极管都是非线性电阻元件。

在被测电阻元件上施加不同极性和幅值的电压，测量出流过该元件中的电流，或在被测

电阻元件中通入不同方向或幅值的电流，测量该元件两端的电压，得到被测电阻元件的伏安特性。

2、电压源

理想直流电压源输出固定幅值的电压，输出电流的大小可由外电路决定。因此它的外特性曲线是平行于电流轴的直线。实际电压源的电压 U 和电流 I 关系为 $U=U_S+R_S I$ 。在线性工作区它可以用一个理想电压源 U_S 和内电阻 R_S 相串联的电路模型来表示。实际电压源的外特性曲线和理想电压源的外特性曲线有一个夹角 θ ， θ 越大，说明实际电压源内电阻 R_S 越大。

电压源与一可调电阻 R_L 相连，改变负载电阻 R_L 的阻值，测量相应的电压源电流和端电压，得到被测电压源外特性。

3、电流源

理想电流源输出固定幅值的电流，其端电压由外电路决定，因此它的外特性曲线是平行于电压轴的直线。实际电流源的电流 I 和电压 U 的关系为 $I=I_S+G_S U$ 。实际电流源在线性工作区内可以用一个理想电流源和内电导相并联的电路模型来表示。实际电流源的外特性曲线和理想电流源的外特性曲线有一个夹角 θ ， θ 越大，说明实际电流源内电导 G_S 值越大。

五、实验注意事项

1、阅读实验中所用仪表的使用介绍，注意量程和功能的选择。注意电压源使用时不能短路。

2、测二极管正向特性时，稳压电源输出应由小到大逐渐增加，应时刻注意电流表读数不得超过 $20mA$ ，稳压源输出端切勿碰线短路。

3、进行不同的实验时，应先估算电压和电流值，合理选择仪表的量程，勿使仪表超量程，仪表的极性亦不可接错。

六、实验内容与步骤

1、电阻元件伏安特性的测量

取 $R=200\Omega$ 作为被测元件，先将稳压电源输出 $12V$ 调好后关闭电源。按图 3.1 接线。经检查无误后，接通电源，调节可变电阻器，使电压表示数分别为表 3.1 中所列数值，记录相应的电流值于表中。注意有效数字的读取，绘制 $U-I$ 关系曲线图。

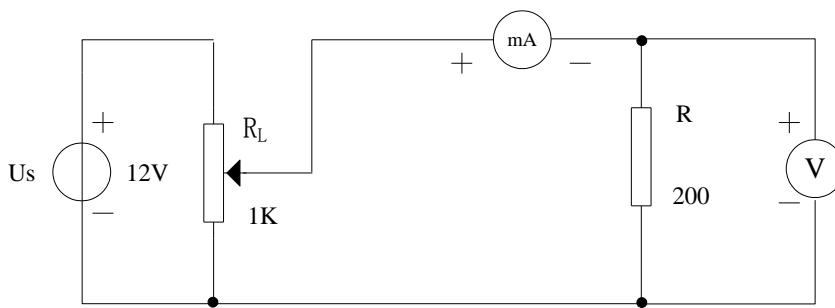


图 3.1 测试线性电阻元件伏安特性的电路图

表 3.1 电阻元件伏安特性测量数据

U (V)	0	2	4	6	8	10
I (mA)						

2、非线性电阻元件伏安特性的测量

(1) 测定整流二极管的伏安特性

被测对象为半导体二极管。由于硅二极管、锗二极管的正向导通压降不一样，为了使特性曲线测得准确，先从低到高给出一组电压数值初测一次，由测量结果描出曲线草图，然后根据形状，合理选取电压值进行测量。曲线曲率大的地方，相邻电压数值要选得靠近一些；曲率小的地方，可选的疏一些。

按图 3.2 接线，US 为可调稳压电源，其中 D 是整流二极管，可变电阻 RL 用以调节电压，r 为限流电阻，用以保护二极管。测二极管 D 的正向特性时，调节电源输出电压为 12V，改变可变电阻 RL 的值，二极管正向电流不得超过 25mA，正向压降可在 0~0.75V 之间取值，特别是在 0.5~0.75V 之间更应多取几个测试点。作反向特性实验时，只需将图 3.2 中的二极管 D 反接，使 $RL=1K$ ，调节可调稳压源输出电压 US，从 0V 开始缓慢增加，二极管反向电压可在 0~12V 之间取值。由于二极管是单向性元件，注意使用中其端钮的接线。线路连好后，按表 3.2 和表 3.3 所列数据观测并记录结果，在 U-I 平面上绘出其伏安特性曲线。

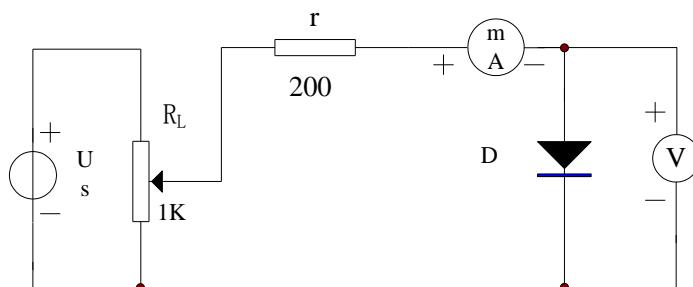


图 3.2 测试非线性电阻正向伏安特性电路图

表 3.2 整流二极管正向伏安特性测量数据

U (V)	0	0.2	0.4	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75
I (mA)									

表 3.3 整流二极管反向伏安特性测量数据

U (V)	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
I (mA)							

(2) 测定稳压二极管的伏安特性

将整流二极管换成稳压二极管，按图 3.2 所示电路接线，调节电压源输出电压为 8V，改变可变电阻 RL 的值，重复实验内容（1）的测量，其正、反向电流不得超过 $\pm 20mA$ ，记录被测稳压二极管上的电压、电流值，填入表 3.4 和表 3.5 中。根据被测数据，绘制稳压二极管伏安特性曲线图。

表 3.4 稳压二极管正向伏安特性测量数据

U (V)	0	0.2	0.4	0.6	0.65	0.7	0.72	0.74	0.76	0.78
I (mA)										

表 3.5 稳压二极管反向伏安特性测量数据

U (V)	0	-1.5	-2	-2.5	-2.8	-3	-3.1	-3.2	-3.5	-3.55
I (mA)										

3、测定理想电压源、电流源伏安特性

被测对象是直流稳压电源，由于其内阻 $R_0 \leq 30m\Omega$ ，在和外电路电阻相比其内阻可忽略不计的情况下，其输出电压基本维持不变，可视为一理想电压源。实验电路如图 3.3 所示。其中 $r=200\Omega$ 为限流电阻， R_L 为 $1K\Omega$ 可变电阻器。接好电路，调节稳压源输出 $U_s=10V$ ，保持稳压源输出电压不变，改变电阻 R_L 的值，使电流表读数分别为表格 3.6 所示，按表 3.6 所列数据记录测量结果，并绘制伏安特性曲线。

电流源伏安特性的测量与电压源的测量方法一致，将电流源按图 3.3 所示电路连接，调节恒流源输出为 $10mA$ ，保持恒流源输出不变，改变电阻 R_L 的值，使电压表读数分别为表格 3.6 所示，按表 3.6 所列数据记录测量结果。

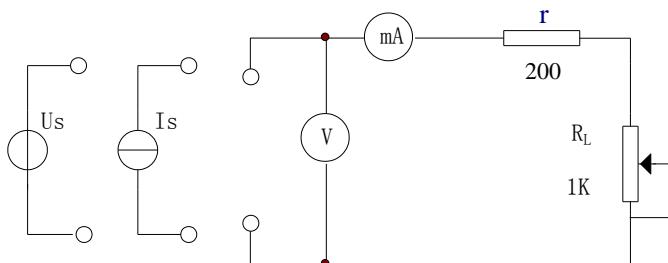


图 3.3 测定理想电源伏安特性电路图

表 3.6 理想电源伏安特性测量数据

	$r=200\Omega$ $R_L=0\sim 1K\Omega$						
电压源	I (mA)	10	15	20	30	40	45
U_s (V)							
电流源	U (V)	3	4	6	8	10	11
I_s (mA)							

4、测定实际电压源的伏安特性

直流稳压电源其内阻很小，为了了解实际电压源的伏安特性，我们选取一个电阻作为稳压电源的内阻，与其串联组成一个实际电压源模型，然后测其伏安特性。实验电路如图 3.4 所示，调节稳压源输出 $U_s=12V$ ，保持稳压源输出电压不变，改变电阻 R_L 的值，使电流表读数分别为表格 3.7 所示，按表 3.7 所列数据记录测量结果，并绘制伏安特性曲线，写出解析式。

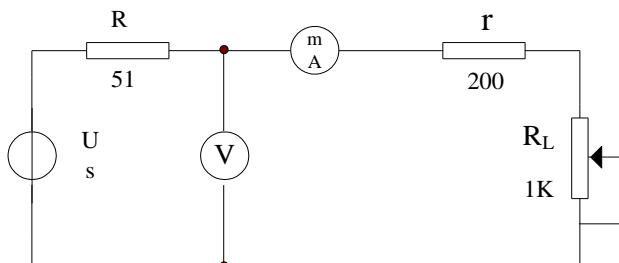


图 3.4 测定实际电压源伏安特性电路图

表 3.7 实际电压源伏安特性测量数据

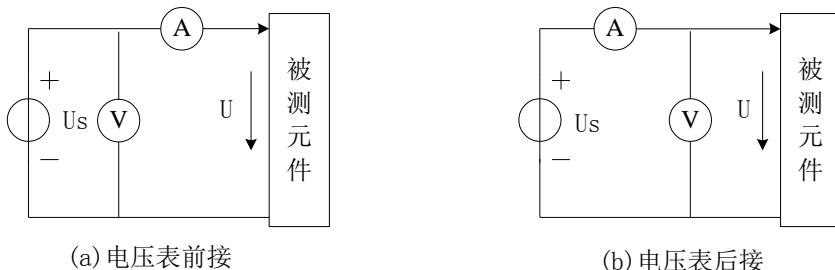
I (mA)	10	15	20	25	30	35	40
U(V)							

七、实验报告要求

- 根据测量数据，在坐标纸上按比例绘制出各伏安特性曲线，由特性曲线求出各种情况下实际电源的内阻值，并与实验给定的内阻值相比较，分析引起误差的主要原因。
- 简要解释各特性曲线的物理意义。
- 根据伏安特性曲线，判断各元件的性质和名称。由线性电阻的特性曲线求出其电阻值。
- 根据实验结果，总结、归纳被测各元件的特性。

八、实验思考题

- 线性电阻和非线性电阻的概念是什么？电阻器与二极管的伏安特性有何区别？
- 设某器件伏安特性曲线的函数式为 $I=f(U)$ ，试问在逐点绘制曲线时，其坐标量应如何放置？
- 稳压二极管与普通二极管有何区别？其用途如何？
- 用伏安法测量电阻元件伏安特性曲线的电路如图 3.5 (a) 所示，由于电流表内阻不为零，电压表的读数包括了电流表两端的电压，给测量结果带来了误差。为了使被测元件伏安特性更准确，设电流表的内阻已知，如何用作图的方法对测得的伏安特性曲线进行校正？若将实验电路换为电压表后接，如图 3.5 (b) 所示，电流表的读数包括了流经电压表支路的电流，设电压表的内阻为已知，对测得的伏安特性又如何校正？



(a) 电压表前接

(b) 电压表后接

图 3.5 用伏安法测电阻元件伏安特性曲线的电路

实验四 电路基本测量

一、实验目的

- 1、掌握电流表、电压表、万用表、滑线变阻器、稳压电源的使用方法。
- 2、学习电流、电压的测量及误差分析。
- 3、掌握电位的测量及电位正负的判定。
- 4、掌握电路电位图的绘制方法。
- 5、学会用电流插头、插座测量各支路电流的方法。
- 6、根据实验电路参数，合理选择仪表量程，掌握档位的选择及正确读数的方法。

二、实验内容

- 1、布置并连接实验线路，调节可调稳压源输出，使用电压表、电流表测量电路电压、电流等，判断被测量的正负，进行误差分析，学会用电流插头、插座测量各支路电流的方法。
- 2、分别以 c、e 为参考节点，测量混联电路中各节点电位及相邻两点之间的电压值，判定电位的正负，通过计算验证电路中任意两节点间的电压与参考点的选择无关，并根据实验数据绘制电路电位图。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	基尔霍夫定律实验电路		1	DLM11
2	可调直流稳压电源	0~5V	1	实验箱
3	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
4	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
5	直流数字电流表		1	实验箱或万用表

四、实验原理

1、滑线变阻器的使用

滑线变阻器是一种常用的电工设备。它可作为可变电阻，用以调节电路中的电流，使负载得到大小合适的电流，它也可作为电位器的使用，改变电路的端电压，使负载得到所需要的电压。它的额定值有最大电阻 R_N 和额定电流 I_N ，在各种使用场合，不论滑动触头处于任何位置，流过它的电流均不允许超过额定电流，否则会烧坏滑线变阻器。

2、电位的测量及电位正负的判定

电路中某点的电位等于该点与参考点之间的电压。电位的参考点选择不同，各节点的电位也相应改变，但任意两点间的电位差不变，即任意两点间电压与参考点电位的选择无关。测量电位就象测量电压一样，要使用电压表或万用表电压档。如果将仪表的接“-”的黑表笔放在电路的正方向（参考方向）的低电位点上，接“+”的红表笔放在正方向的高电位点上，表针正偏转，则读数应取正值。若表针反偏，则应将表笔对调后再测量，读数取负值。

3、电位图的绘制

若以电路中的电位值作纵坐标，电路中各点位置（电阻或电源）作横坐标，将测量到的各点电位在该坐标平面中标出，并把标出点按顺序用直线条相连接，就得到电路的电位变化图。每一段直线段即表示该两点间电位的变化情况。而且任意两点的电位变化，即为该两点之间的电压。

在电路中，电位参考点可任意选定，对于不同参考点，所绘出的电位图形是不同，但其各点电位变化的规律是一样的。

4、电压和电流的测量与读数

在电路测量中，电流表应与被测电路串联，电压表要与被测电路并联。在直流电路中，要注意仪表正极端必须与电路高电位点连接，否则，仪表会出现反摆，甚至会损坏仪表。接线前，应根据电路参数估算后，正确选择仪表的量程。量程选择太小而使电参数超过仪表量程会损坏仪表；量程选择太大又会增加测量误差。根据误差理论分析，一般应当使其读数在 $1/2\sim2/3$ 满刻度之间。一定准确度的仪表，所选量程越接近被测值，测量结果的误差就越小。

5、电流插座和插头的设置

为了用同一电流表来测量多个支路电流，电流表并不直接串入电路，而是用几个电流插座来代表。将电流插座接入被测电流支路，电流插头两接线端与一个电流表两接线端相接，将电流插头插入电流插座的两接触铜片间，电流就流经电流表而测得所需支路电流。

6、电路故障分析与排除

(1) 实验中常见故障

- ①连线：连线错、接触不良、短路或断路。
- ②元件：元件错或元件值错，包括电源输出错。
- ③参考点：电源、实验电路、测试仪器之间公共参考点连接错误等等。

(2) 故障检查

故障检查方法很多，一般是根据故障类型，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点并给予排除。简单实用的方法是用万用表（电压档或电阻档）在通电或断电状态下检查电路故障。

①通电检查法：用万用表电压档或电压表，在接通电源的情况下，根据实验原理，电路某两点应该有电压，万用表测不出电压；某两点不应该有电压，而万用表测出了电压；或所测电压值与电路原理不符，则故障即在此两点间。

②断电检查法：电工实验过程中，可能经常会遇到接触不良或连接导线内部断开的隐性故障。利用万用表可以较方便地寻找到这类故障点。首先，在测量过程中发现某点或某部分电路在数值上与理论值相差甚远或时有时无时，可以大致推断出故障区域，然后切断电源，用万用表欧姆档测量故障区域内的端钮、接线、焊点或元件，当发现某处应当是接通的而阻值较大时，即为故障点。

五、实验注意事项

1、使用指针式仪表时，要特别关注表针的偏转情况，及时调换表的档位，防止指针打弯或损坏仪表。

2、测量电位时，不但要读出数值来，还要判断实际方向，并与设定的参考方向进行比较，若不一致，则该数值前加“-”号。

3、使用电流测试线时，红色插头接电流表“+”，黑色插头接电流表“-”。

4、使用数字直流电压表测量电位时，用黑笔端插入参考点，红笔端插入被测各点，若显示正值，则表明该点电位为正（即高于参考点电位）；若显示负值，表明该点电位为负值（即该点电位低于参考点电位）。

5、使用数字直流电压表测量电压时，红笔端接入被测电压参考方向的正（+）端，黑表笔插入被测电压参考方向的负（-）端，若显示正值，则表明电压参考方向与实际方向一致；若显示负值，表明电压参考方向与实际方向相反。

六、实验内容与步骤

1、实验线路如图 4.1 所示，实验前先任意设定三条支路的电流参考方向，如图 I1、I2、I3 所示。

(1) 分别将两路直流稳压电源接入电路，按表 4.1 所列数据调节稳压电源输出电压。

(2) 熟悉电流插头的结构，将电流插头的两接线端接至直流数字毫安表的“+”、“-”两端。将电流插头分别插入三条支路的三个电流插座中，记录电流值，填入表 4.1 中。

(3) 用直流数字电压表分别测量两路稳压电源输出电压及电阻元件上的电压值，将测量结果记入表 4.1 中。

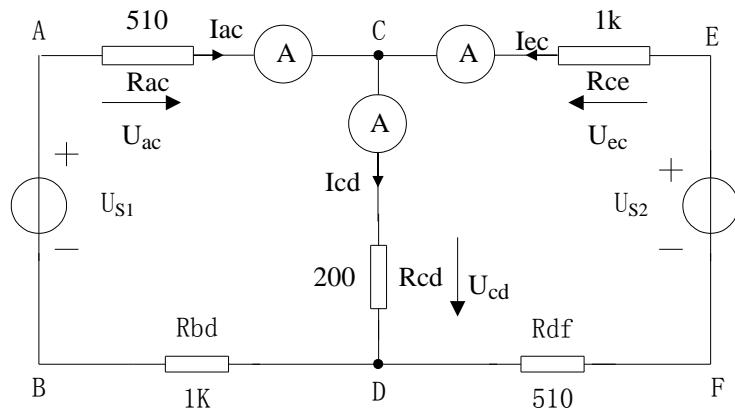


图 4.1 实验电路

表 4.1 电路基本测量实验数据

测量条件	US1	US2	Uac	Uec	Ucd	Iac	Iec	Icd
US1=5V, US2=5V								
US1=5V, US2=12V								

2、 $U_{S1}=12V, U_{S2}=5V$ ，分别以 B、F 为参考节点，测量图 4.1 中各节点电位及相邻两点之间的电压值，将测量结果记入表 4.2 中，通过计算验证电路中任意两节点间的电压与参考点

的选择无关。并根据实验数据绘制电路电位图。

表 4.2 不同参考点电位与电压

参考点	V、U	V _a	V _b	V _c	V _d	V _e	V _f	U _{ac}	U _{ce}	U _{ef}	U _{fd}	U _{dc}	U _{bc}	U _{ab}
B 节点	计算值													
	测量值													
	相对误差													
F 节点	计算值													
	测量值													
	相对误差													

七、实验报告要求

- 1、计算表 4.2 中所列各值，总结出有关参考点与各电压间的关系。
- 2、根据实验数据，绘制电位图形。
- 3、回答实验思考题。
- 4、实验心得体会及其他。

八、实验思考题

- 1、测量电压、电流时，如何判断数据前的正负号？负号的意义是什么？
- 2、电位出现负值，其意义是什么？
- 3、电路中同时需要±12V 电源供电，现有两台 0~30V 可调稳压电源，问怎样连接才能实现其要求？试画出电路图。
- 4、若 I_{ac} 或 I_{ec} 与图 4.1 中所标方向相反，测量时能否断定？其含义如何？

实验五 基尔霍夫定律的验证

一、实验目的

- 1、验证基尔霍夫电流定律（KCL）和电压定律（KVL）。
- 2、学会测定电路的开路电压与短路电流；加深对电路参考方向的理解。

二、实验内容

计算并验证基尔霍夫定理。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	基尔霍夫定律实验电路		1	DLM11
2	可调直流稳压电源	0~5V	1	实验箱
3	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
4	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
5	直流数字电流表		1	实验箱或万用表
6	万用表	MF-30 或其他	1	

四、实验原理

基尔霍夫定律是电路理论中最基本也是最重要的定律之一，它概括了集总电路中电流和电压分别应遵循的基本规律。

基尔霍夫电流定律（KCL）：在集总电路中，任何时刻，对于任一节点，所有支路的电流代数和恒等于零，即 $\sum i = 0$ 。

基尔霍夫电压定律（KVL）：在集总电路中，任何时刻，沿任一回路，所有支路的电压代数和恒等于零，即 $\sum u = 0$ 。

电路中各个支路的电流和支路的电压必然受到两类约束，一类是元件本身造成的约束，另一类是元件相互连接关系造成的约束，基尔霍夫定律表述的是第二类约束。

参考方向：在电路理论中，参考方向是一个重要的概念，它具有重要的意义。电路中，我们往往不知道某一个元件两端电压的真实极性或流过电流的真实流向，只有预先假定一个方向，这个方向就是参考方向。在测量或计算中，如果得出某个元件两端电压的极性或电流的流向与参考方向相同，则把该电压值或电流值取为正值。否则把该电压或电流取为负值，以表示电压的极性或电流的流向与参考方向相反。

五、实验注意事项

- 1、验证 KCL、KVL 时，电流源的电流及电压源两端电压都要进行测量，实验中给定的已知量仅作参考。
- 2、防止电源两端碰线短路。
- 3、使用电流测试线时，将电流插头的红接线端接电流表“+”，电流插头的黑接线端接电

流表“-”。

4、使用数字直流电压表测量电压时，红笔端接入被测电压参考方向的正（+）端，黑表笔插入被测电压参考方向的负（-）端，若显示正值，则表明电压参考方向与实际方向一致；若显示负值，表明电压参考方向与实际方向相反。

5、若用指针式电流表进行测量时，要识别电流插头所接电流表的“+”、“-”极性。倘若不换接极性，则电表指针可能反偏（电流为负值时），此时必须调换电流表的极性，重新测量，此时指针正偏，但读得的电流值必须冠以负号。

六、实验内容与步骤

1、实验前先任意设定三条支路的电流参考方向，如图 5.1 中的 I_{ac} 、 I_{cd} 、 I_{ec} 所示。

2、分别将两路直流稳压电源接入电路，令 $U_{S1}=5V$ ， $U_{S2}=10V$ 。

3、将电流插头分别插入三条支路的三个电流插座中，将电流插头的红接线端接电流表“+”，电流插头的黑接线端接电流表“-”。选择合适的电流表档位，记录电流值。

4、用直流数字电压表分别测量两路电源输出电压及电阻元件上的电压值，记录之。

将测得的各电流、电压值分别代入 $\Sigma i=0$ 和 $\Sigma u=0$ ，计算并验证基尔霍夫定律，作出必要的误差分析。

表 5.1 基尔霍夫定理实验数据

被测量	$I_{ac}(mA)$	$I_{ec}(mA)$	$I_{cd}(mA)$	U_{S1}	U_{S2}	U_{ac}	U_{ec}	U_{cd}	U_{bd}	U_{df}
计算值										
测量值										
相对误差										

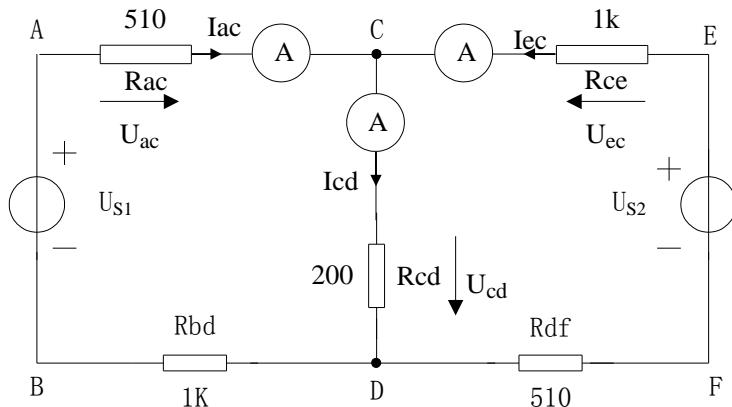


图 5.1 基尔霍夫定理的验证

七、实验报告要求

1、根据实验数据，选定实验电路中的任一个节点，验证 KCL 的正确性。

2、根据实验数据，选定实验电路中的任一个闭合回路，验证 KVL 的正确性。

3、回答思考题 2。

八、实验思考题

1、根据图 5.1 的电路参数，计算出待测电流 I_{ac} 、 I_{ec} 、 I_{cd} 和各电阻上的电压值，记入表中，以便测量时，可正确选择毫安表和电压表的量程。

2、实验中，若用指针式万用表直流毫安档测各支路电流，什么情况下可能出现毫安表指针反偏，应如何处理，在记录数据时应注意什么？若用直流数字毫安表进行时，则会有什么显示呢？

实验六 叠加原理

一、实验目的

- 1、验证线性电路叠加原理的正确性。
- 2、通过实验加深对叠加原理的内容和适用范围的理解。
- 3、学会分析测试误差的方法。

二、实验内容。

- 1、分别令 US1 电源单独作用，US2 电源单独作用，US1 和 US2 共同作用，2US2 单独作用，验证线性电路叠加原理。
- 2、将电阻换成二极管，验证非线性电路不满足叠加原理。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	叠加原理实验电路		1	DLM11
2	可调直流稳压电源	0~5V	1	实验箱
3	可调直流稳压电源	0~12V	2	实验箱
4	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
5	直流数字电流表		1	实验箱或万用表

四、实验原理

叠加原理是分析线性电路时非常有用的网络定理，它反映了线性电路的一个重要规律。

叠加原理：在含有多个独立电源的线性电路中，任意支路的电流或电压等于各个独立电源分别单独激励时，在该支路所产生的电流或电压的代数和。电路中某一电源单独激励时，其余不激励的理想电压源用短路线来代替，不激励的电流源用开路线来代替。

含有受控源的电路应用叠加原理时，在各独立电源单独激励的过程中，一定要保留所有的受控源。

线性电路的齐次性是指当激励信号（某独立源的值）增加或减小 K 倍时，电路的响应（即在电路其他各电阻元件上所建立的电流或电压值）也将增加或减小 K 倍。

叠加原理只适用于线性电路，即使在线性电路中，因为功率与电压、电流不是线性关系，所以计算功率时不能应用叠加原理。

五、实验注意事项

- 1、调节可调电源时，尽量需接入实验电路后再调整，防止负载对电源输出的影响。
- 2、用电流插头测量各支路电流时，应注意仪表的极性，及数据表格中“+”、“-”号的记录。
- 3、注意仪表量程的及时更换。

六、实验内容与步骤

1、按图 6.1 电路接线，取 $U_{S1}=10V$, $U_{S2}=5V$ 。

2、令 U_{S1} 电源单独作用，(将开关 $Sw1$ 投向断路侧，开关 $Sw4$ 投向短路侧)，用直流数字电压表和毫安表（使用电流插头）测量各支路电流及各电阻元件两端电压。将数据记入表格 6.1 中。

表 6.1 线性电路测量数据

测量项目	U_{S1}	U_{S2}	$I_{ac}(mA)$	$I_{ec}(mA)$	$I_{cd}(mA)$	U_{ac}	U_{ec}	U_{cd}	U_{bd}	U_{df}
U_{S1} 单独作用										
U_{S2} 单独作用										
U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用										
$2U_{S2}$ 单独作用										

3、令 U_{S2} 电源单独作用 (将开关 $Sw4$ 投向断路侧，开关 $Sw1$ 投向短路侧)，用直流数字电压表和毫安表（使用电流插头）测量各支路及各电阻元件两端电压。

4、令 U_{S1} 和 U_{S2} 共同作用 (将开关 $Sw1$ 和 $Sw4$ 分别投向断路侧)，重复实验步骤 2。

5、将 U_{S2} 调至 $10V$ ，即 $2U_{S2}$ 电源单独作用 (将开关 $Sw4$ 投向断路侧，开关 $Sw1$ 投向短路侧)，重复上述实验步骤 3。

6、将图 6.1 所示电路中的 $Sw6$ 分别投向二极管 1N4007，其余同上述实验步骤，验证非线性电路不满足叠加原理。将数据记入表格 6.2 中。

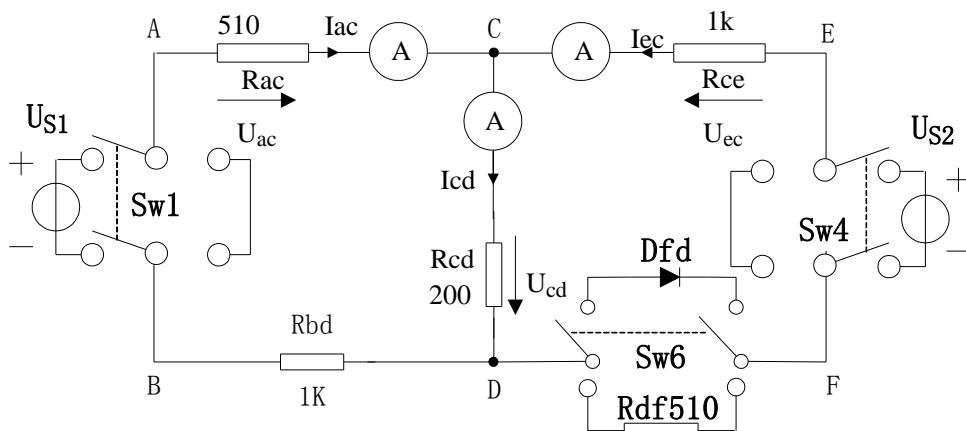


图 6.1 叠加原理实验电路

表 6.2 非线性电路测量数据

测量项目	U_{S1}	U_{S2}	$I_{ac}(mA)$	$I_{ec}(mA)$	$I_{cd}(mA)$	U_{ac}	U_{ec}	U_{cd}	U_{bd}	U_{df}
U_{S1} 单独作用										
U_{S2} 单独作用										
U_{S1} 、 U_{S2} 共同作用										
$2U_{S2}$ 单独作用										

七、实验报告要求

- 1、根据实验数据验证线性电路的叠加性与齐次性。
- 2、将理论值与实测值相比较，分析误差产生的原因。
- 3、回答思考题 1。

八、实验思考题

- 1、用电流实测值及电阻标称值计算 R_{ac} 、 R_{ce} 、 R_{cd} 上消耗的功率，以实例说明功率能否叠加？
- 2、用实验方法验证叠加原理时，如果电源内阻不允许忽略，实验如何进行？

实验七 互易定理

一、实验目的

- 1、验证互易定理。
- 2、通过实验加深对互易定理的内容和适用范围的理解。
- 3、学会分析测试误差的方法。

二、实验内容

1、当一电压源作用于互易网络的 1、1' 端时，在 2、2' 端上引起的短路电流 I_2 等于同一电压源作用于 2、2' 端时，在 1、1' 端上引起的短路电流 $I_{1'}$ ，即 $I_2=I_{1'}$ 。测量互易网络（1）中图（a）、（b）两电路各支路电流值，验证互易定理（1）。

2、当一电流源 I_s 接入 1、1' 端，在 2、2' 端引起开路电压 U_2 ，等同于将此电流源移到 2、2' 端，在 1、1' 端引起的开路电压 $U_{1'}$ ，即 $U_2=U_{1'}$ 。测量互易网络（2）中图（a）、（b）两电路中端口电压值，验证互易定理（2）。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	互易定理实验电路		1	DLM11
2	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
3	可调直流恒流源	0~200mA	1	实验箱
4	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
5	直流数字电流表		1	实验箱或万用表

四、实验原理

互易定理是不含受控源的线性网络的主要特征之一。如果把一个由线性电阻、电容和电感（包括互感）元件构成的二端口网络称为互易网络，则互易定理可以叙述为：

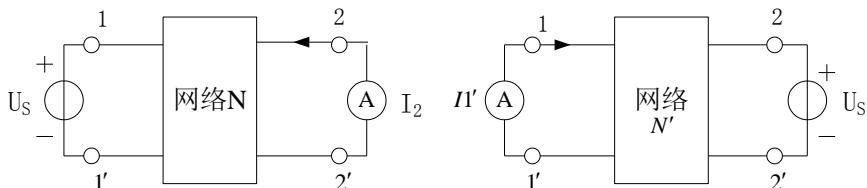


图 7.1 互易网络（1）

1、当一电压源作用于互易网络的 1、1' 端时，在 2、2' 端上引起的短路电流 I_2 等于同一电压源作用于该互易网络的 2、2' 端时，在 1、1' 端上引起的短路电流 $I_{1'}$ 。如图 7.1 所示，即 $I_2=I_{1'}$ 。

2、当一电流源 I_s 接入 1、1' 端，在 2、2' 端引起开路电压 U_2 等于将此电流源移到 2、2' 端，在 1、1' 端引起的开路电压 U_1' ，如图 7.2 所示，即 $U_2=U_1'$ 。

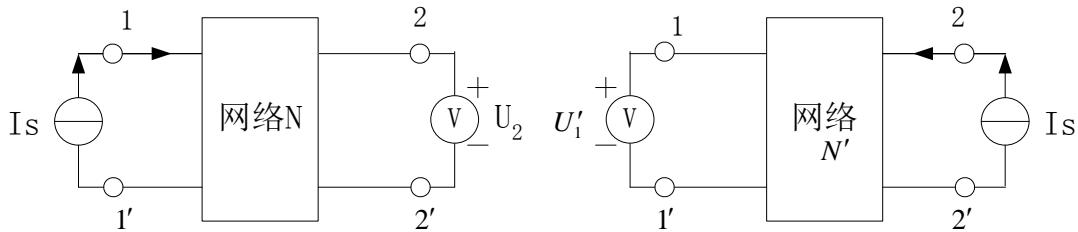
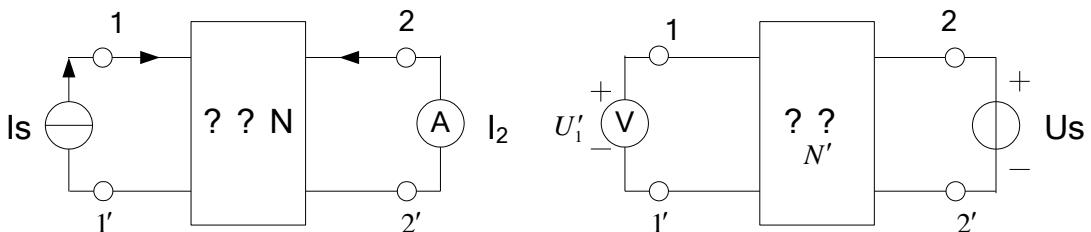


图 7.2 互易网络 (2)

3、当一电流源 I_S 接入 1、1' 端，在 2、2' 端引起短路电流 I_2 ，然后在 2、2' 端接入电压源 U_S ，在 1、1' 端引起开路电压 U_1' ，如图 7.3 所示，如果 I_S 和 U_S 在任何时间都相等（指波形相同，数值相等），则有 $I_2/A=U_1'/V$ 。

图 7.3 互易网络 (3)



五、实验注意事项

- 1、测量时注意仪表量程之间的转换，切不可用电流表去测量电压。
- 2、改接线路时要关掉电源。
- 3、用电流插头测量各支路电流时，应注意仪表的极性，及数据表格中“+”、“-”号的记录。

六、实验内容与步骤

1、验证互易定理 (1)

实验线路如图 7.4 所示， $U_S=10V$ 。测量图 (a)、(b) 两电路各支路电流值，并填入表 7.1 中。

表 7.1 验证互易定理 (1) 的实验数据

电路 a	I_{ac}	I_{ec}	电路 b	I_{ac}'	I_{ec}'

2、验证互易定理 (2)

实验线路如图 7.5 所示，输入电流 $I_s=10mA$ ，测量(a)(b)两电路中端口电压值，并填入表 7.2 中。

表 7.2 验证互易定理 (2) 的实验数据

电路 a	I_S	U_1	电路 b	U_1'	I_S

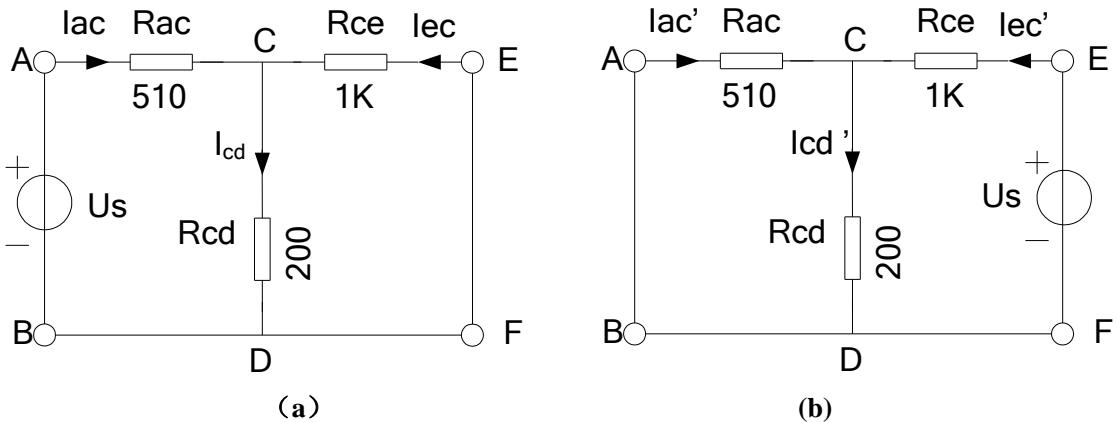


图 7.4 验证互易定理 (1) 实验电路

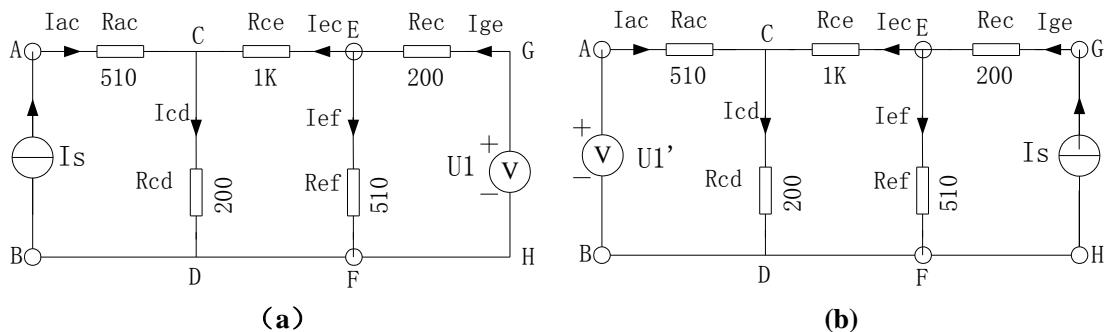


图 7.5 验证互易定理 (2) 实验电路

七、实验报告要求

- 指出表 7.1 中哪两个电流互易，表 7.2 中哪两个电压互易，验证互易定理。
- 将理论值与实测值相比较，分析误差产生的原因。
- 回答思考题。

八、实验思考题

- 一个由电阻器、耦合电感器和变压器所组成的二端口网络是否是互易网络？
- 设计一个验证互易定理 (3) 的实验电路，并验证互易定理 (3)。

实验八 戴维南定理与诺顿定理

一、实验目的

- 1、通过验证戴维南定理与诺顿定理，加深对等效概念的理解。
- 2、学习测量有源二端网络的开路电压和等效电阻的方法。

二、实验内容

- 1、测量开路电压 U_{oc} ；测量短路电流 I_{sc} 和等效电阻 R_0 。
- 2、测量有源二端网络的外特性。
- 3、测量等效电压源的外特性；测量等效电流源的外特性。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	戴维南定理实验电路		1	DLM12
2	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
3	可调直流恒流源	0~200mA	1	实验箱
4	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
5	直流数字电流表		1	实验箱或万用表
6	万用表	MF-30 或其他	1	
7	可调电阻	0~10KΩ	1	实验箱

四、实验原理

1、戴维南定理

任何一个线性有源二端网络（或称单口网络），对外电路来说，总可以用一个理想电压源和电阻相串联的有源支路代替，其理想电压源的电压等于原网络端口的开路电压 U_{OC} ，其内阻等于原网络中所有独立电源为零值时入端等效电阻 R_0 。

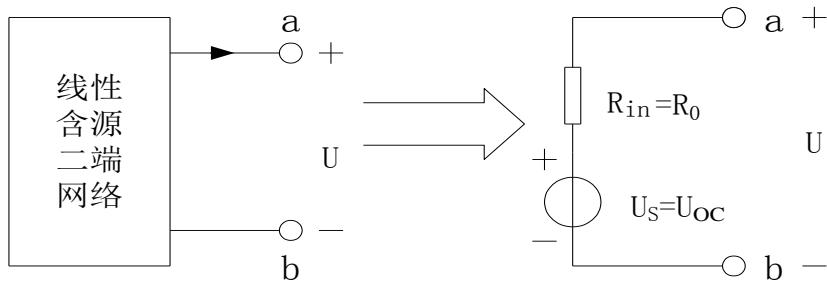


图 8.1 戴维南等效电路

2、诺顿定理

诺顿定理是戴维南定理的对偶形式，它指出任何一个线性有源二端网络，对外电路而言，总可以用一个理想电流源和电导并联的有源支路来代替，其电流源的电流等于原网络端口的短路电流 I_{SC} ，其电导等于原网络中所有独立电源为零时的入端等效电导 G_0 。

应用戴维南定理和诺顿定理时，被变换的二端网络必须是线性的，可以包含独立电源或

受控电源，但是与外部电路之间除直接相联系外，不允许存在任何耦合。

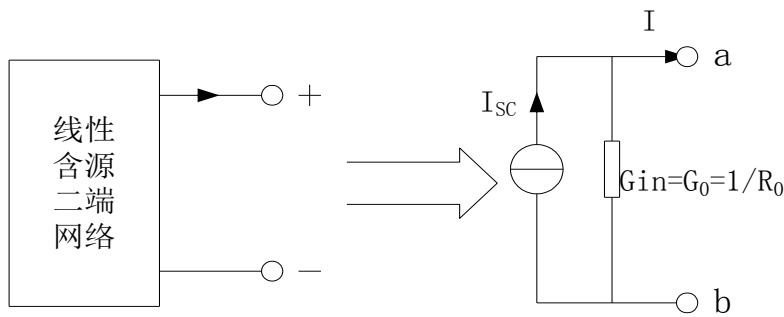


图 8.2 诺顿定理

3、开路电压 U_{OC} 的测量

方法一：直接测量法

当有源二端网络的等效电阻 R_0 远小于电压表内阻 R_V 时，可直接用电压表测量有源二端网络的开路电压，如图 8.3(a)所示。一般电压表内阻并不是很大，最好选用数字电压表，数字电压表的突出特点就是灵敏度高、输入电阻大。通常其输入电阻在 $10M$ 欧姆以上，有的高达数百兆欧姆，对被测电路影响很小，从工程角度来说，用其所得的电压即是有源二端网络的开路电压。

方法二：零示法

在测量具有高内阻含源二端网络的开路电压时，用电压表进行直接测量会造成较大的误差，为了消除电压表内阻的影响，往往采用零示法，如图 8.3(b)所示。

零示法测量原理是用一低内阻的稳压电源与被测有源二端网络进行比较，当稳压电源的输出电压 E_S 与有源二端网络的开路电压 U_{OC} 相等时，电压表的读数将为零，然后将电路断开，测量此时稳压源的输出电压，即为被测有源二端网络的开路电压。

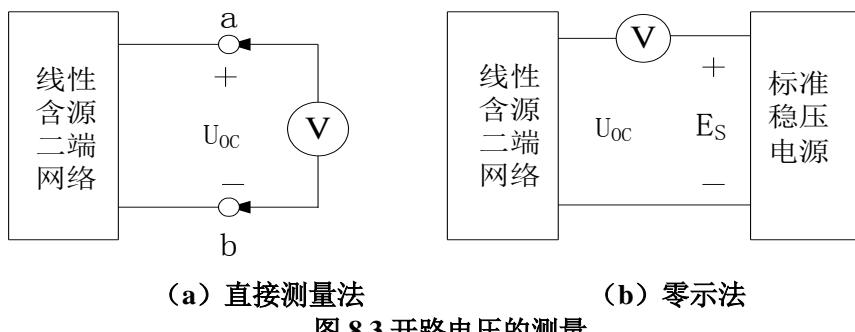


图 8.3 开路电压的测量

4、等效电阻 R_0 的测量

方法一：直接测量法

用数字万用表的电阻档直接测量，测量时首先让有源二端网络中所有独立电源为零，即理想电压源用短路线来代替，理想电流源用开路线代替。这时电路变为无源二端网络，用万用表欧姆档直接测量 a,b 间的电阻即可。

方法二：加压求流法

让有源二端网络中所有独立电源为零，在 a,b 端施加一已知直流电压 U 测量流入二端网络的电流 I，则等效电阻 $R_0 = U/I$ ，以上两种方法适用于电压源内阻很小和电流源内阻很大的场合。

方法三：直线延长法

当有源二端网络不允许短路时，先测开路电压 U_{OC} ，然后测出有源二端网络的负载电阻的电压和电流。在电压，电流坐标系中标出 $(U_{OC}, 0)$ 、 (U_1, I_1) 两点，过两点作直线，与

$$\text{横轴交点为 } (0, ISC), \text{ 则 } ISC = \frac{U_{OC}}{U_{OC} - U_1} I_1, \text{ 所以 } R_0 = \frac{U_{OC} - U_1}{I_1}.$$

方法四：两次求压法

测量时先测量一次有源二端网络的开路电压 U_{OC} ，然后在 a,b 端接入一个已知电阻 RL ，再测出电阻 RL 两端的电压 U_L ，则等效电阻 $R_0 = (\frac{U_{OC}}{U_L} - 1) \times RL$ 。

显见，以上两种测求方法与有源二端网络的内部结构无关，或者说对网络内电路结构可以不去考虑，这正是戴维南定理和诺顿定理在电路分析与实验测试技术中得到广泛应用的原因所在。

五、实验注意事项

- 1、测量时，注意仪表量程的更换。切不可用电流表测量电压，以防烧毁电流表。
- 2、实验步骤 7 中，电源置零时，不可将直流稳压源直接短接。
- 3、用万用表直接测 R_0 时，网络内的独立源必须先置零，以免烧坏万用表，其次欧姆档必须调零后再进行测量。

六、实验内容与步骤

1、利用戴维南定理估算开路电压 $U_{OC'}$ ，等效电阻 R_0' ，短路电流 $I_{SC'}$

按图 8.4 的实验电路接线，设 $U_s=12V$, $I_s=10mA$ ，利用戴维南定理估算开路电压 $U_{OC'}$ ，等效电阻 R_0' ，短路电流 $I_{SC'}$ ，将计算值填入表 8.1 中。对使用仪表测量各量时，合理选择量程做到心中有数。

表 8.1 实验数据表

$U_{OC'}$	R_0'	$I_{SC'}$

2、测量开路电压 U_{OC}

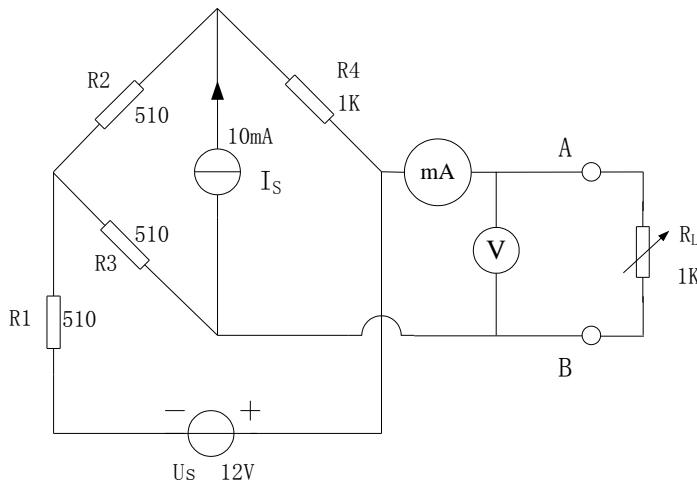


图 8.4 戴维南定理实验电路

将开关 S 投向可变电阻箱一侧，负载开路，用电压表测量 A、B 之间的电压，即为开路电压 U_{oc} ，填入表 8.2 中。

3、测量短路电流 I_{sc} 和等效电阻 R_0

将开关 S 投向短路侧，测量短路电流 I_{sc} ，利用 $R_0 = U_{oc}/I_{sc}$ ，可得等效电阻 R_0 ，填入表 8.2 中。

表 8.2 实验数据表

$U_{oc}(V)$	$I_{sc}(mA)$	$R_0(\Omega)$	
		$U_{oc}/I_{sc} (\Omega)$	实测值

4、测量有源二端网络的外特性

将可变电阻 RL （可调电阻）接入电路 A、B 之间，将开关 S 投向可变电阻箱一侧，测量有源二端网络的外特性，按表 8.3 中所列电阻调 RL ，记录电压表、电流表读数，填入表 8.3 中。

表 8.3 有源二端网络外特性测量数据

$R_L (\Omega)$	0	70	200	300	450	1000
$U (V)$						
$I (mA)$						

5、测量等效电压源的外特性

实验线路如图 8.5 所示，首先将直流稳压电源输出电压调为 $US=U_{oc}$ ，串入等效内阻 R_0 ，按步骤 4 测量之，将测量结果填入表 8.4 中。

表 8.4 等效电压源外特性测量数据

$R_L (\Omega)$	0	70	200	300	450	1000
$U (V)$						
$I (mA)$						

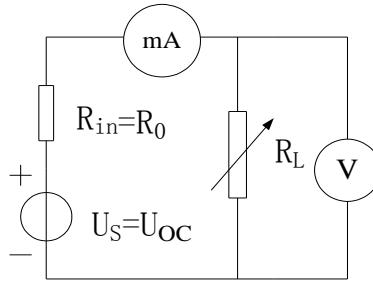


图 8.5 测量等效电压源的外特性

6、测量等效电流源的外特性

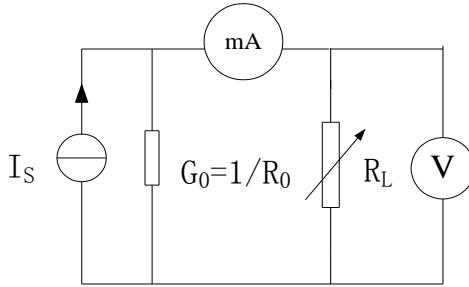


图 8.6 测量等效电流源外特性

实验线路如图 8.6 所示，首先将恒流源输出电流调为 $I_S=I_{SC}$ ，并联等效电导 $G_0=1/R_0$ ，按照步骤 4 测量之，将测量结果填入表 8.5 中。

表 8.5 等效电流源外特性测量数据

$R_L (\Omega)$	0	70	200	300	450	1000
$U (V)$						
$I (mA)$						

7、测定有源二端网络等效电阻（又称入端电阻）的其他方法

将被测有源二端网络内的所有独立源置零（将电流源 I_S 断开，去掉电压源，并在原电压源两端所接的两点用一根短路导线相连），然后用伏安法或直接用万用表的欧姆档去测 A、B 两点之间的电阻，此即为被测网络的等效内阻 R_0 或称为网络的入端电阻 R_i 。

七、实验报告要求

- 1、根据测量数据，在同一坐标系中绘制等效前后 U-I 曲线。
- 2、将理论值与实验所测数据相比较，分析误差产生的原因。
- 3、回答思考题。

八、实验思考题

- 1、在求有源二端网络等效电阻时，如何理解“原网络中所有独立电源为零值”？
- 2、若将稳压电源两端并入一个 3K 的电阻，对本实验的测量结果有无影响？为什么？
- 3、说明测有源二端网络开路电压及等效内阻的几种方法，并比较其优缺点。

实验九 电压源与电流源等效变换及最大功率传输定理

一、实验目的

- 1、掌握电流源和电压源进行等效变换的条件。
- 2、验证最大功率传输定理，掌握直流电路中功率匹配条件。

二、实验内容

- 1、测定理想电压源外特性；测定实际电压源外特性。
- 2、测定理想电流源外特性；测定实际电流源外特性。
- 3、测定电源等效变换条件。
- 4、验证最大功率传输定理。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	电压等效变换实验电路		1	DLM12
2	最大功率传输定理实验电路		1	DLM12
3	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
4	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
5	直流数字电流表		1	实验箱或万用表
6	可调电阻	10K	1	实验箱

四、实验原理

1、电源等效变换

一个实际的电源，就其外部特性而言，可以看成一个电压源，也可以看成是一个电流源。由于实际电压源存在一定的内电阻 R_S ，在正常（或称线性）工作区域内，随着输出电流的增加，输出电压大致按线性规律下降。当电流增大超过额定值后，电压可能会急剧下降直至为零，此时电压源工作在非正常区。在正常工作区域内，其端口特性方程 $U=U_S-R_S I$ ，可以等效为戴维南电路，如图 9.1 (a) 所示。

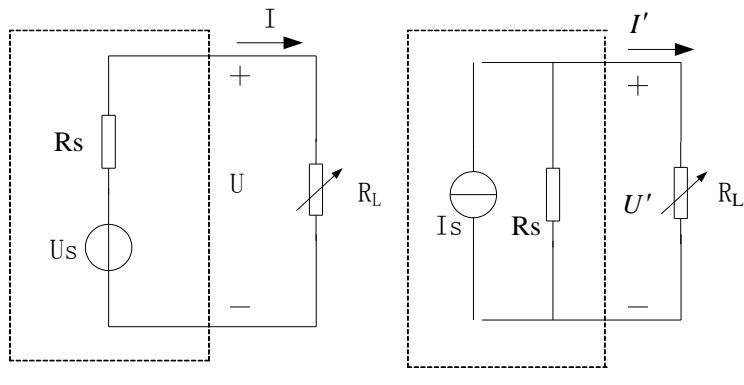


图 9.1 电源等效变换

同理，实际电流源存在一定的内电导 G_S ，在正常工作区域内，随着输出电压的增加，输出电流大致按线性规律下降。当电压增大超过额定值后，电流可能会急剧下降直至为零，此时电流源工作在非正常区。在正常工作区域内，其端口特征方程 $I=I_S-G_SU$ ，可以等效为诺顿电路，如图 9.1 (b) 所示。

设有一个电压源和一个电流源分别与相同的外电阻连接，只要满足以下关系： $I_S=U_S/R_S$ ， $R_S=1/G_S$ ，就有 $I=I'$ ， $U=U'$ ，由此可见，两种电源形式对于外电路是完全等效的，因此两种电压源可以互相替换而对外电路没有任何影响。利用电源等效变换条件，可以很方便地把一个串联内阻为 R_S 的电压源 U_S 变换成一个并联内阻为 R_S 的电流源 U_S/R_S ，反之，也可以很容易地把一个电流源变换成一个等效的电压源。

电压源和电流源对外电路而言，相互间是等效的；但对电源内部讲，是不等效的。但是理想电压源和理想电流源本身之间没有等效的关系。因为对理想电压源 ($R_S=0$) 讲，其短路电流 I_S 为无穷大，对理想电流源 ($R_0=\infty$) 讲，其开路电压 U_0 为无穷大，都不能得到有限的数值，故两者之间不存在等效变换的条件。

2、最大功率传输定理

一个实际电源或一个线性含源一端口网络，不管它内部具体电路如何，都可以等效化简为理想电压源 U_S 和一个电阻 R_S 的串联支路，如图 9.2 所示。当负载 R_L 与电源内阻 R_S 相

等时，负载 R_L 可获得最大功率，即 $P_{MAX}=I^2R_L=\frac{U_S^2R_L}{(R_S+R_L)^2}=\frac{U_S^2}{4R_S}$ ，电路的效率为

$$\eta = \frac{I^2 R_L}{I^2 (R_S + R_L)} \times 100\% = 50\% \quad .$$

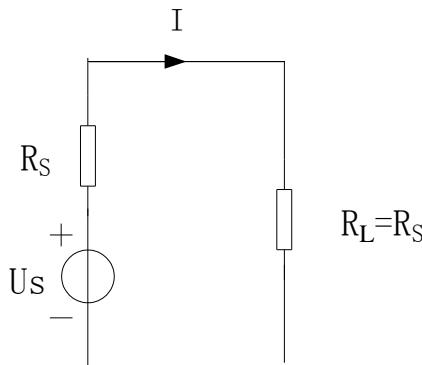


图 9.2 负载从给定电源获得功率电路

五、实验注意事项

1、在测试电压源外特性时，不要忘记测空载时的电压值；在改变负载时，不容许负载短路。测试电流源外特性时，不要忘记测短路时的电流值；在改变负载时，不容许负载开路。

2、换接线路时，必须先关闭电源开关。

3、直流仪表的接入应注意极性与量程。

六、实验内容与步骤

1、测定理想电压源、实际电压源外特性

按图 9.3 (a) 接线, U_s 为 12V 直流稳压电源, 视为理想电压源, R_L 为可调电阻, 调节 R_L 电阻值, 记录电压表和电流表读数, 填入表 9.1 中。按图 9.3 (b) 接线, 虚线框可模拟为一个实际的电压源, $U_s=12V$, $R_s=200\Omega$, $R_L=10K\Omega$, 调节 R_L 值, 记录两表读数。填入表 9.2 中。

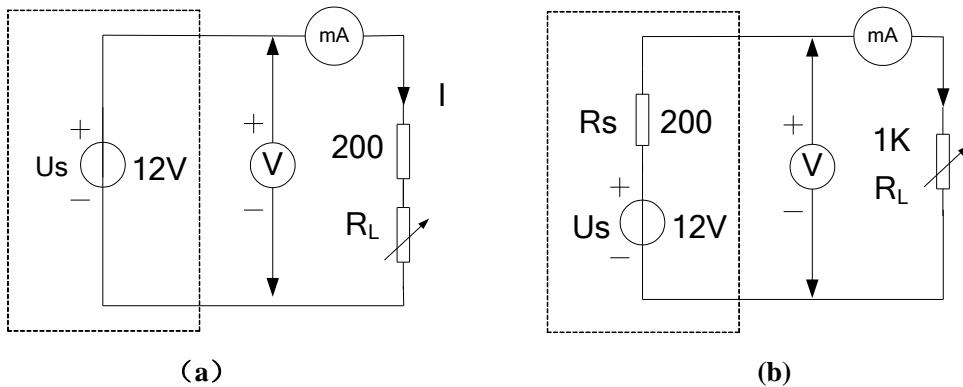


图 9.3 测定电压源的外特性

2、测定理想电流源、实际电流源外特性

按图 9.4 接线, I_s 为直流电流源, 视为理想电流源, 调节其输出为 $I_s=5mA$, $G_s=1/R_s$, 令 R_s 分别为 200Ω 和 ∞ , $R_L=1K\Omega$, 调节 R_L 值 (用电阻箱作为负载), 记录这两种情况下的电压表和电流表的读数。填入表 9.3 和表 9.4 中。

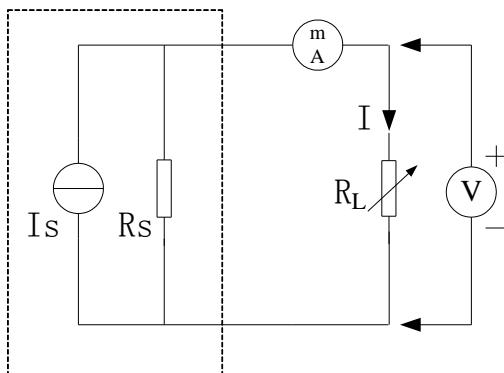


图 9.4 测定电流源的外特性

表 9.1 理想电压源外特性实验数据

$R_L (\Omega)$	200	300	400	500	800	1000	∞
$U (V)$							
$I (mA)$							

表 9.2 实际电压源外特性实验数据

$R_L (\Omega)$	200	300	400	500	800	1000	∞
$U (V)$							
$I (mA)$							

表 9.3 理想电流源外特性实验数据 ($R_s=\infty$)

$R_L (\Omega)$	0	200	400	500	600	800	1000
$U (V)$							
$I (mA)$							

表 9.4 实际电流源外特性实验数据 ($R_s=150\Omega$)

$R_L (\Omega)$	0	200	400	500	600	800	1000
$U (V)$							
$I (mA)$							

3、测定电源等效变换条件

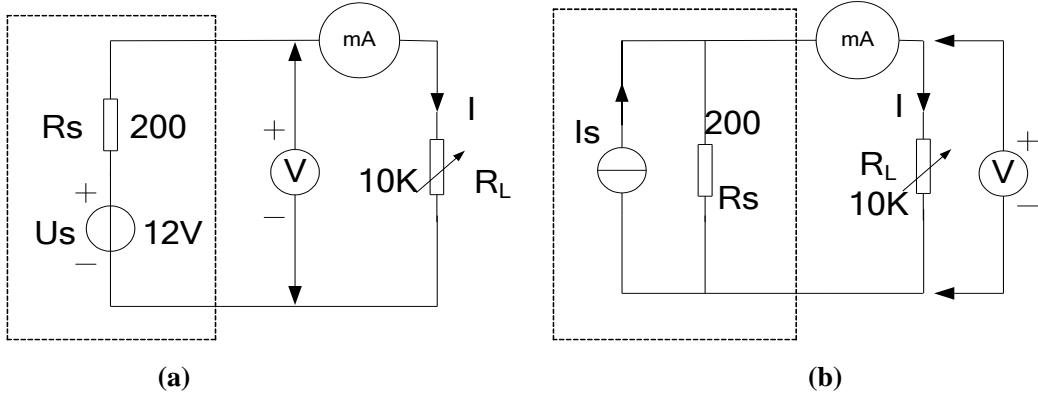


图 9.5 电源等效变换实验电路

按图 9.5 线路接线, (a)、(b)线路负载电阻 R_L 阻值相同, 首先读取 9.5 (a) 线路两表的读数, 然后调节 9.5 (b) 线路中恒流源 I_s , 令两表的读数与 9.5 (a) 的读数相等, 记录 I_s 之值。验证等效变换条件的正确性。

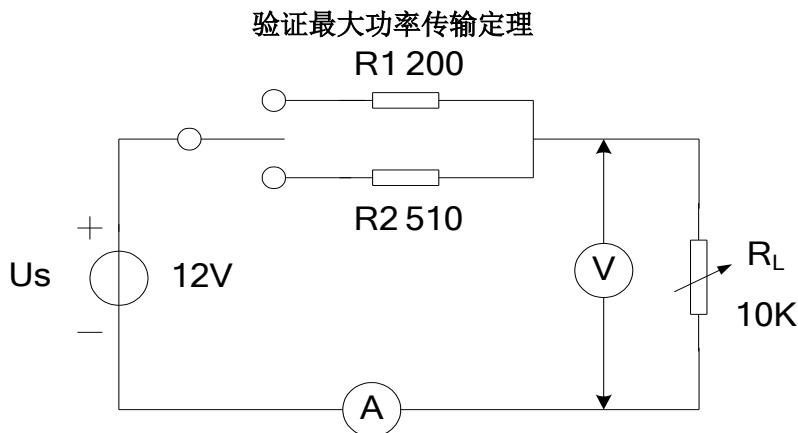


图 9.6 验证最大功率输出定理实验电路

实验电路如图 9.6 所示, 取 $R_1=200\Omega$, 调节电位器 R_L 值, 使得 $U_L=\frac{1}{2} U_s$, 记录电阻 R_L 、

电流 I 、电压 U_L , 计算电源功率 P ($P=U_s I$), 负载获得功率 P_1 ($P_1=I^2 R_L$) 填入表 9.5。

增大和减小 R_L 值, 记录电阻 R_L , 测量端口电压 U_L 、端口电流 I , 计算电源功率 P 值 ($P=U_s I$), 负载获得功率 P_1 ($P_1=I^2 R_L$), 填入表 9.5 中。

取 $R_2=510\Omega$, 按照上述步骤测量, 记录数据于表格 9.6 中。

表 9.5 验证最大功率传输定理数据（内阻取 $R_1=200\Omega$ ）

$R_L (\Omega)$									
测量值	I (mA)								
	U _L (V)								
计算值	P (W)								
	P ₁ (W)								

表 9.6 验证最大功率传输定理数据（内阻取 $R_2=470\Omega$ ）

$R_L (\Omega)$									
测量值	I (mA)								
	U _L (V)								
计算值	P (W)								
	P ₁ (W)								

七、实验报告要求

- 1、根据实验数据绘制出电源的四条外特性，并总结、归纳各电源的特性。
- 2、从实验结果，验证电源等效变换条件。
- 3、根据电路参数求出理论上得 P_{max} ，与实测值 P 进行比较，计算相对误差。
- 4、计算传输最大功率 P 时电路的效率。

八、实验思考题

- 1、分析理想电压源和实际电压源输出端发生短路情况时，对电源的影响。
- 2、电压源、电流源的外特性为什么呈下降趋势，理想电压源和理想电流源的输出在任何负载下是否保持恒值？
- 3、理想电流源和理想电压源之间能否等效变换？为什么？
- 4、实际电流源和实际电压源之间等效变换的条件是什么？

实验十 受控源特性研究

一、实验目的

- 1、测试受控源的外特性及其转移参数，加深对受控源的理解。
- 2、熟悉由运算放大器组成受控源电路的分析方法，了解运算放大器的应用。

二、实验内容

- 1、测量受控源 VCVS 的转移特性 $U_2=f(U_1)$ 及负载特性 $U_2=f(I_L)$ 。
- 2、测量受控源 VCCS 的转移特性 $I_L=f(U_1)$ 及负载特性 $I_L=f(U_2)$ 。
- 3、测量受控源 CCVS 的转移特性 $U_2=f(I_1)$ 及负载特性 $U_2=f(I_L)$ 。
- 4、测量受控源 CCCS 的转移特性 $I_L=f(I_1)$ 及负载特性 $I_L=f(U_2)$ 。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	受控源实验电路		1	DLM61
2	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
3	可调直流恒流源	0~200mA	1	实验箱
4	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
5	直流数字电流表		1	实验箱或万用表
6	可调电阻	10K	1	实验箱

四、实验原理

1、电源有独立电源（如电池、发电机等）与非独立电源（受控源）之分。独立源与受控源的区别：独立源的电势或电流是某一个固定的值或是某一时间的函数，它不与电路的其余部分的状态有关，是独立的；而受控源的电势或电流的值是电路的另一支路电压或电流的函数，是非独立的。

2、受控源是双口元件，一个为控制端口，另一个为受控端口。受控端口的电流或电压受到控制端口的电流或电压的控制。根据控制变量与受控变量的不同组合，受控源可以分为四类：电压控制电压源（VCVS），其特性为 $U_2=\mu U_1, I_1=0$ ；电压控制电流源（VCCS），其特性为 $I_S=gmU_1, I_1=0$ ；电流控制电压源（CCVS），其特性为 $U_2=rmI_1, U_1=0$ ；电流控制电流源（CCCS），其特性为 $I_2=\alpha I_1, U_1=0$ 。

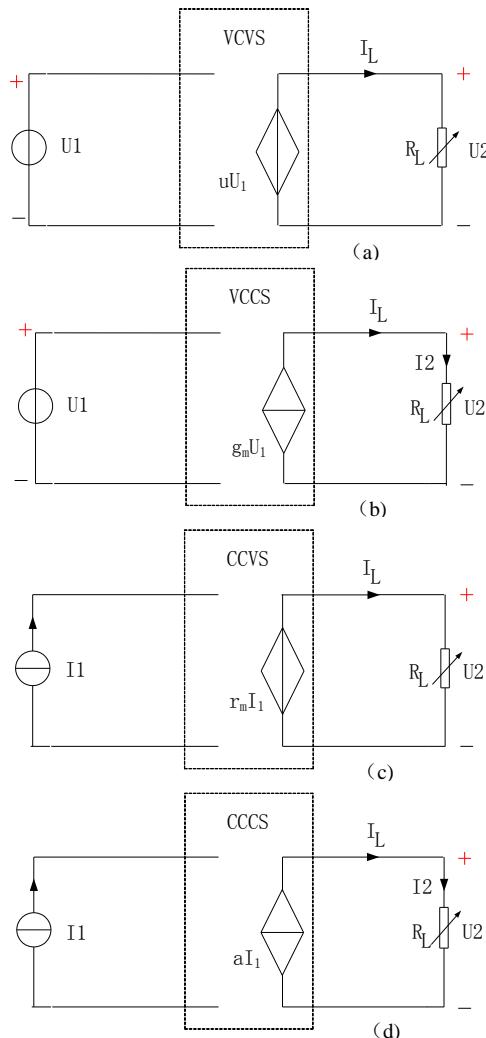


图 10.1 受控源电路符号

3、用运算放大器与电阻元件组成不同的电路，可以实现上述四种类型的受控源。受控源的电压或电流受电路中其他电压或电流的控制，当这些控制电压或电流为零时，受控源的电压或电流也为零。因此，它反映的是电路中某处的电压或电流能控制另一处的电压或电流这一现象，它本身不直接起激励作用。

4、运算放大器的“+”端和“-”端之间等电位，通常称为“虚短”。运算放大器的输入端电流等于零，通常称为“虚断”。运算放大器的理想电路模型为一受控源，在它的外部接入不同的电路元件，可以实现信号的模拟运算或模拟变换。放大器电路的输入与输出有公共接地端，这种连接方式称为共地连接。电路的输入、输出无公共接地点，这种接地方式称为浮地连接。

5、用运放构成四种类型基本受控源的线路原理分析。

(1) 电压控制电压源 (VCVS) (电路如图 10.2 所示)

由于运放的虚短路特性，有 $U_p = U_n = U_1$ ，故 $i_2 = \frac{U_n}{R_2} = \frac{U_1}{R_2}$ ，又因为 $i_1 = i_2$

$$\text{所以 } U_2 = i_1 R_1 + i_2 R_2 = i_2 (R_1 + R_2) = \frac{U_1}{R_2} (R_1 + R_2) = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) U_1$$

即运放的输出电压 U_2 只受输入电压的控制, 与负载 R_L 大小无关, 电路模型如图 10.1(a) 所示。

$$\text{转移电压比 } \mu = \frac{U_2}{U_1} = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

μ 为无量纲, 又称为电压放大系数。

这里的输入输出有公共接地点, 这种联接方式称为共地联接。

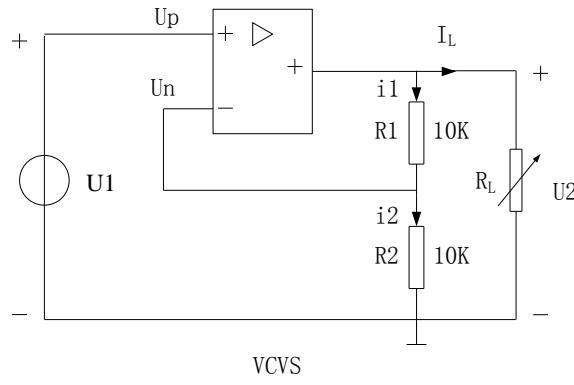


图 10.2 电压控制电压源

(2) 电压控制电流源 (VCCS) 将图 10.2 的 R_1 看成一个负载电阻 R_L , 如图 10.3 所示, 即成为电压控制电流源。

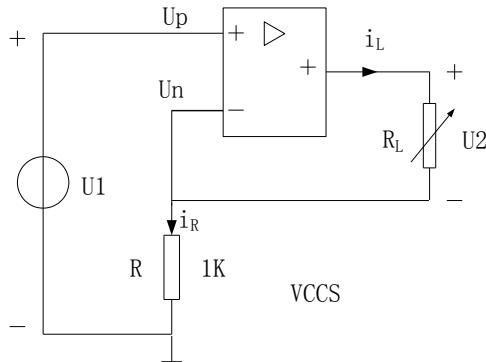


图 10.3 电压控制电流源

$$\text{运算放大器的输出的电流 } i_L = i_R = \frac{U_n}{R} = \frac{U_1}{R}$$

即运放的输出电流 i_L 只受输入电压 U_1 的控制, 与负载 R_L 大小无关。电路模型如图 10.1 (b) 所示。

$$\text{转移电导 } g_m = \frac{i_L}{U_1} = 1/R$$

这里的输入、输出无公共接地点，这种联接方式称为浮地联接。

(3) 电流控制电压源（电路如图 10.4 所示）

由于运放的“+”端接地，所以 $U_p=0$ ，“-”端电压 U_n 也为零，此时运放的“-”端称为虚地点。显然，流过电阻 R 的电流 i_1 就等于网络的输入电流 I_S 。

此时运放的输出电压 $U_2 = -i_1 R = -I_S R$ ，即输出电压 U_2 只受输入电流 I_S 的控制，与负载 R_L 大小无关，电路模型如图 10.1 (c) 所示。

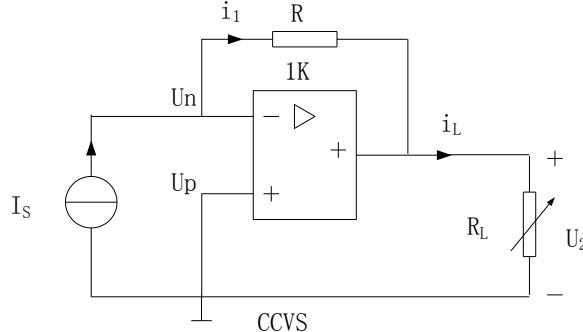


图 10.4 电流控制电压源

$$\text{转移电阻 } r_m = \frac{U_2}{I_S} = -R$$

(4) 电流控制电流源（电路如图 10.5 所示）

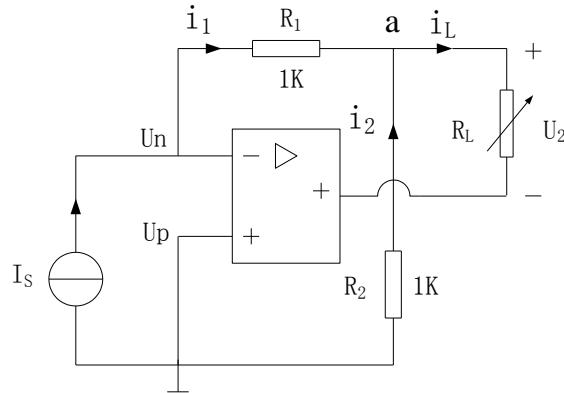


图 10.5 电流控制电流源

$$U_a = -i_2 R_2 = -i_1 R_1$$

$$I_L = i_1 + i_2 = i_1 + \frac{R_1}{R_2} i_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) i_1 = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) I_S$$

即输出电流只受输入电流 I_S 的控制，与负载 R_L 大小无关。电路模型如图 10.1 (d) 所示。

转移电流比 $\alpha = \frac{i_L}{I_S} = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right)$ α 为无量纲，又称电流放大系数。此电路为浮地联接。

五、实验注意事项

- 1、实验中，注意运放的输出端不能与地短接，输入电压不宜过高（小于 5V），不得超过 10V。输入电流不能过大，应在几十微安至几毫安之间。
- 2、在用恒流源供电的实验中，不要使恒流源负载开路。
- 3、运算放大器应有电源供电（±15V 或者 ±12V），其正负极性和管脚不能接错。

六、实验内容与步骤

1、测量受控源 VCVS 的转移特性 $U_2=f(U_1)$ 及负载特性 $U_2=f(I_L)$

实验线路如图 10.6 所示，U1 为可调直流稳压电源，RL 为实验箱上的可调电阻。运算放大器应有电源供电（±15V 或者 ±12V），其正负极性和管脚不能接错。实验前，将实验模块插入实验基板，若实验基板不带供电插座，需将固定直流电源部分的 ±12V、GND 接入模块上方的 VCC、VEE、GND 插座。

(1) 固定 $R_L=2K\Omega$ ，调节直流稳压电源输出电压 U_1 ，使其在 0~6V 范围内取值，测量 U_1 及相应的 U_2 值，绘制 $U_2=f(U_1)$ 曲线，并由其线性部分求出转移电压比 u 。将测得的数据填入表 10.1 中。

表 10.1

测量值	U_1 (V)	
	U_2 (V)	
实验计算值	u	
理论计算值	u	

(2) 保持 $U_1=2V$ ，令 R_L 阻值从 $1K\Omega$ 增至 ∞ ，测量 U_2 及 I_L ，绘制 $U_2=f(I_L)$ 曲线。将测得的数据填入表 10.2 中。

表 10.2

$R_L(K\Omega)$	
$U_2(V)$	
$I_L(mA)$	

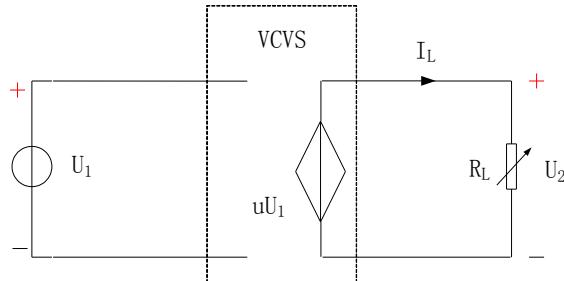


图 10.6 VCVS

2、测量受控源 VCCS 的转移特性 $I_L=f(U_1)$ 及负载特性 $I_L=f(U_2)$

实验线路如图 10.7 所示。

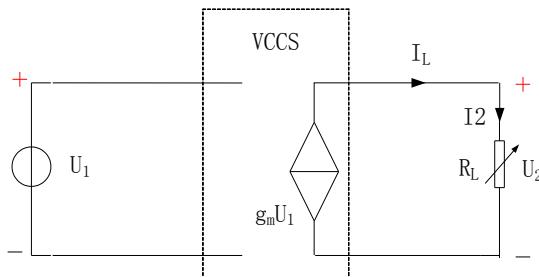


图 10.7 VCCS

(1) 固定 $R_L=2\text{K}\Omega$, 调节直流稳压源输出电压 U_1 , 使其在 $0\sim 5\text{V}$ 范围内取值。测量 U_1 及相应的 I_L , 绘制 $I_L=f(U_1)$ 曲线, 并由其线性部分求出转移电导 g_m 。将测得的数据填入表 10.3 中。

表 10.3

测量值	$U_1 (\text{V})$	
	$I_L (\text{mA})$	
实验计算值	$g_m(\text{S})$	
理论计算值	$g_m(\text{S})$	

(2) 保持 $U_1=2\text{V}$, 令 R_L 从 0 增至 $3\text{K}\Omega$, 测量相应的 I_L 及 U_2 , 绘制 $I_L=f(U_2)$ 曲线。将测得的数据填入表 10.4 中。

表 10.4

$R_L (\text{K}\Omega)$	
$I_L (\text{mA})$	
$U_2(\text{V})$	

3、测量受控源 CCVS 的转移特性 $U_2=f(I_1)$ 及负载特性 $U_2=f(I_L)$

实验线路如图 10.8 所示。 I_1 为可调直流恒流源, R_L 为可调电阻。

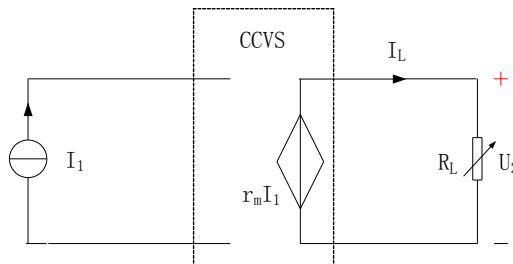


图 10.8 CCVS

(1) 固定 $R_L=2\text{K}$, 调节直流恒流源输出电流 I_1 , 使其在 $0\sim 0.8\text{mA}$ 范围内取值, 测量 I_1 及相应的 U_2 值, 绘制 $U_2=f(I_1)$ 曲线, 并由其线性部分求出转移电阻 r_m 。将测得的数据填入表 10.5 中。

表 10.5

测量值	$I_1(\text{mA})$	
	$U_2(\text{V})$	
实验计算值	$r_m(\text{K}\Omega)$	

理论计算值	$r_m(K\Omega)$	
-------	----------------	--

(2) 保持 $I_1=0.3mA$, 令 R_L 从 $1K\Omega$ 增至 ∞ , 测量 U_2 及相应 I_L 值, 绘制 U_2 及 I_L 值, 绘制负载特性曲线 $U_2=f(I_L)$ 。将测得的数据填入表 10.6 中。

表 10.6

$R_L (K\Omega)$	
$U_2 (V)$	
$I_L (mA)$	

4、测量受控源 CCCS 的转移特性 $I_L=f(I_1)$ 及负载特性 $I_L=f(U_2)$

实验线路如图 10.9 所示。 I_1 为可调直流恒流源, R_L 为可调电阻。

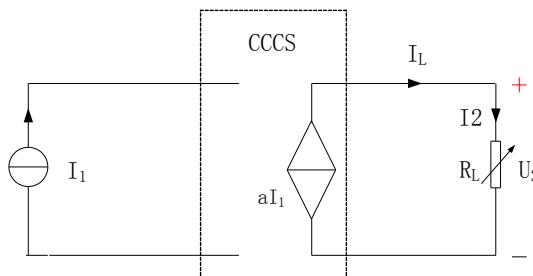


图 10.9 CCCS

(1) 固定 $R_L=2K\Omega$, 调节直流恒流源输出电流 I_1 , 使其在 $0\sim0.8mA$ 范围内取值, 测量 I_1 及相应的 I_L 值, 绘制 $I_L=f(I_1)$ 曲线, 并由其线性部分求出转移电流比 a 。将测得的数据填入表 10.7 中。

表 10.7

测量值	$I_1 (mA)$	
	$I_L (mA)$	
实验计算值	a	
理论计算值	a	

(2) 保持 $I_1=0.3mA$, 令 R_L 从 0 增至 $10K$, 测量 I_L 及 U_2 值, 绘制负载特性曲线 $I_L=f(U_2)$ 曲线。将测得的数据填入表 10.8 中。

表 10.8

$R_L (K\Omega)$	
$I_L (mA)$	
$U_2 (V)$	

七、实验报告要求

- 简述实验原理、实验目的, 画出各实验电路图, 整理实验数据。
- 用所测数据计算各种受控源系数, 并与理论值进行比较, 分析误差原因。
- 回答实验思考题。
- 总结运算放大器的特点, 以及你对实验的体会。

八、实验思考题

- 1、受控源与独立源相比有何异同点。
- 2、试比较四种受控源的代号、电路模型、控制量与被控制量之间的关系。
- 3、四种受控源中的 u, gm, rm 和 α 的意义是什么？如何测得？
- 4、若令受控源的控制量极性反向，试问其输出量极性是否发生变化？
- 5、在测试四种受控源特性时，是否出现其转移特性或输出特性与理论值不符现象？请给予解释。

实验十一 典型电信号的观察与测量

一、实验目的

- 1、熟悉实验装置上函数信号发生器的布局，各旋钮、开关的作用及其使用方法。
- 2、初步掌握用示波器观察电信号波形，定量测出正弦信号和脉冲信号的波形参数。

二、实验内容

- 1、双踪示波器的自检。
- 2、正弦信号的观察。
- 3、方波脉冲信号的测定。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	双踪示波器		1	
2	函数信号发生器		1	
3	交流毫伏表		1	
4	频率计		1	

四、实验原理

1、正弦交流信号和方波信号是常用的电激励信号，由函数信号发生器提供。

正弦信号的波形参数是幅值 U_m 、周期 T （或频率 f ）和初相 ϕ ；方波脉冲信号的波形参数是幅值 U_m 、脉冲重复周期 T 及脉宽 t_k 。本实验装置能提供频率范围为 1HZ~1MHZ,幅值可在 0~20V 之间连续可调的上述信号。不同类型的输出信号可由波形选择开关来选取。

面板标志说明及功能见下表：

序号	名称	作用
1	电源开关	按下开关，电源接通
2	波形选择	1) 输出波形选择 2) 与“6”配合可得到正、负向斜波和脉冲波
3	频率选择开关	频率选择开关与“4”配合选择工作频率
4	频率调节	与“3”配合选择工作频率
5	幅度调节旋钮	1) 调整输出幅度大小 2) 拉出此旋钮，可产生-20dB 的衰减
6	占空比调节/波形倒置开关	拉出此旋钮，可以改变输出波形的对称性，产生斜波、脉冲波且占空比可调，将此旋钮推进则为对称波形。
7	直流偏置调节旋钮	拉出此旋钮可设定任何波形的直流工作点，顺时针方向为正，逆时针为负，将此旋钮推进则直流电位为零。
8	TTL/CMOS 输出调节旋钮	1) 拉出此旋钮，可提供 5V~15V 的连续可调 CMOS 信号 2) 推入此旋钮，可提供 TTL 信号
9	测频输入	作频率计数器，用于外部信号频率测量，测量范围 0、

		1HZ~10MHZ, 具有 20mvRMS 灵敏度。
10	VCF 输入	外接电压控制频率输入端, 输入电压: 0V~10V, 最大压控比: 1000: 1
11	TTL/CMOS 输出旋钮	1) 输出波形为 TTL 脉冲/CMOS 电平, 可作同步信号 2) 与“8”配合使用, 输出 TTL 或 CMOS 信号 3) 脉冲宽度与重复频率可以通过频率范围选择开关和占空比调节旋钮设定。
12	信号输出	输出波形由此输出, 阻抗为 50Ω
13	-20dB 衰减选择开关	按下开关为-20dB, 衰减为 1/10, 正常时衰减为 1/1。
14	EXT/INT 选择开关	选择频率计数器是内部测量还是外部测量。按下选择开关为外部频率测量, 正常时为内部信号频率测量。

2、电子示波器是一种信号图形观察和测量仪器, 可定量测出电信号的波形参数, 从荧光屏的 Y 轴刻度尺并结合其量程分档选择开关(Y 轴输入电压灵敏度分档选择开关)读得电信号的幅值; 从荧光屏的 X 轴刻度尺并结合其量程分档选择开关(时间扫描速度分档选择开关), 读得电信号的周期、脉宽、相位差等参数。为了完成对各种不同波形、不同信号的观察和测量, 示波器上还有一些其它的调节和控制旋钮, 希望在实验中自己动手加以摸索和掌握, 并注意总结实用经验。一台双踪示波器可以同时观察和测量两个信号波形。

五、实验注意事项

1、示波器的辉度不要过亮, 尤其是光点长期停留在荧光屏上不动时, 应将辉度调暗, 以延长示波器的使用寿命。

2、调节仪器旋钮时, 动作不要过猛。实验前, 需熟读双踪示波器的使用说明, 特别是观测双踪时, 要特别注意开关、旋钮的操作与调节。

3、调节示波器时, 要注意触发开关和电平调节旋钮的配合使用, 以使显示的波形稳定。

4、作定量测定时, “t/div”、和“V/ div”的微调旋钮应旋置“标准”位置。

5、信号源的接地端与示波器的接地端要连在一起, 以防外界干扰而影响测量的准确性。

6、做好实验预习, 准备好画图用的图纸。

六、实验内容与步骤

1、双踪示波器的自检

将示波器的 Y 轴输入插口 YA 或 YB 端, 用同轴电缆线接至双踪示波器面板部分的“标准信号”输出, 然后开启示波器电源, 指示灯亮, 稍后, 协调地调节示波器面板上的“辉度”、“聚焦”、“辅助聚焦”“X 轴位移”、“Y 轴位移”等旋钮, 使在荧光屏的中心部分显示出线条细而清晰、亮度适中的方波波形; 通过选择幅度和扫描速度灵敏度, 并将它们的微调旋钮旋至“校准”位置, 从荧光屏上读出“标准信号”的幅值与频率, 并与标称值作比较, 如相差较大, 请老师给予校准。

2、正弦信号的观察

(1) 将示波器的幅度或扫描速度微调旋钮调至“校准”位置。

(2) 通过电缆线, 将信号发生器的正弦波输出口与示波器的 YA 或 YB 插座相连。

(3) 接通电源, 调节信号源的频率旋钮, 使输出频率分别为 50HZ, 1.5KHZ 和 20KHZ (由频率计读出), 输出幅值分别为有效值 0.1V, 1V, 3V (由交流毫伏表读得), 调节示波器 Y 轴和 X 轴灵敏度至合适的位置, 并将他们的微调旋钮旋至“校准”位置。从荧光屏上读得幅值及周期, 记入表 11.1 中和表 11.2 中。

表 11.1

频率计读数 项目测定	正弦信号频率的测定		
	50HZ	1.5KHZ	2KHZ
示波器“t/div”位置			
一个周期占有的格数			
信号周期 (s)			
计算所得频率 (HZ)			

表 11.2

交流毫伏表读数 项目测定	正弦波信号幅值的测定		
	0.1V	1V	3V
示波器“v/div”位置			
峰峰值波形格数			
峰值			
计算所得有效值			

3、方波脉冲信号的测定

- (1) 将函数信号发生器的波形选择开关置方波位置。
- (2) 调节信号源的输出幅度为 3V (用示波器测定), 分别观测 100HZ, 3KHZ 和 30KHZ 方波信号的波形参数。
- (3) 使信号频率保持在 3KHZ, 调节示波器幅度和脉宽旋钮, 观察波形参数的变化, 记录之。

七、实验报告要求

- 1、整理实验中显示的各种波形, 绘制有代表性的波形。
- 2、总结实验中所用仪器的使用方法及观察电信号的方法。
- 3、如用示波器观察正弦信号, 若在荧光屏上出现图 11.2 所示情况时, 试说明测试系统中哪些旋钮的位置不对? 应如何调节?
- 4、心得体会及其它。

八、实验思考题

- 1、熟读仪器的使用说明, “t/ div”、和“V/ div”的含义是什么?
- 2、应用双踪示波器观察到如图 11.1 所示的两个波形, Y 轴的“V/ div”的指示位 0.5V, “t/ div”指示为 20μS, 试问两个波形信号的波形参数为多少?

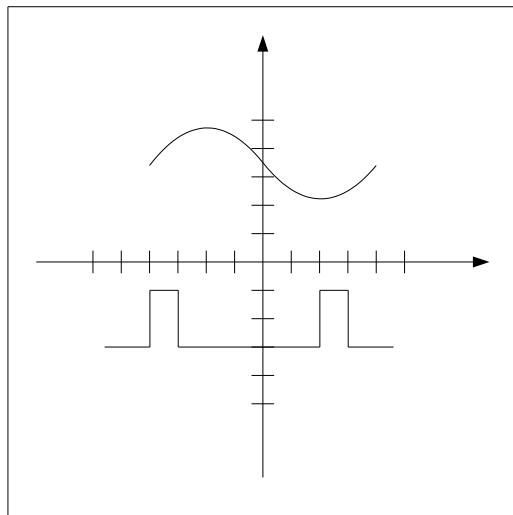


图 11.1

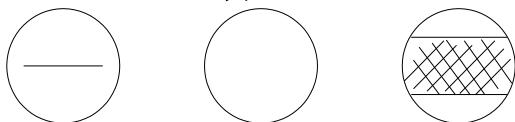


图 11.2

实验十二 RC 一阶电路的响应及其应用

一、实验目的

- 1、研究一阶 RC 电路的零输入响应、零状态响应和全响应的变化规律和特点。
- 2、了解 RC 电路在零输入、阶跃激励和方波激励情况下，响应的基本规律和特点。
- 3、测定一阶电路的时间常数 τ ，了解电路参数对时间常数的影响。
- 4、掌握积分电路和微分电路的基本概念。
- 5、学习用示波器观察和分析电路的响应。

二、实验内容

- 1、观测 RC 电路的矩形响应和 RC 积分电路的响应。
- 2、观测 RC 微分电路的响应。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	一阶电路实验电路		1	DLM31
2	函数信号发生器		1	
3	双踪示波器		1	

四、实验原理

1、RC 电路时域响应

从一种稳定状态转到另一种稳定状态往往不能跃变，而是需要一定过程（时间）的，这个物理过程称为过渡过程。所谓稳定状态，就是电路中的电流和电压在给定的条件下已达到某一稳定值（对交流讲是指它的幅值到达稳定）。稳定状态简称稳态。电路的过渡过程往往为时短暂，所以电路在过渡过程中的工作状态常称为暂态，因而过渡过程又称为暂态过程。暂态过程的产生是由于物质所具有的能量不能跃变而造成的。

从 $t=0-$ 到 $t=0+$ 瞬间，电感元件中的电流和电容元件上的电压不能跃变，这称为换路定则。换路定则仅适用于换路瞬间，可根据它来确定 $t=0+$ 时电路中电压和电流之值，即暂态过程的初始值。

在直流激励下，换路前，如果储能元件储有能量，并设电路已处于稳态，则在 $t=0-$ 电路中，电容元件可视作开路，电感元件可视作短路。换路前，如果储能元件没有储能，则在 $t=0-$ 和 $t=0+$ 的电路中，可将电容元件短路，将电感元件开路。

含有 L ， C 储能元件（动态元件）的电路，其响应可以由微分方程求解。凡是可用一阶微分方程描述的电路，称为一阶电路，一阶电路通常由一个储能元件和若干个电阻元件组成。对于一阶电路，可用一种简单的方法——三要素法直接求出电压及电流的响应。即 $f(t) = f(\infty) + [f(0+) - f(\infty)]e^{-\frac{t}{\tau}}$ ，式中： $f(t)$ ——电路中任一元件的电压和电流； $f(\infty)$ ——稳态值； $f(0+)$ ——初值； τ ——时间常数。

(0+)——初始值; τ ——时间常数。对于 RC 电路, $\tau = RC$, 对于 RL 电路, $\tau = \frac{L}{R}$ 。

所有储能元件初始值为零的电路对激励的响应称为零状态响应。电路在无激励情况下，由储能元件的初始状态引起的响应称为零输入响应。电路在输入激励和初始状态共同作用下引起的响应为全响应。全响应是零输入响应和零状态响应之和，它体现了线性电路的可加性。全响应也可看成是稳态响应和暂态响应之和，暂态响应的起始值与初态和输入有关，而随时间变化的规律仅仅决定于电路的 R 、 C 参数。稳态响应仅与输入有关。当 $t \rightarrow \infty$ 时，暂态过程趋于零，过渡过程结束，电路进入稳态。

2、RC 电路的时间常数 τ

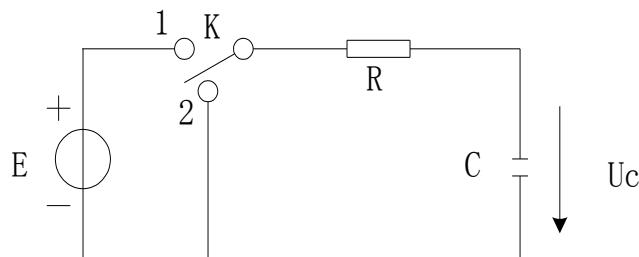


图 12.1 一阶 RC 电路

图 12.1 所示电路为一阶 RC 电路。RC 电路充放电的时间常数 τ 可以从示波器观察的响应波形中估算出来。设时间坐标单位 t 确定，对于充电曲线来说，幅值上升到终值的 63.2% 所对应的时间即为一个 τ [见图 12.2 (a)]，对于放电曲线来说，幅值下降到初值的 36.8% 所需要的时间即为一个 τ [见图 12.2 (b) 所示]。时间常数 τ 越大，衰减越慢。

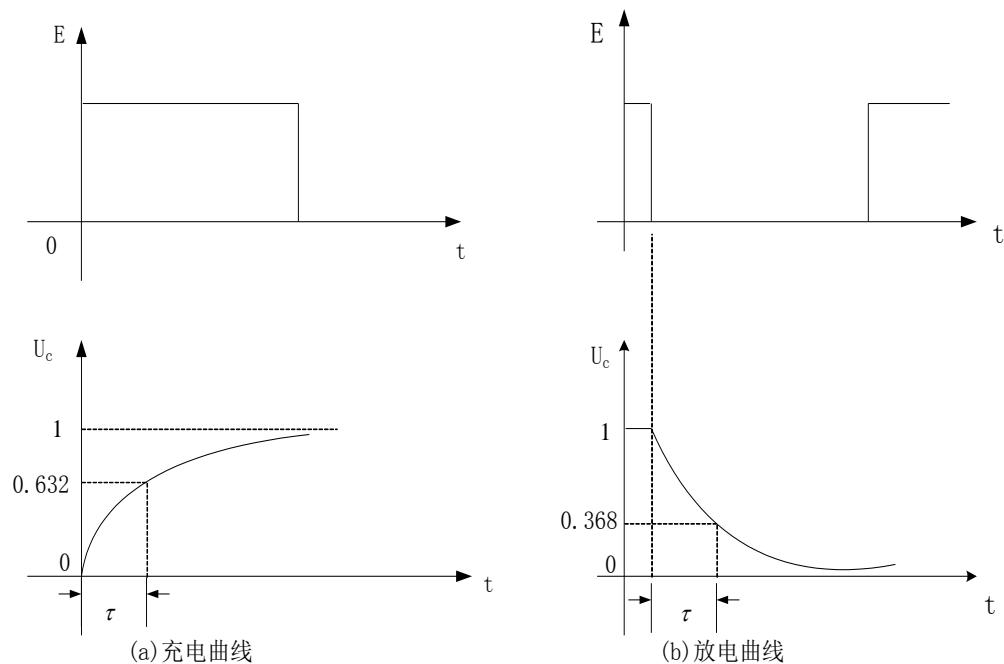


图 12.2 RC 电路充放电曲线

3、微分电路

微分电路和积分电路是 RC 一阶电路中比较典型的电路，它对电路元件参数和输入信号的周期有着特定的要求。微分电路必须满足两个条件：一是输出电压必须从电阻两端取出，二是 R 值很小，因而 $\tau = RC \ll t_p$ ， t_p 为输入矩形方波 u_i 的 1/2 周期。如图 12.3 所示构成了一个微分电路，因为此时电路的输出信号电压近似与输入信号电压的导数成正比，故为微分电路。

只有当时间常数远小于脉宽时，才能使输出很迅速地反映出输入的跃变部分。而当输入跃变进入恒定区域时，输出也近似为零，随之消失，形成一个尖峰脉冲波，故微分电路可以将矩形波转变成尖脉冲波，且脉冲宽度越窄，输入与输出越接近微分关系。

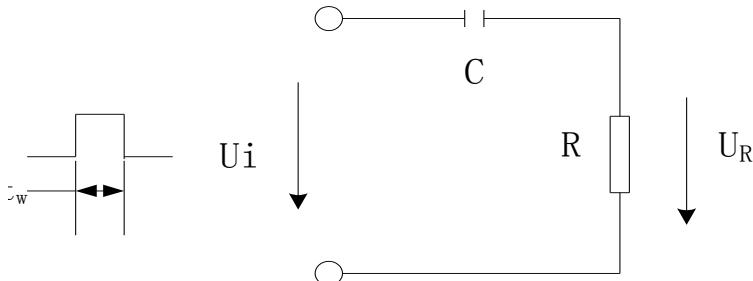


图 12.3 RC 微分电路

4、积分电路

积分电路必须满足两个条件：一是输出电压必须从电容两端取出，二是 $\tau = RC \gg t_p$ ， t_p 为输入矩形方波 u_i 的 1/2 周期。如图 12.4 所示即构成一个积分电路。因为此时电路的输出信号电压近似与输入信号电压对时间的积分成正比，故为积分电路。

由于 $\tau = RC \gg t_p$ ，充放电很缓慢，就是 U_C 增长和衰减很缓慢，充电时 $U_O = U_C \ll U_R$ ，因此 $U_i = U_R + U_O \approx U_R$ 。积分电路能把矩形波转换为三角波、锯齿波。为了得到线性度好，且具有一定幅度的三角波，一定要掌握时间常数 τ 与输入脉冲宽度的关系。方波的脉宽越小，三角波的幅度越小，但与其时间的关系越接近直线，即电路的时间常数 τ 越大，充放电越缓慢，所得三角波的线性越好，但其幅度亦随之下降。

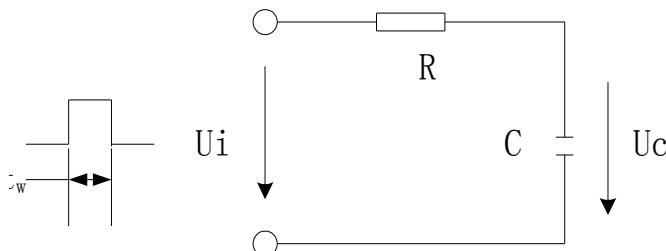


图 12.4 RC 积分电路

五、实验注意事项

- 1、调节电子仪器各旋钮时，动作不要过猛，实验前，需熟读双踪示波器的使用说明，特别是观测双踪时，要特别注意那些开关、旋钮的操作与调节。
- 2、信号源的接地端与示波器的接地端要连在一起，以防外界干扰而影响测量的准确性。
- 3、示波器的辉度不应过亮，尤其是光点长期停留在荧光屏上不动时，应将辉度调暗，以

延长示波器的使用寿命。

4、熟读仪器的使用说明，做好实验预习，准备好画图用的图纸。

六、实验内容与步骤

认清实验电路 R、C 元件的布局及其标称值，各开关的通断位置等。

1、观测 RC 电路的矩形响应和 RC 积分电路的响应

(1) 选择动态电路板上一阶动态响应实验电路， $R=10K\Omega$, $C=1000PF$ (即 $0.001uF$) 组成如图 12.1 所示的 RC 充放电电路，E 为函数信号发生器输出，取 $U_{max}=3V$, $f=1KHZ$ 的方波电压信号，并通过两根同轴电缆线，将激励源 Ui 和响应 UC 的信号分别连至示波器的两个输入口 YA 和 YB，这时可在示波器的屏幕上观察到激励与响应的变化规律。

(2) 令 $R=10K\Omega$, $C=0.01uF$ ，观察并描绘响应的波形，并根据电路参数求出时间常数。少量地改变电容值或电阻值，定性地观察对响应的影响，记录观察到的现象。

(3) 增大 R、C 之值，使之满足积分电路的条件 $\tau = RC \gg tp$ ，观察对响应的影响。

2、观测 RC 微分电路的响应

(1) 选择动态电路板上一阶动态响应实验电路，(提示：输入输出位置简单改动即可)组成如图 12.3 所示的微分电路，令 $C=0.01uF$, $R=1K\Omega$ ，在同样的方波激励 ($Um=3V$, $f=1KHZ$) 作用下，观测并描绘激励与响应的波形。

(2) 少量地增减 R 之值，定性地观测对响应的影响，并作记录，描绘响应的波形。

(3) 令 $C=0.01uF$, $R=100K\Omega$ ，计算 τ 值。在同样的方波激励 ($U_{max}=3V, f=1KHZ$) 作用下，观测并描绘激励与响应的波形。分析并观察当 R 增至 $1M\Omega$ ，输入输出波形有何本质上的区别。

七、实验报告要求

1、根据实验观测的结果，在方格纸上绘出 RC 一阶电路充放电时 UC 的变化曲线，由曲线测得值，并由参数值的计算结果作比较，分析误差原因。

2、根据实验观测结果，归纳总结积分电路和微分电路的形成条件，阐明波形变换的特征。

八、实验思考题

1、什么样的电信号可作为 RC 一阶电路零输入响应、零状态响应和完全响应的激励信号？

2、已知 R、C 一阶电路 $R=10K\Omega$, $C=0.01uF$ ，试计算时间常数 τ ，并根据 τ 值的物理意义，拟订测量 τ 的方案。

3、何谓积分电路，和微分电路，他们必须具备什么条件？他们在方波序列脉冲的激励下，其输出信号的波形的变化规律如何？这两种电路有何功用？

实验十三 二阶动态电路的响应及其测试

一、实验目的

- 1、研究 RLC 串联电路的电路参数与其暂态过程的关系。
- 2、观察二阶电路在过阻尼、临界阻尼和欠阻尼三种情况下的响应波形，加深对二阶电路响应的认识和理解。
- 3、利用响应波形，计算二阶电路暂态过程的有关参数。
- 4、掌握观察动态电路状态轨迹的方法。

二、实验内容

- 1、RLC 串联电路的研究，观察二阶电路的零输入响应和零状态响应由过阻尼过渡到临界阻尼，最后过渡到欠阻尼的变化过渡过程。改变电路参数时，记录 ω_d 与 δ 的变化。
- 2、GCL 并联电路的研究，观察二阶电路的零输入响应和零状态响应由过阻尼过渡到临界阻尼，最后过渡到欠阻尼的变化过渡过程。改变电路参数时，记录 ω_d 与 δ 的变化。

三、实验设备与仪器

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	二阶动态电路实验电路		1	DLM31
2	函数信号发生器		1	
3	双踪示波器		1	
4	可调电阻	10K	1	实验箱

四、实验原理

用二阶微分方程描述的动态电路，为二阶电路。一个二阶电路在方波正、负阶跃信号的激励下，可获得零状态与零输入响应，其响应的变化轨迹决定于电路的固有频率。

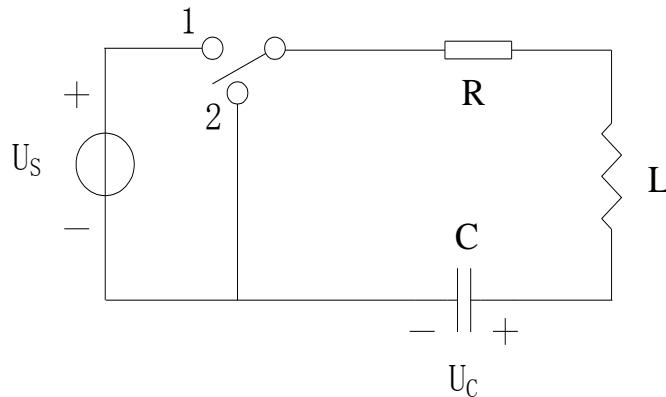


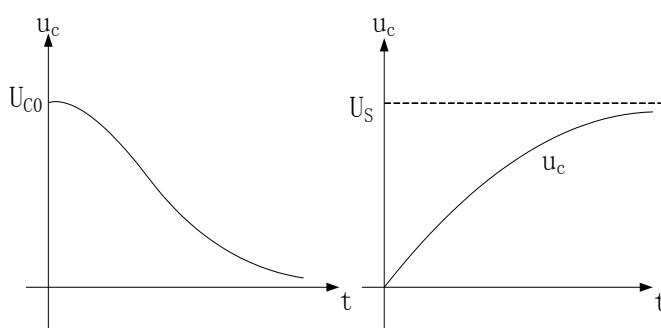
图 13.1 RLC 串联电路

简单而典型的二阶电路是一个 RLC 串联电路和 GCL 并联电路，这二者之间存在着对偶关系。

1、RLC 串联电路

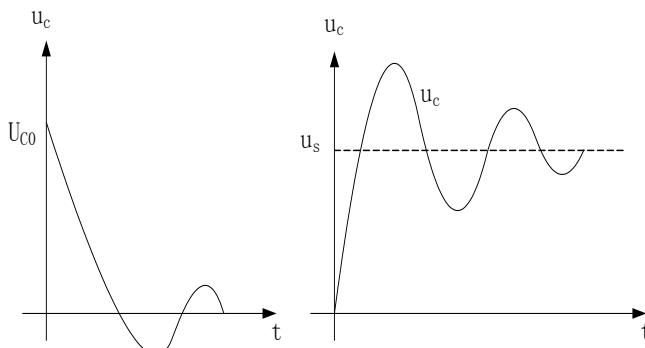
(1) 图 13.1 所示 R、L、C 串联电路是典型的二阶电路。电路的零输入响应只与电路的参数有关，对应不同的电路参数，其响应有不同的特点：

当 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，响应是非振荡性的，称为过阻尼情况。零输入响应为非振荡性的放电过程，零状态响应为非振荡性的充电过程。响应电压波形如图 13.2 所示。



(a) RLC 串联电路零输入响应电压波形 (b) RLC 串联电路零状态响应电压波形

图 13.2 过阻尼状态



(a) RLC 串联电路零输入响应电压波形 (b) RLC 串联电路零状态响应电压波形

图 13.3 欠阻尼状态

当 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，零输入响应中的电压、电流具有衰减振荡的特点，称为欠阻尼状态。此

时衰减系数 $\delta = \frac{R}{2L}$ 。 $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 是在 $R=0$ 情况下的振荡角频率，称为无阻尼振荡电路的固有

角频率。在 $R \neq 0$ 时，R、L、C 串联电路的固有振荡角频率 $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 将随 $\delta = \frac{R}{2L}$ 的增加

而下降。欠阻尼状态时，零输入响应的过渡过程为振荡性的放电过程，零状态响应的过渡过程为振荡充电过程。其响应电压波形如图 13.3 所示。

当 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ 时，有 $\delta = \omega_0$ ， $\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = 0$ 。暂态过程介于非周期与振荡之间，响应

临近振荡，称为临界状态，其本质属于非周期暂态过程。在临界情况下，放电过程是单调衰

减过程，仍然属于非振荡性质。

(2) 欠阻尼状态下的衰减系数 δ 和振荡角频率 ω_d 可以通过示波器观测电容电压的波形求得。图 13.4 是 RLC 串联电路接至方波激励时，呈现衰减振荡暂态过程的波形。相邻两个最大值的间距为振荡周期 T_d ， $\omega_d=2\pi/T_d$ ，对于零输入响应，相邻两个最大值的比值为 $U_{1m}/U_{2m}=e^{\delta T_d}$ 。所以衰减系数 $\delta=\frac{1}{T_d} \ln \frac{U_{1m}}{U_{2m}}$ 。

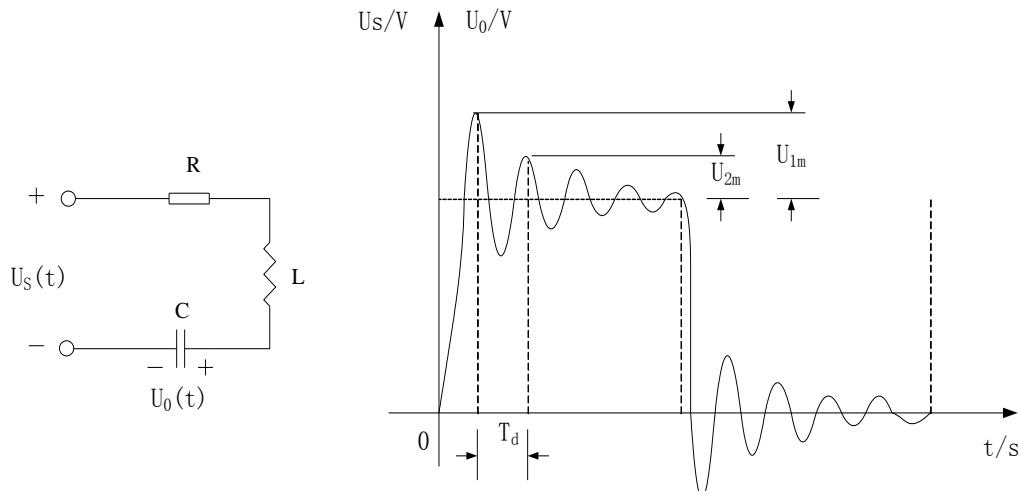


图 13.4 R、L、C 串联电路接至方波激励及衰减振荡的波形

除了在以上各图所表示的 $u-t$ 或 $i-t$ 坐标系上研究动态电路得暂态过程以外，还可以在相平面作同样的研究工作。相平面也是直角坐标系，其横轴表示被研究的物理量 x ，纵轴表示被研究的物理量对时间的变化率 dx/dt 。由电路理论可知，对于 RLC 串联电路，可取电容电压 uC 、电感电流 iL 为两个状态变量。因为 $iL=iC=C \frac{du_c}{dt}$ ，所以 uC 取为横坐标， iL 取为纵坐标，构成研究该电路的状态平面。每一时刻的 uC 、 iL ，可用相平面上的某点表示，这个点称相迹点。 uC 、 iL 随时间变化的每一个状态可用相平面上的一系列相迹点表示。一系列相迹点相连得到的曲线，称为状态轨迹（或相轨迹）。用示波器显示动态电路状态轨迹的原理与显示李萨如图形完全一样，本实验将 RLC 串联电路的 uC 、 iL 分别送入示波器的 X 轴输入和 Y 轴输入，便可得到状态轨迹。

2、GCL 并联电路

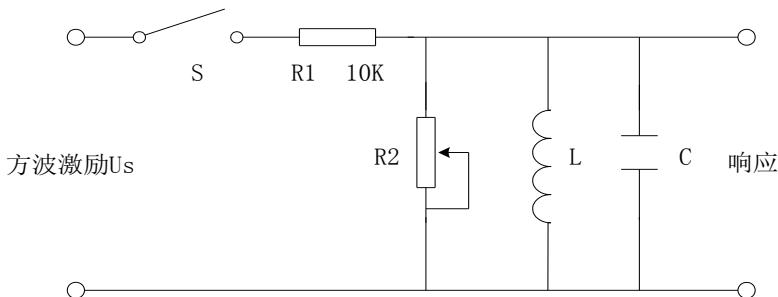


图 13.5 GCL 并联电路

图 13.5 所示电路为 GCL 并联电路，根据 KCL，电路的微分方程为

$$LC \frac{d^2 i_L}{dt^2} + GL \frac{di_L}{dt} + iL = \frac{Us}{R_1} \quad (t \geq 0)$$

令 $\delta = \frac{G}{2C}$ ， δ 称为衰减系数， $G=1/R$

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ， ω_0 称为固有频率

$\omega_d = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ ， ω_d 称为振荡角频率

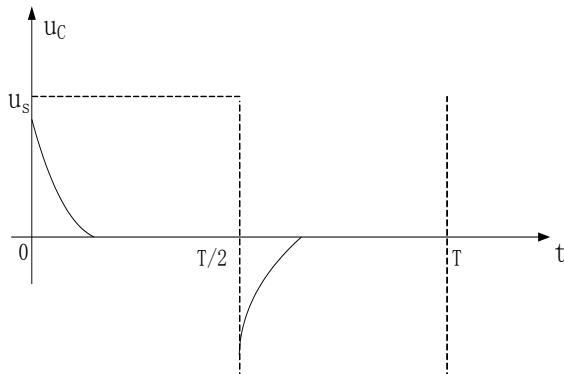


图 13.6 GCL 并联电路的过阻尼响应

方程的解分三种情况：

$\delta > \omega_0$ ，称为过阻尼状态，响应为非振荡性的衰减过程

$\delta = \omega_0$ ，称为临界阻尼状态，响应为临界过程。

$\delta < \omega_0$ ，称为欠阻尼状态，响应为振荡性的衰减过程。

实验中，可通过调节电路的元件参数值，改变电路的固有频率 ω_0 之值，从而获得单调地衰减和衰减振荡的响应，并可在示波器上观察到过阻尼、临界阻尼和欠阻尼这三种响应的波形，如图 13.6 和 13.7 所示。

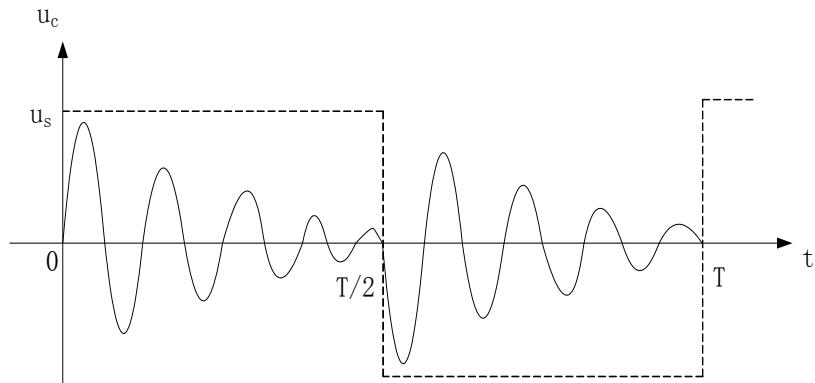


图 13.7 GCL 并联电路的欠阻尼响应

五、实验注意事项

调节 R₂ 时，要细心、缓慢，临界阻尼要找准。

实验前，请仔细阅读数字锁存示波器操作说明。

观察双踪时，显示要稳定，如不同步，则可采用外同步法（看示波器说明）触发。

六、实验内容与步骤

1、RLC 串联电路的研究

(1) 选择动态电路板上二阶动态响应实验电路。利用动态线路板一阶、二阶电路中的元件与开关的配合作用，组成如图 13.8 所示的 RLC 串联电路。令 r=100Ω, r 为取样电阻, L=10mH, C=1000pF, RL 为 10K 可调电阻器，令函数信号发生器的输出为 U_m=3V, f=1KHZ 的方波脉冲信号，通过同轴电缆线接至图的激励端，同时用同轴电缆线将激励端和响应输出端接至双踪示波器的 YA 和 YB 两个输入口。

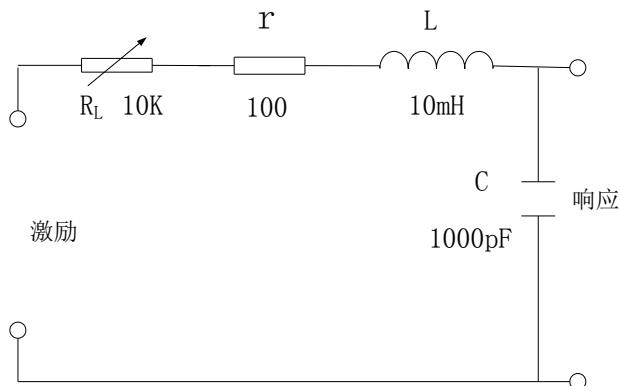


图 13.8 RLC 串联电路

(2) 调节可变电阻器 RL 之值，观察二阶电路的零状态响应由过阻尼过渡到临界阻尼，最后过渡到欠阻尼的变化过渡过程，分别定性地描绘、记录响应的典型变化波形。

(3) 调节 RL 使示波器荧光屏上呈现稳定的欠阻尼响应波形，用示波器光标测量按钮 (cursor 按钮) 测出振荡周期 T_d，相邻两个最大值 U_{1m}、U_{2m}，计算出此时电路的衰减常数

δ 和振荡角频率 ω_d 。 $\omega_d = 2\pi/T_d$ ，衰减系数 $\delta = \frac{1}{T_d} \ln \frac{U_{1m}}{U_{2m}}$ 。（要求实验者能熟练使用数字锁存示波器）

(4) 改变一组电路参数，比如增减 L 或 C 之值，重复步骤 2 的测量，并作记录。随后仔细观察，改变电路参数时， ω_d 与 δ 的变化趋势，并作记录。

表 13.1

电路参数	元件参数				测量值		
	r	R _L	L	C	T _d	U _{1m}	U _{2m}
1	100	调至某一欠阻尼状态	4.7mH	1000pF			
2	100		10mH	1000pF			
3	100		10mH	0.01uF			

2、GCL 并联电路的研究

(1) 选择动态电路板上二阶动态响应实验电路。利用一阶、二阶电路中的元件与开关的配合作用，组成如图 13.9 所示的 GCL 并联电路。令 $R_1=10K\Omega$, $L=10mH$, $C=1000pF$, R_2 为 $10K$ 电位器（可调电阻），令函数信号发生器的输出为 $U_{max}=3V$, $f=1KHZ$ 的方波脉冲信号，通过同轴电缆线接至图的激励端，同时用同轴电缆线将激励端和响应输出端接至双踪示波器的 YA 和 YB 两个输入口。

(2) 调节可变电阻器 R_2 之值，观察二阶电路的零状态响应由过阻尼过渡到临界阻尼，最后过渡到欠阻尼的变化过渡过程，分别定性地描绘、记录响应的典型变化波形。

(3) 调节 R_2 使示波器荧光屏上呈现稳定的欠阻尼响应波形，用示波器光标测量按钮 (cursor 按钮) 测出振荡周期 T_d ，相邻两个最大值 U_{1m} 、 U_{2m} ，计算此时电路的衰减常数 δ 和振荡角频率 ω_d 。

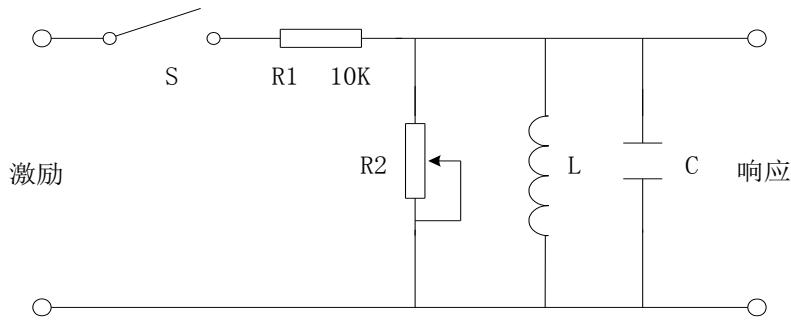


图 13.9 GCL 并联电路

(4) 改变一组电路常数，比如增减 L 或 C 之值，重复步骤 2 的测量，并作记录。随后仔细观察，改变电路参数时， ω_d 与 δ 的变化趋势，并作记录。

表 13.2

电路参数	元件参数				测量值		
	R1	R2	L	C	T_d	U_{1m}	U_{2m}
1	10K	调至某一欠阻尼状态	4.7mH	1000pF			
2	10K		10mH	1000pF			
3	10K		10mH	0.01uF			
4	100K		10mH	0.01uF			

七、实验报告要求

- 根据观测结果，在方格纸上描绘二阶电路过阻尼、临界阻尼和欠阻尼的响应波形。
- 测算欠阻尼振荡曲线上的衰减常数 δ 和振荡角频率 ω_d 。
- 归纳、总结电路元件参数的改变对响应变化趋势的影响。

八、实验思考题

- 根据二阶电路实验电路元件的参数，计算处于临界阻尼状态的 R_2 之值。
- 在示波器荧光屏上，如何测得二阶电路零输入响应欠阻尼状态的衰减常数 δ 和振荡角频率 ω_d 。

实验十四 R、L、C 元件阻抗特性的测定

一、实验目的

- 1、验证电阻、感抗、容抗与频率的关系，测定 R-f, XL-f 与 XC-f 特性曲线。
- 2、加深理解 R、L、C 元件端电压与电流间的相位关系。

二、实验内容

- 1、测量单一参数 R、L、C 元件的阻抗频率特性。
- 2、用双踪示波器观察 rL 串联和 rC 串联电路在不同频率下阻抗角的变化情况，并作记录。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	实验电路	R=1KΩ,L=30mH, C=1uF,r=200Ω	1	DLM01 或 DLM31
2	函数信号发生器		1	
3	万用表		1	
4	双踪示波器		1	

四、实验原理

1、单一参数 R-f, XL-f 与 XC-f 阻抗频率特性曲线

在正弦交流信号作用下，电阻元件 R 两端电压与流过的电流有关系式 $U=RI$ 。

在信号源频率 f 较低情况下，略去附加电感及分布电容的影响，电阻元件的阻值与信号源频率无关，其阻抗频率特性 R-f 如图 14.1 所示。

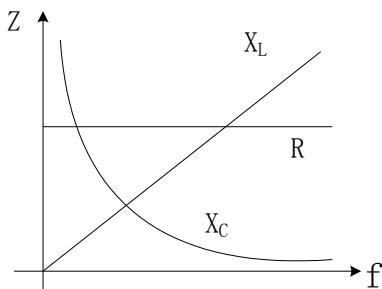


图 14.1 阻抗频率特性

如果不计线圈本身的电阻 RL ，又在低频时略去电容的影响，可将电感元件视为纯电感，有关系式 $UL = jXLI$ ，感抗 $X_L = 2\pi f L$ ，感抗随信号频率而变，阻抗频率特性 $XL-f$ 如图 14.1 所示。

在低频时略去附加电感的影响，将电容元件视为纯电容元件，有关系式 $UC = -jXCI$ ，容抗 $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ ，容抗随信号源频率而变，阻抗频率特性 $XC-f$ 如图 14.1 所示。

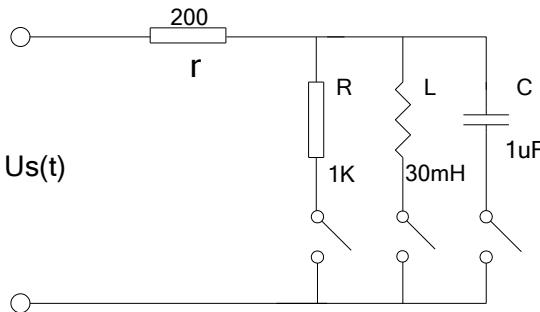


图 14.2 阻抗频率特性测试电路

2、单一参数 R、L、C 阻抗频率特性的测试电路

如图 14.2 所示。图中 R、L、C 为被测元件，r 为电流取样电阻。改变信号源频率，测量 R、L、C 元件两端电压 U_R 、 U_L 、 U_C ，流过被测元件的电流则可由 r 两端电压除以 r 得到。

3、示波器测量阻抗角的方法

元件的阻抗角（即相位差 ϕ ）随输入信号的频率变化而改变，可用实验方法测得阻抗角的频率特性曲线 $\phi \sim f$ 。

用双踪示波器测量阻抗角（相位差）的方法：将欲测量相位差的两个信号分别接到双踪示波器 YA 和 YB 两个输入端。调节示波器有关旋钮，使示波器屏幕上出现两条大小适中、稳定的波形，如图 14.3 所示，荧光屏上数得水平方向一个周期占 n 格，相位差占 m 格，则实际的相位差 ϕ （阻抗角）为 $\phi = m \times \frac{360^\circ}{n}$ 。

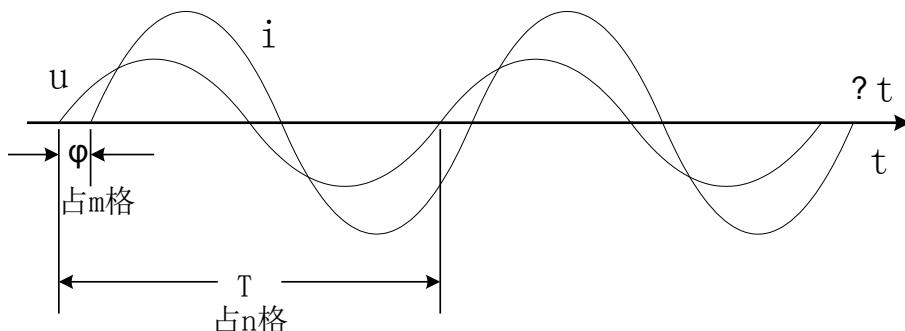


图 14.3 示波器测量阻抗角（相位差）

五、实验注意事项

- 1、实验前仔细阅读实验原理部分，注意自耦调压器的使用。
- 2、信号源的接地端与示波器的接地端、交流毫伏表的接地端要连在一起，以防外界干扰而影响测量的准确性。
- 3、用双踪示波器同时观察双路波形时，应该注意两路信号的共地问题。

六、实验内容与步骤

1、测量单一参数 R、L、C 元件的阻抗频率特性

实验线路如图 14.2 所示,通过电缆线将函数信号发生器输出的正弦信号接至电路输入端,作为激励源 u , 并用交流毫伏表(或者示波器)测量,使激励电压的有效值为 $U=3V$, 并在整个实验过程中保持不变。(注意接地端的共地问题!)

改变信号源的输出频率从 200HZ 逐渐增至 5KHZ(用频率计测量),并使开关分别接通 R、L、C 三个元件,用交流毫伏表分别测量 U_R 、 U_r ; U_L 、 U_r ; U_C 、 U_r ,并通过计算得到各个频率点的 R、XL、XC 之值,记入表中。

表 14.1 R、L、C 元件的阻抗频率特性数据

频率 f (HZ)		单位	200	500	1000	2000	2500	3000	4000	5000
R	U_R	(V)								
	U_r	(V)								
	$I_R=U_r/r$	(mA)								
	$R=U_R/I_R$	(KΩ)								
L	U_L	(V)								
	U_r	(V)								
	$I_L=U_r/r$	(mA)								
	$X_L=U_L/I_L$	(KΩ)								
C	U_C	(V)								
	U_r	(V)								
	$I_C=U_r/r$	(mA)								
	$X_C=U_C/I_C$	(KΩ)								

2、用双踪示波器观测图 14.4 所示 rL 串联和 rC 串联电路在不同频率下阻抗角的变化情况,即用双踪示波器观测 rL 串联电路(rC 串联电路)的电压、电流波形相位差,并作记录。

用双踪示波器测量阻抗角(电压、电流波形相位差)的方法: 将欲测量相位差的两个信号分别接到双踪示波器 YA 和 YB 两个输入端。调节示波器有关旋钮,使示波器屏幕上出现两条大小适中、稳定的波形,如图 14.3 所示,荧光屏上数得水平方向一个周期占 n 格,相位差占 m 格,则实际的相位差 ϕ (阻抗角)为 $\phi=m \times \frac{360^\circ}{n}$ 。

流过 rL 串联电路(rC 串联电路)的电流则可由 r 两端电压 U_r 除以 r 得到,用示波器观察 rL 串联电路电流波形,可通过观察流过该电流的电阻 r 上的电压波形来实现。rL 串联电路(rC 串联电路)两端的电压与输入端的激励电压相等,用双踪示波器观察电压波形可通过观察输入端电压波形来实现。注意两路信号的共地问题。

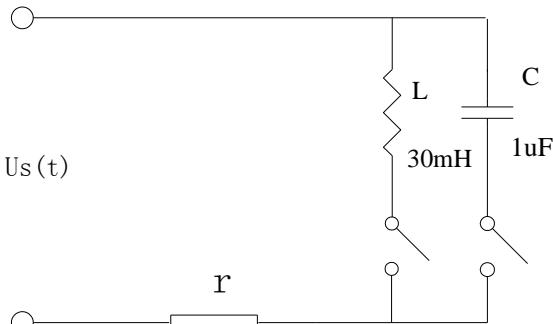


图 14.4 串联电路阻抗角测试电路

表 14.2 串联电路阻抗角测试数据

频率 $f(\text{HZ})$	200	500	1K	2K	2.5K	3K	4K	5K
n(格)								
m(格)								
ϕ (度)								

七、实验报告要求

- 根据实验数据，在方格纸上绘制 R 、 L 、 C 三个元件的阻抗频率特性曲线，从中可以得出什么结论？
- 根据实验数据，在方格纸上绘制 rL 串联、 rC 串联电路的阻抗角频率特性曲线，并总结、归纳出结论。

八、实验思考题

- 图 14.2 中各元件流过的电流如何求得？
- 怎样用双踪示波器观察 rL 串联和 rC 串联电路阻抗角的频率特性？

实验十六 RC 电路的频率响应及选频网络特性测试

一、实验目的

- 1、测定 RC 电路的频率特性，并了解其应用意义。
- 2、熟悉文氏电桥电路的结构特点及其应用。
- 3、学会用交流毫伏表和示波器测定文氏电桥电路的幅频特性和相频特性。
- 4、熟练使用低频信号发生器和交流毫伏表。

二、实验内容

- 1、低通选频电路测试。
- 2、高通选频电路测试。
- 3、RC 选频网络的幅频特性测试。
- 4、测量 RC 串并联电路的相频特性。
- 5、RC 双 T 选频网络的测试。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	RC 选频网络实验电路		1	DLM32
2	函数信号发生器		1	
3	交流毫伏表		1	
4	双踪示波器		1	
5	实验电路元件	1K, 0.1uF	若干	DLM01 或 DLM31、 DLM32

四、实验原理

在交流电路中，电容元件的容抗和电感元件的感抗都与频率有关，当电源电压（激励）的频率改变时（即使电压的幅值不变），电路中电流和各部分电压（响应）的大小和相位也随着改变。响应与频率的关系称为电路的频率特性或频率响应。首先讨论由 R、C 组成的几种滤波电路。所谓滤波就是利用容抗或感抗随频率而改变的特性，对不同频率的输入信号产生不同的响应，让需要的某一频带信号通过，而抑制不需要的其他频率信号。

1、RC 低通滤波电路（如图 18.1）

RC 低通滤波电路输出信号取自电容两端，电路输出电压与输入电压的比值称为电路的转移函数或传递函数，用 $T(j\omega)$ 表示，它是一个复数。

$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_I} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = |T(j\omega)|/\varphi(\omega)$$

$$\text{设 } \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad \text{则 } T(j\omega) = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_I} = \frac{1}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} / \varphi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{\omega}{\omega_0})^2}} / \varphi(\omega)$$

表示 $|T(j\omega)|$ 随 ω 变化的特性称为幅频特性，表示 $\varphi(\omega)$ 随 ω 变化的特性称为相频特性，两者统称为频率特性。

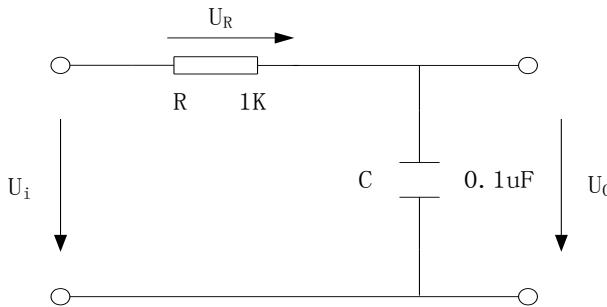


图 18.1 RC 低通滤波电路

在实际应用中，输出电压不能下降过多。通常规定：当输出电压下降到输入电压的 70.7%，即 $|T(j\omega)|$ 下降到 0.707 时为最低限。此时， $\omega = \omega_0$ ，而将频率范围 $0 < \omega < \omega_0$ 称为通频带， ω_0 称为截止频率，它又称为半功率点频率。

当 $\omega < \omega_0$ 时， $|T(j\omega)|$ 变化不大，接近等于 1；当 $\omega > \omega_0$ 时， $|T(j\omega)|$ 明显下降。这表明上述 RC 电路具有使低频信号较易通过而抑制较高频率信号的作用，故称为低通滤波电路。

2、RC 高通滤波电路（如图 18.2）

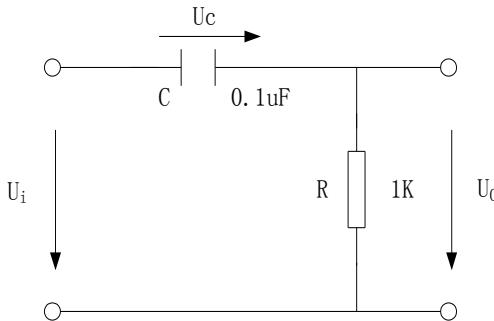


图 18.2 RC 高通滤波电路

RC 高通滤波电路输出信号取自电阻两端，电路的传递函数为

$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_I} = \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC} = |T(j\omega)| / \varphi(\omega)$$

$$\text{设 } \omega_0 = \frac{1}{RC} \quad \text{则 } T(j\omega) = \frac{\dot{U}_0}{\dot{U}_I} = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{1}{\omega RC})^2}} / \varphi(\omega) = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{\omega_0}{\omega})^2}} / \varphi(\omega)$$

上述 RC 电路具有使高频信号较易通过而抑制较低频率信号的作用，故常称为高通滤波电路。

3、RC 串并联选频网络（如图 18.3 所示）

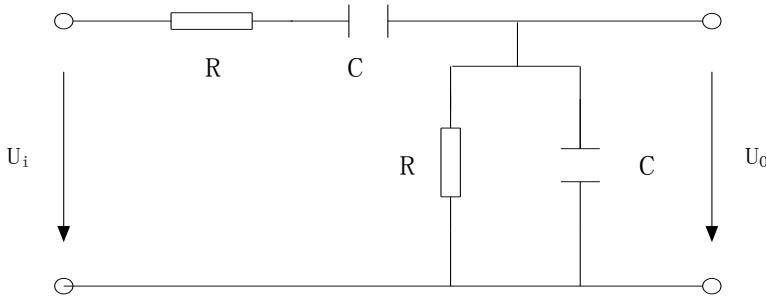


图 18.3 RC 串并联电路

文氏电桥电路是一个 RC 串并联电路，该电路结构简单，被广泛应用于低频振荡电路中作为选频环节，可以获得高纯度的正弦波电压。

用函数信号发生器的正弦输出信号作为图 18.3 的激励信号 \$U_i\$，并保持 \$U_i\$ 值不变的情况下，改变输入信号的频率 \$f\$，用交流毫伏表或示波器测出输出端相应于各个频率点下的输出电压 \$U_o\$ 的值，将这些数据画在以频率 \$f\$ 为横轴，\$U_o\$ 为纵轴的坐标纸上，用一条光滑的曲线连接这些点，该曲线就是上述电路的幅频特性曲线。

文氏电桥的一个特点是其输出电压幅度不仅会随输入信号的频率而改变，而且还会出现一个与输入电压同相位的最大值，如图 18.4(a)所示。

由电路分析得知，该电路的频率特性为

$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{(1 + \frac{R_1}{R_2} + \frac{C_1}{C_2}) + j(\omega R_1 C_1 - \frac{1}{\omega R_2 C_2})}$$

若取 \$R_1=R_2=R\$、\$C_1=C_2=C\$，则

$$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{3 + j(\omega RC - \frac{1}{\omega RC})}$$

当 \$\omega=\omega_0=\frac{1}{RC}\$ 时，即 \$f=f_0=\frac{1}{2\pi RC}\$ 时，电路呈谐振状态，\$f_0\$ 称电路固有频率。

此时，\$U_o\$ 与 \$U_i\$ 同相位，\$T(j\omega) = \frac{\dot{U}_o}{\dot{U}_i} = \frac{1}{3}\$，频率特性如图 18.4 所示。由图 18.4 (a)

可知，RC 串并联电路具有带通特性。当 \$\omega>\omega_0\$，\$U_o\$ 滞后于 \$U_i\$，\$\omega<\omega_0\$，\$U_o\$ 超前于 \$U_i\$。

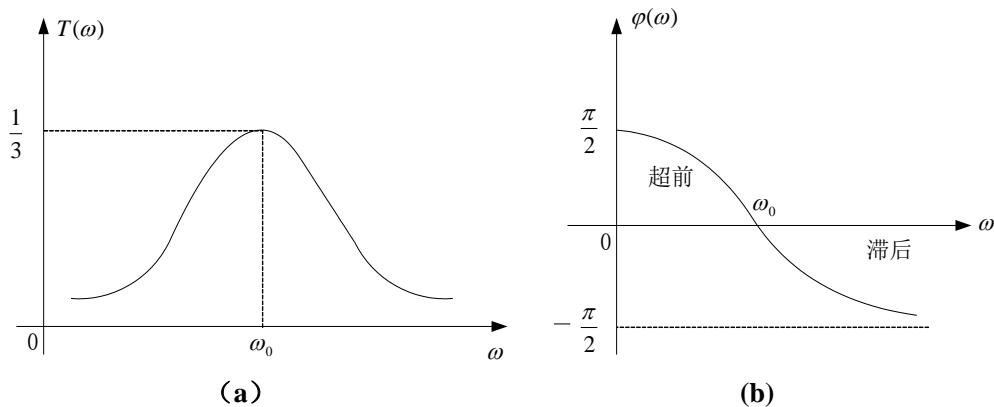


图 18.4 带通滤波电路的频率特性

4、RC 双 T 选频网络（如图 18.5 所示）

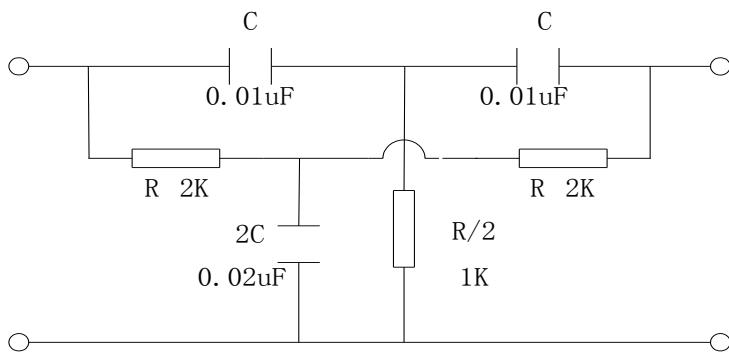


图 18.5 RC 双 T 选频网络电路图

图 18.5 所示是一 RC 双 T 选频网络，它的特点是在一个较窄的频带内有极显著的带阻特性。一般情况下，RC 双 T 选频网络的元件的量值都取简单的对称关系。用同样方法可以测量 RC 双 T 选频网络的幅频特性。

用函数信号发生器的正弦输出信号作为图 18.5 的激励信号 U_i ，并保持 U_i 值不变的情况下，改变输入信号的频率 f ，用交流毫伏表或示波器监视 U_i 并测出输出端相应于各个频率点下的输出电压 U_o 的值，将这些数据画在以频率 f 为横轴， U_o 为纵轴的坐标纸上，用一条光滑的曲线连接这些电压，该曲线就是上述电路的幅频特性曲线。其幅频特性曲线如图 18.6。

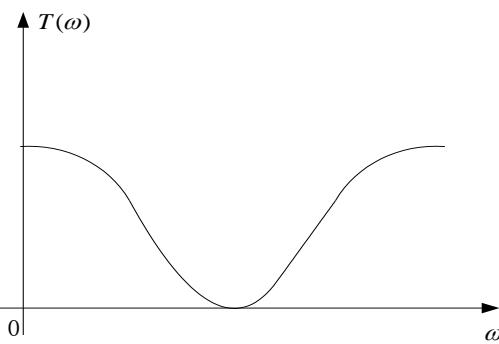


图 18.6 RC 双 T 选频网络幅频特性曲线

5、绘制被测电路的相频特性曲线

在正弦稳态情况下，网络的响应相量与激励相量之比称为频域网络函数。当频率为截止

角频率时, 即 $f=f_0$ 时, 幅频特性有最大值 $\frac{1}{3}$, 相频特性为 0, 这正是称之为选频网络的原因所在。实验中, 可根据输入电压与输出电压同相位确定预选频率 f_0 。

将上述电路的输入和输出分别接到双踪示波器的 YA 和 YB 两个输入端, 改变输入正弦信号的频率, 观测相应的输入和输出波形间的时延 τ 及信号的周期 T, 则两波形间的相位差为

$$\varphi = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ = \varphi_0 - \varphi_i \quad (\text{输出相位与输入相位之差})$$

将各个不同频率下的相位差 φ 测出, 即可绘出被测电路的相频特性曲线, 如图 18.4 (b) 所示。

五、实验注意事项

1、由于信号源内阻的影响, 注意在调节输出频率时, 应同时调节输出幅度, 使实验电路的输入电压保持不变。

2、为消除电路内外干扰, 要求毫伏表与信号源“共地”。

六、实验内容与步骤

1、低通电路测试

选择动态电路一中的元器件, 按图 18.1 所示电路接线, $R=1K\Omega$, $C=0.1\mu F$, 改变信号源的频率 f (由频率计读得), 保持 $U_i=3V$ (有效值), 分别测量表 18.1 中所列频率下的 U_{01} 。

表 18.1 低通电路实验数据

序数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f(HZ)$	50	100	200	500	1K	1.3K	1.6K	1.8K	2K	5K
$U_i (mV)$										
$U_{01} (mV)$										

2、高通电路测试

选择动态电路一中的元器件, 按图 18.2 所示电路接线, $R=1K\Omega$, $C=0.1\mu F$, 改变信号源的频率 f (由频率计读得), 保持 $U_i=3V$ (有效值), 测 U_{02} 值填入表 18.2 中。

表 18.2 高通电路实验数据

序数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f(HZ)$	100	500	1K	1.3K	1.6K	2.5K	4K	5K	10K	20K
$U_i (mV)$										
$U_{02} (mV)$										

3、RC 选频网络的幅频特性测试

(1) 选择动态电路二中的 RC 串并联选频网络 (实际标注内容为: RLC 特性测试) 元器件, 在实验板上按图 18.3 电路选取一组参数 (如 $R=1K\Omega$, $C=0.1\mu F$)。

(2) 调节信号源的输出电压为 3V 的正弦信号, 接入图 18.3 的输入端。

(3) 改变信号源的频率 f (由频率计读得), 并保持 $U_i=3V$ (有效值) 不变, 测量输出电压 U_0 , (可先测量 $\beta=\frac{1}{3}$ 时的电路频率, 然后再在 f_0 左右设置其他频率点测量 U_0)。数据记入表 18.3 中。

(4) 另选一组参数(如 $R=200\Omega$, $C=2.2\mu F$), 重复测量一组数据。数据记入表 18.3 中。

表 18.3 RC 选频网络的幅频特性测试

$R=1K\Omega, C=0.1\mu F$															
$f(HZ)$	300	700	1K	1.1K	1.2K	1.3K	1.4K	1.5K	1.6K	1.7K	1.8K	2K	2.5K	4K	6K
$U_i(V)$															
$U_o(V)$															
$R=200\Omega, C=2.2\mu F$															
$f(HZ)$	100	200	250	300	350	400	450	500	550	600	700	800	900	1K	2K
$U_i(V)$															
$U_o(V)$															

4、RC 选频网络的相频特性测试

按实验原理说明 4 的内容、方法步骤进行, 选定两组电路参数进行测量。数据记入表 18.4 中。

表 18.4 RC 选频网络的相频特性

$R=1K\Omega, C=0.1\mu F$														
$f(HZ)$														
$T(ms)$														
$\tau (ms)$														
Φ														
$R=200\Omega, C=2.2\mu F$														
$f(HZ)$														
$T(ms)$														
$\tau (ms)$														
Φ														

5、RC 双 T 选频网络的测试

测试图 18.5 所示的双 T 型滤波器的幅频特性, 自拟表格, 记录测试数据。

七、实验报告要求

1、根据表中数据, 用坐标纸分别作出低通、高通及选频电路的幅频特性, 要求用频率取对数坐标。求出 f_0 或 ω_0 , 说明电路的作用。

2、取 $f=f_0$ 时的数据, 验证是否满足 $U_0=\frac{1}{3}U_i$, $\varphi=0$ 。

3、回答思考题。

4、总结分析本次实验结果。

八、实验思考题

1、根据电路参数, 估算电路两组参数时的固有频率 f_0 。

2、推导 RC 串并联电路的幅频、相频特性的数学表达式。

3、为什么 RC 电路具有移相作用?

实验十七 RLC 串联谐振电路

一、实验目的

- 1、观察谐振现象，加深对串联谐振电路特性的理解。
- 2、学习测定 RLC 串联谐振电路的频率特性曲线。
- 3、测量电路的谐振频率，研究电路参数对谐振特性的影响。
- 4、掌握交流毫伏表的使用方法。

二、实验内容

1、按图 19.1 接线， $R = 510\Omega$ ， $L = 30mH$ ， $C = 0.1\mu F$ ，调整函数信号发生器，使其波形为正弦波，输出电压有效值为 3V，用交流毫伏表监测电阻 R 两端的电压 U_R ，调节函数信号发生器的输出频率（注意要维持信号源的输出幅度不变），当 U_R 的读数为最大值时，读的频率计上的频率值即为谐振频率 f_0 。

- 2、用交流毫伏表分别测量电路发生谐振时的 U_i 、 U_R 、 U_L 、 U_C 电压，记入表 19.1 中。
- 3、调节函数信号发生器的频率输出，在 f_0 附近分别选几个测量点，测量不同频率时的 U_R 值，记入下表中，并根据计算结果，绘制谐振曲线（标出 Q 值）。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	谐振电路实验电路		1	DLM01 或 DLM32
2	函数信号发生器		1	
3	交流毫伏表		1	
4	双踪示波器		1	
5	频率计		1	
6	电阻	$R=510\Omega$ 、2K,	若干	DLM01 或 DLM32
7	电感	$L=30mH$	1	DLM01 或 DLM32
8	电容	$C=0.1\mu F$ 、 $0.01\mu F$	若干	DLM01 或 DLM32

四、实验原理

1、RLC 串联谐振的条件

在如图 19.1 所示的 RLC 串联电路上，施加一正弦电压，则该电路的阻抗是电流角频率的函数，即： $Z = R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C}) = |Z|/\phi$

当 $\omega L - \frac{1}{\omega C} = 0$ 时，电路处于串联谐振状态，谐振角频率和谐振频率分别为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

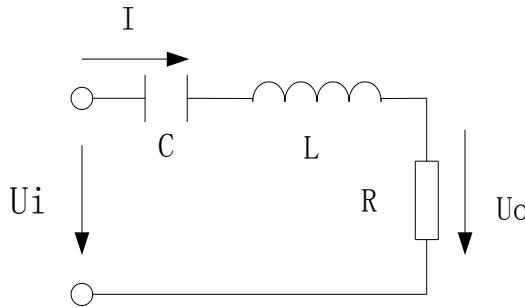


图 19.1 RLC 串联电路

显然，谐振频率仅与元件 L , C 的数值有关，而与电阻 R 和激励电源的角频率 ω 无关。 f_0 反映了串联电路的一个固有性质，而且对于每一个 RLC 串联电路，总有一个对应的谐振频率 f_0 。

2、电路处于谐振状态时的特性

(1) 由于谐振时回路总电抗 $X_0 = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$ ，因此，回路阻抗 Z_0 为最小值，整个电路相当于一个纯电阻回路，激励电源的电压与回路电流同相位。

(2) 由于感抗 $\omega_0 L$ 与容抗 $\frac{1}{\omega_0 C}$ 相等，所以，电感上的电压 U_L 与电容上的电压 U_C 数值相等，相位相差 180° ，电感上的电压（或电容上的电压）与激励电压之比称为品质因数 Q ，即

$$Q = \frac{U_L}{U_s} = \frac{U_C}{U_s} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{1}{\omega_0 C R} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

在 L 和 C 为定值的条件下， Q 值仅仅决定于回路电阻 R 的大小。若 $Q > 1$ ，则谐振时 $U_L = U_C > U$ 。

(3) 在激励电压值（有效值）不变的情况下，回路中的电流 $I = \frac{U_s}{R}$ 为最大值。

3、串联谐振电路的频率特性

回路的响应电流与激励电源的角频率的关系称为电流的幅频特性（表明其关系的图形为串联谐振曲线），表达式为：

$$I(\omega) = \frac{U_s}{\sqrt{R^2 + (\omega L - \frac{1}{\omega C})^2}} = \frac{U_s}{R \sqrt{1 + Q^2 (\eta - \frac{1}{\eta})^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1 + Q^2 (\eta - \frac{1}{\eta})^2}}$$

$$\text{其中: } I_0 = \frac{U_s}{R}, \quad \eta = \frac{\omega}{\omega_0}$$

当电路中的 L , C 保持不变时, 改变 R 的大小, 可以得到不同的 Q 值的电流的幅频特性曲线, 如图 19.2 所示。显然, Q 值越高即 R 值越小, 曲线越尖锐, 其选频性能提高, 而通频带变窄。反之 Q 值越小则选频性能差而通频带加宽。

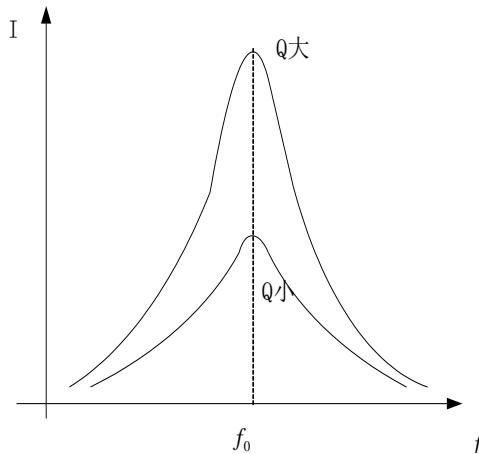


图 19.2 串联谐振电路的频率特性

为了便于比较, 而把上式归一化, 通过研究电流比 I/I_0 与角频率比 ω/ω_0 之间的函数关系, 即所谓通用幅频特性。其表达式为

$$\frac{I}{I_0} = \frac{1}{\sqrt{1+Q^2(\eta-1/\eta)^2}}$$

I_0 为谐振时的回路响应电流。显然 Q 值越大, 在一定的频率偏移下, 电流比下降得越厉害。

取电路电流 I 作为响应, 当输入电压 U_i 维持不变时, 在不同信号频率的激励下, 测出电阻 R 两端电压 U_0 之值, 则 $I=U_0/R$, 然后以 f 为横坐标, 以 I 为纵坐标, 绘出光滑的曲线, 此即为幅频特性, 亦称电流谐振曲线, 如图 19.3 所示。

幅频特性曲线可以计算得出, 或用实验方法测定。

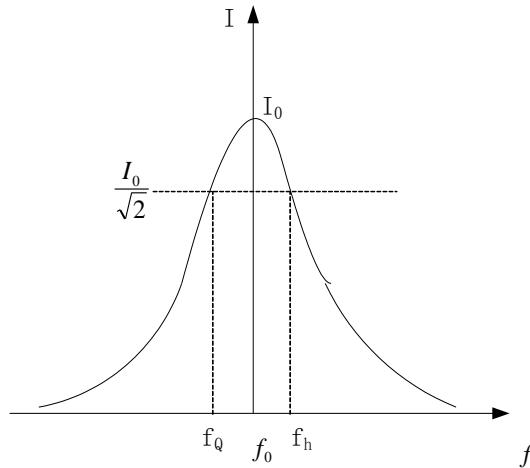


图 19.3

五、实验注意事项

- 1、使用交流毫伏表测量电压值，在读数时要注意量程是否改变。
- 2、在谐振频率附近，应加大测量密度。
- 3、每次改变信号源频率时，都要用毫伏表测量信号源的功率输出端电压，并调节“幅度调节”旋钮，使之保持 5V 不变。
- 4、使用毫伏表测量前，要先校正零点。

六、实验内容与步骤

1、按图 19.1 接线， $R = 510\Omega$ ， $L = 30mH$ ， $C = 0.1\mu F$ ，调整函数信号发生器，使其波形为正弦波，输出电压有效值为 3V，用交流毫伏表监测电阻 R 两端的电压 U_R ，调节函数信号发生器的输出频率（注意要维持信号源的输出幅度不变），当 U_R 的读数为最大值时，读的频率计上的频率值即为谐振频率 f_0 。（学生可以使用谐振电路实验电路，也可以用元器件自己搭建一个串联谐振电路。）

2、用交流毫伏表分别测量电路发生谐振时的 U_i 、 U_R 、 U_L 、 U_C 电压，记入表 19.1 中。如果用双踪示波器测量，则应注意共地问题。

表 19.1

条件	U_i/V	U_R/V	U_L/V	U_C/V
$R = 510\Omega$				
$R = 2K\Omega$				

3、调节函数信号发生器的频率输出，在 f_0 附近分别选几个测量点，测量不同频率时的 U_R 值，记入下表中，并根据计算结果，绘制谐振曲线（标出 Q 值）。

表 19.2

负载	项目	频率 f(KHZ)		
		1.0 KHZ	f_0	4.0 KHZ
$R=510\Omega$ $L=30mH$ $C=0.1\mu F$	测量值	U_R/V		
	计算值	I/mA		
		I/I_0		
		f/f_0		
$R=2K\Omega$ $L=30mH$ $C=0.1\mu F$	测量值	U_R/V		
	计算值	I/mA		
		I/I_0		
		f/f_0		

4、取 $C=0.01\mu F$ ，重复上述步骤的测量过程，并将所测数据记入自拟表格中。

七、实验报告要求

- 1、完成表格中的计算，并在坐标纸上绘制谐振曲线。
- 2、计算实验电路的通频带，谐振频率 ω_0 和品质因数 Q ，并与实测值相比较，分析产生误差的原因。
- 3、回答思考题。

八、实验思考题

- 1、怎样判断串联电路已经处于谐振状态？
- 2、对于通过实验获得的谐振曲线，分析电路参数对它的影响。
- 3、说明通频带与品质因数及选择性之间的关系。
- 4、怎样利用表 19.2 中的数据求得电路的品质因数 Q ？
- 5、电路谐振时，电感和电容的端电压比信号源的输出电压要高，为什么？

实验十八 双口网络研究

一、实验目的

- 1、测定无源线性双口网络的传输参数。
- 2、已知传输参数，作出 T 型和 Π 型等效电路。
- 3、研究双口网络及其等效电路在有载情况下的性能。

二、实验内容

1、按同时测量法（在网络的输入口加上电压，在输入、输出两个端口同时测量其电压和电流，即可求出 A、B、C、D 四个参数，此即为双端口同时测量法。）分别测定两个双口网络的传输参数 A1、B1、C1、D1 和 A2、B2、C2、D2，并列出它们的传输方程。

2、将两个双口网络级联后，用两端口分别测量法（实验前仔细阅读实验原理部分的两端口分别测量法）测量级联后等效双口网络的传输参数 A、B、C、D，并验证等效双口网络传输参数与级联的两个双口网络传输参数之间的关系。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	双口网络实验电路		1	DLM11
2	可调直流稳压电源	0~30V	1	实验箱
3	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
4	直流数字电流表		1	实验箱或万用表

四、实验原理

1、二端口的转移函数（传递函数），就是用拉氏变换形式表示的输出电压或电流与输入电压或电流之比（注意，二端口内部必须没有独立电源和附加电源）。当二端口没有外接负载及输入激励无内阻抗时，称二端口无端接。

在实际应用中，二端口常在一个复杂系统中起着耦合两部分电路的作用，并完成某种功能。因此可以认为在二端口的两个端口处通常各接有一个一端口，接于输入端口的表示具有内阻抗的电源，接于输出端口的表示负载阻抗，这时称二端口有端接。

对于有端接的二端口，它的转移函数不仅与其本身的参数有关，还与端接阻抗有关。二端口的转移函数属网络函数，只是响应和激励不是同一端口变量而已。

转移函数的极点和零点的分布与二端口内部的元件及联接方式等密切相关，而极点、零点的分布又决定了电路的特性。

2、任意一个二端口网络（如图 20.1），其外特性可通过端口电压 U_1 、 U_2 与端口电流 I_1 、 I_2 之间的关系来表征。对应的等效电路参数有开路阻抗参数，短路导纳参数，传输参数和混合参数等。

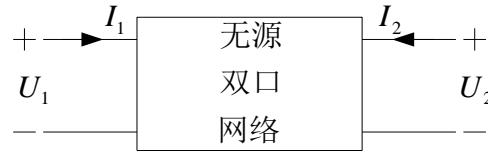


图 20.1

其中，若将二端口网络的输入端电流 I_1 和输出端电流 I_2 作自变量，电压 U_1 和 U_2 作因变量，则开路阻抗参数的特性方程为 $U_1=Z_{11}I_1+Z_{12}I_2$ ， $U_2=Z_{21}I_1+Z_{22}I_2$

若将二端口网络的输入端电压 U_1 和输出端电压 U_2 作自变量，电流 I_1 和 I_2 作因变量，则短路导纳参数的特性方程为 $I_1=Y_{11}U_1+Y_{12}U_2$ ， $I_2=Y_{21}U_1+Y_{22}U_2$

若将二端口网络的输出端电压 U_2 和电流 I_2 作自变量，输入端电压 U_1 和电流 I_1 作因变量，则传输参数的特性方程 $U_1=AU_2-BI_2$ ， $I_1=CU_2-DI_2$

若将二端口网络的输入端电流 I_1 和输出端电压 U_2 作自变量，输入端电压 U_1 和输出端电流 I_2 作因变量，则混合参数的特性方程 $U_1=H_{11}I_1+H_{12}U_2$ ， $I_2=H_{21}I_1+H_{22}U_2$

3、可以通过实验测试的方法来获得双口网络的任意一种等效参数。

3.1 根据 $I_1=Y_{11}U_1+Y_{12}U_2$ ， $I_2=Y_{21}U_1+Y_{22}U_2$

$$Y_{11} = \frac{I_1}{U_1} \quad (U_2=0) \qquad Y_{12} = \frac{I_1}{U_2} \quad (U_1=0)$$

$$Y_{21} = \frac{I_2}{U_1} \quad (U_2=0) \qquad Y_{22} = \frac{I_2}{U_2} \quad (U_1=0)$$

Y_{11} 、 Y_{21} 分别是端口 1、1' 的输入导纳和转移导纳， Y_{22} 、 Y_{12} 分别是端口 2、2' 的输入导纳和转移导纳，由于 4 个参数可以分别根据在短路条件下计算或测定出来，所以又称为短路参数。根据互易定理，对于由线性 R、L(M)、C 元件所构成的任何无源二端口来说， $Y_{21}=Y_{12}$ 总是成立的。所以，对任何一个无源线性二端口，只要三个独立的参数就足以表征它的性能了。一个二端口从任一端口看进去，它的电气特性是一样的，简称为对称二端口。对于对称二端口的 Y 参数， $Y_{11}=Y_{22}$ ，只有 2 个是独立的。

3.2 根据 $U_1=Z_{11}I_1+Z_{12}I_2$ ， $U_2=Z_{21}I_1+Z_{22}I_2$

$$Z_{11} = \frac{U_1}{I_1} \quad (I_2=0) \qquad Z_{12} = \frac{U_1}{I_2} \quad (I_1=0)$$

$$Z_{21} = \frac{U_2}{I_1} \quad (I_2=0) \qquad Z_{22} = \frac{U_2}{I_2} \quad (I_1=0)$$

Z_{11} 、 Z_{21} 分别是端口 1、1' 的开路输入阻抗和转移阻抗， Z_{22} 、 Z_{12} 分别是端口 2、2' 的开路输入阻抗和转移阻抗。

对于含有受控源的线性 R、L(M)、C 二端口，利用特勒根定理可以证明互易定理不再成立，因此 $Y_{21}\neq Y_{12}$ 、 $Z_{21}\neq Z_{12}$ 。

3.3 根据 $U_1=AU_2-BI_2$, $I_1=CU_2-DI_2$

$$A = \frac{U_1}{U_2} \quad (I_2=0) \quad B = \frac{U_1}{-I_2} \quad (U_2=0)$$

$$C = \frac{I_1}{U_2} \quad (I_2=0) \quad D = \frac{I_1}{-I_2} \quad (U_2=0)$$

A、B、C、D 称为二端口的一般参数，传输参数，T 参数，或 A 参数，其值完全决定于网络的拓扑结构及各支路元件的参数值，这四个参数表征了该双口网络的基本特征，A 是两个电压的比值，是一个无量纲的量；B 是短路转移阻抗，C 是开路转移导纳，D 是两个电流的比值，也是无量纲的。对于无源线性二端口来说，A、B、C、D 四个参数中将只有三个是独立的，根据 $Y_{21}=Y_{12}$ ，得 $AD-BC=1$ ，对于对称的二端口，由于 $Y_{11}=Y_{22}$ ，有 $A=D$ 。

由上可知，只要在网络的输入口加上电压，在两个端口同时测量其电压和电流，即可求出 A、B、C、D 四个参数，此即为双端口同时测量法。

若要测量一条远距离输电线构成的双口网络，采用同时测量法就很不方便，这时可采用分别测量法，即先在输入口加电压，而将输出口开路和短路，在输入口测量电压和电流，由传输方程可得：

$$R_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}} = \frac{A}{C} \quad (\text{令 } I_2=0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$R_{1S} = \frac{U_{1S}}{I_{1S}} = \frac{B}{D} \quad (\text{令 } U_2=0, \text{ 即输出口短路时})$$

然后在输出口加电压，而将输入口开路和短路，在输出口测量电压和电流，此时可得

$$R_{20} = \frac{U_{20}}{I_{20}} = \frac{D}{C} \quad (\text{令 } I_1=0, \text{ 即输入口开路时})$$

$$R_{2S} = \frac{U_{2S}}{I_{2S}} = \frac{B}{A} \quad (\text{令 } U_1=0, \text{ 即输入口 A 短路时})$$

$R_{10}, R_{1S}, R_{20}, R_{2S}$ 分别表示一个端口开路和短路时另一端口的等效输入电阻，这四个参

数中有三个是独立的 ($\frac{R_{10}}{R_{20}} = \frac{R_{1S}}{R_{2S}} = \frac{A}{D}$) 即 $AD-BC=1$

至此，可求四个传输参数

$$A = \sqrt{R_{10}/(R_{20}-R_{2S})}, \quad B = R_{2S} A, \quad C = A/R_{10}, \quad D = R_{20} C$$

3.4 根据 $UI=H_{11}I_1+H_{12}U_2$, $I_2=H_{21}I_1+H_{22}U_2$

$$H_{11} = \frac{U_1}{I_1} \quad (U_2=0) \quad H_{12} = \frac{U_1}{U_2} \quad (I_1=0)$$

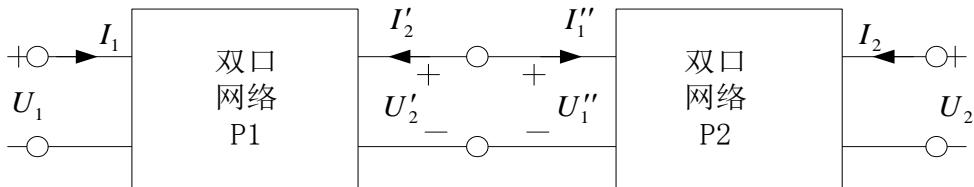
$$H21 = \frac{I_2}{I_1} \quad (U_2=0) \qquad H22 = \frac{I_2}{U_2} \quad (I_1=0)$$

$H11=1/Y11$, $H22=1/Z22$, $H21$ 为两个电流之间的比值, $H12$ 为两个电压之间的比值。

对于无源线性二端口, H 参数中只有三个是独立的, $H21=-H12$ 。对于对称的二端口, 由于 $Y11=Y22$ 或 $Z11=Z22$, 则有 $H11H22-H12H21=1$ 。

4、不管用什么形式的电路参数来表征双口网络的端口特征, 对于互易双口, 其电路参数只有三个是独立的。依此构造最简单的互易双口的等效电路, 只需三个复阻抗。通常采用互易双口的开路阻抗参数, 构造 T 型等效电路。采用互易双口的短路导纳参数, 构造 Π 型等效电路。

5、一个复杂的二端口可看成是由若干个简单的二端口按某种方式联接而成。二端口可按多种不同的方式互相联接: 级联(链联)、串联、并联。二端口的级联(如图 20.2 所示), T 为复合二端口的 T 参数矩阵, 它与二端口 $P1$ 和 $P2$ 的 T 参数矩阵的关系为 $T=T'T''$ 。当两个二端口按并联方式联接时, 两个二端口的输入电压和输出电压被分别强制为相同。 Y 为复合二端口的 Y 参数矩阵, 它与二端口 $P1$ 和 $P2$ 的 Y 参数矩阵的关系为 $Y=Y'+Y''$ 。当两个二端口按串联方式联接时, 只要端口条件仍然成立, 复合二端口的 Z 参数矩阵与串联联接的两个



二端口的 Z 参数矩阵有如下关系: $Z=Z'+Z''$ 。

图 20.2 两个双口网络级联

6、在二端口网络输出端接上一个负载阻抗 ZL , 在输入端接一内阻抗为 ZS 的电压源 US , 则二端网络的输入阻抗为输入端电压与电流之比, 即 $ZIN=\frac{U_1}{I_1}$, 根据 A 参数方程, 得

$$ZIN=\frac{AU_2-BI_2}{CU_2-DI_2} \quad \text{由于 } U_2=-ZLI_2, \text{ 所以 } ZIN=\frac{AZ_L+B}{CZ_L+D} \quad Z0=\frac{DZ_S+B}{CZ_S+A}$$

输入阻抗是双口网络参数与负载阻抗 ZL 的函数, 对于不同的双口, ZIN 与 ZL 的关系不同。对电源来说, 双口网络起到了变换其负载阻抗的作用。同理, 对负载来说, 双口网络起到了变换电源内阻抗的作用。当输入阻抗等于电源内阻抗, 输出阻抗等于负载阻抗时, 即 $ZIN=ZS=ZC1$ $Z0=ZL=ZC2$

$$\text{则有如下关系式 } ZC1=\sqrt{\frac{AB}{CD}} \quad ZC2=\sqrt{\frac{DB}{AC}}$$

可见, $ZC1$ 与 $ZC2$ 只是双口网络的函数, 定义为双口网络的特性阻抗。当有载双口的电源内阻抗和负载阻抗分别等于相应侧的特性阻抗时, 称为阻抗匹配。

7、双口网络频率特性曲线的测试可采用逐点描绘法。使用双踪示波器、交流毫伏表测试双口网络转移电压比的测试电路。

(1) 测试幅频特性曲线：保持信号发生器的输出电压 U_1 恒定，改变其频率，用交流毫伏表测出对应不同频率时输出端的输出电压 U_2 ，计算 $\frac{U_2}{U_1}$ 的值，即可描绘出以 f 为横轴， $\frac{U_2}{U_1}$ 为纵轴的幅频特性曲线。

(2) 测试相频特性曲线：保持信号发生器的输出电压恒定，改变其频率，观测相应的输入和输出波形延时 S 及信号的周期 T ，则两波形间的相位差为 $\varphi = \frac{S}{T} \times 360^\circ$ ，即可描绘出以 f 为横轴， φ 为纵轴的相频特性曲线。

(3) 李萨如图形法测 f_0 ：李萨如图形是在断开示波器内部扫描的情况下，分别在示波器的水平和垂直偏转板上加上正弦电压，在荧光屏上出现的图形。当所加的两个正弦电压频率、相位相同时，李萨如图形为一条与 X 轴成一定夹角的直线。

五、实验注意事项

1、用电流插头、插座测量电流时，要注意判别电流表的极性及选取适合的量程（根据所给的电路参数，估计电流表量程）。

2、两个双口网络级联时，应将一个双口网络 I 的输出端与另一双口网络 II 的输入端联接。

六、实验内容与步骤

双口网络实验线路如图 20.3 所示。将直流稳压电源输出电压调至 10V，作为双口网络的输入。

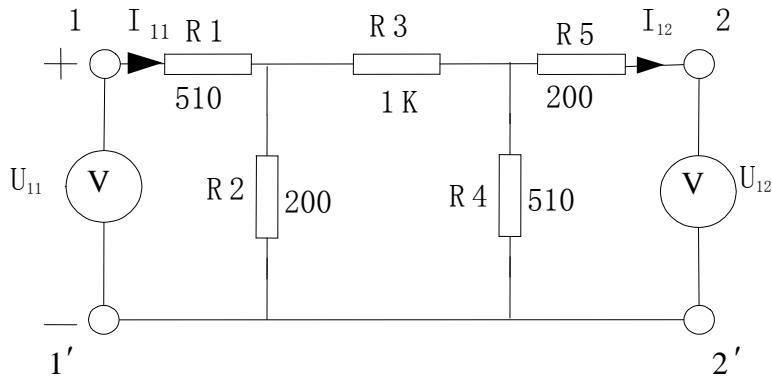


图 20.3

1、按同时测量法（在网络的输入口加上电压，在输入、输出两个端口同时测量其电压和电流，即可求出 A 、 B 、 C 、 D 四个参数，此即为双端口同时测量法。）分别测定两个双口网络的传输参数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 和 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 ，将数据记录于表 20.1，并列出它们的传输方程。

表 20.1

输出端开路 $I_{12}=0$	测 量 值			计 算 值	
	U_{110} (V)	U_{120} (V)	I_{110} (mA)	A_1	B_1
输出端短路 $U_{12}=0$	U_{11S} (V)	I_{11S} (mA)	I_{12S} (mA)	C_1	D_1

七、实验报告要求

- 1、完成对数据表格的测量和计算任务。
- 2、列写参数方程。
- 3、验证级联后等效双口网络的传输参数与级联的两个双口网络传输参数之间的关系。
- 4、总结、归纳双口网络的测试技术。
- 5、心得体会及其他。

八、实验思考题

- 1、试述双口网络同时测量法与分别测量法的测量步骤，优缺点及其适用情况。

实验十九 负阻抗变换器及其应用

一、实验目的

- 1、了解负阻抗变换器的组成原理。
- 2、学习测试负阻抗变换器的特性。
- 3、进一步研究二阶 RLC 电路的动态响应，扩展负阻抗变换器的应用。

二、实验内容

- 1、用直流电压表、毫安表测量负电阻阻值。
- 2、用示波器观察正弦激励下负电阻元件上的 u_1 、 i_1 波形。
- 3、验证用 RC 模拟电感器和用 RL 模拟有损耗电容器的特性。
- 4、用伏安法测定具有负电阻电压源的伏安特性。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	负阻抗变换器实验电路		1	DLM61
2	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
3	直流数字电压表		1	实验箱或万用表
4	直流数字电流表		1	实验箱或万用表
5	函数信号发生器		1	
6	双踪示波器		1	
7	交流毫伏表		1	
8	可调电阻	0~10K	1	实验箱

四、实验原理

1、用运算放大器组成电流倒置型负阻抗变换器的原理

图 25.1 (a) 所示的电路是一个用运算放大器组成的电流倒置型负阻抗变换器，图 (b)、(c) 为其等效电路及电路符号。

由于运放的“+”端和“-”端之间为虚短路，且运放的输入阻抗为无穷大，故有

$$\dot{U}_p = \dot{U}_n \quad \text{即} \quad \dot{U}_1 = \dot{U}_2$$

$$\text{而运放的输出电压 } \dot{U}_0 = \dot{U}_1 - \dot{I}_3 R_1 = \dot{U}_2 - \dot{I}_4 R_2 \quad \text{得} \quad \dot{I}_3 R_1 = \dot{I}_4 R_2$$

$$\text{又因 } \dot{I}_1 = \dot{I}_3, \quad \dot{I}_2 = \dot{I}_4 \quad \text{得} \quad \dot{I}_1 R_1 = \dot{I}_2 R_2$$

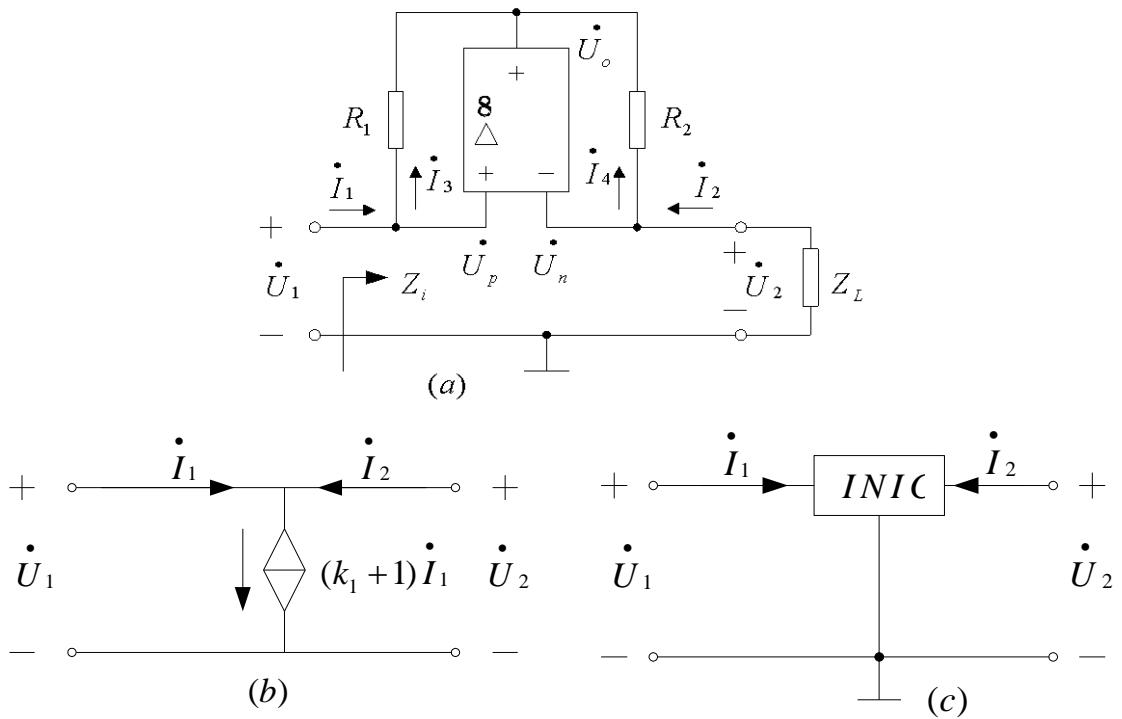


图 25.1

根据图示的 \dot{U}_2 与 \dot{I}_2 的参考方向可知

$$\dot{I}_2 = -\frac{\dot{U}_2}{Z_L}$$

因此电路的输入阻抗

$$Z_{in} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = \frac{\dot{U}_2}{\frac{R_2}{R_1} \dot{I}_2} = -\frac{R_1}{R_2} Z_L = -K Z_L \quad K = \frac{R_1}{R_2} \text{ 称为电流增益}$$

负阻抗变换器的电压电流及阻抗关系如下：

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 \quad \dot{I}_2 = K \dot{I}_1 \quad Z_{in} = -K Z_L$$

可见，这个电路的输入阻抗为负载阻抗的负值，也就是说，当负载端接入任意一个无源阻抗时，在激励端就得到一个负的阻抗元件，简称负阻元件。

在本装置中令 $R_1 = R_2 = R$ 则 $K = 1 \quad Z_{in} = -Z_L$

2、负阻抗变换器的性质

(1) 若 Z_L 为纯电阻 R ，则 $Z_{in} = -R$ 称负电阻，如图 25.2 (a) 所示

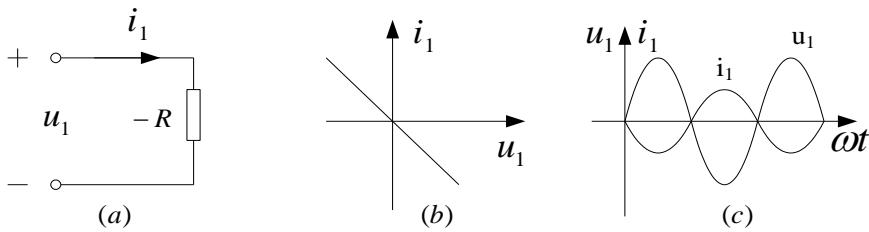


图 25.2

纯负电阻的伏安特性是一条通过坐标原点且处于 2、4 象限的直线，如图 25.2 (b) 所示，当输入电压 u_1 为正弦信号时，输入电流 i_1 与电压 u_1 相位相反，如图 25.2 (c) 所示。

$$(2) \text{ 若 } Z_L \text{ 为纯电容, 即 } Z_L = \frac{1}{j\omega c}$$

$$\text{则 } Z_{in} = -Z_L = -\frac{1}{j\omega c} = j\omega L, \text{ (这里 } L = \frac{1}{\omega^2 c} \text{)}$$

$$(3) \text{ 若 } Z_L \text{ 为纯电感, 即 } Z_L = j\omega L$$

$$\text{则 } Z_{in} = -Z_L = -j\omega L = \frac{1}{j\omega c}, \text{ (这里 } c = \frac{1}{\omega^2 L} \text{)}$$

(4) 负阻抗变换器元件 ($-Z$) 与普通的无源 R、L、C 元件 Z' 作串，并联时，其等值阻抗的计算方法与无源元件的串、并联计算公式相同，即

$$Z_{\text{串}} = -Z + Z' \quad Z_{\text{并}} = \frac{-ZZ'}{-Z + Z'}$$

3、负阻抗变换器的应用

(1) 应用负阻抗变换器，可以构成一个具有负内阻的电压源，其电路如图 25.3 (a) 所示。

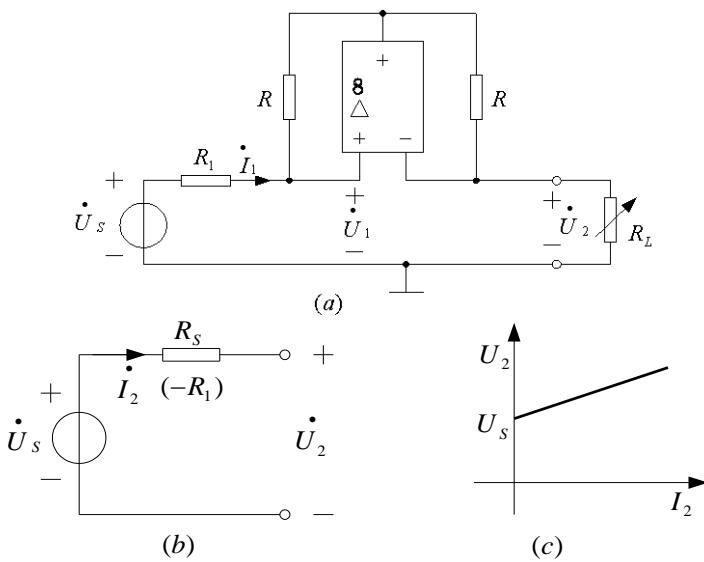


图 25.3

U_2 端为等效负内阻电压源的输出端。由于运放的“+”、“-”端之间的虚短路，即 $\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ 。

由图示的 \dot{I}_1 和 \dot{I}_2 的参考方向及电路参数，可知

$$\dot{I}_2 = -\dot{I}_1$$

故输出电压

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 = \dot{U}_s - \dot{I}_1 R_1 = \dot{U}_s + \dot{I}_2 R_1$$

可见，该电压源的内阻 R_s 等于 $(-R_1)$ ；它的输出端电压随输出电流的增加而增加，其等效电路和伏安特性曲线如图 25.3 (b)、(c) 所示。

(2) 负阻抗变换器能够起到逆变阻抗的作用，即可实现容性阻抗和感性阻抗的互换。由 RC 元件来模拟电感器的电路如图 25.4 所示，电路输入端的等效阻抗 Z_{in} 可视为电阻元件 R 与负阻元件 $-(R + \frac{1}{j\omega C})$ 相并联的结果，即

$$Z_{in} = \frac{-(R + \frac{1}{j\omega C})R}{-(R + \frac{1}{j\omega C}) + R} = \frac{-R^2 - \frac{R}{j\omega C}}{-\frac{1}{j\omega C}} = R + j\omega CR^2$$

对输入端而言，电路等效为一个线性有损耗电感器，等值电感 $L = R^2C$ 。同样，若将图中的电容器 C 换成电感器 L ，电路就等效为一个线性有损耗电容器，等值电容 $C = \frac{L}{R^2}$

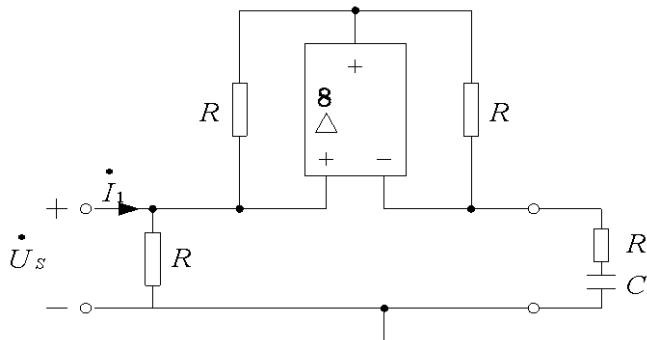


图 25.4

(3) 研究二阶动态电路 (RLC 串联电路) 的方波激励时，响应类型只能观察到过阻尼，临界阻尼和欠阻尼三种形式。若采用如图 25.5 (a) 所示的具有负内阻的方波电源作为激励源，由于电源负内阻 $(-R_s)$ 可以和电感器的电阻 rL 相抵消 (等效电路如图 25.5 (b) 所示)，则响应类型可出现 RLC 串联总电阻为零的无阻尼等幅振荡和总电阻小于零的负阻尼发散型振荡情况，如图 25.5 (c) (d) 所示。

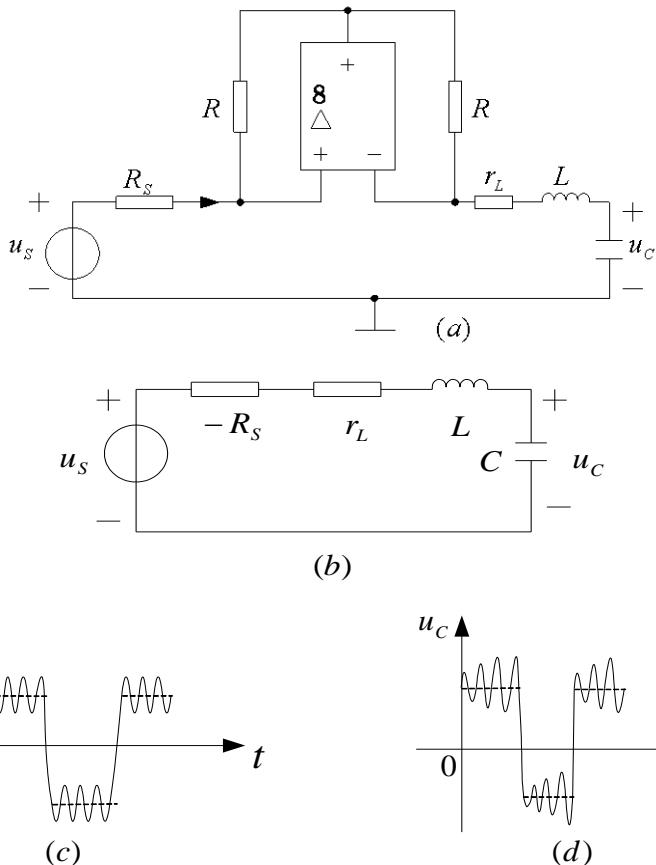


图 25.5

五、实验注意事项

- 1、在实验过程中，示波器和交流毫伏表的电源线使用两脚插头。
 - 2、运算放大器应有电源供电 ($\pm 15V$ 或者 $\pm 12V$)，其正、负极性和管脚不能接错。

六、实验内容与步骤

1、用直流电压表、毫安表测量负电阻阻值

(1) 实验前, 将实验模块插入实验基板, 若实验基板不带供电插座, 需将固定直流电源部分的 $\pm 12V$ 、GND接入模块上方的 VCC、VEE、GND 插座。

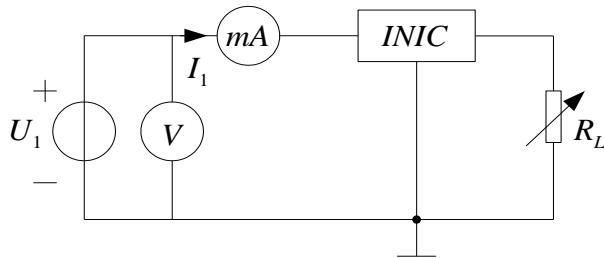


图 25.6

模用万用表测支路中电流，把万用表打到电流档，把万用表的红表笔接到电源模块的+15V，黑表笔与负阻抗变换器的红色端相连，GND与负阻抗变换器的黑色端相连。接到电路

中，测量直流电流 I_1 。实验线路如图 25.6 所示， U_1 为直流稳压电源红表笔， R_L 为可调电阻。

(2) 先断开开关 K (即不接 R_1)，改变可调电阻 R_L 的阻值，测出相应的 U_1 、 I_1 值，计算负电阻值，记录之，与理论值相比较。

$$U_1 = 2.5V, R_1 = \infty$$

表 25.1

$R_L(\Omega)$	3.2K	3.3K	3.4K	3.5K	3.6K	3.7K	31.8K	3.9K
$U_1(V)$								
$I_1(mA)$								
等效电阻 $R(\Omega)$	理论值							
	测量值							

2、用示波器观察正弦激励下负电阻元件上的 u_1 、 i_1 波形

注意：运算放大器应有电源供电，其正负极性和管脚不能接错。

参照图 25.7， u_1 接正弦激励源的输出，调定在有效值为 3V，频率为 1KHz。取 $R_1=1K$ 。

双踪示波器的公共端接在“O”点，探头 Y_1 接 a 点（采集电压 u_1 信号），探头 Y_2 接 b 点（采集电流 i_1 信号，即取 R_1 上的电压，它与电流 i_1 成正比，即 R_1 上的电压信号与电流信号波形相同）。观察 u_1 、 i_1 波形间相位关系，描绘之。

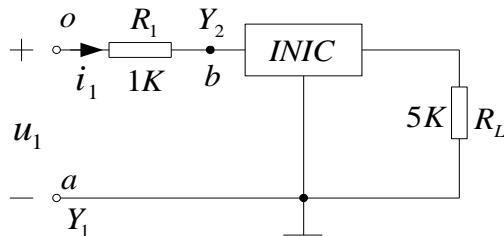


图 25.7

七、实验报告要求

- 1、整理实验数据，画出必要的曲线。
- 2、对实验结果，作出详细的解释。

八、实验思考题

- 1、什么是负阻抗变换器？有哪两种类型？具有什么性质？

实验二十 回转器及其应用

一、实验目的

- 1、熟悉回转器的基本特性，了解实际回转器的组成。
- 2、学会回转器参数测试。
- 3、熟悉回转器的实际应用——模拟电感器的测试及其应用。

二、实验内容

- 1、测量回转器的回转电导。
- 2、模拟电感器测试。
- 3、用模拟电感器组成 R、L、C 并联谐振电路。
- 4、用模拟电感器实现滤波器特性。

三、实验仪器与设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	回转器实验电路			DLM62
2	可调直流稳压电源	0~12V	1	实验箱
3	函数信号发生器		1	
4	交流毫伏表		1	
5	双踪示波器		1	
6	可调电阻	0~10K	1	实验箱
7	电阻、电容、电感		若干	DLM01 或 DLM62

四、实验原理

1、回转器的基本原理

回转器是一种有源两端口网络，其电路符号及等效电路如图 26.1。

理想回转器的导纳方程为：

$$\begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & g_0 \\ -g_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} \quad \text{或} \quad \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{g_0} \\ \frac{1}{g_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \end{bmatrix}$$

或写成

$$i_1 = g_0 u_2 = \frac{u_2}{R_0} \quad i_2 = -g_0 u_1 = -\frac{u_1}{R_0} \quad \text{或}$$

$$u_1 = -\frac{i_2}{g_0} = -R_0 i_2 \quad u_2 = \frac{i_1}{g_0} = R_0 i_1$$

式中 g_0 称为回转电导， R_0 称为回转电阻，统称为回转常数。

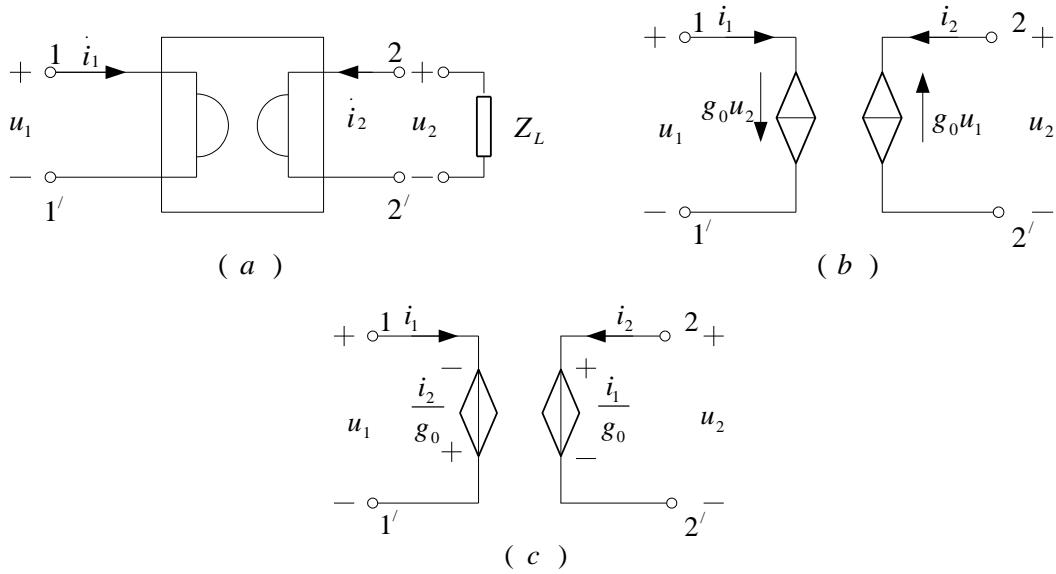


图 26.1

上式说明回转器的一个端口上的电流（或电压）是受另一端口电压（或电流）控制的，故可用压控电流源（VCCS）或流控电压源（CCVS）来等效，如图 26.1（b）（c）所示。

2、回转器的基本特性

若在回转器的输出端 $2-2'$ 接入一个阻抗 Z_L ，则在 $1-1'$ 端看，其输入阻抗 Z_{in} 可由上述方程求得：

$$Z_{in} = \frac{u_1}{i_1} = \frac{-i_2/g_0}{g_0 u_2} = \frac{1}{g_0^2} \left(-\frac{i_2}{u_2} \right) = \frac{1}{g_0^2 Z_L}$$

上式称为阻抗逆变方程。

如果输出端开路，即 $Z_L = \infty$ ，则 $Z_{in} = 0$ ，可视为短路。

如果输出端短路，即 $Z_L = 0$ ，则 $Z_{in} = \infty$ ，可视为开路。

在正弦信号激励下，当回转器接入一个电容元件负载，则其输入阻抗 $Z_{in} = \frac{1}{g_0^2 Z_L} = \frac{1}{g_0^2} \frac{1}{j\omega c} = \frac{j\omega c}{g_0^2} = j\omega L$

$$\text{等效电感 } L = \frac{c}{g_0^2}$$

即回转器能把一个电容元件回转成一个电感元件，同样也能将一个电感元件回转成一个电容元件，故回转器又称为阻抗逆变器。用电容元件来模拟电感是回转器的一个很重要的实际应用，特别是在电子技术应用领域可用以模拟大电感量的电感器。

3、回转器的实现方法

组成回转器的方法很多，本实验装置系采用两个负阻抗变换器的连接来实现回转器电路，如图 26.2 所示。

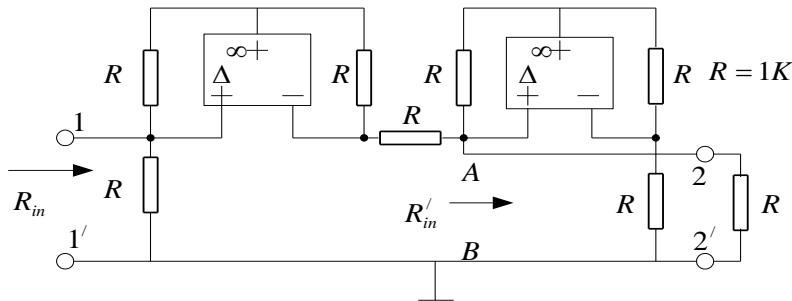


图 26.2

根据负阻抗变换器的特性，图中 A, B 两端的输入阻抗 R'_{in} 是 R_L 与 $-R$ 的并联值，即

$$R'_{in} = R_L // -R = \frac{-R_L R}{R_L - R}$$

在激励端 (1-1') 的输入阻抗则是 R 与 $-(R + R'_{in})$ 并联值，即

$$R_{in} = R // -(R + R'_{in}) = \frac{-R(R + R'_{in})}{R - (R + R'_{in})} = \frac{R^2}{R_L} = \frac{1}{g_0^2 R_L}$$

回转电导为 $g_0 = \frac{1}{R}$

[注]：利用运放的特性直接列、解电路方程，也可得到同样的结果。

4、回转器的应用

(1) 用模拟电感器组成的 RLC 并联谐振电路，如图 26.3 所示。

并联电路的幅频特性为

$$A(\omega) = \frac{1}{\sqrt{g_0^2 + (\omega C - \frac{1}{\omega L})^2}} = \frac{1}{G \sqrt{1 + Q^2 \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)^2}}$$

当电源频率 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ 时，电路发生并联谐振，

$$\text{因为 } L = \frac{C_1}{g_0^2} = R_0^2 C_1 \quad \text{所以 } f_0 = \frac{1}{2\pi R_0 \sqrt{C C_1}}$$

$$\text{电路品质因数 } Q = \frac{\omega_0 C}{G} = \frac{1}{\omega_0 L G}$$

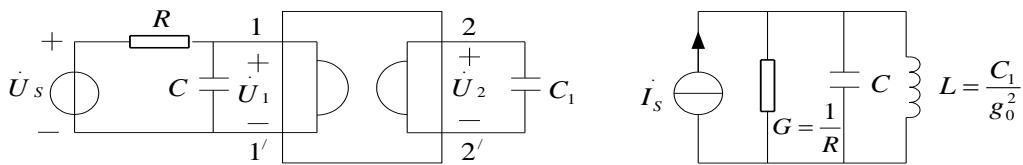


图 26.3

(2) 用回转器实现高通滤波器, 如图 26.4 所示。

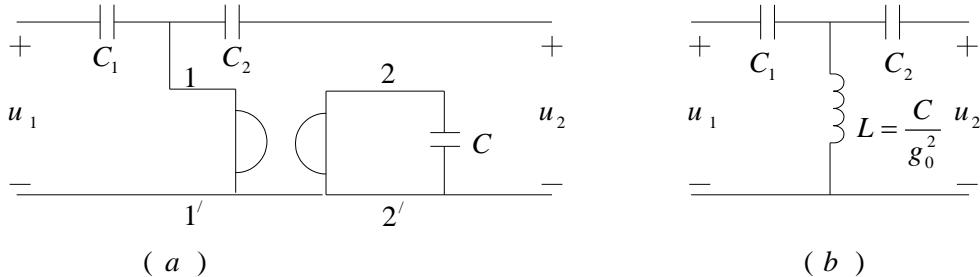


图 26.4

(3) 用回转器实现带通滤波, 如图 26.5 所示。

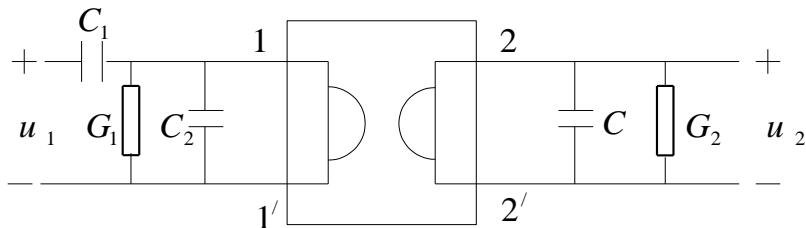


图 26.5

五、实验注意事项

1、回转器的正常工作条件是 u_1 、 i_1 的波形必须是正弦波, 为了避免运放进入饱和状态使波形失真, 必须减小信号电压的幅度, 所以在实验中, 应该用示波器监视回转器输入端口的电压波形。

2、计算回转常数时, 可用理论公式 I_1/U_2 或 I_2/U_1 , 但因实际的运放并非理想, 不可能完全平衡 (即输入为零, 输出不为零)。所以用上述两公式计算结果不完全相等, 一般取其平均值。

3、在实验观测过程中, 示波器及交流毫伏表的电源线均应使用两脚插头。

六、实验内容与步骤

1、测量回转器的回转电导

实验线路如图 26.6 所示, (注意: 运放应有电源供电)

(1) 回转器的输入端通过 R_s (电流取样电阻) 接正弦激励源, $R_s = 1K$, 为避免运放进入饱和状态, 电压 $U_s \leq 3V$ 、 $f = 1KHz$, 输出端接可变电位器 R_L , 用交流毫伏表分别测量不

同负载 R_L 下的 U_1 、 U_2 和 U_{RS} 值，计算出 I_1 、 I_2 和回转常数 g_0 ，将数据记录于表 26.1。

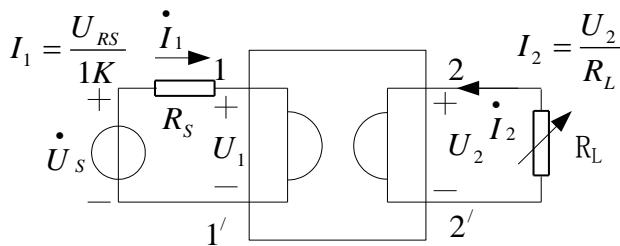


图 26.6

表 26.1

R_L ($k\Omega$)	测量值					计算值		
	U_1 (V)	U_2 (V)	U_{RS} (V)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	g_0' = $\frac{I_1}{U_2}$	g_0'' = $\frac{I_2}{U_1}$	g_0 = $\frac{g_0' + g_0''}{2}$
0.3								
0.5								
0.8								
1.0								
1.5								
2.0								

(2) 分别改变电源频率及幅值重复测量。

2、模拟电感器测试

注意：运放应有电源供电，其正、负极性和管脚不能接错。

(1) 参照图 26.6，用电容负载 $c = 0.1\mu F$ 取代可变电阻 R_L ，取正弦激励源电压 $U_s \leq 3V$ 、 $f = 1KHZ$ ，用示波器观察 u_1 与 i_1 的相位关系，描绘 u_1 与 i_1 的波形。

(2) 保持 $U_s \leq 3V$ ，改变电源频率，用交流毫伏表测量不同频率时 U_1 、 U_2 、 U_{RS} 值，计算等效电感 L 值，将数据记录于表 26.2，并用示波器观察 u_1 、 i_1 的相位关系。

表 26.2

f (Hz)	测量值			计算值			
	U_1 (V)	U_2 (V)	U_{RS} (V)	I_1 (mA)	$L' = \frac{U_1}{\omega I_1} (H)$	$L = \frac{C}{g_0^2} (H)$	$\Delta L = L' - L(H)$
200							
500							
1.0k							
1.5k							
2.0k							

3、用模拟电感器组成 R、L、C 并联谐振电路

注意：运放应有电源供电，其正、负极性和管脚不能接错。

实验线路参照图 26.3，取 $c = 1\mu F$ ， $c_1 = 0.1\mu F$ ， $R = 1K$ 、 $3K$ （10K 可调电阻）。 u_s 为

正弦激励源, 取 $U_s \leq 3V$, 并保持不变, 从低到高改变电源频率 f , 用交流毫伏表测量 $1-1'$ 端的电压 U_1 , 并找出峰值。

改变 R 的阻值(即改变回路的 Q 值), 再重复测量一次, 将数据记录于表 26.3 和表 26.4。

表 26.3

频率	
$R = 1K$	U_1 (V)
$R = 3K$	U_1 (V)

表 26.4

	品质因数	谐振频率
$R = 1K$	$Q =$	$f_0 =$
$R = 3K$	$Q =$	$f_0 =$

七、实验报告要求

- 1、根据实验数据计算本装置回转器的回转电导, 并与理论值作比较;
- 2、描绘用示波器观察到的模拟电感器的 $u_1 - i_1$ 的波形;
- 3、在同一坐标平面上描绘出两条不同 Q 值时的并联谐振电路 u_0 的幅频特性曲线;
- 4、描绘用模拟电感器实现滤波器的幅频特性曲线;
- 5、对所有实验结果作出正确的解释。

八、实验思考题

- 1、在做 RLC 并联谐振实验时, 应怎样用示波器判断电路是否处于谐振状态?