

电路分析实验 指导书

商丘师范学院物理与信息工程系编

目 录

实验一 电路测量仪器的使用	1
实验二 电路元件伏安特性的测定	4
实验三 基尔霍夫定律的验证	7
实验四 电流源和电压源的等效变换.....	10
实验五 受控源的实验研究	14
实验六 RLC 串联电路的幅频特性与谐振现象.....	18
实验七 三相电路的研究.....	21
实验八 线性无源二端口网络测试.....	25

实验一 电路测量仪器的使用

一、实验目的

- (1) 熟悉电工仪表的工作原理和分类；
- (2) 掌握仪表的误差级别和使用方法。

二、实验仪器

交直流电流表、交直流电压表、功率表、万用表、电源及附件和导线若干。

三、实验原理

1、电流的测量

测量电路中的电流值，要按被测电流的种类及量值的大小选择合适量程的交流电流表或直流电流表，要使电流表串联在被测电流的电路中，以使被测电流通过电流表，如图 1 所示。

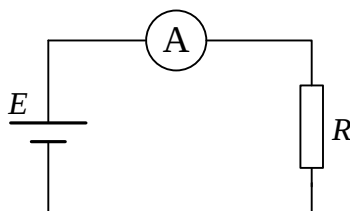


图 1 电流的测量

由于电流表本身内阻很小，切不可将电流表误接在某一有电压的元件两端，以免烧坏电流表，测量直流电流时还应注意电流表的正、负极性，应使被测电流由电流表的正极流向电流表的负极。

电工实验台为测量电流方便，配有电流测量插口和插头，使用时将各插口分别串入各被测电路，将插头两端引线接到电流表两端，需要测量某电路电流时，只要将插头分别插入各电路插口，即可测出各电路中的电流。

2、电压的测量

测量电路中的电压时，可按被测电压的种类和大小来选择合适量程的直流电压表或交流电压表，测量电压时，要将电压表并联在被测电压两端，如图 2 所示。

电压表本身内阻很大，不可将电压表串接入某一支路，以免影响整个电路的正常工作，测量直流电压时还应注意电压表的正、负极性，应将电压表的正极接到被测电压的高电位端。

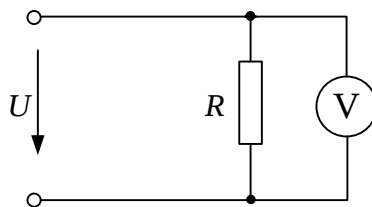


图 2 电压的测量

四、实验步骤

1、测量三相交流电源的输出电压

打开实验台电源开关，使用交流电压表测量三相交流电源输出端的各线电压和相电压：在实验台上找到 U、V、W 和 N 端子，将电压表跨接在两端（不分正负端），测量结束后，记录数据填入表 1，

并关闭实验台电源开关。

2、测试交流电压经整流后的电压

用交流电压表监视从实验台调压器输出的 20V 和 25V 交流电压，并接到整流器上，如图 1 所示，使用直流电压表测量输出的直流电压，测量时注意直流电压表的正负极，测量结束后记录数据填入表 2，并关闭实验台电源。

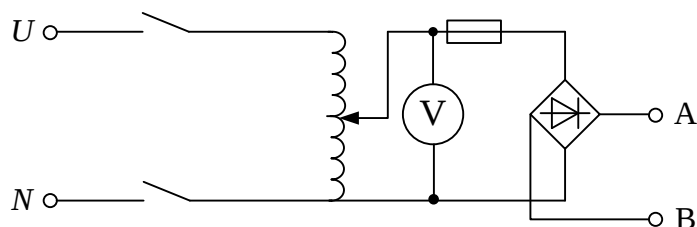


图 2 整流输出

3、测量流过负载的电流和负载两端的电压

选择三相负载，按图 3 连接线路，打开实验台电源，改变灯泡组数，测量灯泡两端电压及流过灯泡的电流，并记录数据填入表 3，测量结束后关闭实验台电源。

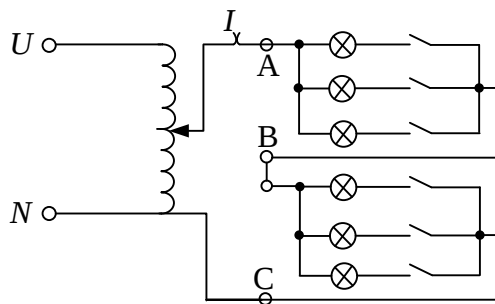


图 3

4、测量灯泡实际消耗的功率

选择三相负载，接入功率表，按图 4 连接线路，打开实验台电源，改变灯泡组数，测量灯泡实际消耗的功率，记录相应数据，填入表 4，测量结束后关闭实验台。

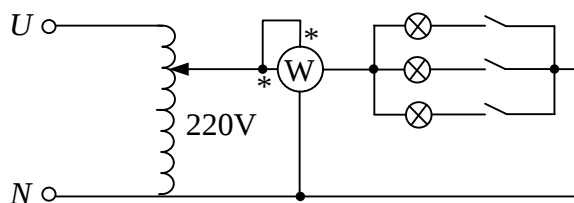


图 4

五、数据处理

根据实验步骤，测量三相电源输出电压、交流电压经整流后的输出电压、流过负载的电流和负载两端的电压及负载消耗的功率，分别将数据记录在表 1、2、3、4 中。

表 1 三相电源输出电压

项目	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	U_{UN}	U_{VN}	U_{WN}
电压						

表 2 整流输出电压

交流输入电压	直流输出电压
20V	
25V	

表 3 负载电流及负载两端电压

项目	U_{AB}	U_{BC}	I
第一组三盏 第二组一盏			
第一组二盏 第二组二盏			

表 4 三相负载的功率

额定功率	60W（亮一盏灯）	120W（亮二盏灯）	180W（亮三盏灯）
实际功率			

六、问题思考

- 1、测量电流和电压时，电流表、电压表应如何接入电路？
- 2、测量直流电流、电压时，直流电流表、直流电压表的正负极如何连接？
- 3、功率表指针出现反向偏转的现象，原因是什么？

实验二 电路元件伏安特性的测定

一、实验目的

- (1) 学习直读式仪表和晶体管稳压电源等设备的使用方法；
- (2) 学习测量线性和非线性电路元件伏安特性的方法；
- (3) 加深对线性电阻元件、非线性电阻元件伏安特性的理解，验证欧姆定律。

二、实验仪器

600 Ω 滑变电阻器各一个、伏安特性单元板、直流电压表和直流电流表或万用表各一块、直流稳压电源一台、导线若干。

三、实验原理

1、线性电阻元件

电阻元件是一种对电流呈现阻力的元件，有阻碍电流流动的性能。当电流通过电阻元件时，必然要消耗能量，就会沿着电流流动方向产生电压降。对于线性电阻元件，在电压电流取关联参考方向下，电压降的大小等于电流的大小与电阻的乘积，电压降和电流及电阻的这一关系称为欧姆定律：

$$U = IR$$

上式中 R 为线性电阻元件的电阻，为一常数。电阻两端的电压与流过电阻的电流是同时并存的，也就是说，任何时刻电阻两端的电压降只能由该时刻流过电阻的电流所确定，与该时刻前的电流的大小无关，因此电阻元件又称为“无记忆”元件。

电阻元件的特性除了用电压电流方程式表示外，还可以用伏安特性曲线来表示，对于线性电阻，其伏安特性曲线为一过原点的直线，如图 1 所示。

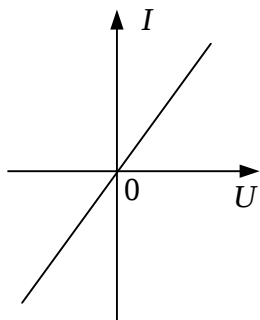


图 1 线性电阻的伏安特性曲线图

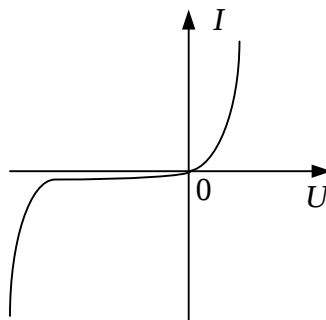


图 2 半导体二极管的伏安特性曲线

2、非线性电阻元件——半导体二极管

半导体二极管是一种非线性电阻元件，其电阻值随着端电压的大小和极性的不同而不同，当外加电压的极性与二极管的极性相同时，其阻值很小，反之二极管的电阻很大。二极管的这一性能称为单向导电性，利用二极管的单向导电性可以把交流电变换为直流电。

非线性电阻元件的电压、电流关系，不能用欧姆定律来表示，它的伏安特性一般为一曲线。图 2 给出的是一般半导体二极管的伏安特性曲线。

四、实验步骤

1、测定线性电阻的伏安特性

实验在伏安特性单元板上进行，取实验单元板上 $R = 200\Omega$ 和 $R = 2000\Omega$ 电阻作为被测元件，并按图 3 连接好线路，检查无误后，打开直流稳压电源开关，依次调节直流稳压电源的输出电压为表 1 中所列数据，并将相应的电流值记录在表 1 中。

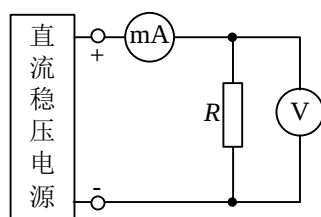


图 3 线性电阻元件伏安特性测量原理图

2、测定半导体二极管的伏安特性

（1）正向特性

按图 4 接好电路，经检查无误后，开启稳压电源，输出电压调至 2V。调节可变电阻器 R ，使电压表读数分别为表 2 中数值，并将对应的电流表读数记入表 2。为了便于作图，在曲线弯曲部分可适当多选取几个测量点。

（2）反向特性

按图 5 接好电路，经检查无误后，开启稳压电源，输出电压调至 30V。调节可变电阻器 R ，使电压表读数分别为表 3 中数值，并将对应的电流表读数记入表 3。

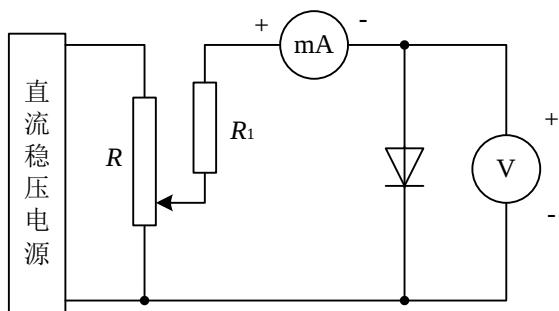


图 4 半导体二极管正向特性测量原理图

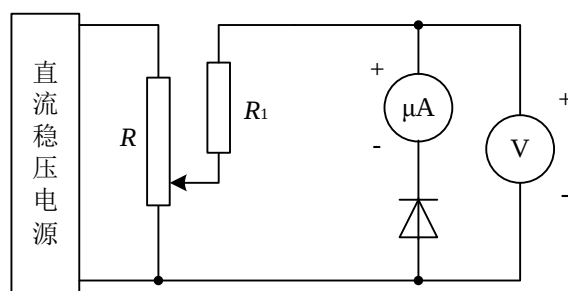


图 5 半导体二极管反向特性测量原理图

3、测量小灯泡灯丝的伏安特性

采用低压小灯泡作为测试对象，按图 6 接好线路，经检查无误后，打开直流稳压电源开关，依次调节电源输出电压为表 4 所列数值，并将相对应的电流值记录在表 4 中。

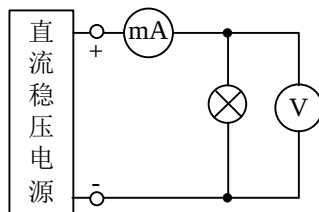


图 6 小灯泡伏安特性测定原理图

五、数据处理

根据实验步骤，完成相应测量内容，并分别将数据记录在表 1、2、3、4 中。

表 1 线性电阻元件的伏安特性

项目	U (V)	0	2	4	6	8	10
$R = 200\ \Omega$	I (mA)						
$R = 2000\ \Omega$	I (mA)						

表 2 半导体二极管正向特性

U (V)	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.55	0.6	0.65	0.7	0.75
I (mA)											

表 3 半导体二极管反向特性

U (V)	0	5	10	15	20	25	30
I (μ A)							

表 4 小灯泡的伏安特性

U (V)	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2	3	4	5	6	7	8	9
I (mA)													

六、问题思考

- 1、比较图 4、图 5 中电压表电流表接法的区别？为什么？
- 2、通过比较线性电阻与灯丝的伏安特性曲线分析这两种元件的性质有什么不同？
- 3、什么叫双向元件？白炽灯灯丝是双向元件吗？

实验三 基尔霍夫定律的验证

一、实验目的

- (1) 通过实验验证基尔霍夫定律，巩固所学理论知识；
- (2) 加深对参考方向概念的理解。

二、实验仪器

直流电路单元板，双路直流稳压电源，直流毫安表，直流电压表，指针式万用表，导线若干。

三、实验原理

1、基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是电路理论中的最基本的定律之一，概括了电路中电压和电流分别遵循的基本定律，包括基尔霍夫电流定律（KCL）和基尔霍夫电压定律（KVL）。

基尔霍夫电流定律：在集总电路中，任何时刻，对任一结点，所有流出结点的支路电流的代数和恒等于零，即： $\sum I = 0$ 。

其中，“代数和”是根据电流是流入还是流出结点来判断的，若流出结点的电流前面去“+”号，则流入结点的电流前取“-”号，电流是流入结点还是流出结点，均根据电流的参考方向判断。

基尔霍夫电压定律：在集总电路中，任何时刻，沿任一回路，有支路电压的代数和恒等于零，即： $\sum U = 0$ 。使用基尔霍夫电压定律前，需要任意指定一个回路的绕行方向，凡支路电压的参考方向与回路绕行方向一致，则该电压前取“+”号，否则取“-”号。

2、参考方向

测量某结点各支路电流时，可设流入该结点的电流方向为参考方向（反之亦可），将电流表负极接到该结点上，而将电流表的正极分别串入各条支路，当电流表指针正向偏转时，说明该支路电流是流入结点的，与参考方向相同，取其值为正；若指针反偏，说明该支路电流是流出结点的，与参考方向相反，倒换电流表极性，再测量，取其值为负。

测量某闭合回路各电压时，也假定某一绕行方向为参考方向，按绕行方向测量电压时，若电压表指针正向偏转时，则该电压取正值，反之取负值。

四、实验步骤

1、验证基尔霍夫电流定律

本实验在直流电路单元板上进行，按图 1 接好线路，图中 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 为结点 B 的三条支路电流测量插口，测量某支路电流时，将电流表的两只表笔接在该支路接口上，并将另两个接口用联接导线短接，验证 KCL 时，可按如下步骤操作：

(1) 连接好单元板两端电源，无误后打开实验台总电源，打开稳压电源，调节电源电压，电源大小可以任意选择，但需要用电压表记录下电源电压，以便实验后能给出理论计算值，调节结束后关闭稳压电源；

(2) 假设流入结点 B 的电流方向为参考方向，则初始测量时应使电流表的负极连接在 B 端；

(3) 测量流过 AB 支路的电流：短接 X_3 和 X_4 、 X_5 和 X_6 ，打开稳压电源，将电流表的正极连接在 X_1 位置，若正偏，则读取数据，若反偏，则交换电流表的正负极，读数并记为负值，填入表 1，测量结束后关闭稳压电源。

(4) 测量 BC 支路的电流：改变线路短接 X_1 和 X_2 、 X_3 和 X_4 ，打开稳压电源，将电流表的正极连接在 X_6 位置，若正偏，则读取数据，若反偏，则交换电流表的正负极，读数并记为负值，填入表 1，测量结束后关闭稳压电源。

(5) 测量 BE 支路的电流，短接 X_1 和 X_2 、 X_5 和 X_6 ，打开稳压电源，将电流表的正极连接在 X_4 位置，若正偏，则读取数据，若反偏，则交换电流表的正负极，读数并记为负值，填入表 1，关闭稳压电源。

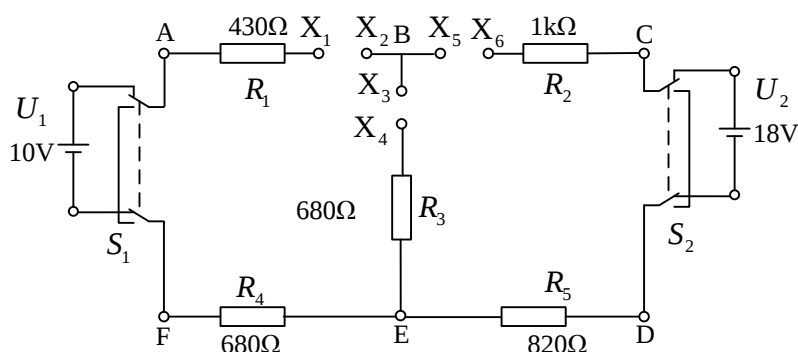


图 3 线性电阻元件伏安特性测量原理图

2、验证基尔霍夫电压定律

(1) 连线电路，短接 X_1 和 X_2 、 X_3 和 X_4 、 X_5 和 X_6 ；

(2) 选择回路 ABEF，并选择顺时针方向为参考方向，打开稳压电源，测量各支路电压；

① 测量 AB 支路电压：电压表正极在 A，负极在 B，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值；

② 测量 BE 支路电压：电压表正极在 B，负极在 E，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值；

③ 测量 EF 支路电压：电压表正极在 E，负极在 F，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值；

④ 测量 FA 支路电压：电压表正极在 F，负极在 A，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值。

(3) 选择回路 BCDE：测量过程类似过程与选择回路 ABEF 类似。

① 测量 BC 支路电压：电压表正极在 B，负极在 C，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值；

② 测量 CD 支路电压：电压表正极在 C，负极在 D，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值；

③ 测量 DE 支路电压：电压表正极在 D，负极在 E，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值；

④ 测量 EB 支路电压：电压表正极在 E，负极在 B，若指针正偏，读取数据，记为正电压值，若反偏，调换电压表极性，读取数据，记为负电压值。

将测量数据填入表 2。

五、数据处理

根据实验步骤，完成相应测量内容，并分别将数据记录在表 1、2 中。

表 1 基尔霍夫电流定律的验证

	计算值	测量值	误差
AB 支路电流 I_1 (mA)			
BE 支路电流 I_2 (mA)			
BC 直流电流 I_3 (mA)			
ΣI			

表 2 基尔霍夫电压定律的验证

	U_{AB}	U_{BE}	U_{EF}	U_{FA}	回路 ΣU	U_{BC}	U_{CD}	U_{DE}	U_{EB}	回路 ΣU
计算值										
测量值										
误差										

六、问题思考

- 1、已知某支路电流约为 3mA，现有量程分别为 5mA 和 10mA 两只电流表，应采用哪只电流表进行测量？为什么？
- 2、改变电压或电流的参考方向，对验证基尔霍夫定律有影响吗？为什么？

实验四 电压源和电流源的等效变换

一、实验目的

- (1) 通过实验加深对电流源及其外特性的认识；
- (2) 掌握电流源和电压源进行等效变换的条件。

二、实验仪器

双路直流稳压电源，直流电流、电压表各一只，电阻箱两只，电压源电流源变换单元板一块。

三、实验原理

1、电压源

电压源是有源元件，可分为理想电压源与实际电压源。理想电压源的输出电压不因负载而改变。而实际电压源的端电压随着电流变化而变化，即它具有一定的内阻值。理想电压源与实际电压源以及它们的伏安特性如图 1 所示。

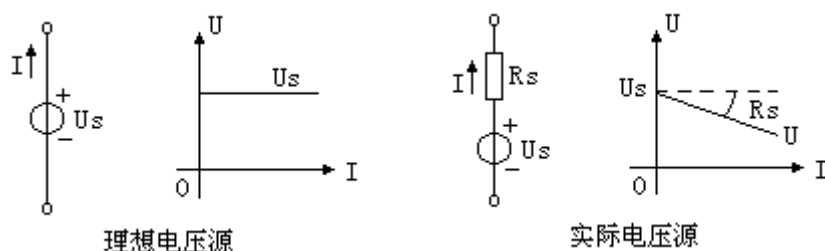


图 1 电压源

2、电流源

电流源也分为理想电流源和实际电流源。理想电流源的电流是恒定的，不因外电路不同而改变。实际电流源的电流与所联接的电路有关。当端电压增高时，通过外电路的电流要降低，端压越低，通过外电路的电流越大。实际电流源可以用一个理想电流源和一个内阻 R_s 并联来表示。图 2 为两种电流源的伏安特性。

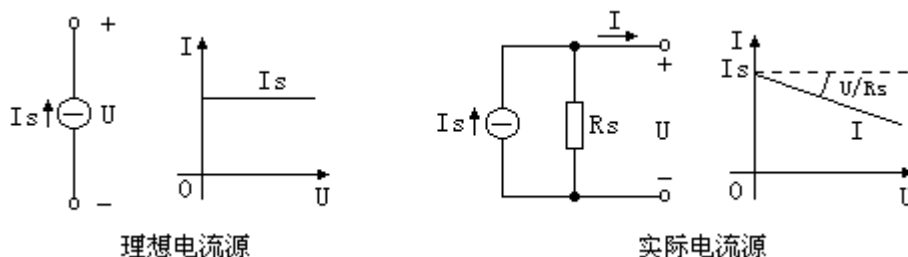


图 2 电流源

某些器件的伏安特性具有近似理想电流源的性质，如硅光电池、晶体三极管输出特性等。本实验中的电流源是用晶体管来实现的，晶体三极管在共基极联接时，集电极电流 I_C 和集电极与基极间的电压 U_{CB} 的关系如图 3 所示。由图可见，曲线的平坦部分具有恒流特性，当 U_{CB} 在一定范围变化时，集

电极电流 I_C 近乎恒定值，可以近似地将其视为理想电流源。

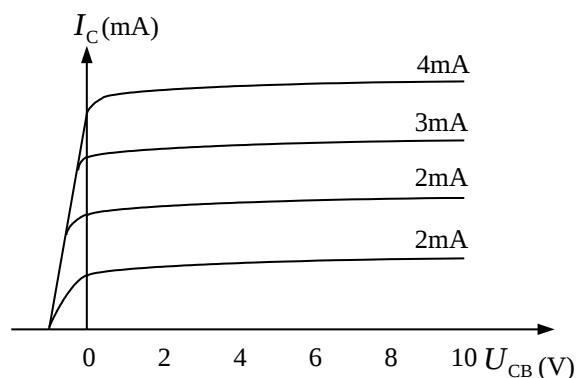


图 3

3、电源的等效变换

一个实际电源，对其外部特性来讲，可以看成为一个电压源，也可看成为一个电流源。两者是等效的，其中 $I_S = \frac{U_S}{R_S}$ 或 $U_S = I_S R_S$

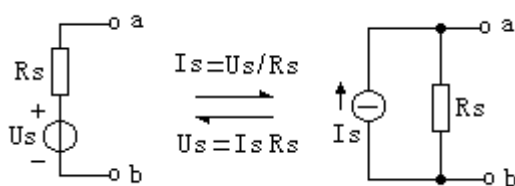


图 4 电压源电流源的等效变换

图 4 为等效变换电路，由式中可以看出来，它可以很方便地把一个参数为 U_S 和 R_S 的电压源变换为一个参数为 I_S 和 R_S 的电流源。同时可知理想电压源与理想电流源两者之间不存在等效变换的条件。

四、实验步骤

1、测试理想电流源的伏安特性

实验在电压源—电流源等效变换单元板上进行，按图 5 接好电路。

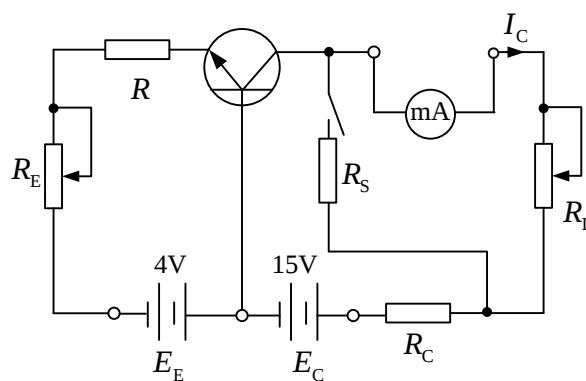


图 5 理想电流源特性的测定

图中 E_E 和 E_C 由双路直流稳压电源提供，调节电位器 R_E 使 $I_C = 8\text{mA}$ ，按表 1 中的数值从小到大依次调节电阻 R_L 的值，记录电流相对应的读数，填入表 1 中。

2、测定实际电流源的伏安特性

按图 6 接好电路，闭合与 R_S 串联的开关。当 $R_L = 0$ 时，调节 R_E 使 $I_L = 8\text{mA}$ ，改变 R_L 的值如表 2 中的数值，记录对应的负载电流 I_L 。

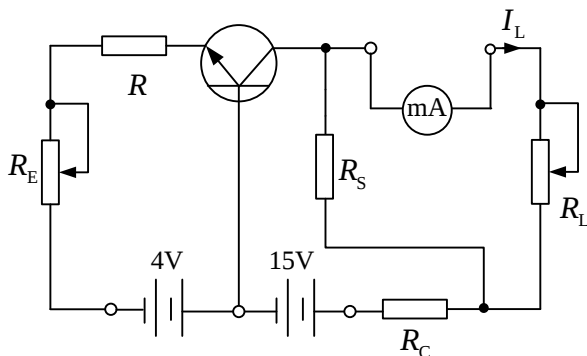


图 6 实际电流源特性的测定

3、电流源与电压源的等效变换

根据电源等效变换条件，将图 6 中所示电流源等效变换为一个电压源。等效电路如图 7 所示，其中 U_S 由直流稳压电源提供，其值使用电压表测量。 R_L 和 R_S 用电阻箱上的电阻，使 $R_S = 1\text{k}\Omega$ ， R_L 为表 3 中所示数值，记录相应的电流值 I_L ，填入表 3 中，比较表 2 和表 3 中的数据，验证实际电流源和实际电压源的等效性。

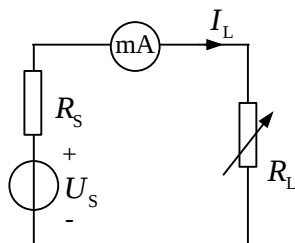


图 7 等效电压源电路

五、数据处理

根据实验步骤，完成相应测量内容，并分别将数据记录在表 1、2、3 中。

表 1 理想电流源的伏安特性

R_L (Ω)	0	200	400	600	800	1k
I_C (mA)						
计算 U (V)						

表 2 实际电流源的伏安特性

R_L (Ω)	0	200	400	600	800	1k
I_C (mA)						
计算 U (V)						

表 3 等效电压源的伏安特性

R_L (Ω)	0	200	400	600	800	1k
I_C (mA)						
计算 U (V)						

六、问题思考

- 1、电压源、电流源等效变换条件是什么？
- 2、理想电流源和理想电压源能否进行等效变换？为什么？

实验五 受控源的实验研究

一、实验目的

- (1) 通过实验加深对受控源概念的理解；
- (2) 通过对电压控制电压源（VCVS）和电压控制电流源（VCCS）的测试，加深对两种受控源的受控特性及负载特性的认识。

二、实验仪器

双路直流稳压电源，直流电流、电压表各一只，电阻箱两只，受控源实验单元板一块，导线若干。

三、实验原理

1、受控源：

受控源是对某些电路元件物理性能的模拟，反映电路中某条支路的电压或电流受电路中其他支路的电压或电流控制的关系，测量受控量与控制量之间的关系，就可以掌握受控源输入量与输出量间的变化规律，受控源具有独立源的特性，受控源的受控量仅随控制量的变化而变化，与外接负载无关。

根据控制量与受控量电压或电流的不同，受控源有四种：电压控制电压源(VCVS)、电压控制电流源(VCCS)、电流控制电压源(CCVS)、电流控制电流源(CCCS)。电路模型如图 1 所示。

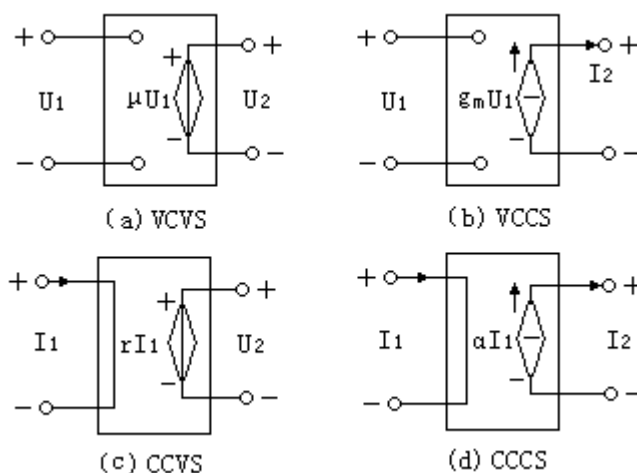


图 1 受控源电路模型

2、受控源的实现

受控源可以用运算放大器来实现。运算放大器是一种高增益，高输入阻抗和低输出阻抗的放大器。常用符号如图 2 所示，它有两个输入端 a 和 b、一个输出端 o 和一个对输入输出信号的参考接地。其中输入端 a 称为反相输入端，输入端 b 称为同相输入端。当两个输入端同时有电压作用时，输出电压

$$u_o = A(u^+ - u^-) = u_d$$

其中 A 称为运算放大器的电压放大倍数（或电压增益的绝对值），运放的这种输入称为差动输入， u_d 称为差动输入电压。

运算放大器的电路模型如图 3 所示，理想情况下有 $R_{in} = \infty$ 、 $R_o = 0$ 且 $A = \infty$ ，则有 $u^+ = u^-$ （虚

地), $I_a = I_b = 0$ (虚断)。为了简化分析, 一般假设运算放大器是在理想条件下工作的, 这样近似在许多场合下不会造成很大的误差。

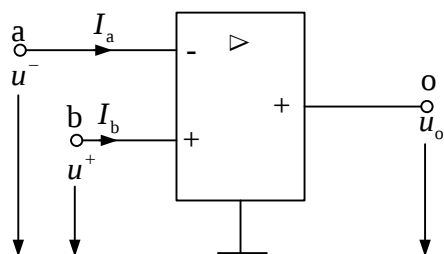


图 2 运算放大器符号

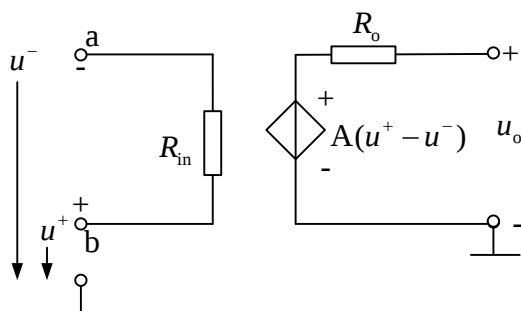


图 3 运算放大器的电路模型

3、由运放构成的电压控制电压源 (VCVS)

图 4 所示电路是一个由运算放大器构成的电压控制电压源。根据理想运放的虚断特性, 有 $I_1 = I_2$, 根据虚短特性有: $U_1 = I_1 R_1$ 、 $U_2 = -I_2 R_2$, 则得 $\frac{U_2}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1} = \mu$ (μ 无量纲, 称为电压放大倍数)。

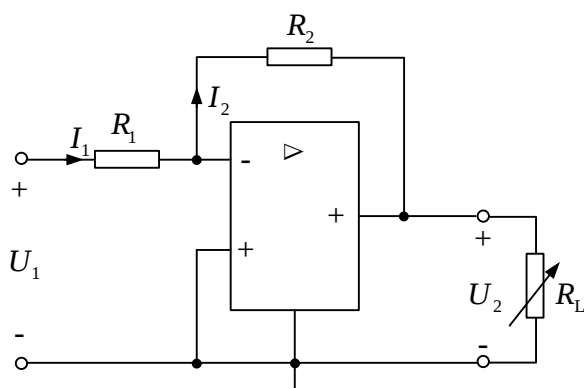


图 4 电压控制电压源电路

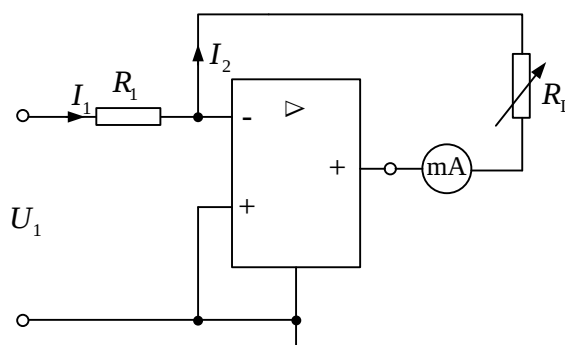


图 5 电压控制电流源电路

4、由运放构成的电压控制电流源 (VCCS)

图 5 所示电路是一个由运算放大器构成的电压控制电流源。根据理想运放的虚断特性, 有 $I_1 = I_2$, 根据虚短特性有: $U_1 = I_1 R_1$, 则得 $\frac{I_2}{U_1} = \frac{1}{R_1} = g$ (g 具有电导的量纲, 称为转移电导)。

四、实验步骤

1、测试电压控制电压源 (VCVS) 的受控特性和负载特性

按图 6 接线, 取 $R_1 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_L = 1\text{k}\Omega$ 。运算放大器是有源器件, 它工作所需要的电源由单元板自身提供, 只要将单元板上的插头插入 220V 交流电源, 单元板中的整流电流就可以向运算

放大器提供正、负 15V 电压，使运算放大器正常工作，运算放大器调零电位器在单元板侧面顶部。

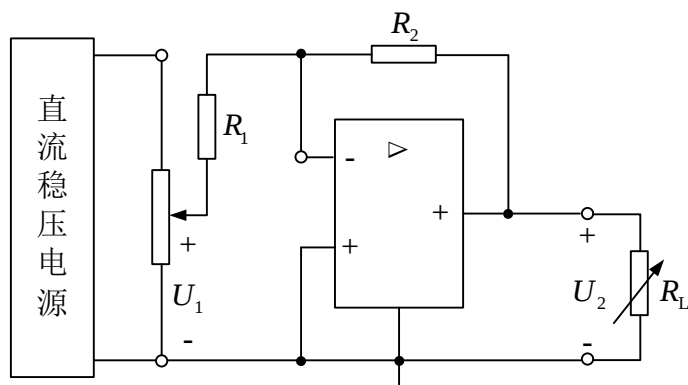


图 6 VCVS 特性测试电路

(1) 测试 VCVS 的受控特性：调节电位器，使 U_1 分别为表 1 中的数值，测量输出电压 U_2 ，填入表 1，并计算电压放大倍数 μ ，并填入表 1。

(2) 测试 VCVS 的负载特性：调节电位器，使 $U_1 = 3V$ ，改变负载 R_L 的阻值为表 2 中的数值，测量输出电压 U_2 ，填入表 2。

注意：接好电路后，将受控源单元板上的抽头插入 220V 交流电源插座中，使运算放大器正常工作。

2、测试电压控制电流源（VCCS）的受控特性和负载特性

按图 7 接线，取 $R_1 = 1k\Omega$ 、 $R_L = 1k\Omega$ 。

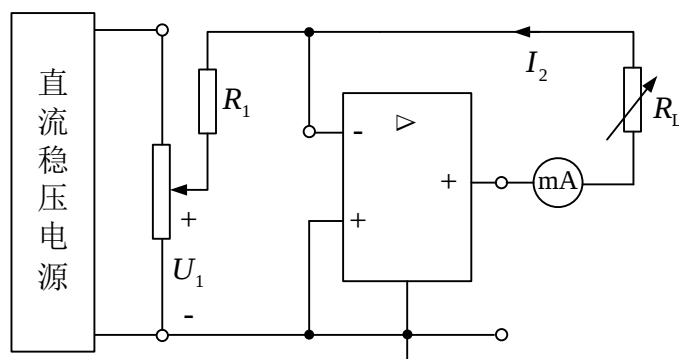


图 7 VCCS 特性测试电路

(1) 测试 VCCS 的受控特性：调节电位器，使 U_1 分别为表 3 中的数值，测量通过负载 R_L 的电流 I_2 ，填入表 3，并计算转移电导，填入表 3。

(2) 测试 VCVS 的负载特性：取 $R_1 = 1k\Omega$ ，调节电位器，使 $U_1 = 5V$ ，改变负载 R_L 的电阻为表 4 中的数值，测量通过负载的电流 I_2 ，填入表 4。

五、数据处理

根据实验步骤，完成相应测量内容，并分别将数据记录在表 1、2、3、4 中。

表 1 VCVS 的受控特性($R_1 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_L = 1\text{k}\Omega$)

U_1 (V)	1	2	3	4	5
U_2 (V)					
μ					

表 2 VCVS 的负载特性($R_1 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_2 = 1\text{k}\Omega$ 、 $U_1 = 3\text{V}$)

R_L (k Ω)	1	2	3	4	5
U_2 (V)					

表 3 VCCS 的受控特性($R_1 = 1\text{k}\Omega$ 、 $R_L = 1\text{k}\Omega$)

U_1 (V)	2	4	6	8	10
I_2 (mA)					
g					

表 4 VCCS 的负载特性($R_1 = 1\text{k}\Omega$ 、 $U_1 = 5\text{V}$)

R_L (k Ω)	0.4	0.8	1.2	1.6	2.0
I_2 (mA)					

六、问题思考

- 1、受控源和独立源有何异同？
- 2、受控源的控制特性是否适合于交流信号？

实验六 RLC 串联电路的幅频特性与谐振现象

一、实验目的

- (1) 测量 RLC 串联电路的谐振曲线，通过实验进一步掌握串联谐振的条件和特点；
- (2) 研究电路参数对谐振特性的影响。

二、实验仪器

正弦波信号发生器（由电工实验台提供）、毫伏表、频率计、动态电路单元板、导线若干。

三、实验原理

1、 RLC 串联：

RLC 串联电路如图 1 所示，交流电源电压为 $\dot{U}_s$ ，则 $\dot{U}_s = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$ ， RLC 串联电路的复

阻抗 $Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$ ，回路电流 $\dot{I} = \frac{\dot{U}_s}{Z} = \frac{\dot{U}_s}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$ ，

电流大小为： $I = \frac{U_s}{|Z|} = \frac{U_s}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$ 。

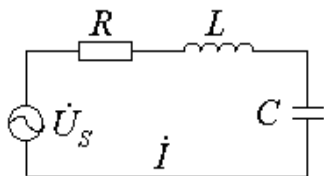


图1 RLC 串联电路

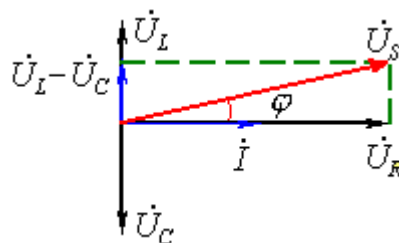


图2 RLC 串联电路矢量图

矢量图解法如图 2 所示，总电压 $\dot{U}_s$ 与电流 $\dot{I}$ 之间的相位（或 $\dot{U}_s$ 与电阻电压 $\dot{U}_R$ 的相位）为

$\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$ ，可见， RLC 串联回路相位 φ 与电源频率 f （ $\omega = 2\pi f$ ）有关。

2、 RLC 串联谐振

RLC 串联电路中，当信号的频率 f 为谐振频率 $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ ，即感抗与容抗相等（ $\omega_0 L = \frac{C}{\omega_0}$ ）

时，电路的阻抗有最小值（ $Z=R$ ），电流有最大值（ $I_0 = \frac{U_s}{|Z|} = \frac{U_s}{R}$ ），电路为纯电阻，这种现象称为

RLC 串联谐振。

RLC 串联回路电流 I 与电源的频率 f （ $\omega = 2\pi f$ ）有关， RLC 串联电路的 $u-f$ 的关系曲线称为 RLC 串联电路的幅频特性曲线，如图3所示。

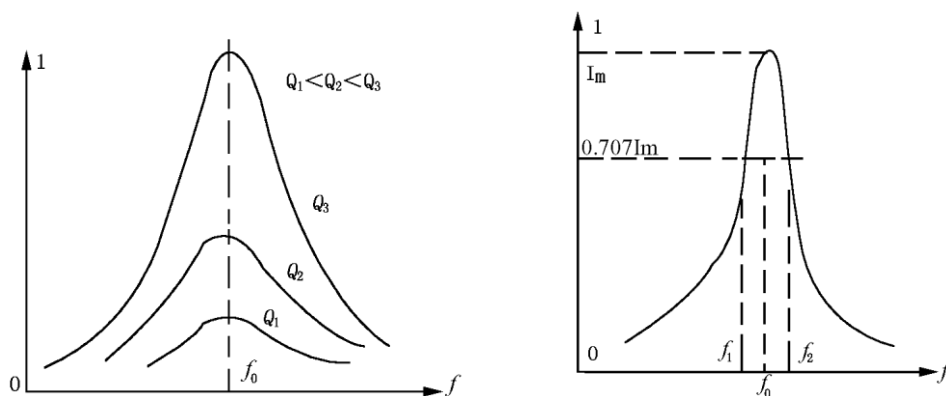


图3 幅频特性曲线

RLC 串联幅频曲线如图 3 所示，将电流 $I=0.707I_0$ 的两点频率 f_1 、 f_2 的间距定义为 RLC 回路的通频带 BW ，

$$BW = f_2 - f_1 = \frac{R}{L}。$$

谐振时，回路的感抗（或容抗）与回路的电阻之比称为回路的品质因数，以 Q 表示， $Q = \frac{\omega_0 L}{R}$ 或

$Q = \frac{1}{\omega_0 CR}$ 。当 RLC 电路中 L 、 C 不变时，电阻 R 越大，则品质因数 Q 越小，通频带越宽，滤波性能

就越差（如图 3 所示）。

谐振时，电感与电容的电压有最大值，是电源电压的 Q 倍，即

$$U_{L0} = I_0 \omega_0 L = \frac{U_s}{R} \omega_0 L = QU_s$$

$$U_{C0} = I_0 \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{U_s}{R \omega_0 C} = QU_s$$

谐振时，电容和电感两端的电压比信号源电压 U_s 大 Q 倍，有电压放大作用，要注意元件的耐压。

四、实验步骤

1、本实验电路的元件选自电工试验台配备的动态电路单元板，用导线按图 4 接好电路。图中取 $L = 33\text{mH}$ 、 $C = 0.01\mu\text{F}$ 、 $R = 620\Omega$ ， r 为电感线圈的电阻。

打开实验台开关，打开信号输入部分的电源开关，调节正弦波信号发生器的输出电压在 3V 左右，用毫伏表观测电阻 R 两端的电压 U_2 ，调节信号发生器的输出频率（此时不要连接频率计），找出输出电压 U_2 最大的频率点，用频率计测量该频率（测量过程中不能改变该频率），测量结束后断开频率计，用毫伏表校准电源电压，使之为 3V ，然后再测量电阻（电阻两端的电压需要重新测量，因为电源电压改变了）、电容、电感两端的电压，该频率即为谐振频率，记录该频率值及电阻、电容、电感两端的电

压，填入表 1 的中间位置。

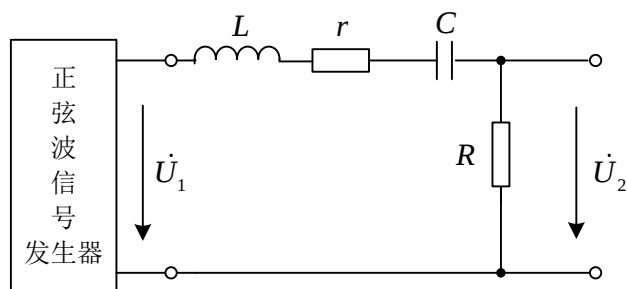


图 4 RLC 串联电路

改变电源的频率，用频率计测量，记下频率值，然后用毫伏表校准电源电压为 3V，测量电阻、电容、电感两端的电压，在谐振频率上下各选取 4 到 5 个点，频率之间的间隔可以大一些。记录频率值和电阻、电容、电感两端的电压，填入表 1。

2、改变电阻阻值，使 $R=1300\Omega$ ，电容电感保持不变 $L=33\text{mH}$ ， $C=0.01\mu\text{F}$ ，根据图 4 连接线路，打开信号输入部分的开关，重复上述测量过程，将数据记录在表 2 中。

五、数据处理

根据实验步骤，完成相应测量内容，并分别将数据记录在表 1、2 中。

表 1 RLC 串联电路的幅频特性($R=620\Omega$)

频率 (kHz)												
U_2 (V)												
U_C (V)												
U_L (V)												

表 2 RLC 串联电路的幅频特性($R=1300\Omega$)

频率 (kHz)												
U_2 (V)												
U_C (V)												
U_L (V)												

六、问题思考

- 1、实验中怎样判断电路已经处于谐振状态？
- 2、通过实验获得的谐振曲线分析电路参数对谐振的影响。

实验七 三相电路的研究

一、实验目的

- (1) 学习三相负载的连接方式，加深对三相电路中相、线电压及电流关系的理解；
- (2) 掌握功率表的连接方法和功率表测量电路功率的方法。

二、实验仪器

三相交流电源、单相功率表一块、交流电压一块、电流表一块、白炽灯泡若干、连接线若干。

三、实验原理

1、三相电路：

电源用三相四线制向负载供电，三相负载可接成星形（又称‘Y’形）或三角形（又称‘Δ’形）。

当三相对称负载作星形联接时： $U_L = \sqrt{3}U_p$ ， $I_L = I_p$

作三角形联接时，有 $U_L = U_p$ ， $I_L = \sqrt{3}I_p$

不对称三相负载作星形联接时，必须采用三相四线制，以保证三相不对称负载的每相电压等于电源的相电压（三相对称电压）。若中线断开，会导致三相负载电压的不对称，致使负载轻的那一相的相电压过高，使负载遭受损坏，负载重的一相相电压又过低，使负载不能正常工作；对于不对称负载作三角形联接时， $I_L \neq \sqrt{3}I_p$ ，但只要电源的线电压对称，加在三相负载上的电压仍是对称的，对各相负载工作没有影响。

2、三相电路功率的测量

对称三相负载情况下，有 $P = 3P_p = 3U_p I_p \cos \varphi = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$ ，不对称负载不存在该关系。

三相有功功率的测量方法有二瓦计法和三瓦计法。三瓦计法通常用于三相四线制，该方法是分别用三个瓦特计分别测量出各相消耗的有功功率，如图 1 所示，三个瓦特计所测功率数的总和，就是三相负载消耗的总功率。

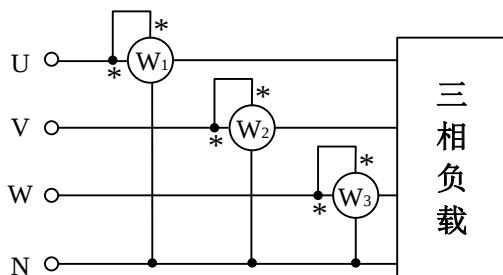


图 1 三瓦计法

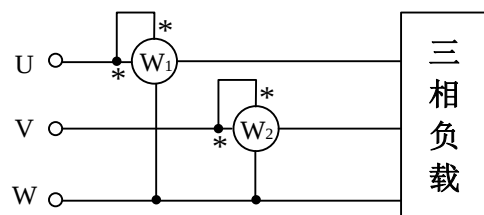


图 2 二瓦计法

二瓦计法通常用于三相三线制负载功率的测量，如图 2 接线，三相电路的总功率等于两个功率表读数的代数和，即 $P = P_1 \pm P_2$ 。当负载的功率因数 $\cos \varphi < 0.5$ 时（例如电动机空载或轻载运行），测量时会出现一个功率表指针反偏现象，无法读数，此时可拨动面板上的极性开关（有些功率表无此开关，可调换电流线圈的两个接线端），使指针正偏，但读数应取负值。本次实验为电阻性电灯负载，不会出现负值，测量的总功率就为 $P = P_1 + P_2$ 。

3、相序的测定

用一只电容器和两组灯联接成星形不对称三相负载电路。便可测量三相电源的相序，如图 3 所示。电容器接 A 相，由负载中点的偏移电位表达式可知，中点电位偏移角 φ 的变化范围在 I、II 象限之间，因此 $U_B > U_C$ ，则灯较亮的为 B 相，灯较暗的为 C 相。

相序是相对的，任何一相为 A 相时，B 相和 C 相便可确定。

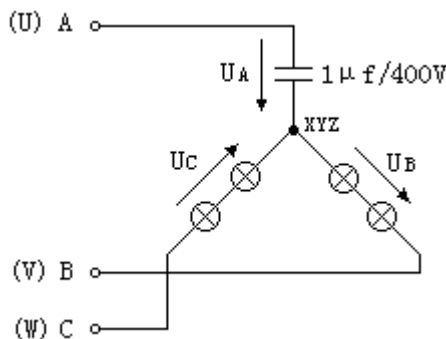


图 3 相序测定原理图

3、测量仪表的连接

为充分利用仪表、保证仪表的安全使用及更方便地进行测量，本实验中将电流表、电压表和功率表接成图 4 所示电路，这样便可以用一个瓦特计、一个电流表和一个电压表同时测量各线（相）的电压、电流和功率。用这个测量电路进行测量时，只要将电流测量插口插入待测电路的电流插口中，并将电压表笔接到待测电压接点上，就可以同时读出电压、电流和功率，使用十分方便。

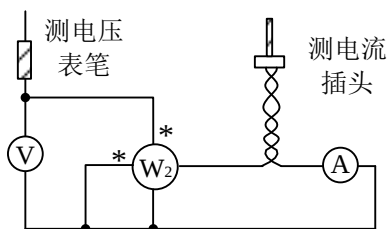


图 4

四、实验步骤

1、按照图 4 连接电压表、电流表和功率表；

2、星形连接负载

选取灯泡负载单元板、电流测量插口单元板及三相负荷开关单元板，安放在实验台框架的合适位置上，按图 5 将灯泡负载连接成星形负载的实验电路。

(1) 每相均开三盏灯，构成对称负载情况，测量各线电压、线电流、相电压、中线电流及用三瓦计法测量的三相电功率，并将测得的数据填入表 1 中。

(2) 将三相负载分别改为 1、2、3 盏灯，接上中线，观察各灯泡亮度是否有差别，然后拆除中线（断开串接在中线上的开关），再观察各灯泡亮度是否有差别，测量无中线时各线电压、线电流、相电压及二瓦计法测量的三相电功率，并测量电源中性点和负载中性点的电位差，将测量数据填入表 2。

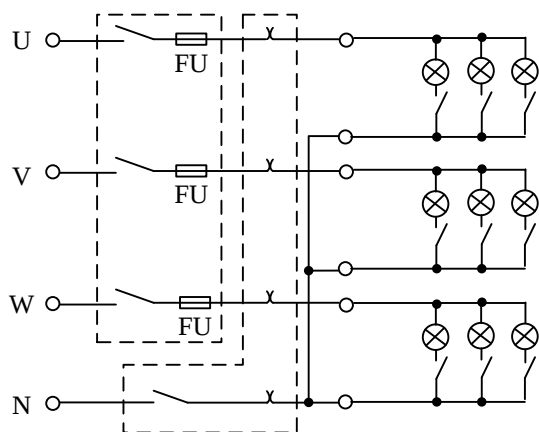


图 5 星形负载实验电路

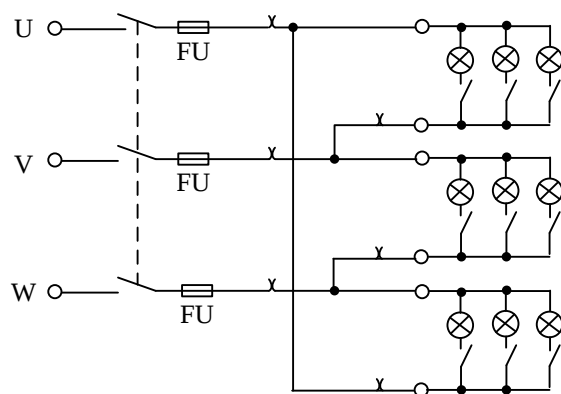


图 6 三角形负载实验电路

3、三角形负载

按图 6 接好电路。

(1) 令每相均开 3 盏灯（对称负载情况），确认无误后，打开实验台总开关，闭合三相负荷开关，测量各线电压（两条端线之间的电压）、线电流（端线中的电流，即插口位置的电流）、相电流（每一相中的电流）、相电压（相电压等于线电压）、功率（两瓦计法），将测量数据填入表 3。

(2) 改变负载情况，分别开 1、2、3 盏灯，测量各线电压、线电流、相电流（相电流与灯泡数成正比）、相电压（相电压等于线电压）、功率（两瓦计法），将测量数据填入表 4。

五、数据处理

根据实验步骤，完成相应测量内容，并分别将数据记录在表 1、2、3、4 中。

表 1 对称星形负载

负载性质	中线	相电压			线电压			线（相）电流			I_N	功率			
		U_U	U_V	U_W	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	I_U	I_V	I_W		P_U	P_V	P_W	P
对称	有														

表 2 不对称星形负载

负载性质	中线	相电压			线电压			线（相）电流			$U_{NN'}$	功率		
		U_U	U_V	U_W	U_{UV}	U_{VW}	U_{WU}	I_U	I_V	I_W		P_{UW}	P_{VW}	P
不对称	无													

表 3 对称三角形负载

负载性质	中线	线（相）电压			相电流			线电流			功率		
		U_U	U_V	U_W	I_{UV}	I_{VW}	I_{WU}	I_U	I_V	I_W	P_{UW}	P_{VW}	P
对称	无												

表 4 不对称三角形负载

负载 性质	中 线	线（相）电压			相电流			线电流			功率		
		U_U	U_V	U_W	I_{UV}	I_{VW}	I_{WU}	I_U	I_V	I_W	P_{UW}	P_{VW}	P
不对 称	无												

六、问题思考

- 1、中线的作用是什么？什么情况下可以省略？什么情况下不可少？
- 2、能否用二瓦计法测量三相四线制不对称负载的功率？为什么？

实验八 线性无源二端口网络测试

一、实验目的

- (1) 学习测定无源二端口网络参数（A 参数）的方法；
- (2) 通过实验研究二端口网络参数的特性及其等值电路。

二、实验仪器

直流稳压电源，直流电路单元板，直流电压表，直流电流表，导线若干。。

三、实验原理

对于任何一个线性网络，关心的往往只是输入端口和输出端口电压和电流间的相互关系，可通过实验测定方法求取一个极其简单的等值双口电路来替代原网络，此即为“黑盒理论”的基本内容。

1、参数方程

一个双口网络两端口的电压和电流四个变量之间的关系，可以用多种形式的参数方程来表示。本实验采用输出口的电压 $\dot{U}_2$ 和电流 $\dot{I}_2$ 作为自变量，以输入口的电压 $\dot{U}_1$ 和电流 $\dot{I}_1$ 作为因变量，所得的方程称为双口网络的传输参数方程，如图 1 所示的无源线性双口网络（又称为四端网络）的传输方程为

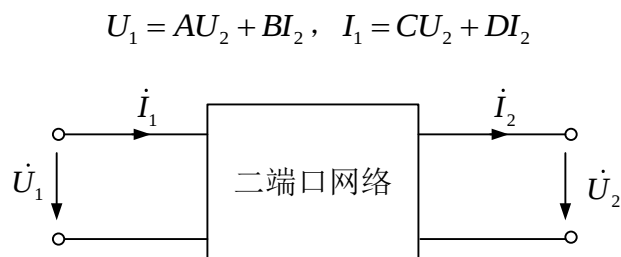


图 1 无源二端口网络

式中的 A 、 B 、 C 、 D 称为双口网络的一般参数、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性，它们的含义是

$$A = \frac{U_{10}}{U_{20}} \quad (\text{令 } I_2 = 0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$B = \frac{U_{1S}}{I_{2S}} \quad (\text{令 } U_2 = 0, \text{ 即输出口短路时})$$

$$C = \frac{I_{10}}{U_{20}} \quad (\text{令 } I_2 = 0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$D = \frac{I_{1S}}{I_{2S}} \quad (\text{令 } U_2 = 0, \text{ 即输出口短路时})$$

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。

2、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 and 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测量，而将输入口开路 and 短路，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：

$$\frac{R_{10}}{R_{20}} = \frac{R_{1S}}{R_{2S}} = \frac{A}{D} \quad \text{即 } AD - BC = 1$$

至此，可求出四个传输参数。

四、实验步骤

本实验以直流电路单元板为二端口网络实验电路，如图 2 所示。

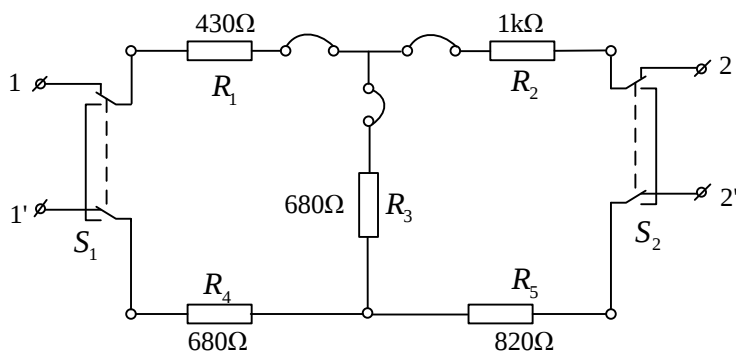


图 2 二端口网络实验电路

1、采用双端口同时测量法测量二端口网络参数

调节稳压电源输出电压为 $U_1 = 15V$ ，令端口 2 开路（端口 2 的开关处于打开状态，且不能连接电源），端口 1 的开关打到连接电源侧，测量开路时端口 2 中的电压 U_{20} 和端口 1 中的电流 I_{10} 。

令端口 2 短路（闭合到短路线一侧），测量开路时端口 2 中的电流 I_{2S} 和端口 1 中的电流 I_{1S} 。

记录相应的测量数据，填入表 1。

2、采用两个端口分别测量的方法测量二端口网络参数

令端口 2 开路，端口 1 接电源，打开稳压电源，使端口 1 的电压为 15V，测量端口 1 的电流，再

令端口 2 短路，测量端口 1 的电流。

端口 2 接电源，端口 1 开路，打开稳压电源，使端口 2 的电压为 15V，测量端口 2 的电流，再令端口 1 短路，测量端口 2 的电流，测量结束后关闭稳压电源。

记录相应的测量数据，填入表 2。

五、数据处理

根据实验步骤，完成相应测量内容，并分别将数据记录在表 1、2 中。

表 1

端口 2 开路	U_{20} (V)	I_{10} (mA)
端口 2 短路	I_{1S} (mA)	I_{2S} (mA)

表 2

$U_1=15V$	端口 2 开路	端口 2 短路
	I_{10} (mA)	I_{1S} (mA)
$U_2=15V$	端口 2 开路	端口 2 短路
	I_{2S} (mA)	I_{2S} (mA)

六、问题思考

- 1、根据测量结果判断该二端口网络是否为互易网络。
- 2、写出该二端口网络的 Y 参数。