

(I) 常规实验

实验一 基本电工仪表的使用及测量误差的计算

一、实验目的

1. 熟悉实验台上各类电源及各类测量仪表的布局和使用方法。
2. 掌握指针式电压表、电流表内阻的测量方法。
3. 熟悉电工仪表测量误差的计算方法。

二、原理说明

1. 为了准确地测量电路中实际的电压和电流, 必须保证仪表接入电路后不会改变被测电路的工作状态。这就要求电压表的内阻为无穷大; 电流表的内阻为零。而实际使用的指针式电工仪表都不能满足上述要求。因此, 当测量仪表一旦接入电路, 就会改变电路原有的工作状态, 这就导致仪表的读数与电路原有的实际值之间出现误差。这种测量误差值的大小与仪表本身内阻值的大小密切相关。只要测出仪表的内阻, 即可计算出由其产生的测量误差。以下介绍几种测量指针式仪表内阻的方法。

2. 用“分流法”测量电流表的内阻

如图 1-1 所示。A 为被测内阻(R_A)的直流电流表。测量时先断开开关 S, 调节电流源的输出电流 I 使 A 表指针满偏转。然后合上开关 S, 并保持 I 值不变, 调节电阻箱 R_B 的阻值, 使电流表的指针指在 1/2 满偏转位置, 此时有

$$I_A = I_S = I/2$$

$$\therefore R_A = R_B \parallel R_1$$

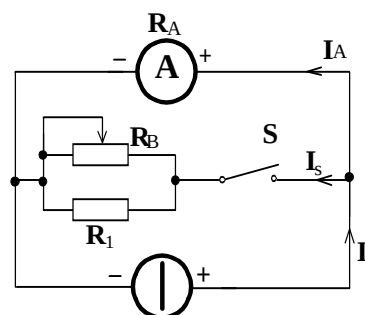
R_1 为固定电阻器之值, R_B 可由电阻箱的刻度盘上读得。

3. 用分压法测量电压表的内阻。

如图 1-2 所示。V 为被测内阻(R_V)的电压表。测量时先将开关 S 闭合, 调节直流稳压电源的输出电压, 使电压表 V 的指针为满偏转。然后断开开关 S, 调节 R_B 使电压表 V 的指示值减半。此时有: $R_V = R_B + R_1$

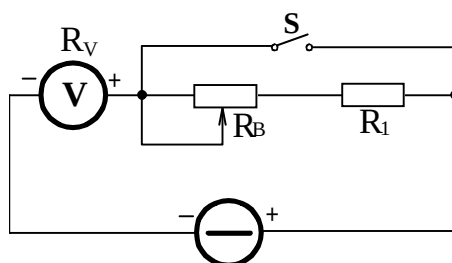
电压表的灵敏度为: $S = R_V/U$ (Ω/V)。式中 U 为电压表满偏时的电压值。

4. 仪表内阻引入的测量误差 (通常称之为方法误差, 而仪表本身结构引起的误差称为仪表基本误差) 的计算。



可调电流源

图 1-1



可调稳压源

图 1-2

(1) 以图 1-3 所示电路为例, R_1 上的电压为 $U_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U$ 。

现用一内阻为 R_V 的电压表来测量 U_{R1} 值, 当 R_V 与 R_1 并联后,

$$R_{AB} = \frac{R_V R_1}{R_V + R_1}, \text{ 以此来替代上式中的 } R_1, \text{ 则得}$$

$$U'_{R1} = \frac{R_V + R_1}{R_V R_1} U \quad \text{绝对误差为 } \Delta U = U'_{R1} - U_{R1} = \frac{-R_1^2 R_2 U}{R_V(R_1^2 + 2R_1 R_2 + R_2^2) + R_1 R_2(R_1 + R_2)}$$

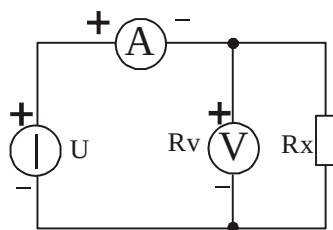
$$\frac{1}{\frac{R_V R_1}{R_V + R_1} + R_2}$$

若 $R_1 = R_2 = R_V$, 则得 $\Delta U = -\frac{U}{6}$

相对误差 $\Delta U\% = \frac{U'_{R1} - U_{R1}}{U_{R1}} \times 100\% = \frac{-U/6}{U/2} \times 100\% = -33.3\%$

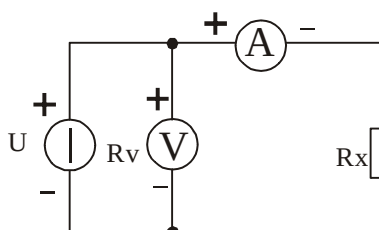
由此可见, 当电压表的内阻与被测电路的电阻相近时, 测得值的误差是非常大的。

(2) 伏安法测量电阻的原理为: 测出流过被测电阻 R_X 的电流 I_R 及其两端的电压降 U_R , 则其阻值 $R_X = U_R / I_R$ 。图 1-4 (a)、(b) 为伏安法测量电阻的两种电路。设所用电压表和电流表的内阻分别为 $R_V = 20k\Omega$, $R_A = 100\Omega$, 电源 $U = 20V$, 假定 R_X 的实际值为 $R = 10k\Omega$ 。现在来计算用此两电路测量结果的误差。



(a)

图 1-4



(b)

电路 (a): $I_R = \frac{U}{R_A + \frac{R_V R_X}{R_V + R_X}} = \frac{20}{0.1 + \frac{10 \times 20}{10 + 20}} = 2.96(mA)$

$$U_R = I_R \cdot \frac{R_V R_X}{R_V + R_X} = 2.96 \times \frac{10 \times 20}{10 + 20} = 19.73(V)$$

$$\therefore R_X = \frac{U_R}{I_R} = \frac{19.73}{2.96} = 6.666 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

$$\text{相对误差 } \Delta a = \frac{R_X - R}{R} = \frac{6.666 - 10}{10} \times 100\% = -33.4\%$$

$$\text{电路 (b) : } I_R = \frac{U}{R_A + R_X} = \frac{20}{0.1 + 10} = 1.98(mA)$$

$$U_R = U = 20(V)$$

$$\therefore R_X = \frac{U_R}{I_R} = \frac{20}{1.98} = 10.1 \text{ (k}\Omega\text{)}$$

$$\text{相对误差 } \Delta b = \frac{10.1 - 10}{10} \times 100\% = 1\%$$

由此例，既可看出仪表内阻对测量结果的影响，也可看出采用正确的测量电路也可获得较满意的结果。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~30V	二路	
2	可调恒流源	0~500mA	1	
3	指针式万用表	MF-47 或其它	1	自备
4	可调电阻箱	0~9999.9Ω	1	HE-19
5	电阻器	按需选择		HE-11/ HE-11A

四、实验内容

1. 根据“分流法”原理测定指针式万用表（MF-47 型或其它型号）直流电流 0.5mA 和 5mA 档量限的内阻。线路如图 1-1 所示。R_B 可选用 HE-19 中的电阻箱（下同）。

被测电流表量限	S 断开时的表读数 (mA)	S 闭合时的表读数 (mA)	R _B (Ω)	R ₁ (Ω)	计算内阻 R _A (Ω)
0.5 mA					
5 mA					

2. 根据“分压法”原理按图 1-2 接线，测定指针式万用表直流电压 2.5V 和 10V 档量程的内阻。

被测电压表 量 限	S 闭合时表读 数 (V)	S 断开时表读 数 (V)	R_B (k Ω)	R_1 (k Ω)	计算内阻 R_V (k Ω)	S (Ω/V)
2.5V						
10V						

3. 用指针式万用表直流电压 10V 档量程测量图 1-3 电路中 R_1 上的电压 U'_{R1} 之值，并计算测量的绝对误差与相对误差。

U	R_2	R_1	R_{10V} (k Ω)	计算值 U_{R1} (V)	实测值 U'_{R1} (V)	绝对误差 ΔU	相对误差 ($\Delta U/U_{R1}$) $\times$ 100%
12V	10k Ω	50k Ω					

五、实验注意事项

1. 实验台上配有实验所需的恒流源，在开启电源开关前，应将恒流源的输出粗调拨到 2mA 档，输出细调旋钮应调至最小。按通电源后，再根据需要缓慢调节。

2. 当恒流源输出端接有负载时，如果需要将其粗调旋钮由低档位向高档位切换时，必须先将其细调旋钮调至最小。否则输出电流会突增，可能会损坏外接器件。

3. 实验前应认真阅读直流稳压电源的使用说明书，以便在实验中能正确使用。

4. 电压表应与被测电路并联使用，电流表应与被测电路串联使用，并且都应注意极性与量程的合理选择。

5. 本实验仅测试指针式仪表的内阻。由于所选指针表的型号不同，本实验中所列的电流、电压量程及选用的 R_B 、 R_1 等都会不同。实验时请按选定的表型自行确定。

六、思考题

1. 根据实验内容 1 和 2，若已求出 0.5mA 档和 2.5V 档的内阻，可否直接计算得出 5mA 档和 10V 档的内阻？

2. 用量程为 10A 的电流表测实际值为 8A 的电流时，实际读数为 8.1A，求测量的绝对误差和相对误差。

七、实验报告

1. 列表记录实验数据，并计算各被测仪表的内阻值。

2. 计算实验内容 3 的绝对误差与相对误差。

3. 对思考题的计算。

4. 其它（包括实验的心得、体会及意见等）。

实验二 减小仪表测量误差的方法

一、实验目的

1. 进一步了解电压表、电流表的内阻在测量过程中产生的误差及其分析方法。
2. 掌握减小因仪表内阻所引起的测量误差的方法。

二、原理说明

减小因仪表内阻而产生的测量误差的方法有以下两种

1. 不同量程两次测量算法

当电压表的灵敏度不够高或电流表的内阻太大时，可利用多量程仪表的不同量程对同一被测量值进行两次测量，用所得读数经计算后可得到较准确的结果。

如图 2-1 所示电路，欲测量具有较大内阻 R_0 的电动势 U_S 的开路电压 U_0 时，如果所用电压表的内阻 R_v 与 R_0 相差不大时，将会产生很大的测量误差。

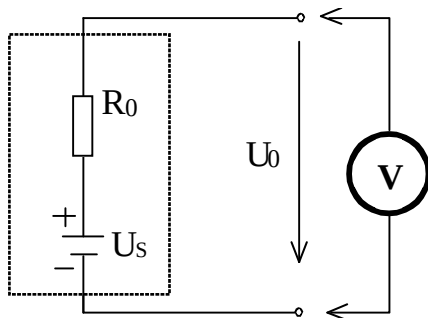


图 2-1

设电压表有两档量程， U_1 、 U_2 分别为在这两个不同量程下测得的电压值，令 R_{v1} 和 R_{v2} 分别为这两个相应量程的内阻，则由图 2-1 可得出

$$U_1 = \frac{R_{v1}}{R_0 + R_{v1}} \times U_S \quad U_2 = \frac{R_{v2}}{R_0 + R_{v2}} \times U_S$$

由以上两式可解得 U_S 和 R_0 。其中 U_S (即 U_0) 为：

$$U_S = \frac{U_1 U_2 (R_{v2} - R_{v1})}{U_1 R_{v2} - U_2 R_{v1}}$$

由此式可知，当电源内阻 R_0 与电压表的内阻 R_v 相差不大时，通过上述的两次测量结果，即可计算出开路电压 U_0 的大小，且其准确度要比单次测量好得多。

对于电流表，当其内阻较大时，也可用类似的方法测得较准确的结果。如图 2-2 所示

电路，不接入电流表时的电流为 $I = \frac{U_S}{R}$ ，

接入内阻为 R_A 的电流表 A 时，电路中的电流变为 $I' = \frac{U_S}{R + R_A}$

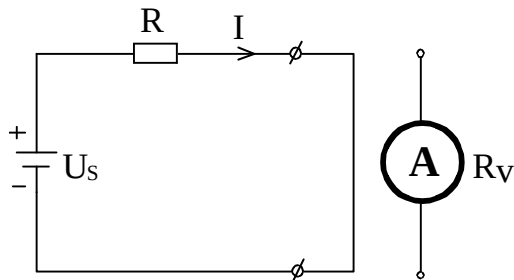


图 2-2

如果 $R_A = R$ ，则 $I' = I/2$ ，出现很大的误差。

如果用有不同内阻 R_{A1} 、 R_{A2} 的两档量程的电流表作两次测量并经简单的计算就可得到较准确的电流值。

按图 2-2 电路，两次测量得

$$I_1 = \frac{U_S}{R + R_{A1}}$$

$$I_2 = \frac{U_S}{R + R_{A2}}$$

由以上两式可解得 U_S 和 R ，进而可得：
$$I = \frac{U_S}{R} = \frac{I_1 I_2 (R_{A1} - R_{A2})}{I_1 R_{A1} - I_2 R_{A2}}$$

2. 同一量限两次测量算法

如果电压表（或电流表）只有一档量限，且电压表的内阻较小（或电流表的内阻较大）时，可用同一量限两次测量法减小测量误差。其中，第一次测量与一般的测量并无两样。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。

(1) 电压测量——测量如图 2-3 所示电路的开路电压 U_0 。

设电压表的内阻为 R_v 。第一次测量，电压表的读数为 U_1 。第二次测量时应与电压表串接一个已知阻值的电阻器 R ，电压表读数为 U_2 。由图可知

$$U_1 = \frac{R_v U_S}{R_0 + R_v}$$

$$U_2 = \frac{R_v U_S}{R_0 + R + R_v}$$

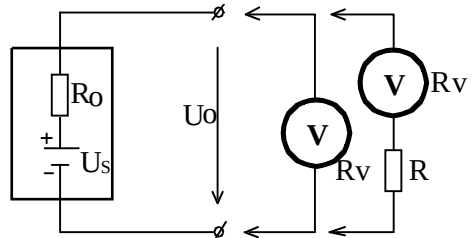


图 2-3

由以上两式可解得 E 和 R_0 ，其中 U_S （即 U_0 ）为：

$$U_S = U_0 = \frac{R U_1 U_2}{R_v (U_1 - U_2)}$$

(2) 电流测量——测量如图 2-4 所示电路的电流 I

设电流表的内阻为 R_A 。第一次测量电流表的读数为 I_1 。第二次测量时应与电流表串接一个已知阻值的电阻器 R ，电流表读数为 I_2 。由图可知

$$I_1 = \frac{U_S}{R_0 + R_A}$$

$$I_2 = \frac{U_S}{R_0 + R_A + R}$$

由以上两式可解得 U_S 和 R_0 ，从而可得：

$$I = \frac{U_S}{R_0} = \frac{I_1 I_2 R}{I_2 (R_A + R) - I_1 R_A}$$

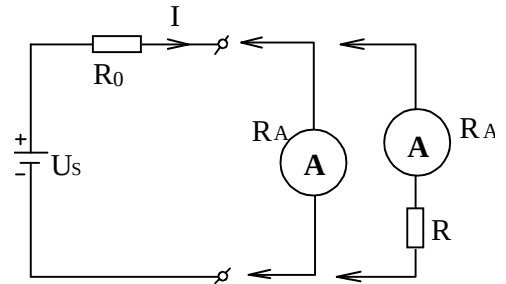


图 2-4

由以上分析可知，当所用仪表的内阻与被测线路的电阻相差不大时，采用多量限仪表不同量限两次测量法或单量限仪表两次测量法，通过计算就可得到比单次测量准确得多的结果。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数 量	备注
1	直流稳压电源	0~30V	1	
2	指针式万用表	MF-47 或其它	1	自备
3	直流数字电流表	0~2000mA	1	
4	可调电阻箱	0~99999.9 Ω	1	HE-19
5	电阻器	按需选择		HE-11/ HE-11A

四、实验内容

1. 双量限电压表两次测量法

按图 2-3 电路, 实验中利用实验台上的一路直流稳压电源, 取 $U_S = 2.5V$, R_0 选用 $50k\Omega$ (取自电阻箱)。用指针式万用表的直流电压 $2.5V$ 和 $10V$ 两档量限进行两次测量, 最后算出开路电压 U'_0 之值。

万用表电压量限 (V)	内阻值 (k Ω)	两个量限的测量值 U (V)	电路计算值 U_0 (V)	两次测量计算值 U'_0 (V)	U 的相对误差值 (%)	U'_0 的相对误差 (%)
2.5						
10						

$R_{2.5V}$ 和 R_{10V} 参照实验一的结果。

2. 单量限电压表两次测量法

实验线路同上。先用上述万用表直流电压 $2.5V$ 量限档直接测量, 得 U_1 。然后串接 $R = 10k\Omega$ 的附加电阻器再一次测量, 得 U_2 。计算开路电压 U'_0 之值。

实际计算值	两次测量值		测量计算值	U_1 的相对误差	U'_0 的相对误差 (%)
U_0 (V)	U_1 (V)	U_2 (V)	U'_0 (V)	(%)	

3. 双量限电流表两次测量法

按图 2-2 线路进行实验, $U_S = 0.3V$, $R = 300\Omega$ (取自电阻箱), 用万用表 $0.5mA$ 和 $5mA$ 两档电流量限进行两次测量, 计算出电路的电流值 I' 。

万用表电流量限	内阻值 (Ω)	两个量限的测量值 I_1 (mA)	电路计算值 I (mA)	两次测量计算值 I' (mA)	I_1 的相对误差 (%)	I' 的相对误差 (%)

0.5mA						
5mA						

$R_{0.5mA}$ 和 R_{5mA} 参照实验一的结果。

4. 单量限电流表两次测量法

实验线路同 3。先用万用表 0.5mA 电流量限直接测量，得 I_1 。再串联附加电阻 $R=30\Omega$ 进行第二次测量，得 I_2 。求出电路中的实际电流 I' 之值。

实际计算值	两次测量值		测量计算值	I_1 的相对误差	I' 的相对误差
I (mA)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	I' (mA)	(%)	(%)

五、实验注意事项

1. 同实验一

2. 采用不同量限两次测量法时，应选用相邻的两个量限，且被测值应接近于低量限的满偏值。否则，当用高量限测量较低的被测值时，测量误差会较大。

3. 在实验内容 3 和 4 中，电路电流的计算值为 $\frac{0.3V}{300\Omega} = 1mA$ ，却用万用表 0.5mA 档去测量该电流，这纯为实验所需。因为实验中，已知万用表 0.5mA 档的内阻 $> 300\Omega$ ，接入电路后总电流 $< 0.5mA$ ，故可如此用。在实际工程测量中，一般应先用最高量程档去测量被测值，粗知被测值后再选用合适的档位进行准确测量。

4. 实验中所用的 MF-47 型万用表属于较精确的仪表。在大多数情况下，直接测量误差不会太大。只有当被测电压源的内阻 $> 1/5$ 电压表内阻或者被测电流源内阻 < 5 倍电流表内阻时，采用本实验的测量、算法才能得到较满意的结果。

六、思考题

1. 完成各项实验内容的计算
2. 实验的收获与体会

实验三、仪表量程扩展实验

一、实验目的

- 1、了解指针式毫安表的量程和内阻在测量中的作用。
- 2、掌握毫安表改装成电流表和电压表的方法。
- 3、学会电流表和电压表量程切换开关的应用方法。

二、原理说明

1、一只毫安表允许通过的最大电流称为该表的量程，用 I_g 表示，该表有一定的内阻，用 R_g 表示。这就是一个“基本表”，其等效电路如图 3-1 所示。 I_g 和 R_g 是毫安表的两个重要参数。

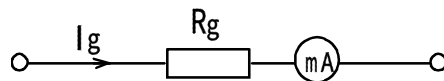


图 3-1 基本表

2、满量程为 1mA 的毫安表，最大只允许通过 1mA 的电流，过大的电流会造成“打针”，甚至烧断电流线圈而损坏。要用它测量超过 1mA 的电流，亦即要扩大毫安表的测量范围，可选择合适的分流电阻 R_A 与基本表并联，如图 3-2 所示。 R_A 的大小可以精确算出。

设：基本表满量程为 $I_g=1\text{mA}$ ，

基本表内阻 $R_g=100\Omega$ 。

现要将其量程扩大 10 倍（即可用来测量 10mA 电流），则应并联的分流电阻 R_A 应满足下式：

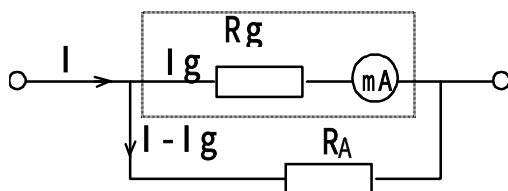


图 3-2 扩大电流量程

$$I_g R_g = (I - I_g) R_A$$

$$1\text{mA} \times 100\Omega = (10 - 1)\text{mA} \times R_A$$

$$R_A = \frac{100}{9} = 11.1\Omega$$

同理，要使其量程扩展为 100mA，则应并联 1.11Ω 的分流电阻。

当用改装后的电流表来测量 10（或 100）mA 以下的电流时，只要将基本表的读数乘以 10（或 100）或者直接将电表面板的满刻度刻成（10 或 100）mA 即可。

3、毫安表改装为电压表。

一只毫安表也可以改装为一只电压表，只要选择一只合适的分压电阻 R_v 与基本表相串接即可，如图 3-3 所示。

设被测电压值为 U ，则：

$$U = U_g + U_v = I_g (R_g + R_v)$$

$$\therefore R_v = \frac{U - I_g R_g}{I_g} = \frac{U}{I_g} - R_g$$

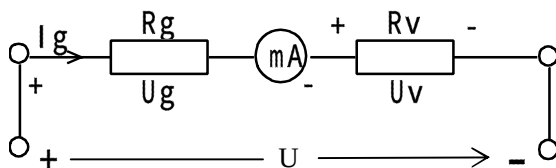


图 3-3

电压表要将量程为 1mA，内阻为 100Ω 的毫安表改装为量程为 1V 的电压表，则应串联的分压电阻的阻值应为：

$$R_v = \frac{1V}{1mA} - 100 = 1000 - 100 = 900\Omega$$

若要量程扩大到 10V，应串多大的分压电阻呢？

三、实验设备

序号	名称	型号规格	数量	备 注
1	直流电压表	0~300V	1	
2	直流电流表	0~2000mA	1	
3	直流稳压电源	0~30V	1	
4	直流恒流源	0~500mA	1	
5	基本表	1mA, 100Ω	1	HE-11
6	电阻	1.01Ω, 11.1Ω, 900Ω, 9.9kΩ	各 1	HE-11

四、实验内容与步骤

1、1mA 表表头的检验。

1)、调节恒流源的输出，最大不超过 1mA；

2)、先对毫安表进行机械调零，再将恒流源的输出接至毫安表的信号输入端；

3)、调节恒流源的输出，令其从 1mA 调至 0，分别读取指针表的读数，并记录之。

恒流源输出(mA)	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
表头读数(mA)						

2、将基本表改装为量程为 10mA 的毫安表。

1)、将分流电阻 11.1Ω 并接在基本表的两端，这样就将基本表改装成了满量程为 10mA 的毫安表；

2)、将恒流源的输出调至 10mA；

3)、调节恒流源的输出，使其从 10mA 调至 0，依次减小 2mA，用改装好的毫安表依次测量恒流源的输出电流，并记录之；

恒流源输出(mA)	10	8	6	4	2	0
毫安表读数(mA)						

4)、将分流电阻改换为 1.01Ω，再重复步骤 3)（注意要改变恒流源的输出值）。

3、将基本表改装为一只电压表。

1)、将分压电阻 9.9kΩ 与基本表相串接，这样基本表就被改装成为满量程为 10V 的电压表；

2)、将电压源的输出调至 10V；

3)、调节电压源的输出，使其从 10V 至 0，依次减小 2V，并用改装成的电压表进行测量，并记录之。

电压源输出 (V)	10	8	6	4	2	0
改装表读数 (V)						

4)、将分压电阻换成 900Ω ，重复上述测量步骤。(注意调整电压源的输出。)

五、实验注意事项

- 1)、输入仪表的电压和电流要注意到仪表的量程，不可过大，以免损坏仪表；
- 2)、可外接标准表（如智能直流毫安表和直流电压表作为标准表）进行校验；
- 3)、注意接入仪表的信号极性，以免指针反偏而打坏指针。

4)、HE-11 实验箱上的 11.1Ω 、 1.01Ω 、 $9.9k\Omega$ 、 900Ω 四只电阻的阻值是按照量程 $I_g=1mA$ ，内阻 $R_g=100\Omega$ 的基本表计算出来的。基本表的 R_g 会有差异，导致利用上述四个电阻扩展量程后，测量时的误差增大。因此，实验时，可先按实验一测出 R_g ，并计算出量程扩展电阻 R ，再从 HE-19 实箱中的电阻箱上取得 R 值，可提高实验的准确性、实际性。

5)、稳压源和恒流源的 0 点会有剩余量，可按实记录。

六、预习思考题

如果要将本实验中的几种测量改为万用表的操作方式，需要用什么样的开关来进行切换，以便对不同量程的电压、电流进行测量？该线路应如何设计？

七、实验报告

1. 总结电路原理中分压、分流的具体应用。
2. 总结电表的改装方法。
3. 测量误差的分析。
4. 设计预习思考题的实现线路。

实验四 电路元件伏安特性的测绘

一、实验目的

1. 学会识别常用电路元件的方法
2. 掌握线性电阻、非线性电阻元件伏安特性的逐点测试法
3. 掌握实验台上直流电工仪表和设备的使用方法。

二、原理说明

任何一个电器二端元件的特性可用该元件上的端电压 U 与通过该元件的电流 I 之间的函数关系 $I=f(U)$ 来表示，即用 I - U 平面上的一条曲线来表征，这条曲线称为该元件的伏安特性曲线。

1. 线性电阻器的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线，如图 4-1 中 a 所示，该直线的斜率等于该电阻器的电阻值。

2. 一般的白炽灯在工作时灯丝处于高温状态，其灯丝电阻随着温度的升高而增大，通过白炽灯的电流越大，其温度越高，阻值也越大，一般灯泡的“冷电阻”与“热电阻”的阻值可相差几倍至十几倍。所以它的伏安特性如图 4-1 中 b 曲线所示。

3. 一般的半导体二极管是一个非线性电阻元件，其伏安特性如图 4-1 中 c 所示。正向压降很小（一般的锗管约为 0.2~0.3V，

硅管约为 0.5~0.7V），正向电流随正向压

降的升高而急骤上升，而反向电压从零一直增加到十多至几十伏时，其反向电流增加很小，粗略地可视为零。可见，二极管具有单向导电性，但反向电压加得过高，超过管子的极限值，则会导致管子击穿损坏。

4. 稳压二极管是一种特殊的半导体二极管，其正向特性与普通二极管类似，但其反向特性较特别，如图 4-1 中 d 所示。在反向电压开始增加时，其反向电流几乎为零，但当电压增加到某一数值时（称为管子的稳压值，有各种不同稳压值的稳压管）电流将突然增加，以后它的端电压将基本维持恒定，当外加的反向电压继续升高时其端电压仅有少量增加。

注意：流过二极管或稳压二极管的电流不能超过管子的极限值，否则管子就会烧坏。

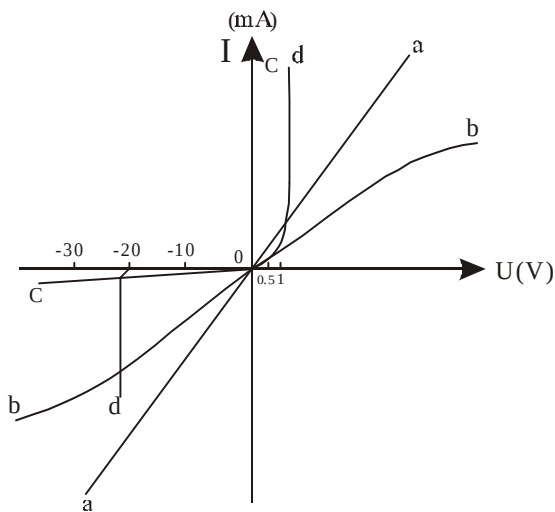


图 4-1

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~30V	1	
2	万 用 表	FM-30 或其它	1	
3	直流数字电流表	0~2000mA	1	
4	直流数字电压表	0~300V	1	
5	二 极 管	1N4007	1	HE-11
6	稳 压 管	2CW51	1	HE-11
7	白 炽 灯	12V, 0.1A	1	HE-11
8	线性电阻器	200 Ω , 510 Ω , 1k/8W	1	HE-19

四、实验内容

1. 测定线性电阻器的伏安特性

按图 4-2 接线，调节稳压电源的输出电压 U ，从 0 伏开始缓慢地增加，一直到 10V，记下相应的电压表和电流表的读数 U_R 、 I_o 。

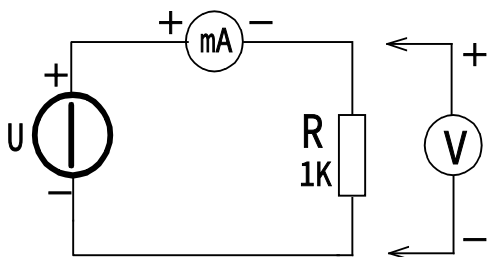


图 4-2

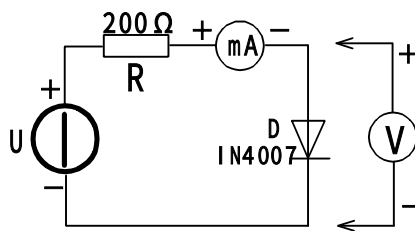


图 4-3

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

2. 测定非线性白炽灯泡的伏安特性

将图 4-2 中的 R 换成一只 12V, 0.1A 的灯泡，重复 1 的测量。 U_L 为灯泡的端电压。

U_L (V)	0.1	0.5	1	2	3	4	5
I (mA)							

3. 测定半导体二极管的伏安特性

按图 4-3 接线， R 为限流电阻器。测二极管的正向特性时，其正向电流不得超过 35mA，二极管 D 的正向压降 U_{D+} 可在 0~0.75V 之间取值。在 0.5~0.75V 之间应多取几个测量点。测反向特性时，只需将图 4-3 中的二极管 D 反接，且其反向电压 U_{D-} 可加到 30V。

正向特性实验数据

U_{D+} (V)	0.10	0.30	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
I (mA)								

反向特性实验数据

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

4. 测定稳压二极管的伏安特性

(1) 正向特性实验：将图 4-3 中的二极管换成稳压二极管 2CW51，重复实验内容 3 中的正向测量。 U_{Z+} 为 2CW51 的正向压降。

U_{Z+} (V)	
I (mA)	

(2) 反向特性实验：将图 4-3 中的 R 换成 510Ω ，2CW51 反接，测量 2CW51 的反向特性。稳压电源的输出电压 U_O 从 0~20V，测量 2CW51 二端的电压 U_{Z-} 及电流 I ，由 U_{Z-} 可看出其稳压特性。

U_O (V)	
U_{Z-} (V)	
I (mA)	

五、实验注意事项

1. 测二极管正向特性时，稳压电源输出应由小至大逐渐增加，应时刻注意电流表读数不得超过 35mA。稳压源输出端切勿碰线短路。
2. 如果要测定 2AP9 的伏安特性，则正向特性的电压值应取 0, 0.10, 0.13, 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.24, 0.30 (V)，反向特性的电压值取 0, 2, 4, ……，10(V)。
3. 进行不同实验时，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、思考题

1. 线性电阻与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？
2. 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，其坐标变量应如何放置？
3. 稳压二极管与普通二极管有何区别，其用途如何？
4. 在图 4-3 中，设 $U=2V$ ， $U_{D+}=0.7V$ ，则 mA 表读数为多少？

七、实验报告

1. 根据各实验结果数据，分别在方格纸上绘制出光滑的伏安特性曲线。（其中二极管和稳压管的正、反向特性均要求画在同一张图中，正、反向电压可取为不同的比例尺）。
2. 根据实验结果，总结、归纳被测各元件的特性。
3. 完成数据表格中的计算，对误差作必要的分析。
4. 心得体会及其它。

实验五 电位、电压的测定及电路电位图的绘制

一、实验目的

1. 用实验证明电路中电位的相对性、电压的绝对性
2. 掌握电路电位图的绘制方法

二、原理说明

在一个确定的闭合电路中，各点电位的高低视所选的电位参考点的不同而变，但任意两点间的电位差（即电压）则是绝对的，它不因参考点电位的变动而改变。据此性质，我们可用一只电压表来测量出电路中各点相对于参考点的电位及任意两点间的电压。

电位图是一种平面坐标一、四两象限内的折线图。其纵坐标为电位值，横坐标为各被测点。要制作某一电路的电位图，先以一定的顺序对电路中各被测点编号。以图 5-1 的电路为例，如图中的 A~F，并在坐标横轴上按顺序，均匀间隔标上 A、B、C、D、E、F、A。再根据测得的各点电位值，在各点所在的垂直线上描点。用直线依次连接相邻两个电位点，即得该电路的电位图。

在电位图中，任意两个被测点的纵坐标值之差即为该两点之间的电压值。

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

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	直流可调稳压电源	0~30V	二路	
2	万用表		1	自备
3	直流数字电压表	0~300V	1	
4	电位、电压测定实验电路板		1	HE-12

四、实验内容

利用 HE-12 实验箱上的“基尔霍夫定律/叠加原理”线路，按图 5-1 接线。

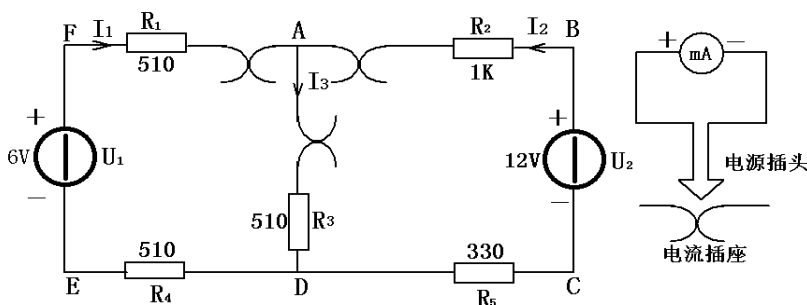


图 5-1

1. 分别将两路直流稳压电源接入电路，令 $U_1=6V$ ， $U_2=12V$ 。（先调准输出电压值，再接入实验线路中。）
2. 以图 5-1 中的 A 点作为电位的参考点，分别测量 B、C、D、E、F 各点的电位值 ϕ

及相邻两点之间的电压值 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CD} 、 U_{DE} 、 U_{EF} 及 U_{FA} ，数据列于表中。

3. 以 D 点作为参考点，重复实验内容 2 的测量，测得数据列于表中。

电 位 参考点	ϕ 与 U	ϕ_A	ϕ_B	ϕ_C	ϕ_D	ϕ_E	ϕ_F	U_{AB}	U_{BC}	U_{CD}	U_{DE}	U_{EF}	U_{FA}
A	计算值	—	—	—	—	—	—						
	测量值												
	相对误差	—	—	—	—	—	—						
D	计算值	—	—	—	—	—	—						
	测量值												
	相对误差	—	—	—	—	—	—						

注：1. “计算值”一栏， $U_{AB} = \phi_A - \phi_B$ ， $U_{BC} = \phi_B - \phi_C$ ，以此类推。

2. 相对误差 = $\frac{\text{测量值} - \text{计算值}}{\text{计算值}} \times 100 \quad (\%)$

五、实验注意事项

1. 本实验线路板系多个实验通用，本次实验中不使用电流插头和插座。HE-12 上的 K_3 应拨向 330Ω 侧，三个故障按键均不得按下。

2. 测量电位时，用指针式万用表的直流电压档或用数字直流电压表测量时，用负表棒（黑色）接参考电位点，用正表棒（红色）接被测各点。若指针正向偏转或数显表显示正值，则表明该点电位为正（即高于参考点电位）；若指针反向偏转或数显表显示负值，此时应调换万用表的表棒，然后读出数值，此时在电位值之前应加一负号（表明该点电位低于参考点电位）。数显表也可不调换表棒，直接读出负值。

六、思考题

若以 F 点为参考电位点，实验测得各点的电位值；现令 E 点作为参考电位点，试问此时各点的电位值应有何变化？

七、实验报告

1. 根据实验数据，绘制两个电位图形，并对照观察各对应两点间的电压情况。两个电位图的参考点不同，但各点的相对顺序应一致，以便对照。

2. 完成数据表格中的计算，对误差作必要的分析。

3. 总结电位相对性和电压绝对性的原理。

4. 心得体会及其它。

实验六 基尔霍夫定律的验证

一、实验目的

1. 验证基尔霍夫定律的正确性，加深对基尔霍夫定律的理解。
2. 学会用电流插头、插座测量各支路电流的方法。

二、原理说明

基尔霍夫定律是电路的基本定律。测量某电路的各支路电流及每个元件两端的电压，应能分别满足基尔霍夫电流定律（KCL）和电压定律（KVL）。即对电路中的任一个节点而言，应有 $\sum I=0$ ；对任何一个闭合回路而言，应有 $\sum U=0$ 。

运用上述定律时必须注意各支路或闭合回路中电流的正方向，此方向可预先任意设定。

三、实验设备

同实验五

四、实验内容

实验线路与实验五图 5-1 相同，用 HE-12 挂箱的“基尔霍夫定律/叠加原理”线路。

1. 实验前先任意设定三条支路和三个闭合回路的电流正方向。图 5-1 中的 I_1 、 I_2 、 I_3 的方向已设定。三个闭合回路的电流正方向可设为 ADEFA、BADCB 和 FBCEF。
2. 分别将两路直流稳压源接入电路，令 $U_1=6V$ ， $U_2=12V$ 。
3. 熟悉电流插头的结构，将电流插头的两端接至数字毫安表的“+、-”两端。
4. 将电流插头分别插入三条支路的三个电流插座中，读出并记录电流值。
5. 用直流数字电压表分别测量两路电源及电阻元件上的电压值，记录之。

被测量	$I_1(\text{mA})$	$I_2(\text{mA})$	$I_3(\text{mA})$	$U_1(\text{V})$	$U_2(\text{V})$	$U_{FA}(\text{V})$	$U_{AB}(\text{V})$	$U_{AD}(\text{V})$	$U_{CD}(\text{V})$	$U_{DE}(\text{V})$
计算值										
测量值										
相对误差										

五、实验注意事项

1. 同实验五的注意 1，但需用到电流插座。
2. 所有需要测量的电压值，均以电压表测量的读数为准。 U_1 、 U_2 也需测量，不应取电源本身的显示值。
3. 防止稳压电源两个输出端碰线短路。
4. 用指针式电压表或电流表测量电压或电流时，如果仪表指针反偏，则必须调换仪表极性，重新测量。此时指针正偏，可读得电压或电流值。若用数显电压表或电流表测量，则可直接读出电压或电流值。但应注意：所读得的电压或电流值的正确正、负号应根据设定的电流方向来判断。

六、预习思考题

1. 根据图 5-1 的电路参数, 计算出待测的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 和各电阻上的电压值, 记入表中, 以便实验测量时, 可正确地选定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, 在什么情况下可能出现指针反偏, 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测量时, 则会有什么显示呢?

七、实验报告

1. 根据实验数据, 选定节点 A, 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. 将支路和闭合回路的电流方向重新设定, 重复 1、2 两项验证。
4. 误差原因分析。
5. 心得体会及其它。

实验七 叠加原理的验证

一、实验目的

验证线性电路叠加原理的正确性，加深对线性电路的叠加性和齐次性的认识和理解。

二、原理说明

叠加原理指出：在有多多个独立源共同作用下的线性电路中，通过每一个元件的电流或其两端的电压，可以看成是由每一个独立源单独作用时在该元件上所产生的电流或电压的代数和。

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（即在电路中各电阻元件上所建立的电流和电压值）也将增加或减小 K 倍。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备 注
1	直流稳压电源	0~30V 可调	二路	
2	万用表		1	
3	直流数字电压表	0~300V	1	
4	直流数字电流表	0~2000mA	1	
5	叠加原理实验电路板		1	HE-12

四、实验内容

实验线路如图 7-1 所示，用 HE-12 挂箱的“基尔霍夫定律/叠加原理”线路。

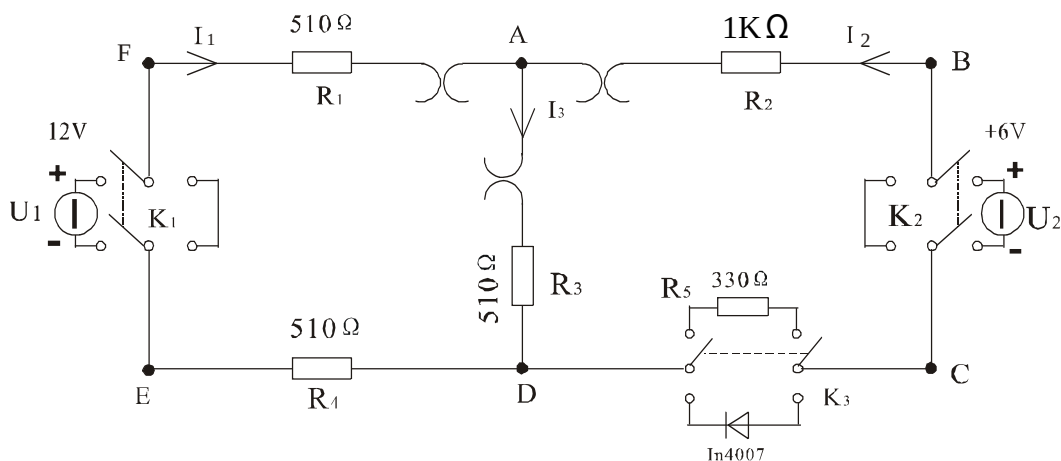


图 7-1

1. 将两路稳压源的输出分别调节为 12V 和 6V，接入 U_1 和 U_2 处。
2. 令 U_1 电源单独作用（将开关 K_1 投向 U_1 侧，开关 K_2 投向短路侧）。用直流数字电压表和毫安表（接电流插头）测量各支路电流及各电阻元件两端的电压，数据记入表 7-1。

表 7-1

测量项目 实验内容	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	I_3 (mA)	U_{AB} (V)	U_{CD} (V)	U_{AD} (V)	U_{DE} (V)	U_{FA} (V)
U_1 单独作用										
U_2 单独作用										
U_1 、 U_2 共同作用										
$2U_2$ 单独作用										

3. 令 U_2 电源单独作用（将开关 K_1 投向短路侧，开关 K_2 投向 U_2 侧），重复实验步骤 2 的测量和记录，数据记入表 7-1。

4. 令 U_1 和 U_2 共同作用（开关 K_1 和 K_2 分别投向 U_1 和 U_2 侧），重复上述的测量和记录，数据记入表 7-1。

5. 将 U_2 的数值调至 +12V，重复上述第 3 项的测量并记录，数据记入表 7-1。

6. 将 R_5 (330Ω) 换成二极管 1N4007（即将开关 K_3 投向二极管 1N4007 侧），重复 1~5 的测量过程，数据记入表 7-2。

7. 任意按下某个故障设置按键，重复实验内容 4 的测量和记录，再根据测量结果判断出故障的性质。

表 7-2

测量项目 实验内容	U_1 (V)	U_2 (V)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	I_3 (mA)	U_{AB} (V)	U_{CD} (V)	U_{AD} (V)	U_{DE} (V)	U_{FA} (V)
U_1 单独作用										
U_2 单独作用										
U_1 、 U_2 共同作用										
$2U_2$ 单独作用										

五、实验注意事项

1. 用电流插头测量各支路电流时，或者用电压表测量电压降时，应注意仪表的极性，并应正确判断测得值的+、-号。

2. 注意仪表量程的及时更换。

六、预习思考题

1. 在叠加原理实验中，要令 U_1 、 U_2 分别单独作用，应如何操作？可否直接将不作用的电源（ U_1 或 U_2 ）短接置零？

2. 实验电路中，若有一个电阻器改为二极管，试问叠加原理的迭加性与齐次性还成立吗？为什么？

3. 当 K_1 (或 K_2) 拨向短路侧时, 如何测 U_{FA} (或 U_{AB}) ?

七、实验报告

1. 根据实验数据表格, 进行分析、比较, 归纳、总结实验结论, 即验证线性电路的叠加性与齐次性。

2. 各电阻器所消耗的功率能否用叠加原理计算得出? 试用上述实验数据, 进行计算并作结论。

3. 通过实验步骤 6 及分析表格 7-2 的数据, 你能得出什么样的结论?

4. 心得体会及其它。

实验八 电压源与电流源的等效变换

一、实验目的

1. 掌握电源外特性的测试方法。
2. 验证电压源与电流源等效变换的条件。

二、原理说明

1. 一个直流稳压电源在一定的电流范围内，具有很小的内阻。故在实用中，常将它视为一个理想的电压源，即其输出电压不随负载电流而变。其外特性曲线，即其伏安特性曲线 $U=f(I)$ 是一条平行于 I 轴的直线。

一个恒流源在实用中，在一定的电压范围内，可视为一个理想的电流源，即其输出电流不随负载两端的电压（亦即负载的电阻值）而变。

2. 一个实际的电压源（或电流源），其端电压（或输出电流）不可能不随负载而变，因它具有一定的内阻值。故在实验中，用一个小阻值的电阻（或大电阻）与稳压源（或恒流源）相串联（或并联）来模拟一个实际的电压源（或电流源）。

3. 一个实际的电源，就其外部特性而言，既可以看成是一个电压源，又可以看成是一个电流源。若视为电压源，则可用一个理想的电压源 U_s 与一个电阻 R_o 相串联的组合来表示；若视为电流源，则可用一个理想电流源 I_s 与一电导 g_o 相并联的给合来表示。如果有两个电源，它们能向同样大小的电阻供出同样大小的电流和端电压，则称这两个电源是等效的，即具有相同的外特性。

一个电压源与一个电流源等效变换的条件为：

电压源变换为电流源： $I_s = U_s / R_o$ ， $g_o = 1 / R_o$

电流源变换为电压源： $U_s = I_s R_o$ ， $R_o = 1 / g_o$

如图 8-1 所示。

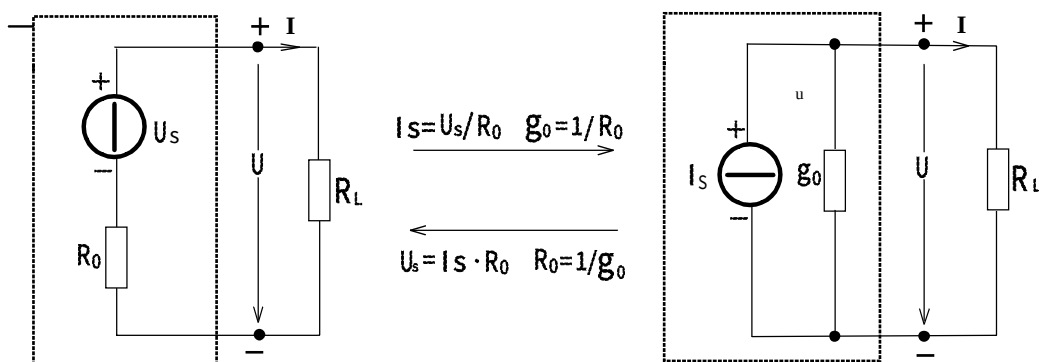


图 8-1

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备 注
1	可调直流稳压电源	0~30V	1	
2	可调直流恒流源	0~500mA	1	
3	直流数字电压表	0~300V	1	
4	直流数字电流表	0~2000mA	1	
5	万用表		1	自备
6	电阻器	120 Ω , 200 Ω 510 Ω , 1k Ω		HE-11/ HE-11A
7	可调电阻器	1k Ω /2W	1	HE-11/ HE-11A

四、实验内容

1. 测定直流稳压电源（理想电压源）与实际电压源的外特性

(1) 利用 HE-11 上的元件和屏上的电流插座，按图 8-2 接线。 U_s 为 +12V 直流稳压电源。调节 R_2 ，令其阻值由大至小变化，记录两表的读数。

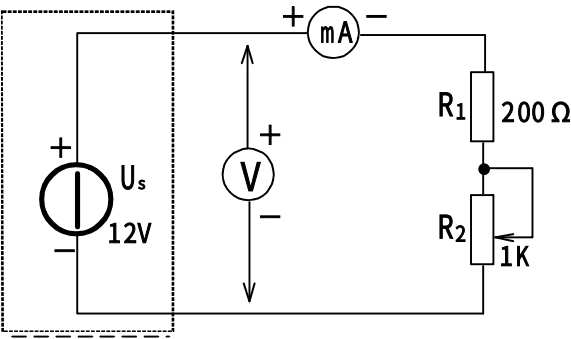


图 8-2

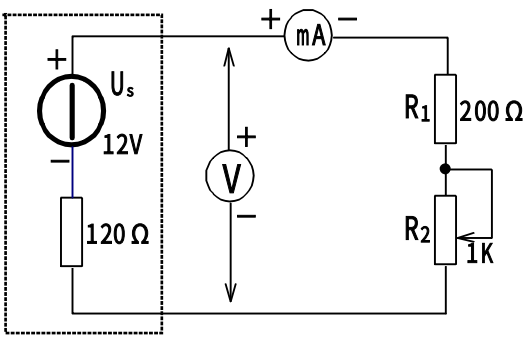


图 8-3

U (V)							
I (mA)							

(2) 按图 8-3 接线，虚线框可模拟为一个实际的电压源。调节 R_2 ，令其阻值由大至小变化，记录两表的读数。

U (V)							
I (mA)							

2. 测定电流源的外特性

按图 8-4 接线， I_s 为直流恒流源，调节其输出为 10mA，令 R_o 分别为 1k Ω 和 ∞ （即接入和断开），调节电位器 R_L （从 0 至 1k Ω ），

测出这两种情况下的电压表和电流表的读数。自拟数据表格，记录实验数据。

3. 测定电源等效变换的条件

先按图 8-5 (a) 线路接线, 记录线路中两表的读数。然后利用图 8-5(a)中右侧的元件和仪表, 按图 8-5(b)接线。调节恒流源的输出电流 I_s , 使两表的读数与 8- 5(a)时的数值相等, 记录 I_s 之值, 验证等效变换条件的正确性。

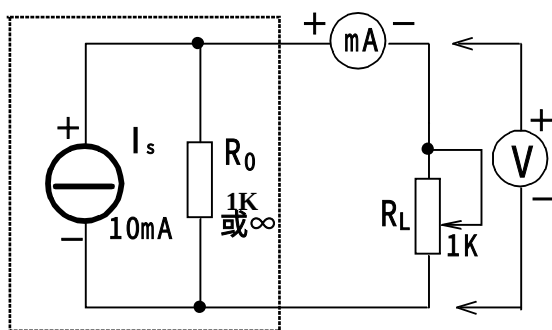
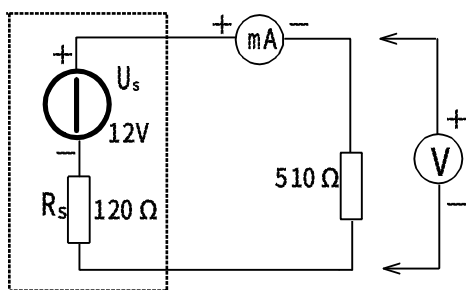
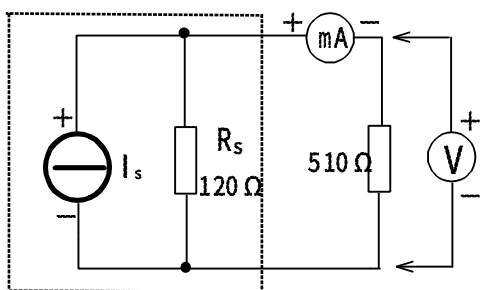


图 8-4



(a)



(b)

图 8-5

五、实验注意事项

1. 在测电压源外特性时, 不要忘记测空载时的电压值, 测电流源外特性时, 不要忘记测短路时的电流值。
2. 换接线路时, 必须关闭电源开关。
3. 直流仪表的接入应注意极性与量程。

六、预习思考题

1. 电压源与电流源的外特性为什么呈下降变化趋势, 稳压源和恒流源的输出在任何负载下是否保持恒值?

七、实验报告

1. 根据实验数据绘出电源的四条外特性曲线, 并总结、归纳各类电源的特性。
2. 从实验结果, 验证电源等效变换的条件。
3. 心得体会及其它。

实验九 戴维南定理和诺顿定理的验证 ——有源二端网络等效参数的测定

一、实验目的

1. 验证戴维南定理和诺顿定理的正确性，加深对该定理的理解。
2. 掌握测量有源二端网络等效参数的一般方法。

二、原理说明

1. 任何一个线性含源网络，如果仅研究其中一条支路的电压和电流，则可将电路的其余部分看作是一个有源二端网络（或称为含源一端口网络）。

戴维南定理指出：任何一个线性有源网络，总可以用一个电压源与一个电阻的串联来等效代替，此电压源的电动势 U_S 等于这个有源二端网络的开路电压 U_{oc} ，其等效内阻 R_0 等于该网络中所有独立源均置零（理想电压源视为短接，理想电流源视为开路）时的等效电阻。

诺顿定理指出：任何一个线性有源网络，总可以用一个电流源与一个电阻的并联组合来等效代替，此电流源的电流 I_S 等于这个有源二端网络的短路电流 I_{sc} ，其等效内阻 R_0 定义同戴维南定理。

U_{oc} (U_S) 和 R_0 或者 I_{sc} (I_S) 和 R_0 称为有源二端网络的等效参数。

2. 有源二端网络等效参数的测量方法

(1) 开路电压、短路电流法测 R_0

在有源二端网络输出端开路时，用电压表直接测其输出端的开路电压 U_{oc} ，然后再将其输出端短路，用电流表测其短路电流 I_{sc} ，则等效内阻为

$$R_0 = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}$$

如果二端网络的内阻很小，若将其输出端口短路则易损坏其内部元件，因此不宜用此法。

(2) 伏安法测 R_0

用电压表、电流表测出有源二端网络的外特性曲线，如图 9-1 所示。根据外特性曲线求出斜率 $\tan \phi$ ，则内阻

$$R_0 = \tan \phi = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_{oc}}{I_{sc}}。$$

也可以先测量开路电压 U_{oc} ，再测量电流为额定值 I_N 时的输出

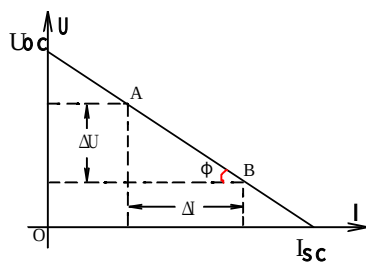


图 9-1

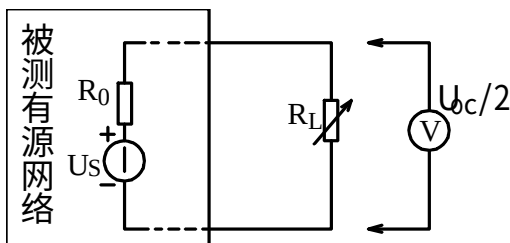


图 9-2

端电压值 U_N ，则内阻为 $R_0 = \frac{U_{oc} - U_N}{I_N}$ 。

(3) 半电压法测 R_0

如图 9-2 所示，当负载电压为被测网络开路电压的一半时，负载电阻（由电阻箱的读数确定）即为被测有源二端网络的等效内阻值。

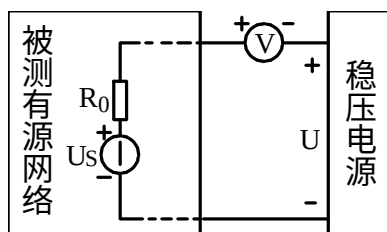


图 9-3

(4) 零示法测 U_{oc}

在测量具有高内阻有源二端网络的开路电压时，用电压表直接测量会造成较大的误差。为了消除电压表内阻的影响，往往采用零示测量法，如图 9-3 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与有源二端网络的开路电压相等时，电压表的读数将为“0”。然后将电路断开，测量此时稳压电源的输出电压，即为被测有源二端网络的开路电压。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~30V	1	
2	可调直流恒流源	0~500mA	1	
3	直流数字电压表	0~300V	1	
4	直流数字电流表	0~2000mA	1	
5	万用表		1	自备
6	可调电阻箱	0~99999.9Ω	1	HE-19
7	电位器	1k/2W	1	HE-11/ HE-11A
8	戴维南定理实验电路板		1	HE-12

四、实验内容

被测有源二端网络如图 9-4(a)，即 HE-12 挂箱中“戴维南定理/诺顿定理”线路。

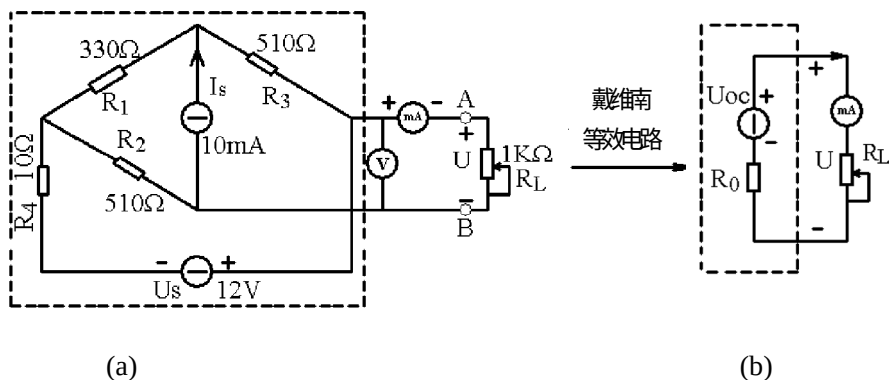


图 9-4

1. 用开路电压、短路电流法测定戴维南等效电路的 U_{oc} 和 R_0 。在 9-4(a)中，接入稳

压电源 $U_s=12V$ 和恒流源 $I_s=10\text{ mA}$ ，不接入 R_L 。利用开关 K ，分别测定 U_{OC} 和 I_{sc} ，并计算出 R_0 。（测 U_{OC} 时，不接入 mA 表。）

$U_{oc}(v)$	$I_{sc}(mA)$	$R_0=U_{oc}/I_{sc}(\Omega)$

2. 负载实验

按图 9-4(a)接入 R_L 。改变 R_L 阻值，测量不同端电压下的电流值，记于下表，并据此画出有源二端网络的外特性曲线。

$U\text{ (v)}$									
$I\text{ (mA)}$									

3. 验证戴维南定理：从电阻箱上取得按步骤“1”所得的等效电阻 R_0 之值，然后令其与直流稳压电源（调到步骤“1”时所测得的开路电压 U_{oc} 之值）相串联，如图 9-4(b)所示，仿照步骤“2”测其外特性，对戴氏定理进行验证。

$U\text{ (v)}$									
$I\text{ (mA)}$									

4. 验证诺顿定理：从电阻箱上取得按步骤“1”所得的等效电阻 R_0 之值，然后令其与直流恒流源（调到步骤“1”时所测得的短路电流 I_{sc} 之值）相并联，如图 9-5 所示，仿照步骤“2”测其外特性，对诺顿定理进行验证。

$U\text{ (v)}$									
$I\text{ (mA)}$									

5. 有源二端网络等效电阻（又称入端电阻）的直接测量法。见图 9-4 (a)。将被测有源网络内的所有独立源置零（去掉电流源 I_s 和电压源 U_s ，并在原电压源所接的两点用一根短路导线相连），然后用伏安法或者直接用万用表的欧姆档去测定负载 R_L 开路时 A、B 两点间的电阻，此即为被测网络的等效内阻 R_0 ，或称网络的入端电阻 R_i 。

6. 用半电压法和零示法测量被测网络的等效内阻 R_0 及其开路电压 U_{oc} 线路及数据表格自拟。

五、实验注意事项

1. 测量时应注意电流表量程的更换。
2. 用万表直接测 R_0 时，网络内的独立源必须先置零，以免损坏万用表。其次，欧姆档必须经调零后再进行测量。
3. 用零示法测量 U_{oc} 时，应先将稳压电源的输出调至接近于 U_{oc} ，再按图 9-3 测量。
4. 改接线路时，要关掉电源。

六、预习思考题

1. 在求戴维南等效电路时，作短路试验，测 I_{sc} 的条件是什么？在本实验中可否直接

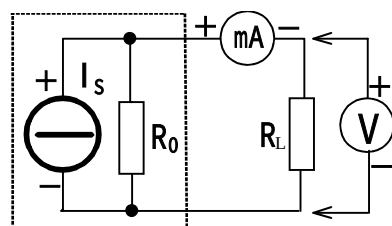


图 9-5

作负载短路实验？请实验前对线路 9-4(a)预先作好计算，以便调整实验线路及测量时可准确地选取电表的量程。

2. 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。

七、实验报告

1. 根据步骤 2 和 3，分别绘出曲线，验证戴维南定理的正确性， 并分析产生误差的原因。

2. 根据步骤 1、4、5 各种方法测得的 U_{oc} 与 R_0 与预习时电路计算的结果作比较，你能得出什么结论。

3. 归纳、总结实验结果。

4. 心得体会及其它。

实验十 等效网络变换的原理和测试

一、实验目的

- 1、掌握无源等效网络变换的条件及计算公式。
- 2、用实验验证等效变换的正确性。

二、原理说明

图 10-1 所示的 $\triangle$ 形电路和 Y 形电路可相互进行等效变换。等效变换的条件是：必须保证两种电路相对应的端点 1、2、3 之间的电压相等，流过 1、2、3 端点的电流也相等。据此可以得出 $\triangle$ 形电路与 Y 形电路互相进行等效变换的计算公式为：令 $R_{12}+R_{23}+R_{31}=R_{\Delta}$ ，则： $R_1=R_{12}R_{31}/R_{\Delta}$ ， $R_2=R_{23}R_{12}/R_{\Delta}$ ， $R_3=R_{31}R_{23}/R_{\Delta}$ ；或者令 $R_1R_2+R_2R_3+R_3R_1=R_Y$ ，则： $R_{12}=R_Y/R_3$ ， $R_{23}=R_Y/R_1$ ， $R_{31}=R_Y/R_2$ 。

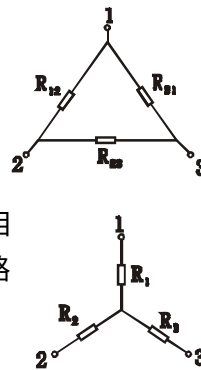


图 10-1

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	直流稳压电源	0~30V	1	
2	直流数字电压表	0~300V	1	
3	直流数字电流表	0~2000mA	1	
4	数字万用表	四位半	1	自备
5	实验线路及器件		1	HE-14A

四、实验内容

实验线路板见 HE-14A 实验箱上的“等效网络变换与实验”。

1、用实验线路板上的 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{31} 组成 $\triangle$ 形电路。计算出将其等效转换为 Y 形电路时各支路的电阻 R'_1 、 R'_2 、 R'_3 值。

2、利用实验板上的 R_4 、 R_5 、 R_6 及 W_1 、 W_2 、 W_3 分别调节出 R'_1 、 R'_2 、 R'_3 的值（用万用表测量）。

3、按图 10-2 接线。图中 A、B、C 为电流插座（在屏上），以便测量各支路的电流。1、2、3 三处按序号接入第 1 步中的 $\triangle$ 电路。将稳压电源输出的 15V 电压接入图 11-2 的 a、b 处。用毫安表依次测量并记录 $I_{1\Delta} \sim I_{3\Delta}$ ，再用电压表测量 $U_{\Delta 12}$ 、 $U_{\Delta 23}$ 、 $U_{\Delta 31}$ 。

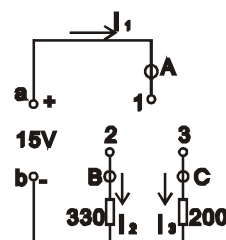


图10-2

4、拆去 $\triangle$ 电路，将第 2 步所得的 R'_1 、 R'_2 、 R'_3 接成 Y 形电路，按序号接入 1、2、3 三处，用毫安表依次测量并记录 $I_{1Y} \sim I_{3Y}$ ，用电压表测量 U_{Y12} 、 U_{Y23} 、 U_{Y31} 。

5、参照 1~4 步，将由实验线路板 R_1 、 R_2 、 R_3 构成的 Y 形电路转换成 $\triangle$ 形电路，计算并调节出 R'_{12} 、 R'_{23} 、 R'_{31} ，再分别测量 $I'_{1Y} \sim I'_{3Y}$ 、 $I'_{1\Delta} \sim I'_{3\Delta}$ 、 U'_{Y12} 、 U'_{Y23} 、 U'_{Y31} 、 $U'_{\Delta 12}$ 、 $U'_{\Delta 23}$ 、 $U'_{\Delta 31}$ 。

原始 电路	电路形式		$\triangle$ 形电路			Y 形电路		
	电阻值(Ω)		$R_{12}=220$	$R_{23}=300$	$R_{31}=470$	$R_1=220$	$R_2=300$	$R_3=470$
	测量 值	电流 (mA)	$I_{1\triangle} =$	$I_{2\triangle} =$	$I_{3\triangle} =$	$I'_{1Y} =$	$I'_{2Y} =$	$I'_{3Y} =$
		电压 (V)	$U_{\triangle 12} =$	$U_{\triangle 23} =$	$U_{\triangle 31} =$	$U'_{Y12} =$	$U'_{Y23} =$	$U'_{Y31} =$
变换 后 电路	电路形式		Y 形电路			$\triangle$ 形电路		
	电阻值(Ω)		$R'_1 =$	$R'_2 =$	$R'_3 =$	$R'_{12} =$	$R'_{23} =$	$R'_{31} =$
	测量 值	电流 (mA)	$I_{1Y} =$	$I_{2Y} =$	$I_{3Y} =$	$I'_{1\triangle} =$	$I'_{2\triangle} =$	$I'_{3\triangle} =$
		电压 (V)	$U_{Y12} =$	$U_{Y23} =$	$U_{Y31} =$	$U'_{\triangle 12} =$	$U'_{\triangle 23} =$	$U'_{\triangle 31} =$

五、实验注意事项

实验前应进行 $\triangle$ -Y 等效变换电阻的计算，并估算各支路电流的范围，以便测量时选用合适的仪表量程。

六、预习思考题

- 1、网络等效变换的目的是什么？ $\triangle$ -Y 网络等效变换的条件是什么？
- 2、推导 $\triangle$ -Y 电路等效变换的电阻计算公式。

七、实验报告

- 1、根据实验测得的数据，验证两种电路变换是否等效。
- 2、分析误差及其原因。
- 3、心得体会及其它。

实验十一 最大功率传输条件测定

一、实验目的

- 1、掌握负载获得最大传输功率的条件。
- 2、了解电源输出功率与效率的关系。

二、原理说明

1、电源与负载功率的关系

图 11-1 可视为由一个电源向负载输送电能的模型， R_0 可视为电源内阻和传输线路电阻的总和， R_L 为可变负载电阻。

负载 R_L 上消耗的功率 P 可由下式表示：

$$P = I^2 R_L = \left(\frac{U}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L,$$

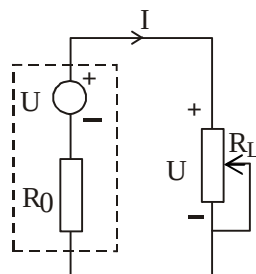


图 11-1

当 $R_L=0$ 或 $R_L=\infty$ 时，电源输送给负载的功率均为零。而以不同的 R_L 值代入上式可求得不同的 P 值，其中必有一个 R_L 值，使负载能从电源处获得最大的功率。

2、负载获得最大功率的条件：

根据数学求最大值的方法，令负载功率表达式中的 R_L 为自变量， P 为应变量，并使 $dP/dR_L=0$ ，即可求得最大功率传输的条件：

$$\frac{dP}{dR_L} = 0, \quad \text{即} \quad \frac{dP}{dR_L} = \frac{[(R_0 + R_L)^2 - 2R_L(R_L + R_0)]U^2}{(R_0 + R_L)^4}$$

$$\text{令} (R_L + R_0)^2 - 2R_L(R_L + R_0) = 0, \quad \text{解得: } R_L = R_0$$

当满足 $R_L=R_0$ 时，负载从电源获得的最大功率为：

$$P_{MAX} = \left(\frac{U}{R_0 + R_L} \right)^2 R_L = \left(\frac{U}{2R_L} \right)^2 R_L = \frac{U^2}{4R_L}$$

这时，称此电路处于“匹配”工作状态。

3、匹配电路的特点及应用

在电路处于“匹配”状态时，电源本身要消耗一半的功率。此时电源的效率只有 50%。显然，这对电力系统的能量传输过程是绝对不允许的。发电机的内阻是很小的，电路传输的最主要指标是要高效率送电，最好是 100% 的功率均传送给负载。为此负载电阻应远大于电源的内阻，即不允许运行在匹配状态。而在电子技术领域里却完全不同。一般的信号源本身功率较小，且都有较大的内阻。而负载电阻（如扬声器等）往往是较小的定值，且希望能从电源获得最大的功率输出，而电源的效率往往不予考虑。通常设法改变负载电阻，或者在信号源与负载之间加阻抗变换器（如音频功放的输出级与扬声器之间的输出变压器），使电路处于工作匹配状态，以使负载能获得最大的输出功率。

三、实验设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	直流电流表	0~2000mA	1	
2	直流电压表	0~300V	1	
3	直流稳压电源	0~30V	1	
4	实验箱	HE-11	1	
5	元件箱	HE-19	1	

四、实验内容与步骤

1、利用相关器件及屏上的电流插座，参照图 11-2 接线。图中的电源 U_S 接直流稳压电源，负载 R_L 取自元件箱 HE-19 的电阻箱。

2、开启稳压电源开关，调节其输出电压为 10V，之后关闭该电源，通过导线将其输出端接至实验线路 U_S 两端。

3、设置 $R_0=100\Omega$ ，开启稳压电源，用直流电压表按下表中的内容进行测量，即令 R_L 在 0~1k 范围内变化时，分别测出 U_O 、 U_L 及 I 的值，并填入表 11-1 中。表中 U_O 、 $P_O(=U_O \times I)$ 分别为稳压电源的输出电压和功率， U_L 、 $P_L(=U_L \times I)$ 分别为 R_L 二端的电压和功率， I 为电路的电流。

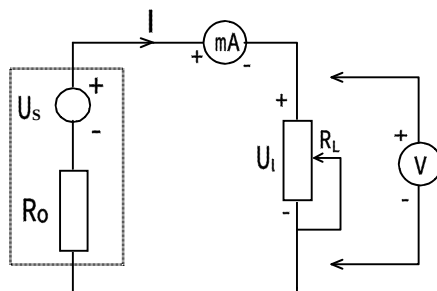


图 11-2

表 11-1 (单位：R— Ω ，U—V，I—mA，P—W)

$U_S=$ 10V $R_{01}=$ 100 Ω	R_L		1k	∞
	U_O			
	U_L			
	I			
	P_O			
	P_L			
$U_S=$ 15V $R_{02}=$ 300 Ω	R_L		1k	∞
	U_O			
	U_L			
	I			
	P_O			
	P_L			

4、改变内阻值为 $R_0=300\Omega$ ，输出电压 $U_S=15V$ ，重复上述测量。

五、实验注意事项

- 1)、实验前要了解智能电压电流表的使用与操作方法。
- 2)、在最大功率附近处可多测几点。

六、预习与思考题

- 1)、电力系统进行电能传输时为什么不能工作在匹配工作状态？
- 2)、实际应用中，电源的内阻是否随负载而变？
- 3)、电源电压的变化对最大功率传输的条件有无影响？

七、实验报告

- 1、整理实验数据，分别画出两种不同内阻下的下列各关系曲线：
 $I \sim R_L$, $U_O \sim R_L$, $U_L \sim R_L$, $P_O \sim R_L$, $P_L \sim R_L$
- 2、根据实验结果，说明负载获得最大功率的条件是什么？

实验十二 受控源 VCVS、VCCS、CCVS、CCCS 的实验研究

一、实验目的

通过测试受控源的外特性及其转移参数，进一步理解受控源的物理概念，加深对受控源的认识和理解。

二、原理说明

1. 电源有独立电源（如电池、发电机等）与非独立电源（或称为受控源）之分。

受控源与独立源的不同点是：独立源的电势 E_s 或电激流 I_s 是某一固定的数值或是时间的某一函数，它不随电路其余部分的状态而变。而受控源的电势或电激流则是随电路中另一支路的电压或电流而变的一种电源。

受控源又与无源元件不同，无源元件两端的电压和它自身的电流有一定的函数关系，而受控源的输出电压或电流则和另一支路（或元件）的电流或电压有某种函数关系。

2. 独立源与无源元件是二端器件，受控源则是四端器件，或称为双口元件。它有一对输入端（ U_1 、 I_1 ）和一对输出端（ U_2 、 I_2 ）。输入端可以控制输出端电压或电流的大小。施加于输入端的控制量可以是电压或电流，因而有两种受控电压源（即电压控制电压源 VCVS 和电流控制电压源 CCVS）和两种受控电流源（即电压控制电流源 VCCS 和电流控制电流源 CCCS）。

3. 当受控源的输出电压（或电流）与控制支路的电压（或电流）成正比变化时，则称该受控源是线性的。

理想受控源的控制支路中只有一个独立变量（电压或电流），另一个独立变量等于零，即从输入口看，理想受控源或者是短路（即输入电阻 $R_1=0$ ，因而 $U_1=0$ ）或者是开路（即输入电导 $G_1=0$ ，因而输入电流 $I_1=0$ ）；从输出口看，理想受控源或是一个理想电压源或者是一个理想电流源，如图 12-1 所示。

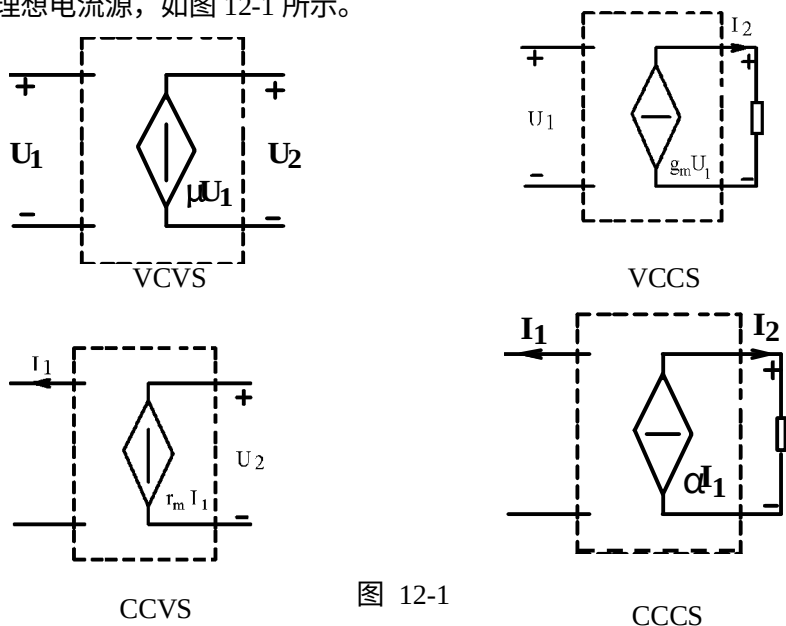


图 12-1

4. 受控源的控制端与受控端的关系式称为转移函数。

四种受控源的定义及其转移函数参量的定义如下：

- (1) 压控电压源(VCVS)： $U_2=f(U_1)$ ， $\mu=U_2/U_1$ 称为转移电压比（或电压增益）。
- (2) 压控电流源(VCCS)： $I_2=f(U_1)$ ， $g_m=I_2/U_1$ 称为转移电导。
- (3) 流控电压源(CCVS)： $U_2=f(I_1)$ ， $r_m=U_2/I_1$ 称为转移电阻。
- (4) 流控电流源(CCCS)： $I_2=f(I_1)$ ， $\alpha=I_2/I_1$ 称为转移电流比（或电流增益）。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压源	0~30V	1	
2	可调恒流源	0~500mA	1	
3	直流数字电压表	0~300V	1	
4	直流数字电流表	0~2000mA	1	
5	可变电阻箱	0~99999.9 Ω	1	HE-19
6	受控源实验电路板		1	HE-13

四、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 $U_2=f(I_L)$ ，实验线路如图 12-2。

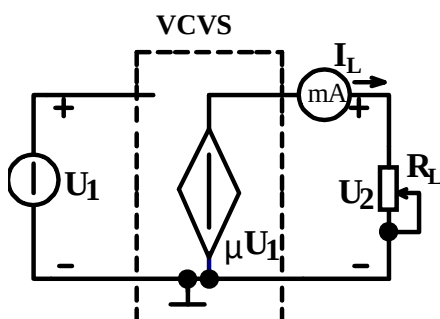


图 12-2

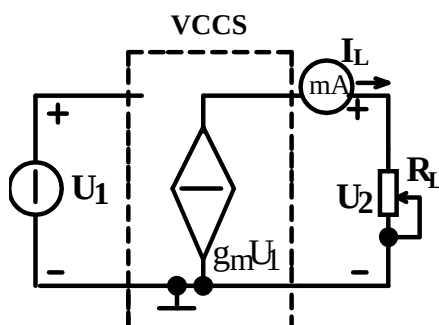


图 12-3

- (1) 不接电流表，固定 $R_L=2k\Omega$ ，调节稳压电源输出电压 U_1 ，测量 U_1 及相应的 U_2 值，记入下表。

U_1 (V)	0	1	2	3	5	7	8	9	μ
U_2 (V)									

在方格纸上绘出电压转移特性曲线 $U_2=f(U_1)$ ，并在其线性部分求出转移电压比 μ 。

- (2) 接入电流表，保持 $U_1=2V$ ，利用电阻箱改变 R_L 的阻值，测 U_2 及 I_L ，绘制负载特性曲线 $U_2=f(I_L)$ 。

$R_L (\Omega)$	50	70	100	200	300	400	500	∞
$U_2 (v)$								
$I_L (mA)$								

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 12-3。

(1) 固定 $R_L=2k\Omega$, 调节稳压电源的输出电压 U_1 , 测出相应的 I_L 值, 绘制 $I_L=f(U_1)$ 曲线, 并由其线性部分求出转移电导 g_{mo}

$U_1 (V)$	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	3.5	3.7	4.0	g_m
$I_L (mA)$									

(2) 保持 $U_1=2V$, 令 R_L 从大到小变化, 测出相应的 I_L 及 U_2 , 绘制 $I_L=f(U_2)$ 曲线。

$R_L (k\Omega)$	5	4	2	1	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
$I_L (mA)$										
$U_2 (v)$										

3. 测量受控源 C CVS 的转移特性 $U_2=f(I_1)$ 与负载特性 $U_2=f(I_L)$, 实验线路如图 12-4。

(1) 固定 $R_L=2k\Omega$, 调节恒流源的输出电流 I_s , 按下表所列 I_s 值, 测出 U_2 , 绘制 $U_2=f(I_1)$ 曲线, 并由其线性部分求出转移电阻 r_{mo}

$I_1 (mA)$	0.1	1.0	3.0	5.0	7.0	8.0	9.0	9.5	r_m
$U_2 (v)$									

(2) 保持 $I_s=2mA$, 按下表所列 R_L 值, 测出 U_2 及 I_L , 绘制负载特性曲线 $U_2=f(I_L)$ 。

$R_L (k\Omega)$	0.5	1	2	4	6	8	10
$U_2 (v)$							
$I_L (mA)$							

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 12-5。

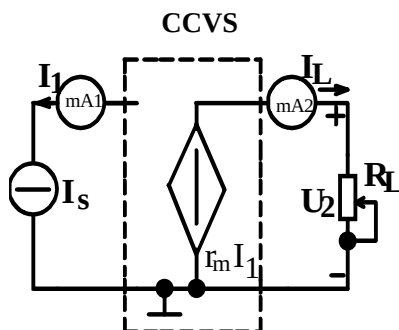


图 12-4

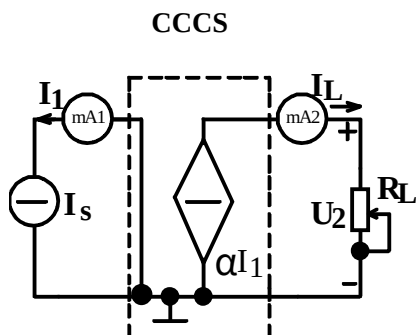


图 12-5

(1) 参见 3(1)测出 I_L , 绘制 $I_L=f(I_1)$ 曲线, 并由其线性部分求出转移电流比 α 。

I_1 (mA)	0.1	0.2	0.5	1	1.5	2	2.2	α
I_L (mA)								

(2)保持 $I_s=1\text{mA}$ ，令 R_L 为下表所列值，测出 I_L ， 绘制 $I_L=f(U_2)$ 曲线。

R_L (k Ω)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	5	10	20
I_L (mA)										
U_2 (v)										

五、实验注意事项

1. 每次组装线路，必须事先断开供电电源，但不必关闭电源总开关。

六、预习思考题

1. 受控源和独立源相比有何异同点？比较四种受控源的代号、 电路模型、控制量与被控量的关系如何？
2. 四种受控源中的 r_m 、 g_m 、 α 和 μ 的意义是什么？如何测得？
3. 若受控源控制量的极性反向，试问其输出极性是否发生变化？
4. 受控源的控制特性是否适合于交流信号？

七、实验报告

1. 根据实验数据， 在方格纸上分别绘出四种受控源的转移特性和负载特性曲线，并求出相应的转移参量。
2. 对预习思考题作必要的回答。
3. 对实验的结果作出合理的分析和结论， 总结对四种受控源的认识和理解。
4. 心得体会及其它。

实验十三 周期性电压信号的峰值、平均值和有效值的测量

一、实验目的

- 1、加深对周期性电压信号的峰值、平均值和有效值概念的理解，学会相应的计算和测量。
- 2、了解几种常见的周期性电压信号（正弦波、矩形波、脉冲波、三角波）的三种值之间的关系。
- 3、学会函数信号发生器和示波器的使用方法。

二、原理说明

一个周期性交流电压 $v(t)$ 的大小，可以用它的峰值 V_p （有时也用峰-峰值 $V_{p-p}=2V_p$ ，见图 13-1）、平均值 $\bar{V}$ 和有效值 V 来表示。

交流电压表在测量交流电压时，一般都采用 AC/DC 变换器（通常用检波器来实现）把被测交流电压转变成直流电流 I 。如果用模拟（指针式）电压表来指示，就用 I 来驱动直流电流表偏转，并根据被测交流电压的大小与转换成的 I 的关系在表盘上刻以电压值；如果用数显电压表来显示，就将 I 再转换成直流电压，再用专用的 A/D 转换集成电路芯片显示相应的数字量。

被测交流电压经 AC/DC 转换后所得到的电流 I 与 AC/DC 变换器对被测交流电压的响应特性密切相关。通常有峰值响应、平均值响应和有效值响应三种检波器，相对应的就有峰值电压表、平均值电压表和有效值电压表。

1、峰值电压表

峰值电压表大都采用二极管峰值检波器，即检波器（AC/DC 变换器，下同）是峰值响应的。峰值电压表的指示或显示值与被测电压（任意波形）的峰值成正比。实际上除了某些特殊需要外，峰值电压表也是按正弦有效值来指示或显示的。

2、平均值电压表

在平均值电压表中，检波器对被测电压的平均值产生响应，一般都用全波整流电路作检波器。为了改

善检波器的线性，常将检波器放在运算放大器电路中，组成精密线性检波器。平均值电压表的指示或显示值与被测电压的平均值成正比。

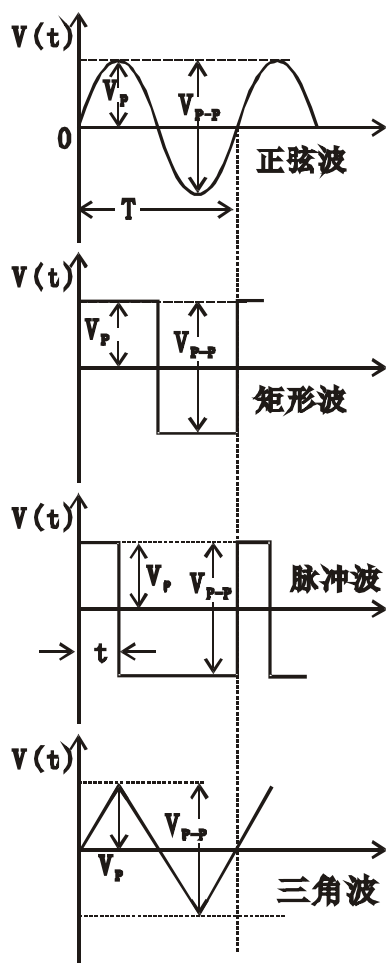


图 13-1

周期为 T 的交流电压 $v(t)$ ，其平均值 $\bar{V}$ 的数学定义为： $\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt$ 。对纯粹的交流电压（如正弦波）而言，按此式求得的 $\bar{V} = 0$ 。因此从测量的观点讲，平均值一般是指经过全波检波后的平均值，即 $\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T |v(t)| dt$ 。

平均值电压表虽然是平均值响应，但习惯上仍以正弦波电压的有效值进行刻度或显示。

3、有效值电压表

交流电压的有效值是指：让一个或多个完整周期的交流电压通过某纯阻负载所产生的热量，与一个直流电压在相同时间内通过同一负载所产生的热量相等，则该直流电压的值就是交流电压的有效值。交流电压的有效值表征了其做功能力的大小。

在数学上，有效值就是均方根值，即 $V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v^2(t) dt}$

有效值电压表通常采用两种电路，即热电变换（利用热电偶）电路和模拟计算电路（专用集成电路芯片）来实现电压有效值的测量。

综上所述，峰值电压表、平均值电压表和有效值电压表，只是其中的 AC/DC 转换器的响应不同，再采用相应的电路，使表头的指示（刻度）或显示值为正弦波有效值。换言之，如果被测的周期性交流电压为正弦波，那么经过这三种检波电路后，测得的值是相同的，其真正的峰值、平均值可根据其有效值来换算。如果被测的周期性交流电压是非正弦波，那么，经过这三种检波电路后，测得的值是各不相同的。其中，经过峰值和平均值两种电路后测得的值并不是被测电压的有效值（也不是峰值或平均值）。只有经过有效值电路后测得的值才是被测电压的有效值。因此，用峰值电压表或平均值电压表测量非正弦波交流电压会有较大测量误差。为便于对照，现将几种常见波形（波形图见图 13-1）的峰值、平均值和有效值列于下表。

波形	峰值	平均值	有效值	波形	峰值	平均值	有效值
正弦波	V_P	$0.637V_P$	$0.707V_P$	矩形波	V_P	V_P	V_P
三角波	V_P	$V_P/2$	$0.577V_P$	脉冲波	V_P	$t \cdot V_P/T$	$V_P \sqrt{t/T}$

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	函数信号发生器		1	屏上
2	三值电压表		1	HE-18A
3	示波器		1	自备

四、实验内容

1、开启实验装置总电源、函数信号发生器 TH-SG01P 的电源和屏上直流数显稳压电源的电源开关，将其中的 $\pm 12\text{V}$ 、 $+5\text{V}$ 固定电源引入 HE-18A 实验箱，预热 10 分钟。

2、令函数信号发生器输出 1kHz 、 $V_p=2\text{V}$ （用示波器观测）的正弦波，依次接入 HE-18A 的峰值、平均值和有效值三个模块的输入端。用 HE-18A 中的直流电压表测量并记录各模块的相应输出值，记入表中。

3、令函数信号发生器输出 1kHz 、 $V_p=2\text{V}$ 占空比为 50%的矩形波，重复第 2 步的测量。

4、将矩形波的占空比改为 20%，重复第 2 步的测量。

5、令函数信号发生器输出 1kHz 、 $V_p=2\text{V}$ 的三角波，重复第 2 步的测量。

波 形	峰 值	平均值	有效值
正弦波			
矩形波			
脉冲波			
三角波			

五、实验注意事项

每一种波形在三次测量中，其幅值、频率不得改变。

六、实验报告

1、根据测得的数据，验证同一波形三种值之间的关系公式。

2、计算各测量数据与理论值之间的误差，并分析原因。

3、心得体会及其它。

实验十四 典型电信号的观察与测量

一、实验目的

1. 熟悉低频信号发生器、脉冲信号发生器各旋钮、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。
3. 初步掌握示波器、信号发生器的使用。

二、实验说明

1. 正弦交流信号和方波脉冲信号是常用的电激励信号，可分别由低频信号发生器和脉冲信号发生器提供。正弦信号的波形参数是幅值 U_m 、周期 T （或频率 f ）和初相；脉冲信号的波形参数是幅值 U_m 、周期 T 及脉宽 t_{ko} 。

2. 电子示波器是一种信号图形观测仪器，可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 V/div 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（时间扫描速度 T/div 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、不同要求的观察和测量，它还有一些其它的调节和控制旋钮，希望在实验中加以摸索和掌握。

一台双踪示波器可以同时观察和测量两个信号的波形和参数。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	双踪示波器		1	
2	低频、脉冲信号发生器		1	
3	交流毫伏表	0~600V	1	
4	频率计		1	

四、实验内容

1. 双踪示波器的自检

将示波器面板部分的“标准信号”插口，通过示波器专用同轴电缆接至双踪示波器的 Y 轴输入插口 Y_A 或 Y_B 端，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，并将它们的微调旋钮旋至“校准”位置，从荧光屏上读出该“标准信号”的幅值与频率，并与标称值（1V，1kHz）作比较，如相差较大，请指导老师给予校准。

2. 正弦波信号的观测

(1) 将示波器的幅度和扫描速度微调旋钮旋至“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 Y_A 插座相连。

(3) 接通信号发生器的电源，选择正弦波输出。通过相应调节，使输出频率分别为 50Hz、1.5kHz 和 20kHz（由频率计读出）；再使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，从荧光屏上读得幅值及周期，记入表中。

频率计读数	正弦波信号频率的测定		
测定项目	50Hz	1500Hz	20000Hz
示波器“t/div”旋钮位置			
一个周期占有的格数			
信号周期（ms）			
计算所得频率（Hz）			

交流毫伏表读数	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—峰值			
计算所得有效值			

3. 方波脉冲信号的观察和测定

(1) 将电缆插头换接在脉冲信号的输出插口上，选择信号源为方波输出。

(2) 调节方波的输出幅度为 3.0V_{p-p}（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，选择不同的幅度及脉宽，观测波形参数的变化。

五、实验注意事项

1. 示波器的辉度不要过亮。
2. 调节仪器旋钮时，动作不要过快、过猛。
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. 为防止外界干扰，信号发生器的接地端与示波器的接地端要相连（称共地）。
6. 不同品牌的示波器，各旋钮、功能的标注不尽相同，实验前请详细阅读所用示波器的说明书。
7. 实验前应认真阅读信号发生器的使用说明书。

六、预习思考题

- 1. 示波器面板上“t/div”和“V/div”的含义是什么？
- 2. 观察本机“标准信号”时，要在荧光屏上得到两个周期的稳定波形，而幅度要求为五格，试问Y轴电压灵敏度应置于哪一档位置？“t/div”又应置于哪一档位置？
- 3. 应用双踪示波器观察到如图 14-1 所示的两个波形，Y_A和Y_B轴的“V/div”的指示均为0.5V，“t/div”指示为20μS，试写出这两个波形信号的波形参数。

七、实验报告

- 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测电信号的方法。
- 3. 如用示波器观察正弦信号时，荧光屏上出现图 14-2 所示的几种情况时，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。

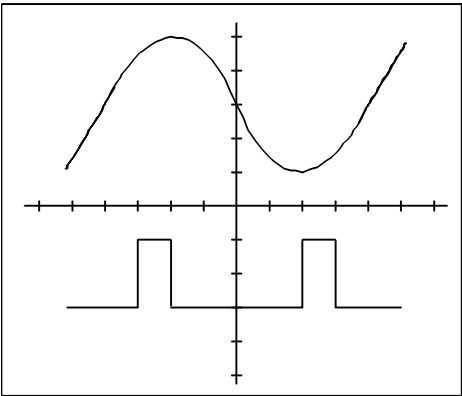


图 14-1

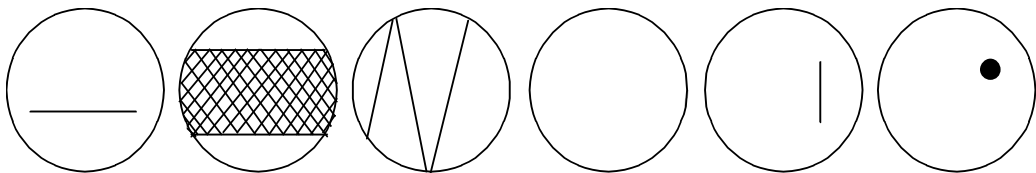


图 14-2

实验十五 RC 一阶电路的响应测试

一、实验目的

1. 测定 RC 一阶电路的零输入响应、零状态响应及完全响应。
2. 学习电路时间常数的测量方法。
3. 掌握有关微分电路和积分电路的概念。
4. 进一步学会用示波器观测波形。

二、原理说明

1. 动态网络的过渡过程是十分短暂的单次变化过程。要用普通示波器观察过渡过程和测量有关的参数,就必须使这种单次变化的过程重复出现。为此,我们利用信号发生器输出的方波来模拟阶跃激励信号,即利用方波输出的上升沿作为零状态响应的正阶跃激励信号;利用方波的下降沿作为零输入响应的负阶跃激励信号。只要选择方波的重复周期远大于电路的时间常数 τ , 那么电路在这样的方波序列脉冲信号的激励下, 它的响应就和直流电接通与断开的过渡过程是基本相同的。

2. 图 15-1(b)所示的 RC 一阶电路的零输入响应和零状态响应分别按指数规律衰减和增长, 其变化的快慢决定于电路的时间常数 τ 。

3. 时间常数 τ 的测定方法:

用示波器测量零输入响应的波形如图 15-1(a)所示。

根据一阶微分方程的求解得知 $u_c = U_m e^{-t/RC} = U_m e^{-t/\tau}$ 。当 $t = \tau$ 时, $U_c(\tau) = 0.368 U_m$ 。此时所对应的时间就等于 τ 。亦可用零状态响应波形增加到 $0.632 U_m$ 所对应的时间测得, 如图 15-1(c)所示。

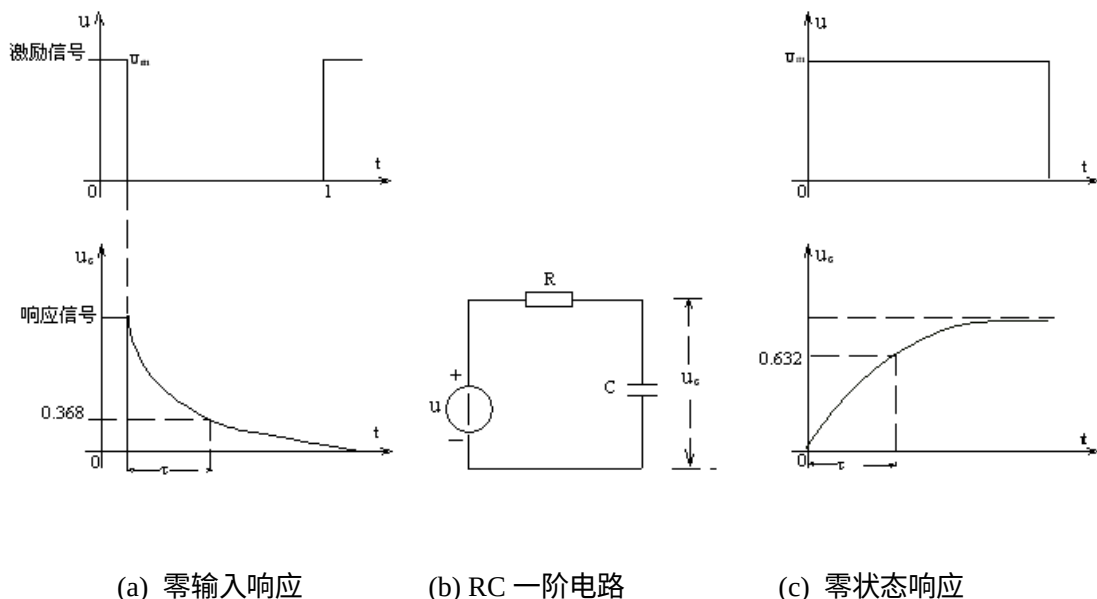


图 15-1

4. 微分电路和积分电路是 RC 一阶电路中较典型的电路，它对电路元件参数和输入信号的周期有着特定的要求。一个简单的 RC 串联电路，在方波序列脉冲的重复激励下，

当满足 $\tau = RC \ll \frac{T}{2}$ 时（ T 为方波脉冲的重复周期），且由 R 两端的电压作为响应输出，

这就是一个微分电路。因为此时电路的输出信号电压与输入信号电压的微分成正比。如图 15-2(a)所示。利用微分电路可以将方波转变成尖脉冲。

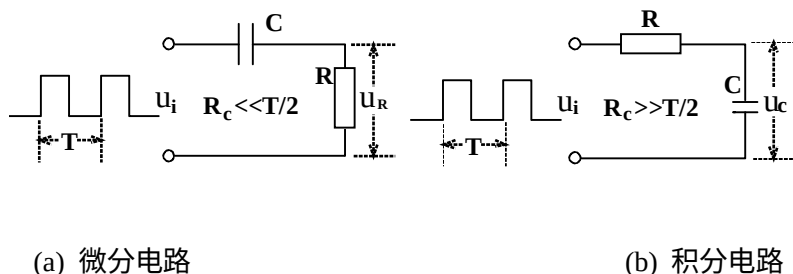


图 15-2

若将图 15-2 (a) 中的 R 与 C 位置调换一下，如图 15-2 (b) 所示，由 C 两端的电压作为响应输出。当电路的参数满足 $\tau = RC \gg \frac{T}{2}$ 条件时，即称为积分电路。因为此时电路的输出信号电压与输入信号电压的积分成正比。利用积分电路可以将方波转变成三角波。

从输入输出波形来看，上述两个电路均起着波形变换的作用，请在实验过程中仔细观察与记录。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	脉冲信号发生器		1	
2	双踪示波器		1	
3	动态电路实验板		1	HE-14

四、实验内容

实验线路板采用 HE-14 实验挂箱的“一阶、二阶动态电路”，如图 15-3 所示，请认清 R 、 C 元件的布局及其标称值，各开关的通断位置等等。

1. 从电路板上选 $R=10k\Omega$ ， $C=6800pF$ 组成如图 15-1(b)所示的 RC 充放电电路。 u 为信号发生器输出的 $U_{p.p}=3V$ 、 $f=1kHz$ 的方波电压信号，并通过两根同轴电缆线，将激励源 u 和响应 u_c 的信号分别连至示波器的两个输入口 Y_A 和 Y_B 。这时可在示波器的屏幕上观察到激励与响应的变化规律，请测算出时间常数 τ ，并用方格纸按 1:1 的比例描绘波形。

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。

2. 令 $R=10k\Omega$ ， $C=0.1\mu F$ ，观察并描绘响应的波形，继续增大 C 之值，定性地观

察对响应的影响。

3. 令 $C=0.01\mu\text{F}$, $R=100\Omega$, 组成如图 15-2(a)所示的微分电路。在同样的方波激励信号 ($U_{p-p}=3\text{V}$, $f=1\text{kHz}$) 作用下, 观测并描绘激励与响应的波形。

增减 R 之值, 定性地观察对响应的影响, 并作记录。当 R 增至 $1\text{M}\Omega$ 时, 输入输出波形有何本质上的区别?

五、实验注意事项

1. 调节电子仪器各旋钮时, 动作不要过快、过猛。实验前, 需熟读双踪示波器的使用说明书。观察双踪时, 要特别注意相应开关、旋钮书。观察双踪时, 要特别注意相应开关、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(称共地), 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, 以延长示波管的使用寿命。

六、预习思考题

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 RC 一阶电路 $R=10\text{k}\Omega$, $C=0.1\mu\text{F}$, 试计算时间常数 τ , 并根据 τ 值的物理意义, 拟定测量 τ 的方案。

3. 何谓积分电路和微分电路, 它们必须具备什么条件? 它们在方波序列脉冲的激励下, 其输出信号波形的变化规律如何? 这两种电路有何作用?

4. 预习要求: 熟读仪器使用说明, 回答上述问题, 准备方格纸。

七、实验报告

1. 根据实验观测结果, 在方格纸上绘出 RC 一阶电路充放电时 u_c 的变化曲线, 由曲线测得 τ 值, 并与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。

2. 心得体会及其它。

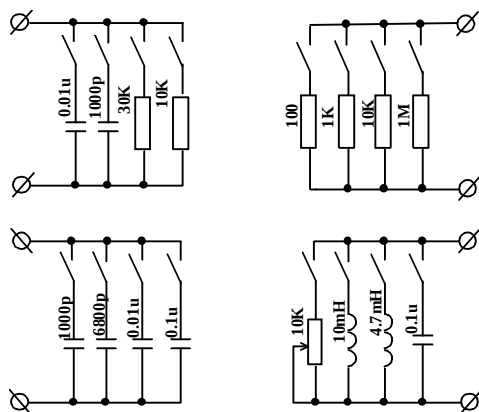


图 15-3 动态电路、选频电路实验板

实验十六 二阶动态电路响应的研究

一、实验目的

1. 学习用实验的方法来研究二阶动态电路的响应，了解电路元件参数对响应的影响。
2. 观察、分析二阶电路响应的三种状态轨迹及其特点，以加深对二阶电路响应的认识与理解。

二、原理说明

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。当调节电路的元件参数值，使电路的固有频率分别为负实数、共轭复数及虚数时，可获得单调地衰减、衰减振荡和等幅振荡的响应。在实验中可获得过阻尼，欠阻尼和临界阻尼这三种响应图形。

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。本实验仅对 GCL 并联电路进行研究。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	脉冲信号发生器		1	
2	双踪示波器		1	
3	动态实验电路板		1	HE-14

四、实验内容

动态电路实验板与实验十五相同，如图 15-3 所示。利用动态电路板中的元件与开关的配合作用，组成如图 16-1 所示的 GCL 并联电路。

令 $R_1=10\text{k}\Omega$ ， $L=4.7\text{mH}$ ， $C=1000\text{PF}$ ， R_2 为 $10\text{k}\Omega$ 可调电阻。令脉冲信号发生器的输出为 $U_{P-P}=1.5\text{V}$ ， $f=1\text{kHz}$ 的方波脉冲，通过同轴电缆接至图中的激励端，同时用同轴电缆将激励端和响应输出接至双踪示波器的 Y_A 和 Y_B 两个输入口。

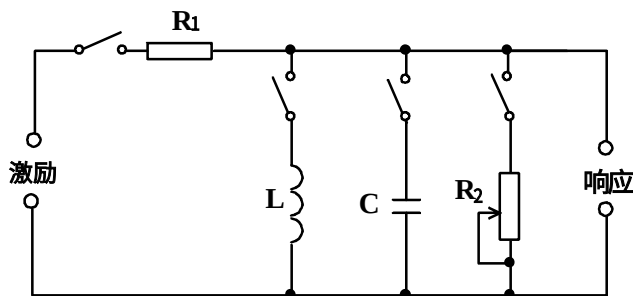


图 14-1

1. 调节可变电阻器 R_2 之值，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，分别定性地描绘、记录响应的典型变化波形。
2. 调节 R_2 使示波器荧光屏上呈现稳定的欠阻尼响应波形，测量计算此时电路的衰减常数 α 和振荡频率 ω_d 。

3. 改变一组电路参数，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 α 的变化趋势，并作记录。

电路参数 实验次数	元 作 参 数				计算值	
	R_1	R_2	L	C	α	ω_d
1	10k Ω	调至 某一 次欠 阻尼 态	4.7mH	1000PF		
2	10k Ω		4.7mH	0.01 μ F		
3	30k Ω		4.7mH	0.01 μ F		
4	10k Ω		10mH	0.01 μ F		

五、实验注意事项

1. 调节 R_2 时，要细心、缓慢，临界阻尼要找准。
2. 观察双踪时，显示要稳定，如不同步， 则可采用外同步法触发（看示波器说明）。

六、预习思考题

1. 根据二阶电路实验电路元件的参数， 计算出处于临界阻尼状态的 R_2 之值。
2. 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 α 和振荡频率 ω_d ？

七、实验报告

1. 根据观测结果，在方格纸上描绘二阶电路过阻尼、 临界阻尼和欠尼的响应波形。
2. 测算欠阻尼振荡状态时的 α 与 ω_d 。
3. 归纳、总结电路元件参数的改变对响应变化趋势的影响。
4. 心得体会及其它。

附录：欠阻尼状态下 α 与 ω_d 的测算。

用示波器观察欠阻尼状态时响应端 U_0 的波形，应如图 16-2 所示，则：

$$\omega_d = 2\pi / T'$$

$$\alpha = \frac{1}{T'} \ln \frac{U_2}{U_1}$$

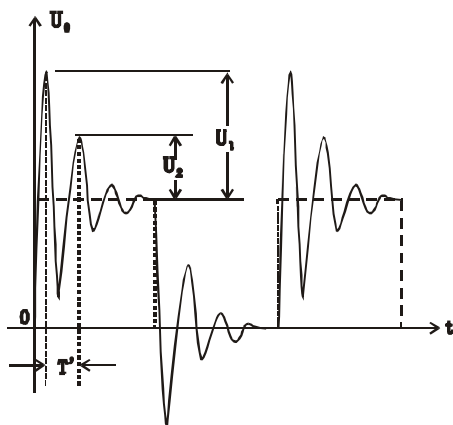


图 16-2

实验十七 交流电路频率特性的测定

一、实验目的

- 1、了解几种交流电路的频率特性。
- 2、掌握交流电路中相关参数的测试方法。

二、实验原理

交流电路的基本元件有电阻 R、电感 L 和电容 C。用它们可以组成串联、并联或各种串、并混合电路。如果保持交流激励源的幅值不变，只改变其频率，则电路中各电容和电感元件的电流、电压的幅值和相位都随着改变，这就是交流电路的频率特性。其中幅值与频率的关系称为幅频特性，相位与频率的关系称作相频特性。本实验将测试几种交流电路的幅频特性。

1、高通和低通滤波电路

图 17-1 (a)、(b) 分别为高通和低通滤波电路。它们的幅频特性曲线分别如图 17-2 (a)、(b) 所示。由图可见，高通/低通滤波电路中，频率越高/低，信号通过的能力就越强。当

$\omega = \omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$ 时， $A(\omega_0) = 0.707$ ，即 $U_2 = 0.707U_1$ 。通常将 f_0 视为信号能通过的最低/最高频率，称作下限/上限频率。

2. 用电阻和电容还能构成带通和带阻电路，它们的幅频率特性曲线分别如图 17-3 (a)、(b) 所示。图中

$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{RC}$ ，在带通滤波器中，只有频率在 $(\omega_1 \sim \omega_2) / 2\pi$ 之间的信号才能顺利通过。而在带阻滤波器中，频率在 $(\omega_1 \sim \omega_2) / 2\pi$ 之间的信号则被阻止通过，其余频率的信号则能顺利通过。

RC 文氏桥电路是一种典型的带通滤波器电路，RC 双 T 电路则是一种带阻滤波器电路。该两电路的测试详见本书实验二十一，此处不再测试。

3. RLC 串联电路和 RLC 并联电路也是研究交流电路频率特性的典型电路。它们都是带通电路。在 RLC 的简单串联/并联电路中，如果保持交流激励源的电压/电流的幅值不变，

只改变激励源的频率，那么电容 C 的容抗 $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ 将随频率的增加而减小，而电感 L 的

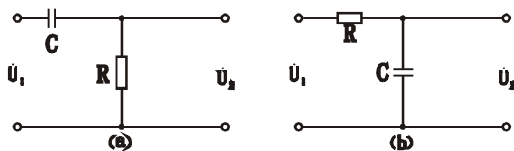


图 17-1

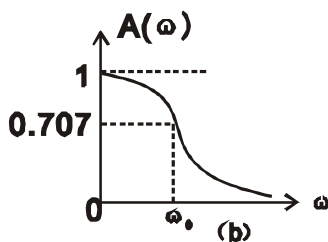
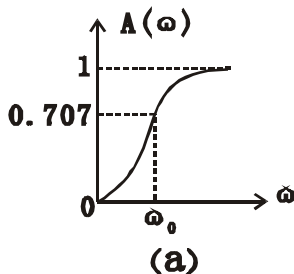


图17-2

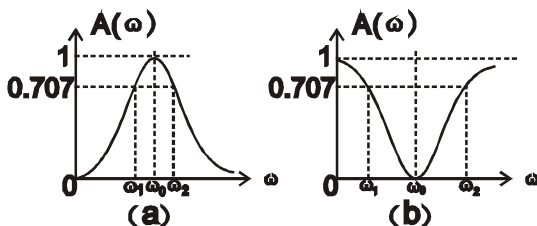


图17-3

感抗 $X_L = 2\pi fL$ 将随频率的升高而增加。因此，必然存在某一频率 f_0 ，使得 $X_C = X_L$ ，即

$$\frac{1}{2\pi f_0 C} = 2\pi f_0 L, \text{ 这时就称该电路达到或处于谐振状态。谐振时的频率 } f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ 则称}$$

作该电路的谐振频率。处于谐振状态的串联/并联电路呈纯阻性，L 与 C 串联/并联支路的阻抗达到最小/最大，因而电路的电流/电压达到最大值。该两电路的幅频特性曲线与图 17-3 (a) 相同。RLC 串联电路的频率特性测试详见本书实验二十二。本实验只测试 RLC 并联电路。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	函数信号发生器、频率计	TH-SG01P	1	屏上
2	交流毫伏表	0-600V	1	屏上
3	实验器件	R、L、C、r 等	1	HE-15

四、实验内容

(一) 高通、低通滤波电路

1、利用 HE-15 串联谐振电路中的 $0.1\mu F$ 和 $1k\Omega$ 电阻（将 L 短接），按图 17-1 (a) 接线。

2、令函数信号发生器输出 $10V_{p-p}$ 的正弦波接入 U_1 两端。

3、调节函数信号发生器输出信号的频率为表 1 所列 f 值，保持信号幅值 ($10V_{p-p}$) 不变，测量每个频率值下相应的 R 和 C 两端的电压 U_R 和 U_C ，记入表 1。

表 1

$f(kHz)$	0.1	1	3	5	7	9	10	11	12	14	16	18	20
$U_R(V)$													
$U_C(V)$													

(二) RLC 并联电路

1、利用 HE-15 串联谐振电路中的 $0.1\mu F$ 电容、 $30mH$ 电感、 200Ω 及 $1k\Omega$ 电阻，组成图 17-4 电路。

2、将函数信号发生器输出的正弦波经功率输出接入 a、b。

3、依次将函数信号发生器输出信号的频率调至表 1 所列 f 值，并调节输出信号的幅值，使 r 两端的电压 $U_r = 1.00V$ 。

4、在每一频率值下，用交流毫伏表测量 R 两端的电压 U_R ，记入表 2。

五、实验注意事项

每次调准函数信号发生器输出信号的频率值后，都应调节输出信号的幅度值，使高通、低通滤波电路的 $U_1 = 10V_{p-p}$ 或 RLC 并联电路的 $U_r = 1.00V$ 。

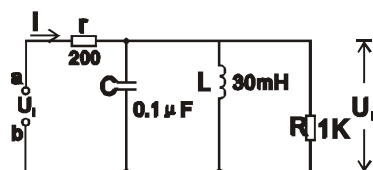


图17-4

六、实验报告

1、根据实验数据，在坐标纸上绘制高通、低通滤波电路和 RLC 并联电路的幅频特性曲线，求出上、下限频率或通带宽度。

2、总结高通、低通滤波电路和 RLC 并联电路的频率特性。

表 2

$f(\text{kHz})$	0.5	1.0	2.0	2.8	2.9	3.0	3.5	4.0	5	6	8	10
$U_R(\text{V})$												

实验十八 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 $R \sim f$ 、 $X_L \sim f$ 及 $X_C \sim f$ 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、原理说明

1. 在正弦交变信号作用下，R、L、C 电路元件在电路中的抗流作用与信号的频率有关，它们的阻抗频率特性 $R \sim f$ 、 $X_L \sim f$ 、 $X_C \sim f$ 曲线如图 18-1 所示。

2. 元件阻抗频率特性的测量电路如图 18-2 所示。

图中的 r 是提供测量回路电流用的标准小电阻，由于 r 的阻值远小于被测元件的阻抗值，因此可以认为 AB 之间的电压就是被测元件 R、L 或 C 两端的电压，流过被测元件的电流则可由 r 两端的电压除以 r 所得。

若用双踪示波器同时观察 r 与被测元件两端的电压，亦就展现出被测元件两端的电压和流过该元件电流的波形，从而可在荧光屏上测出电压与电流的幅值及它们之间的相位差。

3. 将元件 R、L、C 串联或并联相接，亦可用同样的方法测得 $Z_{\text{串}}$ 与 $Z_{\text{并}}$ 的阻抗频率特性 $Z \sim f$ ，根据电压、电流的相位差可判断 $Z_{\text{串}}$ 或 $Z_{\text{并}}$ 是感性还是容性负载。

4. 元件的阻抗角（即相位差 ϕ ）随输入信号的频率变化而改变，将各个不同频率下的相位差画在以频率 f 为横坐标、阻抗角 ϕ 为纵坐标的坐标纸上，并用光滑的曲线连接这些点，即得到阻抗角的频率特性曲线。

用双踪示波器测量阻抗角的方法如图 18-3 所示。从荧光屏上数得一个周期占 n 格，相位差占 m 格，则实际的相位差 ϕ （阻抗角）为

$$\phi = m \frac{360^\circ}{n} \quad (\text{度})。$$

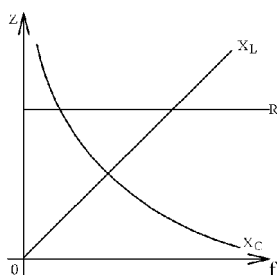


图 18-1

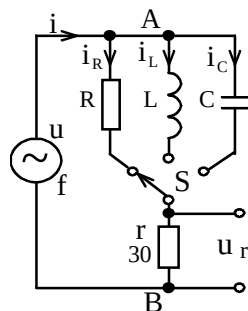


图 18-2

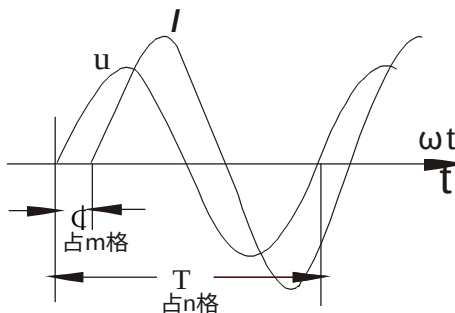


图 18-3

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备 注
1	低频信号发生器		1	
2	交流毫伏表	0~600V	1	
3	双踪示波器		1	
4	频率计		1	
5	实验线路元件	$R=1k\Omega$, $C=1\mu F$	1	HE-16
6	电阻	30Ω	1	HE-19

四、实验内容

1. 测量 R、L、C 元件的阻抗频率特性

通过电缆线将低频信号发生器输出的正弦信号接至如图 18-2 的电路，作为激励源 u ，并用交流毫伏表测量，使激励电压的有效值为 $U=3V$ ，并保持不变。

使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 S 分别接通 R、L、C 三个元件，用交流毫伏表测量 U_r ，并计算各频率点时的 I_R 、 I_L 和 I_C （即 U_r / r ）以及 $R=U/I_R$ 、 $X_L=U/I_L$ 及 $X_C=U/I_C$ 之值。

注意：在接通 C 测试时，信号源的频率应控制在 200~2500Hz 之间。

2. 用双踪示波器观察在不同频率下各元件阻抗角的变化情况，按图 18-3 记录 n 和 m ，算出 ϕ

3. 测量 R、L、C 元件串联的阻抗角频率特性。

五、实验注意事项

1. 交流毫伏表属于高阻抗电表,测量前必须先调零。
2. 测 ϕ 时，示波器的“V/div”和“t/div”的微调旋钮应旋置“校准位置”。

六、预习思考题

测量 R、L、C 各个元件的阻抗角时，为什么要与它们串联一个小电阻？可否用一个小电感或大电容代替？为什么？

七、实验报告

1. 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，从中可得出什么结论？

2. 根据实验数据,在方格纸上绘制 R、L、C 三个元件串联的阻抗角频率特性曲线，并总结、归纳出结论。

3. 心得体会及其它。

实验十九 用三表法测量电路等效参数

一、实验目的

1. 学会用交流电压表、交流电流表和功率表测量元件的交流等效参数的方法。
2. 学会功率表的接法和使用。

二、原理说明

1. 正弦交流信号激励下的元件值或阻抗值，可以用交流电压表、交流电流表及功率表分别测量出元件两端的电压 U 、流过该元件的电流 I 和它所消耗的功率 P ，然后通过计算得到所求的各值，这种方法称为三表法，是用以测量 50Hz 交流电路参数的基本方法。

计算的基本公式为：

$$\text{阻抗的模 } |Z| = \frac{U}{I}, \quad \text{电路的功率因数 } \cos \phi = \frac{P}{UI}$$

$$\text{等效电阻 } R = \frac{P}{I^2} = |Z| \cos \phi, \quad \text{等效电抗 } X = |Z| \sin \phi$$

$$\text{或 } X = X_L = 2\pi fL, \quad X = X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

2. 阻抗性质的判别方法:在被测元件两端并联电容或串联电容的方法来加以判别，方法与原理如下：

(1) 在被测元件两端并联一只适当容量的试验电容，若串接在电路中电流表的读数增大，则被测阻抗为容性，电流减小则为感性。

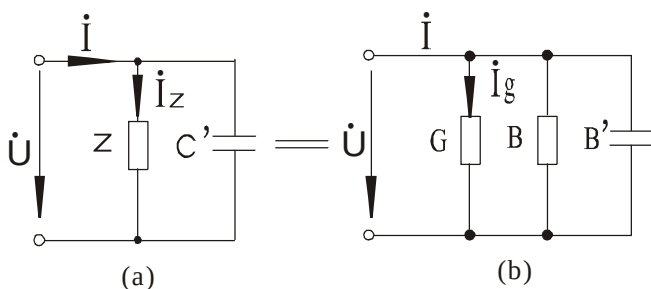


图 19-1 并联电容测量法

图 19-1(a)中， Z 为待测定的元件， C' 为试验电容器。(b)图是(a)的等效电路，图中 G 、 B 为待测阻抗 Z 的电导和电纳， B' 为并联电容 C' 的电纳。在端电压有效值不变的条件下，按下面两种情况进行分析：

① 设 $B + B' = B''$ ，若 B' 增大， B'' 也增大，则电路中电流 I 将单调地上升，故可判断 B 为容性元件。

② 设 $B + B' = B''$ ，若 B' 增大，而 B'' 先减小而后再增大，电流 I 也是先减小后上升，

如图 19-2 所示，则可判断 B 为感性元件。

由上分析可见，当 B 为容性元件时，对并联电容 C' 值无特殊要求；而当 B 为感性元件时， $B' < |2B|$ 才有判定为感性的意义。 $B' > |2B|$ 时，电流单调上升，与 B 为容性时

相同，并不能说明电路是感性的。因此 $B' < |2B|$ 是判断电路性质的可靠条件，由此得

$$\text{判定条件为 } C' < \left| \frac{2B}{\omega} \right|$$

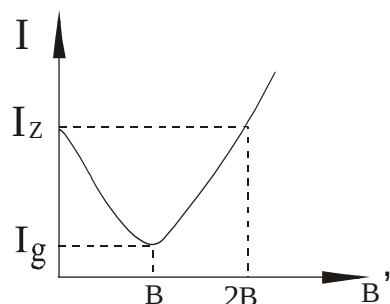


图 19-2

(2) 与被测元件串联一个适当容量的试验电容，若被测阻抗的端电压下降，则判为容性，端压上升则为感性，判定条件为 $\frac{1}{\omega C'} < |2X|$ 式中 X 为被测阻抗的电抗值，C' 为串联试验电容值，此关系式可自行证明。

判断待测元件的性质，除上述借助于试验电容 C' 测定法外，还可以利用该元件电流、电压间的相位关系，若 I 超前于 U，为容性；I 滞后于 U，则为感性。

3. 本实验所用的功率表为实验台上的智能交流功率表，其电压接线端应与负载并联，电流接线端应与负载串联。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~500V	1	
2	交流电流表	0~5A	1	
3	功率表		1	
4	自耦调压器		1	
5	电感线圈	30W 日光灯配用	1	HE-16
7	电容器	1 $\mu\text{F}/500\text{V}$ 、4.7 $\mu\text{F}/500\text{V}$	各 1	HE-16
8	白炽灯	25W /220V	3	HE-17

四、实验内容

测试线路如图 19-3 所示

1. 按图 19-3 接线，并经指导教师检查后，方可接通电源。

2. 分别测量 25W 白炽灯(R)，30W 日光灯镇流器(L) 和 4.7 μF 电容器(C)的等效参数。

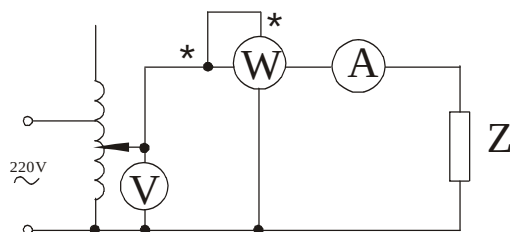


图 19-3

3. 测量 L、C 串联与并联后的等效参数。

被测阻抗	测量值				计算值		电路等效参数		
	U (V)	I (A)	P (W)	$\cos \phi$	Z (Ω)	$\cos \phi$	R (Ω)	L (mH)	C (μF)
25W 白炽灯 R									
电感线圈 L									
电容器 C									
L 与 C 串联									
L 与 C 并联									

4. 验证用串、并试验电容法判别负载性质的正确性。

实验线路同图 19-3，但不必接功率表，按下表内容进行测量和记录。

被测元件	串 $4.7 \mu F$ 电容		并 $4.7 \mu F$ 电容	
	串前端电压 (V)	串后端电压 (V)	并前电流 (A)	并后电流 (A)
R (三只 25W 白炽灯)				
C($1 \mu F$)				
L(1H)				

5. 三表法测定无源单口网络的交流参数。

(1) 实验电路如图 19-4 所示。

实验电源取自主控屏 50Hz 三相交流电源中的一相。调节自耦调压器，使单相交流最大输出电压为 150V。

用本实验单元黑匣子上的六只开关，可变换出 8 种不同的电路：

- ① K1 合（开关投向上方），其它断。
- ② K2、K4 合，其它断。
- ③ K3、K5 合，其它断。
- ④ K2 合，其它断。
- ⑤ K3、K6 合，其它断。
- ⑥ K2、K3、K6 合，其它断。
- ⑦ K2、K3、K4、K5 合，其它断。
- ⑧ 所有开关合。

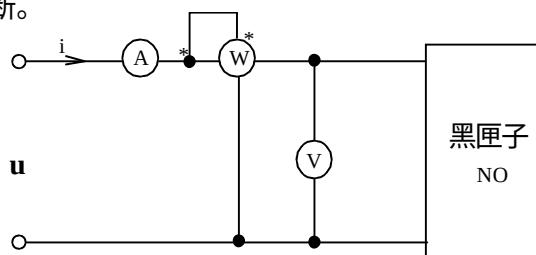


图 19-4

测出以上 8 种电路的 U、I、P 及 $\cos \phi$ 的值，并列表记录。

2) 按图 19-5 接线。将自耦调压器的输出电压调为 $\leq 30V$ 。按照第 2 步中黑匣子的 8 种开关组合，观察和记录 u、i（即 r 上的电压）的相位关系。

五、实验注意事项

1. 本实验直接用市电 220V 交流电源供电，实验中要特别注意人身安全，不可用手直接接触通电线路的裸露部分，以免触电，进实验室应穿绝缘鞋。

2. 耦调压器在接通电源前，应将其手柄置在零位上，调节时，使

其输出电压从零开始逐渐升高。每次改接实验线路、换拨黑匣子上的开关及实验完毕，都必须先将其旋柄慢慢调回零位，再断电源。必须严格遵守这一安全操作规程。

3. 实验前应详细阅读智能交流功率表的使用说明书，熟悉其使用方法。

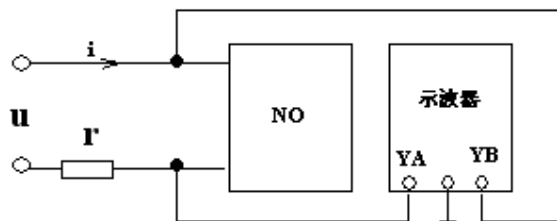


图 19-5

六、预习思考题

1. 在 50Hz 的交流电路中，测得一只铁心线圈的 P 、 I 和 U ，如何算得它的阻值及电感量？

2. 如何用串联电容的方法来判别阻抗的性质？试用 I 随 X'_C （串联容抗）的变化关系

作定性分析，证明串联试验时， C' 满足 $\frac{1}{\omega C'} < |2X|$ 。

七、实验报告

1. 根据实验数据，完成各项计算。

2. 完成预习思考题 1、2 的任务。

3. 根据实验内容 5 的观察测量结果，分别作出等效电路图，计算出等效电路参数并判定负载的性质。

4. 心得体会及其它。

实验二十 正弦稳态交流电路相量的研究

一、实验目的

1. 研究正弦稳态交流电路中电压、电流相量之间的关系。
2. 掌握日光灯线路的接线。
3. 理解改善电路功率因数的意义并掌握其方法。

二、原理说明

1. 在单相正弦交流电路中，用交流电流表测得各支路的电流值，用交流电压表测得回路各元件两端的电压值，它们之间的关系满足相量形式的基尔霍夫定律，即

$$\sum I = 0 \text{ 和 } \sum U = 0$$

2. 图 20-1 所示的 RC 串联电路，在正弦稳态信号 U 的激励下， U_R 与 U_C 保持有 90° 的相位差，即当 R 阻值改变时， U_R 的相量轨迹是一个半圆。 U 、 U_C 与 U_R 三者形成一个直角形的电压三角形，如图 20-2 所示。

R 值改变时，可改变 ϕ 角的大小，从而达到移相的目的。

3. 日光灯线路如图 20-3 所示，图中 A 是日光灯管， L 是镇流器， S 是启辉器， C 是补偿电容器，用以改善电路的功率因数（ $\cos \phi$ 值）。

有关日光灯的工作原理请自行翻阅有关资料。

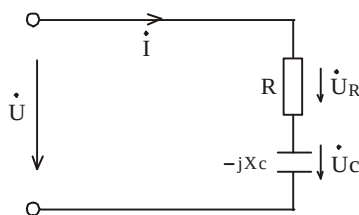


图 20-1

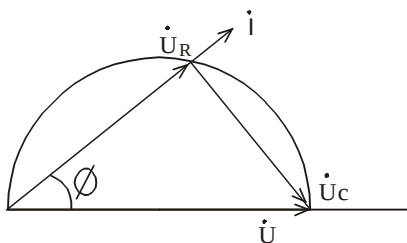


图 20-2

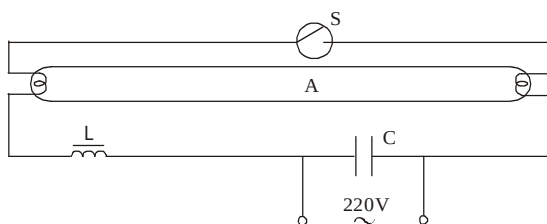


图 20-3

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~500V	1	
2	交流电流表	0~5A	1	
3	功率表		1	
4	自耦调压器		1	

5	镇流器、启辉器	与 30W 灯管配用	各 1	HE-16
6	日光灯灯管	30W	1	屏内
7	电容器	1 μF , 2.2 μF , 4.7 μF /500V	各 1	HE-16
8	白炽灯及灯座	220V, 25W	1~3	HE-17
9	电流插座		3	屏上

四、实验内容

1. 按图 20-1 接线。R 为 220V、25W 的白炽灯泡，电容器为 4.7 μF /500V。经指导教师检查后，接通实验台电源，将自耦调压器输出(即 U)调至 220V。记录 U、 U_R 、 U_C 值，验证电压三角形关系。

测 量 值			计 算 值		
U (V)	U_R (V)	U_C (V)	U' (与 U_R , U_C 组成 Rt Δ) ($U' = \sqrt{U_R^2 + U_C^2}$)	$\Delta U = U' - U$ (V)	$\Delta U/U$ (%)

2. 日光灯线路接线与测量。

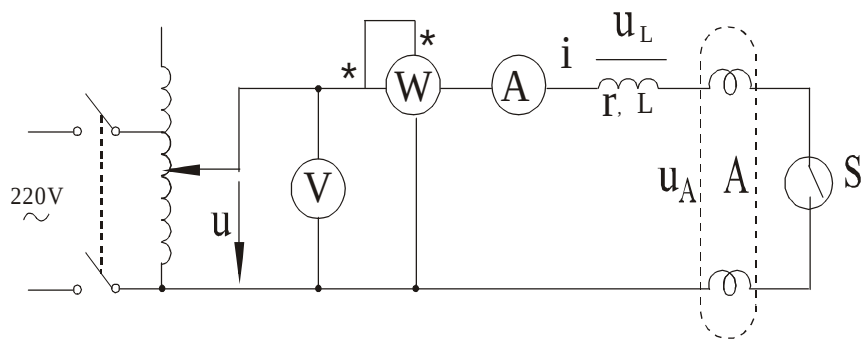


图 20-4

利用 HE-16 实验箱中“30W 日光灯实验器件”、屏上与 30W 日光灯管连通的插孔及相关器件，按图 20-4 接线。经指导教师检查后接通实验台电源，调节自耦调压器的输出，使其输出电压缓慢增大，直到日光灯刚启辉点亮为止，记下三表的指示值。然后将电压调至 220V，测量功率 P，电流 I，电压 U， U_L ， U_A 等值，验证电压、电流相量关系。

测 量 数 值							计算值	
	P(W)	$\cos \phi$	I(A)	U(V)	U_L (V)	U_A (V)	$r(\Omega)$	$\cos \phi$
启辉值								
正常工作值								

3. 并联电路——电路功率因数的改善。

利用主屏上的电流插座，按图 20-5 组成实验线路。

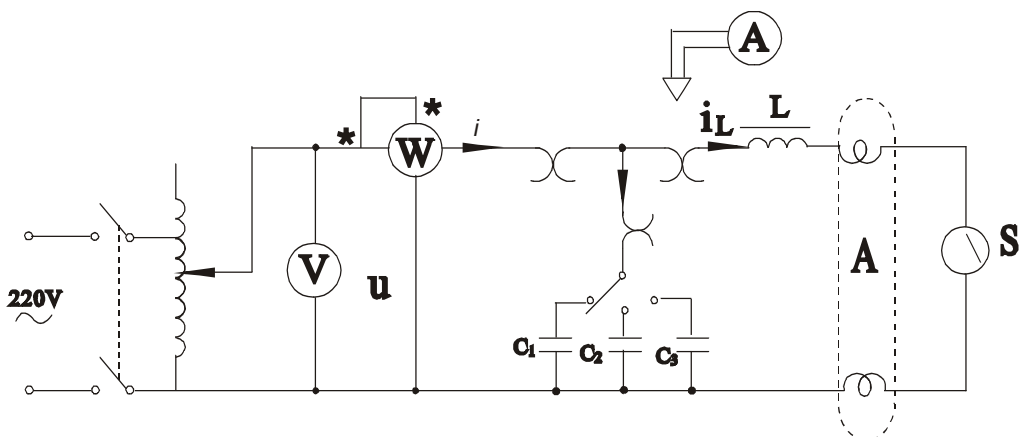


图 20-5

经指导老师检查后，接通实验台电源，将自耦调压器的输出调至 220V，记录功率表，电压表读数。通过一只电流表和三个电流插座分别测得三条支路的电流，改变电容值，进行三次重复测量。

电容值	测 量 数 值						计 算 值
(μF)	P(W)	$\cos \phi$	U(V)	I (A)	I_L (A)	I_C (A)	$\cos \phi$
0							
1							
2.2							
4.7							

五、实验注意事项

1. 本实验用交流市电 220V，务必注意用电和人身安全。
2. 功率表要正确接入电路，读数时要注意量程和实际读数的折算关系。
3. 线路接线正确，日光灯不能启辉时，应检查启辉器及其接触是否良好。

六、预习思考题

1. 参阅课外资料，了解日光灯的启辉原理。
2. 在日常生活中，当日光灯上缺少了启辉器时，人们常用一根导线将启辉器的两端短接一下，然后迅速断开，使日光灯点亮；或用一只启辉器去点亮多只同类型的日光灯，这是为什么？（HE-16 实验箱上有短接按钮，可用它代替启辉器做一下试验。）
3. 为了提高电路的功率因数，常在感性负载上并联电容器，此时增加了一条电流支路，试问电路的总电流是增大还是减小，此时感性元件上的电流和功率是否改变？
4. 提高线路功率因数为什么只采用并联电容器法，而不用串联法？所并的电容器是

否越大越好？

七、实验报告

1. 完成数据表格中的计算，进行必要的误差分析。
2. 根据实验数据，分别绘出电压、电流相量图，验证相量形式的基尔霍夫定律。
3. 讨论改善电路功率因数的意义和方法。
4. 装接日光灯线路的心得体会及其它。

实验二十一 RC 选频网络特性测试

一、实验目的

1. 熟悉文氏电桥电路和 RC 双 T 电路的结构特点及其应用。
2. 学会用交流毫伏表和示波器测定以上两种电路的幅频特性和相频特性。

二、原理说明

1. 文氏桥电路

文氏电桥电路是一个 RC 的串、并联电路，如图 21-1 所示。该电路结构简单，被广泛地用于低频振荡电路中作为选频环节，可以获得很高纯度的正弦波电压。

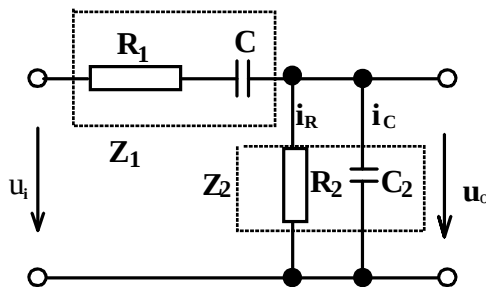


图 21-1

用信号发生器的正弦输出信号作为图 21-1 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 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。

文氏桥路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变，而且还会出现一个与输入电压同相位的最大值，如图 21-2 所示。

由电路分析得知，该网络的传递函数为

$$\beta = \frac{1}{3 + j(\omega RC - 1/\omega RC)}$$

当角频率 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时，

$$|\beta| = \frac{U_o}{U_i} = \frac{1}{3}, \text{ 此时 } U_o \text{ 与 } U_i$$

同相。由图 21-2 可见 RC 串并联电路具有带通特性。

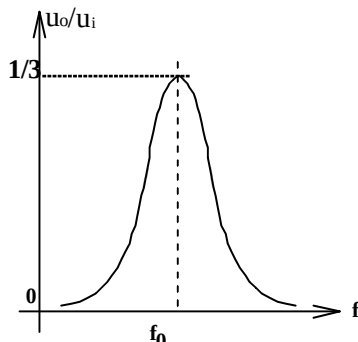


图 21-2

2. 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 $\phi = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ = \phi_o - \phi_i$ (输

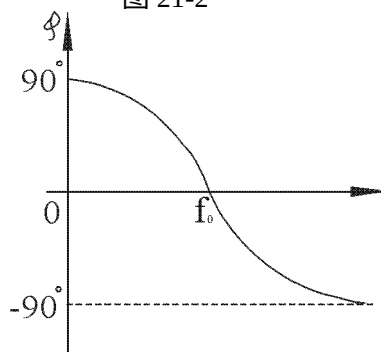


图 21-3

出相位与输入相位之差)

将各个不同频率下的相位差 ϕ 画在以 f 为横轴, ϕ 为纵轴的坐标纸上, 用光滑的曲线将这些点连接起来, 即是被测电路的相频特性曲线, 如图 21-3 所示。

由电路分析理论得知, 当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$, 即 $f = f_0 = \frac{1}{2\pi RC}$ 时, $\phi = 0$, 即 U_o 与 U_i

同相位。

3. RC 双 T 电路

RC 双 T 电路如图 21-4 所示。

由电路分析可知: 双 T 网络零输出的条件为:

$$\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{R_3}, \quad C_1 + C_2 = C_3$$

若选 $R_1 = R_2 = R$, $C_1 = C_2 = C$

$$\text{则 } R_3 = \frac{R}{2}, \quad C_3 = 2C$$

该双 T 电路的频率特性为 (令 $\omega_0 = \frac{1}{RC}$):

$$F(\omega) = \frac{\frac{1}{2}(R + \frac{1}{j\omega C})}{\frac{2R(1 + j\omega RC)}{1 - \omega^2 R^2 C^2} + \frac{1}{2}(R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2}{1 - (\frac{\omega}{\omega_0})^2 + j4\frac{\omega}{\omega_0}}$$

当 $\omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$ 时, 输出幅值等于 0, 相频特性呈现 $\pm 90^\circ$ 的突跳。

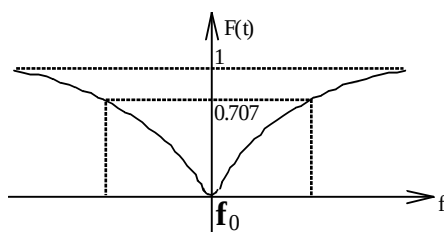


图 21-5

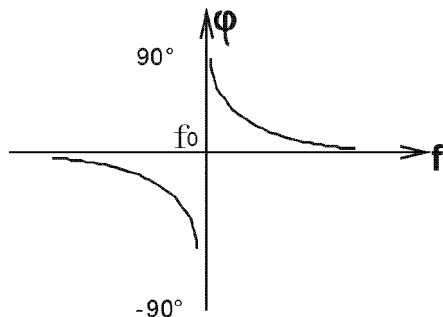


图 21-6

参照文氏桥电路的做法, 也可画出双 T 电路的幅频和相频特性曲线, 分别如图 21-5 和图 21-6 所示。

由图可见, 双 T 电路具有带阻特性。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备 注
1	低频信号发生器及频率计		1	

2	双踪示波器		1	
3	交流毫伏表	0~600V	1	
4	RC 选频网络实验板		1	HE-15

四、实验内容与步骤

1、测量 RC 串、并联电路的幅频特性。

1)、利用 HE-15 挂箱上“RC 串、并联选频网络”线路，组成图 21-1 线路。取 $R=1k\Omega$ ， $C=0.1\mu F$ ；

2)、调节信号源输出电压为 3V 的正弦信号，接入图 21-1 的输入端；

3)、改变信号源的频率 f （由频率计读得），并保持 $U_i=3V$ 不变，测量输出电压 U_o （可先测量 $\beta=1/3$ 时的频率 f_0 ，然后再在 f_0 左右设置其它频率点测量。）

4)、取 $R=200\Omega$ ， $C=2.2\mu F$ ，重复上述测量。

R=1k, C=0.1 μF	f (Hz)	
	U_o (V)	
R=200 Ω , C=2.2 μF	f (Hz)	
	U_o (V)	

2、测量 RC 串、并联电路的相频特性

将图 21-1 的输入 U_i 和输出 U_o 分别接至双踪示波器的 Y_A 和 Y_B 两个输入端，改变输入正弦信号的频率，观测不同频率点时，相应的输入与输出波形间的时延 τ 及信号的周期 T 。两波形间的相位差为：

$$\varphi = \varphi_o - \varphi_i = \frac{\tau}{T} \times 360^\circ$$

R=1k Ω C=0.1 μF	F(Hz)	
	T(ms)	
	τ (ms)	
	φ	
R=200 Ω C=2.2 μF	F(Hz)	
	T(ms)	
	τ (ms)	
	φ	

3、测量 RC 双 T 电路的幅频特性（参照步骤 1）。

4、测量 RC 双 T 电路的相频特性（参照步骤 2）。

五、实验注意事项

由于信号源内阻的影响，输出幅度会随信号频率变化。因此，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。

六、预习思考题

- 1、根据电路参数，估算电路两组参数的固有频率 f_0 。
- 2、推导 RC 串并联电路的幅频、相频特性的数学表达式。

七、实验报告

- 1、根据实验数据，绘制幅频特性和相频特性曲线。找出最大值，并与理论计算值比较。
- 2、讨论实验结果及其它。

实验二十二 R、L、C 串联谐振电路的研究

一、实验目的

1. 学习用实验方法绘制 R、L、C 串联电路的幅频特性曲线。
2. 加深理解电路发生谐振的条件、特点，掌握电路品质因数（电路 Q 值）的物理意义及其测定方法。

二、原理说明

1. 在图 22-1 所示的 R、L、C 串联电路中，当正弦交流信号源 U_i 的频率 f 改变时，电路中的感抗、容抗随之而变，电路中的电流也随 f 而变。取电阻 R 上的电压 U_o 作为响应，当输入电压 U_i 的幅值维持不变时，在不同频率的信号激励下，测出 U_o 之值，然后以 f 为横坐标，以 U_o/U_i 为纵坐标（因 U_i 不变，故也可直接以 U_o 为纵坐标），绘出光滑的曲线，此即为幅频特性曲线，亦称谐振曲线，如图 22-2 所示。

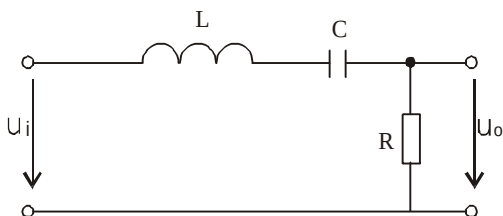


图 22-1

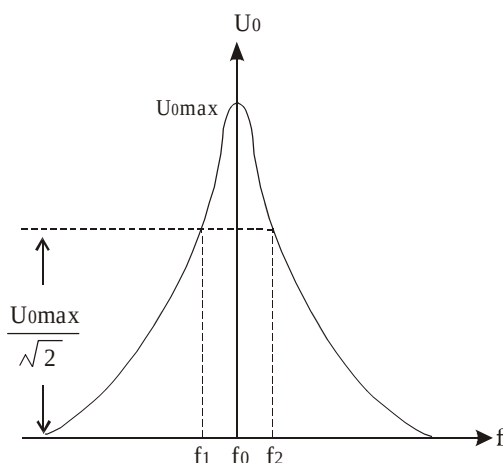


图 22-2

2. 在 $f=f_0=\frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 处，即幅频特性曲线尖峰所在的频率点称为谐振频率。此时

$X_L=X_C$ ，电路呈纯阻性，电路阻抗的模为最小。在输入电压 U_i 为定值时，电路中的电流达到最大值，且与输入电压 U_i 同相位。从理论上讲，此时 $U_i=U_R=U_o$ ， $U_L=U_C=QU_i$ ，式中的 Q 称为电路的品质因数。

3. 电路品质因数 Q 值的两种测量方法

一是根据公式 $Q=\frac{U_L}{U_o}=\frac{U_C}{U_o}$ 测定， U_c 与 U_L 分别为谐振时电容器 C 和电感线圈 L

上的电压；另一方法是通过测量谐振曲线的通频带宽度 $\Delta f=f_2-f_1$ ，再根据 $Q=\frac{f_0}{f_2-f_1}$ 求

出 Q 值。式中 f_0 为谐振频率, f_2 和 f_1 是失谐时, 亦即输出电压的幅度下降到最大值的 $1/\sqrt{2}$ ($=0.707$) 倍时的上、下频率点。Q 值越大, 曲线越尖锐, 通频带越窄, 电路的选择性越好。在恒压源供电时, 电路的品质因数、选择性与通频带只决定于电路本身的参数, 而与信号源无关。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	低频函数信号发生器		1	
2	交流毫伏表	0~600V	1	
3	双踪示波器		1	
4	频率计		1	
5	谐振电路实验电路板			HE-15

四、实验内容

1. 利用 HE-15 实验箱上的“R、L、C 串联谐振电路”, 按图 22-3 组成监视、测量电路。选 $C_1=0.01\ \mu\text{F}$ 。用交流毫伏表测电压, 用示波器监视信号源输出。令信号源输出电压 $U_i=3\text{V}$, 并保持不变。

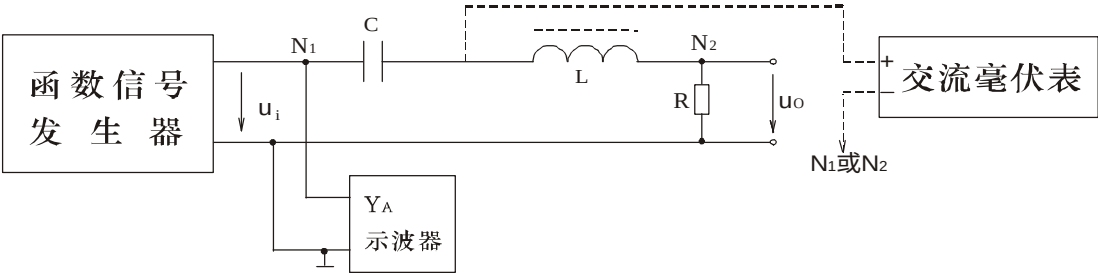


图 22-3

2. 找出电路的谐振频率 f_0 , 其方法是, 将毫伏表接在 R($200\ \Omega$) 两端, 令信号源的频率由小逐渐变大 (注意要维持信号源的输出幅度不变), 当 U_o 的读数为最大时, 读得频率计上的频率值即为电路的谐振频率 f_0 , 并测量 U_C 与 U_L 之值 (注意及时更换毫伏表的量限)。

3. 在谐振点两侧, 按频率递增或递减 500Hz 或 1kHz , 依次各取 8 个测量点, 逐点测出 U_o , U_L , U_C 之值, 记入数据表格。

f(kHz)													
$U_o(\text{V})$													
$U_L(\text{V})$													
$U_C(\text{V})$													

$U_i=3V$, $C=0.01\mu F$, $R=200\Omega$, $f_0=$, $f_2-f_1=$, $Q=$

4.选 $C_1=0.01\mu F$, $R_2=1k\Omega$, 重复步骤 2, 3 的测量过程

f(kHz)														
$U_O(V)$														
$U_L(V)$														
$U_C(V)$														
$U_i=3V$, $C=0.01\mu F$, $R=1k\Omega$, $f_0=$, $f_2-f_1=$, $Q=$														

5.选 $C_2=0.1\mu F$, $R_1=200\Omega$ 及 $C_2=0.1\mu F$, $R_2=1k\Omega$, 重复 2、3 两步。(自制表格)。

五、实验注意事项

1. 测试频率点的选择应在靠近谐振频率附近多取几点。在变换频率测试前，应调整信号输出幅度（用示波器监视输出幅度），使其维持在 3V。

2. 测量 U_C 和 U_L 数值前，应将毫伏表的量限改大，而且在测量 U_L 与 U_C 时毫伏表的“+”端接 C 与 L 的公共点，其接地端分别触及 L 和 C 的近地端 N_2 和 N_1 。

3. 实验中，信号源的外壳应与毫伏表的外壳绝缘（不共地）。如能用浮地式交流毫伏表测量，则效果更佳。

六、预习思考题

1. 根据实验线路板给出的元件参数值，估算电路的谐振频率。
2. 改变电路的哪些参数可以使电路发生谐振，电路中 R 的数值是否影响谐振频率值？
3. 如何判别电路是否发生谐振？测试谐振点的方案有哪些？
4. 电路发生串联谐振时，为什么输入电压不能太大，如果信号源给出 3V 的电压，电路谐振时，用交流毫伏表测 U_L 和 U_C ，应该选择用多大的量限？
5. 要提高 R、L、C 串联电路的品质因数，电路参数应如何改变？
6. 本实验在谐振时，对应的 U_L 与 U_C 是否相等？如有差异，原因何在？

七、实验报告

1. 根据测量数据，绘出不同 Q 值时三条幅频特性曲线，即：

$$U_O=f(f), U_L=f(f), U_C=f(f)$$

2. 计算出通频带与 Q 值，说明不同 R 值时对电路通频带与品质因数的影响。
3. 对两种不同的测 Q 值的方法进行比较，分析误差原因。
4. 谐振时，比较输出电压 U_O 与输入电压 U_i 是否相等？试分析原因。
5. 通过本次实验，总结、归纳串联谐振电路的特性。
6. 心得体会及其它。

实验二十三 二阶网络状态轨迹的观测

一、实验目的

- 1、观察 RLC 电路的状态轨迹。
- 2、掌握一种同时观察两个无公共接地端电信号的方法。

二、原理说明

1. 任何变化的物理过程在每一时刻所处的“状态”，都可以概括地用若干被称为“状态变量”的物理量来描述。例如一辆汽车可以用它在不同时刻的运动速度和加速度来描述它是处于停止状态、加（减）速状态或者匀速运动状态；一杯水可以用它的温度来描述它是处于结冰的固态还是沸腾的开水等等。这里速度、加速度和温度都可称为状态变量。由于物体所具有的动能等于 $1/2mv^2$ ，而物体具有的热量等于 $mc(t_2-t_1)$ ，我们常将与物体储能直接有关的物理量作为状态变量。

电路也不例外，一个动态网络在不同时刻各支路电压、电流都在变化，所处的状态也都不相同。在所有 V_C 、 i_C 、 V_L 、 i_L 、 V_R 、 i_R 六种可能的变量中，由于电容的储能为 $1/2CV_C^2$ ，电感的储能 $1/2Li_L^2$ ，所以选电容的电压和电感的电流作为电路的状态变量。了解了电路中 V_C 和 i_L 的变化就可以了解电路状态的变化。

2. “状态变量”较确切的定义是能描述系统动态特性组的最少数量的数据。对一个电网络，若选择全部电容电压和电感电流作状态变量，那么根据这些状态变量和激励，就可确定网络中任一支路的电压或电流。但是在一个电路网络中若存在三个电容构成的一个回路，则只有两个电容的电压可选作状态变量；若有三个电感共一节点，则只有其中两个电感的电流可选作状态变量。

对 n 阶网络应该用 n 个状态变量来描述。可以设想一个 n 维空间，每一维表示一个状态变量，构成一个“状态空间”。

网络在每一时刻所处的状态可以用状态空间中一个点来表达。随着时间的变化，点的移动形成一个轨迹，称为“状态轨迹”。电路参数不同则状态轨迹也不相同。三阶网络状态空间可用一个三维空间来表达，而二阶网络可以用一个平面来表达。图 23-1 所示的 RLC 电路就

是一个二阶网络，其状态轨迹见图 23-2~23-4。

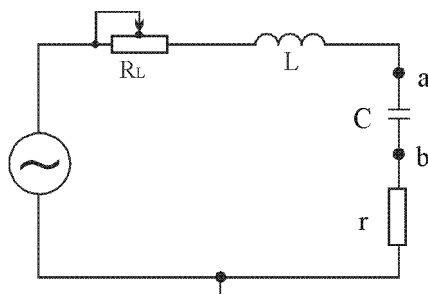


图 23-1

3. 状态变量是一些与储能直接有关的物理量，因为能量是不能突变的，所以实际电路的状态量一般也是不能突变的，因而状态轨迹是一根连续的曲线。

3. 用示波器显示二阶网络状态轨迹的原理与显示李萨如图形完全一样。它采用 23-1 电路，用方波作为激励，使过渡过程能重复出现，以便于用一般示波器观察。示波器 X 轴

(Y_A)

应接 u_r , Y 轴(Y_B)应接 u_c 。由于 u_r 与 u_c 无公共接地端, 因此需采用减法器电路, 如图 23-5。根据运放特点, $u_o = (u_a - u_b) R_2 / R_1$ 。取 $R_2 = R_1$, 则 $u_o = u_a - u_b = u_c$ 。而 u_o 与 u_r 共地, 因而可接入示波器观察状态轨迹。

在本实验中, 采用一种简易的方法来观察状态轨迹。由于电阻 r 阻值很小, 在 b 点电压仍表现为容性, 因此将电容两端相对于地的电压分别引到示波器 X 轴和 Y 轴仍能看到状态的轨迹。

三、预习练习

1. 简述用示波器显示李萨育图的原理和示波器的联接方法。
2. 哪些是图 23-1 电路的状态变量, 在不同电阻值时它的状态轨迹大致形状如何?
3. 观察状态轨迹时示波器与电路应如何接法?

四、实验内容与步骤

1. 按预习练习 3 拟定的方案, 利用 HE-14 中的“电路状态轨迹的观测”线路联接电路和仪器。然后打开信号源和示波器的电源, 观察图 23-1 电路的状态轨迹。应调节电路中哪些元件参数, 使之能观察到预计的状态轨迹?

五、仪器设备

1. 函数信号发生器。
2. 双踪示波器。
3. HE-14 实验箱。

六、报告要求

1. 整理二阶网络状态轨迹的测试方法。
2. 绘出所观察到的各种状态轨迹, 与计算结果相比较, 说明产生差别的原因。

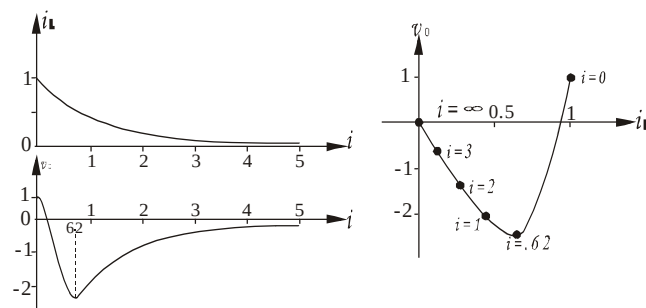


图 23-2 RLC 电路在过阻尼时的状态轨迹

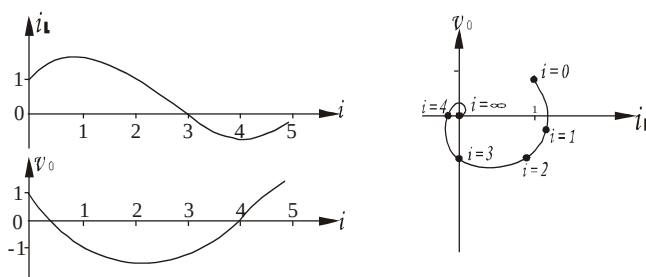


图 23-3 RLC 电路在欠阻尼时的状态轨迹

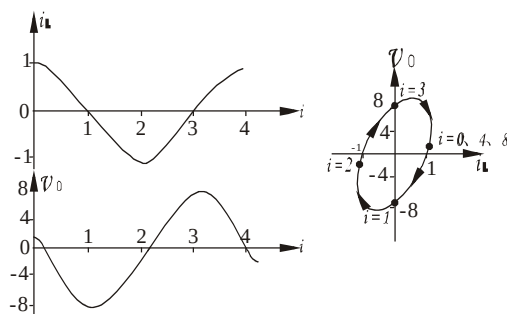


图 23-4 RLC 电路在 $R=0$ 时的状态轨迹

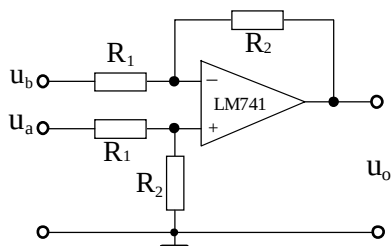


图 23-5

实验二十四 二端口网络测试

一、实验目的

1. 加深理解二端口网络的基本理论。
2. 掌握直流二端口网络传输参数的测量技术。

二、原理说明

对于任何一个线性网络，我们所关心的往往只是输入端口和输出端口的电压和电流之间的相互关系，并通过实验测定方法求取一个极其简单的等值二端口电路来替代原网络，此即为“黑盒理论”的基本内容。

1. 一个二端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 U_2 和电流 I_2 作为自变量，以输入口的电压 U_1 和电流 I_1 作为应变变量，所得的方程称为二端口网络的传输方程，如图 24-1 所示的无源线性二端口网络（又称为四端网络）的传输方程为： $U_1 = AU_2 + BI_2$ ； $I_1 = CU_2 + DI_2$ 。

式中的 A、B、C、D 为二端口网络的传输参数，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二端口网络的基本特性，它们的含义是：

$$A = \frac{U_{10}}{U_2} \quad (\text{令 } I_2 = 0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$B = \frac{U_{20}}{U_1} \quad (\text{令 } U_2 = 0, \text{ 即输出口短路时})$$

$$C = \frac{I_{2s}}{I_{10}} \quad (\text{令 } I_2 = 0, \text{ 即输出口开路时})$$

$$D = \frac{U_{20}}{I_{1s}} \quad (\text{令 } U_2 = 0, \text{ 即输出口短路时})$$

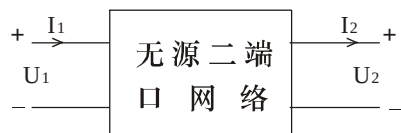


图 24-1

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二端口网络，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，而将输入口开路 and 短路，测量输出口的电压和电流。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

数中只有三个是独立的: $\frac{R_{10}}{R_{20}} = \frac{R_{1s}}{R_{2s}} = \frac{A}{D}$ 即 $AD - BC = 1$ 。至此, 可求出四个传输参

数: $A = \sqrt{R_{10} / (R_{20} - R_{2s})}$, $B = R_{2s}A$, $C = A/R_{10}$, $D = R_{20}C$

3. 二端口网络级联后的等效二端口网络的传输参数亦可采用前述的方法之一求得。从理论推得两个二端口网络级联后的传输参数与每一个参加级联的二端口网络的传输参数之间有如下的关系:

$$\begin{aligned} A &= A_1A_2 + B_1C_2 & B &= A_1B_2 + B_1D_2 \\ C &= C_1A_2 + D_1C_2 & D &= C_1B_2 + D_1D_2 \end{aligned}$$

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~30V	1	
2	数字直流电压表	0~300V	1	
3	数字直流电流表	0~2000mA	1	
4	二端口网络实验电路板		1	HE-12

四、实验内容

二端口网络实验线路如图 24-2 所示, 可利用 HE-12 实验箱的“二端口网络/互易定理”线路。将直流稳压电源的输出电压调到 10V, 作为二端口网络的输入。

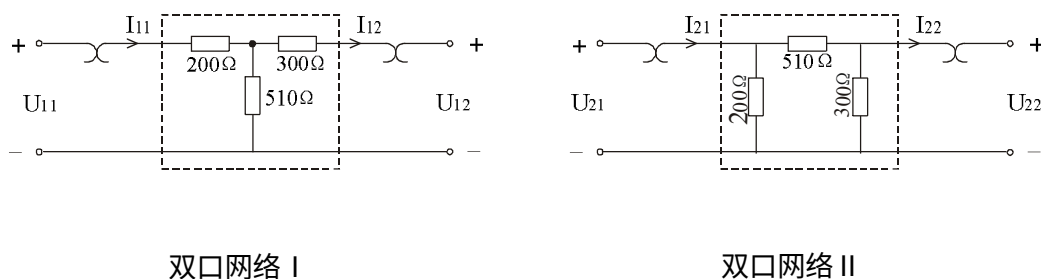


图 24-2

1. 按同时测量法分别测定两个二端口网络的传输参数 A_1 、 B_1 、 C_1 、 D_1 和 A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 , 并列出的传输方程。

二 端 口 网 络 I	输出端开路 $I_{12}=0$	测 量 值			计 算 值
		U_{11O} (V)	U_{12O} (V)	I_{11O} (mA)	$A_1=$ $B_1=$
	输出端短路 $U_{12}=0$	U_{11S} (V)	I_{11S} (mA)	I_{12S} (mA)	
					$C_1=$ $D_1=$

二 端 口 网 络 II	输出端开路 $I_{22}=0$	测 量 值			计 算 值
		U_{21O} (V)	U_{22O} (V)	I_{21O} (mA)	$A_2=$ $B_2=$
	输出端短路 $U_{22}=0$	U_{21S} (V)	I_{21S} (mA)	I_{22S} (mA)	
					$C_2=$ $D_2=$

2. 将两个二端口网络级联，即将网络 I 的输出接至网络 II 的输入。用两端口分别测量法测量级联后等效二端口网络的传输参数 A、B、C、D，并验证等效二端口网络传输参数与级联的两个二端口网络传输参数之间的关系。（总输入端或总输出端所加的电压仍为 10V。）

输入 端加 电压	输出端开路 $I_2=0$			输出端短路 $U_2=0$			计 算 传输参数
	U_{1O} (V)	I_{1O} (mA)	R_{1O} (k Ω)	U_{1S} (V)	I_{1S} (mA)	R_{1S} (k Ω)	
输出 端加 电压	输入端开路 $I_1=0$			输入端短路 $U_1=0$			$A=$ $B=$ $C=$ $D=$
	U_{2O} (V)	I_{2O} (mA)	R_{2O} (k Ω)	U_{2S} (V)	I_{2S} (mA)	R_{2S} (k Ω)	

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，估算电流表量程）。
2. 实验中，如果测得的 I 或 U 为负值，则计算传输参数时取其绝对值。

六、预习思考题

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。
2. 本实验方法可否用于交流双口网络的测定？

七、实验报告

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. 心得体会及其它。

实验二十五 负阻抗变换器

一、实验目的

1. 加深对负阻抗概念的认识，掌握对含有负阻的电路分析研究方法。
2. 了解负阻抗变换器的组成原理及其应用。
3. 掌握负阻器的各种测试方法。

二、原理说明

1. 负阻抗是电路理论中的一个重要基本概念，在工程实践中有广泛的应用。有些非线性元件（如隧道二极管）在某个电压或电流范围内具有负阻特性。除此之外，一般都由一个有源双口网络来形成一个等效的线性负阻抗。该网络由线性集成电路或晶体管等元件组成，这样的网络称作负阻抗变换器。

按有源网络输入电压电流与输出电压电流的关系，负阻抗变换器可分为电流倒置型和电压倒置形两种(INIC 及 VNIC)，其示意图如图 25-1 所示。

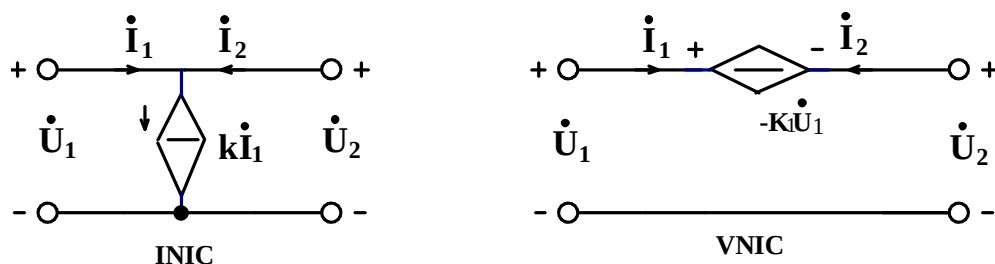


图 25-1

在理想情况下，负阻抗变换器的电压、电流关系为：

INIC 型： $\dot{U}_2 = \dot{U}_1$, $\dot{I}_2 = K \dot{I}_1$ (K 为电流增益)

VNIC 型： $\dot{U}_2 = -K_1 \dot{U}_1$, $\dot{I}_2 = -\dot{I}_1$ (K_1 为电压增益)

2. 本实验用线性运算放大器组

成如图 25-2 所示的 INIC 电路，在一定的电压、电流范围内可获得良好的线性度。

根据运放理论可知：

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_+ = \dot{U}_- = \dot{U}_2$$

$$\text{又 } \dot{I}_5 = \dot{I}_6 = 0, \quad \dot{I}_1 = \dot{I}_3, \quad \dot{I}_2 = -\dot{I}_4$$

$$Z_i = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1}, \quad \dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_1 - \dot{U}_3}{Z_1}$$

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_2}{Z_2} = \frac{\dot{U}_3 - \dot{U}_1}{Z_2}$$

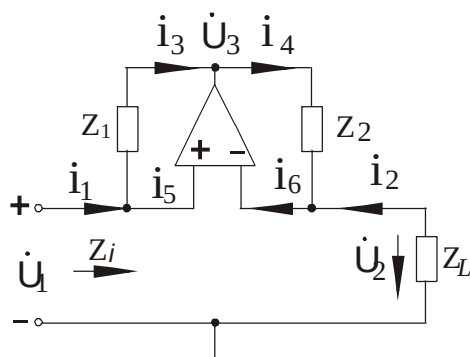


图 25-2

$$\begin{aligned}\therefore \dot{I}_4 Z_2 &= -\dot{I}_3 Z_1, \quad -\dot{I}_2 Z_2 = -\dot{I}_1 Z_1, \\ \therefore \frac{\dot{U}_2}{Z_L} \cdot Z_2 &= -\dot{I}_1 Z_1 \\ \therefore \frac{\dot{U}_2}{\dot{I}_1} &= \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = Z_i = -\frac{Z_1}{Z_2} \cdot Z_L = -K Z_L \quad (\text{令 } K = \frac{Z_1}{Z_2})\end{aligned}$$

$$\text{当 } Z_1=R_1=R_2=Z_2=1\text{k}\Omega \text{ 时, } K = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{R_1}{R_2} = 1$$

$$(1) \text{ 若 } Z_L=R_L \text{ 时, } Z_i = -K Z_L = -R_L$$

$$(2) \text{ 若 } Z_L = \frac{1}{j\omega C} \text{ 时, } Z_i = -K Z_L = -\frac{1}{j\omega C} = j\omega L \quad (\text{令 } L = \frac{1}{\omega^2 C})$$

$$(3) \text{ 若 } Z_L = j\omega L \text{ 时, } Z_i = -K Z_L = -j\omega L = \frac{1}{j\omega C} \quad (\text{令 } C = \frac{1}{\omega^2 L})$$

(2) (3) 两项表明, 负阻抗变换器可实现容性阻抗和感性阻抗的互换。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	直流稳压电源	0~30V	1	
2	低频信号发生器		1	
3	直流数字电压表	0~300V	1	
4	直流数字电流表	0~2000mA	1	
5	交流毫伏表	0~600V	1	
6	双踪示波器		1	
7	可变电阻箱	0~99999.9Ω	1	HE-19
8	电容器	0.1 μF	1	HE-19 或 HE-13A
9	线性电感	100mH	1	HE-19 或 HE-13A
10	电阻器	200Ω, 1kΩ		HE-19 或 HE-13A
11	实验电路板			HE-13 或 HE-13A

四、实验内容与步骤

1. 测量负电阻的伏安特性, 计算电流增益 K 及等值负阻。实验线路参见 25-2, 可利用 HE-13 实验箱的 INIC 线路。U₁ 接直流可调稳压电源, Z_L 接 HE-19 挂箱上的电阻箱。

$R_L = 300\Omega$	$U_1(V)$								
	$I_1(mA)$								
	$R-(k\Omega)$								
$R_L = 600\Omega$	$U_1(V)$								
	$I_1(mA)$								
	$R-(k\Omega)$								

(1) 取 R_L (即 Z_L) = 300Ω (取自电阻箱)。调节直流稳压源的输出电压, 使 U_1 在 $0\sim 1V$ 的范围内取不同的值, 分别测量 INIC 的输入电压 U_1 及输入电流 I_1 。

(2) 令 $R_L = 600\Omega$, 重复上述的测量 (令 U_1 在 $0\sim 2V$ 的范围内取不同的值)。

(3) 计算: 等效负阻: 实测值 $R_- = \frac{U_1}{I_1}$,

理论计算值 $R'_- = -KZ_L = -R_L$

$$\text{电流增益: } K = \frac{R_1}{R_2} = 1$$

(4) 绘制负阻的伏安特性曲线 $U_1 = f(I_1)$

2. 阻抗变换及相位观察。

见图 25-3。图中 b、c 即为 HE-13 中 INIC

线路左下侧的两个插孔(用 HE-13A 时, R_1 、 R_2 均取 $1k\Omega$)。

图 25-3

接线时, 信号源的高端接 a, 低(“地”)端接 b, 双踪示波器的“地”端接 b, Y_A 、 Y_B 分别接 a, c。图中的 R_s 为电流取样电阻。因为电阻两端的电压波形与流过电阻的电流波形同相, 所以用示波器观察 R_s 上的电压波形就反映了电流 I_1 的相位。

(1) 调节低频信号使 $U_1 \leq 3V$, 改变信号源频率 $f = 500Hz \sim 2000Hz$, 用双踪示波器观察 U_1 与 I_1 的相位差, 判断是否具有容抗特征。

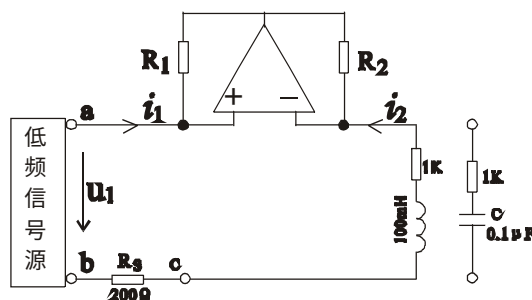
(2) 用 $0.1\mu F$ 的电容 C 代替 L, 重复 (1) 的观察, 是否具有感抗特征。

五、实验注意事项

本实验内容的接线较多, 应仔细检查, 特别是信号源与示波器的低端不可接错。

六、实验报告

1. 完成计算与绘制特性曲线。
2. 总结对 INIC 的认识。
3. 心得体会及其它。



实验二十六 回转器

一、实验目的

1. 掌握回转器的基本特性
2. 测量回转器的基本参数
3. 了解回转器的应用

二、原理说明

1. 回转器是一种有源非互易的新型二端口网络元件，电路符号及其等效电路如图 26-1(a)、(b)所示。

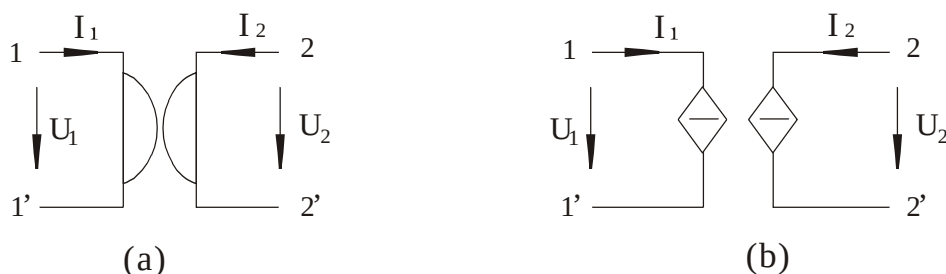


图 26-1

理想回转器的导纳方程如下：

$$\begin{vmatrix} I_1 \\ I_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & g \\ -g & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \end{vmatrix}, \text{ 或写成 } i_1 = gu_2, i_2 = -gu_1$$

也可写成电阻方程：

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ u_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -R \\ R & 0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \end{vmatrix}, \text{ 或写成 } u_1 = -Ri_2, u_2 = Ri_1$$

式中 g 和 R 分别称为回转电导和回转电阻，统称为回转常数。

2. 若在 2-2'端接一负载电容 C ，则从 1-1'端看进去就相当于一个电感，即回转器能把一个电容元件“回转”成一个电感元件；相反也可以把一个电感元件“回转”成一个电容元件，所以也称为阻抗逆变器。

2-2'端接有 C 后，从 1-1'端看进去的导纳 Y_i 为

$$Y_i = \frac{i_1}{u_1} = \frac{gu_2}{-i_2/g} = \frac{-g^2 u_2}{i_2} \quad \therefore \frac{u_2}{i_2} = -Z_L = \frac{1}{j\omega C}$$

$$\therefore Y_i = g^2 / j\omega C = \frac{1}{j\omega L}, \text{ 式中 } L = \frac{C}{g^2} \text{ 为等效电感。}$$

3. 由于回转器有阻抗逆变作用，在集成电路中得到重要的应用。因为在集成电路制

造中，制造一个电容元件比制造电感元件容易得多，我们可以用一带有电容负载的回转器来获得数值较大的电感。

图 26-2 为用运算放大器组成的回转器电路图。

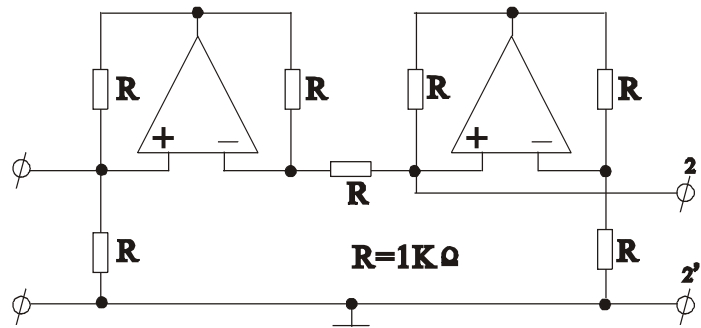


图 26-2

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	低频信号发生器		1	
2	交流毫伏表	0~600V	1	
3	双踪示波器		1	
4	可变电阻箱	0~99999.9 Ω	1	HE-19
5	电容器	0.1 μ F, 1 μ F	1	HE-19, HE-16
6	电阻器	1k Ω	1	
7	回转器实验电路板	运放、电阻	1	HE-13 或 HE-13A

四、实验内容

实验线路如图 26-3 所示。 R_s 跨接于 HE-13 挂箱中 G 线路板左下部的二个插孔间(或利用 HE-13A 中的器件组成图 26-2 所示的回转器电路)。

1. 在图 26-3 的 2-2'端接纯电阻负载（电阻箱）， 信号源频率固定在 1kHz， 信号电压 ≤ 3 伏。

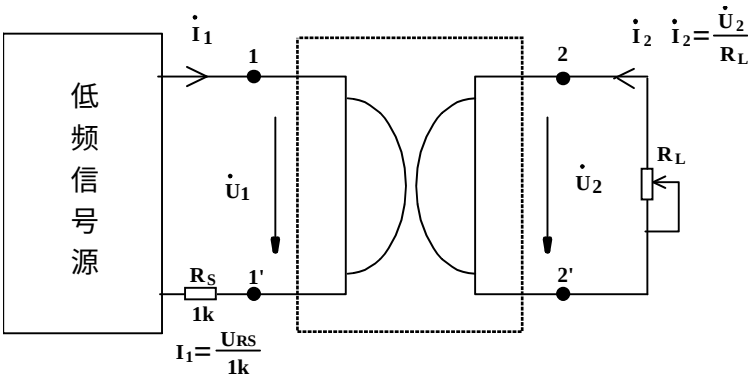


图 26-3

用交流毫伏表测量不同负载电阻 R_L 时的 U_1 、 U_2 和 U_{RS} ，并计算相应的电流 I_1 、 I_2 和回转常数 g ，一并记入表 26-1 中。

表 26-1

R_L (Ω)	测 量 值			计 算 值				
	U_1 (v)	U_2 (v)	U_{RS} (v)	I_1 (mA)	I_2 (mA)	$g' = \frac{I_1}{U_2}$	$g'' = \frac{I_2}{U_1}$	$g = \frac{g' + g''}{2}$
500								
1k								
1.5k								
2k								
3k								
4k								
5k								

2. 用双踪示波器观察回转器输入电压和输入电流之间的相位关系。按图 26-4 接线。信号源的高端接 1 端,低(“地”)端接 M, 示波器的“地”端接 M, Y_A 、 Y_B 分别接 1 (电压波形)、 $1'$ (电流波形) 端。

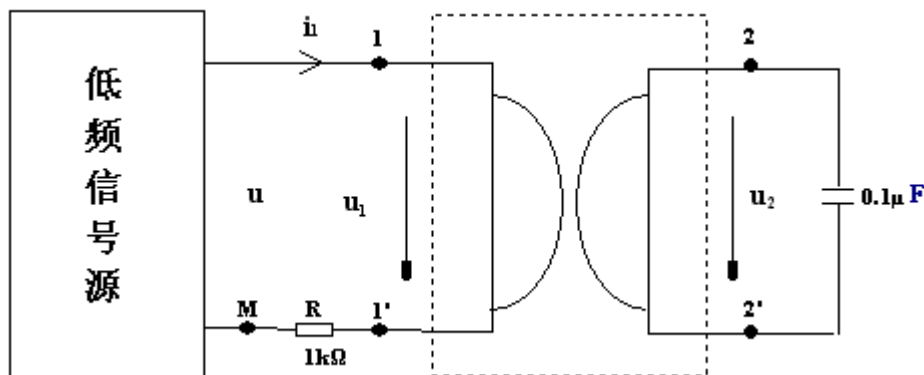


图 26-4

在 2-2'端接电容负载 $C=0.1\mu F$ ，取信号电压 $U \leq 3V$ ，频率 $f=1kHz$ 。观察 i_1 与 u_1 之间的相位关系，是否具有感抗特征。

3. 测量等效电感

线路同 2 (不接示波器)。取低频信号源输出电压 $U \leq 3V$ ，并保持恒定。用交流毫伏表测量不同频率时的 U_1 、 U_2 、 U_R 值，并算出 $I_1=U_R/1k$ ， $g=I_1/U_2$ ， $L'=U_1/(2\pi f I_1)$ ， $L=C/g^2$ 及误差 $\Delta L=L'-L$ ，分析 U 、 U_1 、 U_R 之间的相量关系。

频率 参数	200	400	500	700	800	900	1000	1200	1300	1500	2000
U_1 (v)											
U_2 (v)											
U_R (v)											
I_1 (mA)											
$g(\frac{1}{\Omega})$											
L' (H)											
L (H)											
$\Delta L=L'-L$ (H)											

4. 测量谐振特性

用回转器作电感，与电容器 $C=1\mu\text{F}$ 构成并联谐振电路，如图 26-5 所示。

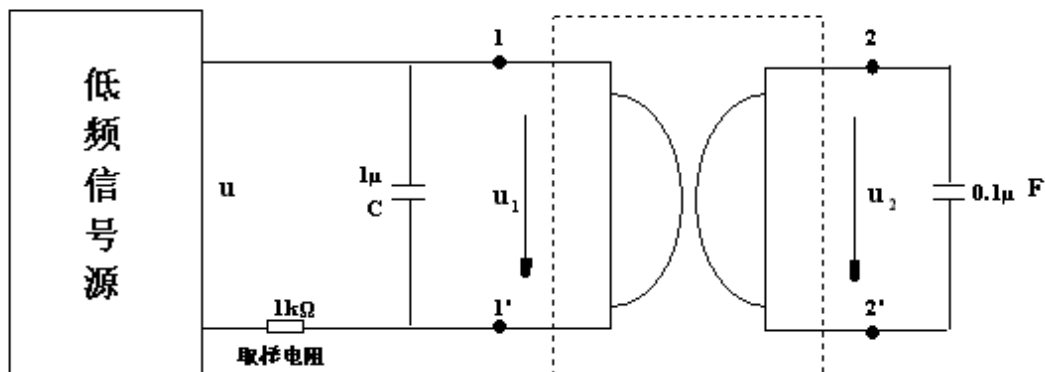


图 26-5

取 $U \leq 3\text{V}$ 并保持恒定，在不同频率时用交流毫伏表测量 1-1'端的电压 U_1 ，并找出谐振频率。

五、实验注意事项

1. 回转器的正常工作条件是 u 或 u_1 、 i_1 的波形必须是正弦波。为避免运放进入饱和状态使波形失真，所以输入电压不宜过大。
2. 实验过程中，示波器及交流毫伏表电源线使用两线插头。

六、实验报告

1. 完成各项规定的实验内容（测试、计算、绘曲线等）
2. 从各实验结果中总结回转器的性质、特点和应用。

实验二十七 互感电路观测

一、实验目的

1. 学会互感电路同名端、互感系数以及耦合系数的测定方法。
2. 理解两个线圈相对位置的改变，以及用不同材料作线圈芯时对互感的影响。

二、原理说明

1. 判断互感线圈同名端的方法。

(1) 直流法

如图 27-1 所示，当开关 S 闭合瞬间，若毫安表的指针正偏，则可断定“1”、“3”为同名端；指针反偏，则“1”、“4”为同名端。

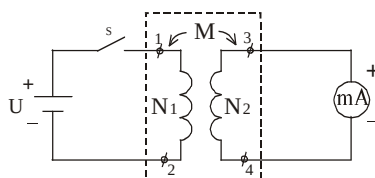


图 27-1

(2) 交流法

如图 27-2 所示，将两个绕组 N_1 和 N_2 的任意两端（如 2、4 端）联在一起，在其中的一个绕组（如 N_1 ）两端加一个低电压，另一绕组（如 N_2 ）开路，用交流电压表分别测出端电压 U_{13} 、 U_{12} 和 U_{34} 。若 U_{13} 是两个绕组端压之差，则 1、3 是同名端；若 U_{13} 是两绕组端电压之和，则 1、4 是同名端。

2. 两线圈互感系数 M 的测定。

在图 27-2 的 N_1 侧施加低压交流电压 U_1 ，测出 I_1 及 U_2 。根据互感电势 $E_{2M} \approx U_2 =$

$$\omega M I_1, \text{ 可算得互感系数为 } M = \frac{U_2}{\omega I_1}$$

3. 耦合系数 K 的测定。

两个互感线圈耦合松紧的程度可用耦合系数 K 来表示

$$K = M / \sqrt{L_1 L_2}$$

如图 27-2，先在 N_1 侧加低压交流电压 U_1 ，测出 N_2 侧开路时的电流 I_1 ；然后再在 N_2 侧加电压 U_2 ，测出 N_1 侧开路时的电流 I_2 ，求出各自的自感 L_1 和 L_2 ，即可算得 K 值。

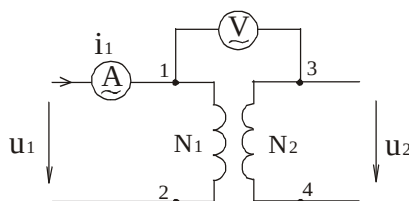


图 27-2

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	数字直流电压表	0~300V	1	
2	数字直流电流表	0~2000mA	1	
3	交流电压表	0~500V	1	
4	交流电流表	0~5A	1	

5	空心互感线圈	N_1 为大线圈 N_2 为小线圈	1 对	HE-18 或 HE-21
6	自耦调压器		1	
7	直流稳压电源	0~30V	1	
8	电阻器	$30\Omega/8W$ $510\Omega/2W$	各 1	HE-19
9	粗、细铁棒、铝棒		各 1	
10	变压器	36V/220V	1	屏内或 HE-21

四、实验内容

本实验需利用 HE-18 实验箱上的“互感实验及同名端判断”和屏上的“铁芯变压器”或者 HE-21 上的部件。

1. 分别用直流法和交流法测定互感线圈的同名端。

(1) 直流法

实验线路如图 27-3 所示。先将 N_1 和 N_2 两线圈的四个接线端子编以 1、2 和 3、4 号。将 N_1 、 N_2 同心式套在一起，并放入细铁棒。U 为可调直流稳压电源，调至 10V。流过 N_1 侧的电流不可超过 0.4A (选用 5A 量程的数字电流表)。 N_2 侧直接接入 2mA 量程的毫安表。将铁棒迅速地拔出和插入，观察毫安表读数正、负的变化，来判定 N_1 和 N_2 两个线圈的同名端。

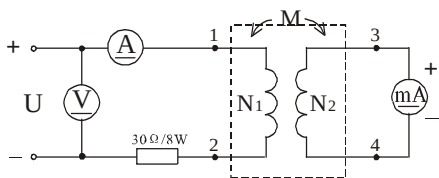


图 27-3

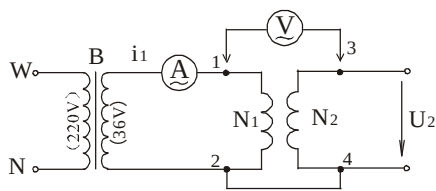


图 27-4

(2) 交流法

本方法中，由于加在 N_1 上的电压较低，直接用屏内调压器很难调节，因此采用图 27-4 的线路来扩展调压器的调节范围。图中 W、N 为主屏上的自耦调压器的输出端，B 为屏内的升压铁芯变压器或者是 HE-21 上的升压铁芯变压器，此处作降压用。将 N_2 放入 N_1 中，并插入铁棒。

接通电源前，应首先检查自耦调压器是否调至零位，确认后方可接通交流电源，令自耦调压器输出一个很低的电压（约 12V 左右），使流过电流表的电流小于 1.4A，然后用交流电压表测量 U_{13} 、 U_{12} 、 U_{34} ，判定同名端。

拆去 2、4 联线，并将 2、3 相接，重复上述步骤，判定同名端。

2. 拆除 2、3 连线，测 U_1 ， I_1 ， U_2 ，计算出 M 。

3. 将低压交流加在 N_2 侧，使流过 N_2 侧电流小于 1A， N_1 侧开路，按步骤 2 测出 U_2 、 I_2 、 U_{10} 。

4. 用万用表的 $R \times 1$ 档分别测出 N_1 和 N_2 线圈的电阻值 R_1 和 R_2 ，计算 K 值。

5. 观察互感现象

在图 27-4 的 N_2 侧接入交流电压表。

(1) 将铁棒慢慢地从两线圈中抽出和插入，观察交流电压表的变化，记录现象。

(2) 将两线圈改为并排放置，并改变其间距，以及分别或同时插入铁棒，观察交流电压表的变化及仪表读数。

(3) 改用铝棒替代铁棒，重复(1)、(2)的步骤，观察交流电压表变化，记录现象。

五、实验注意事项

1. 整个实验过程中，注意流过线圈 N_1 的电流不得超过 1.4A，流过线圈 N_2 的电流不得超过 1A。

2. 测定同名端及其它测量数据的实验中，都应将小线圈 N_2 套在大线圈 N_1 中，并插入铁芯。

3. 作交流试验前，首先要检查自耦调压器，要保证手柄置在零位。因实验时加在 N_1 上的电压只有 2~3V 左右，因此调节时要特别仔细、小心，要随时观察电流表的读数，不得超过规定值。

六、预习思考题

1. 用直流法判断同名端时，可否以及如何根据 S 断开瞬间毫安表指针的正、反偏来判断同名端？

2. 本实验用直流法判断同名端是用插、拨铁芯时观察电流表的正、负读数变化来确定的（应如何确定？），这与实验原理中所叙述的方法是否一致？

七、实验报告

1. 总结对互感线圈同名端、互感系数的实验测试方法。

2. 自拟测试数据表格，完成计算任务。

3. 解释实验中观察到的互感现象。

4. 心得体会及其它。

实验二十八 铁磁材料的磁滞回线和基本磁化曲线

一、实验目的

1. 认识铁磁物质的磁化规律和动态磁化特性。
2. 测定样品的基本磁化曲线，作 $\mu-H$ 曲线。

二、实验原理

铁磁物质是一种性能特异、用途广泛的材料。铁、钴、镍及其众多合金以及含铁的氧化物（铁氧体）均属铁磁物质。其特征是在外磁场作用下能被强烈磁化，故磁导率 μ 很高。另一特征是磁滞，即磁化场作用停止后，铁磁物质仍保留磁化状态。图 28-1 为铁磁物质的磁感应强度 B 与磁化场强度 H 之间的关系曲线。

图中的原点 O 表示磁化之前铁磁物质处于磁中性状态，即 $B=H=0$ ，当磁场 H 从零开始增加时，磁感应强度 B 随之缓慢上升，如线段 oa 所示。继之 B 随 H 迅速增长，如 ab 所示。其后 B 的增长又趋缓慢。并当 H 增至 H_s 时， B 到达饱和值 B_s 。oabs 称为起始磁化曲线。图 28-1 表明，当磁场从 H_s 逐渐减小至零，磁感应强度 B 并不沿起始磁化曲线恢复到“0”点，而是沿另一条曲线 SR 下降。比较线段 OS 和 SR 可知， H 减小时 B 也相应减小，但 B 的变化滞后于 H 的变化，这现象称为磁滞。磁滞的明显特征是当 $H=0$ 时， B 不为零，而保留剩磁 B_r 。

当磁场反向从 0 逐渐变至 $-H_0$ 时，磁感应强度 B 消失，说明要消除剩磁，必须施加反向磁场。 H_0 称为矫顽力，它的大小反映铁磁材料保持剩磁状态的能力，线段 RD 称为退磁曲线。

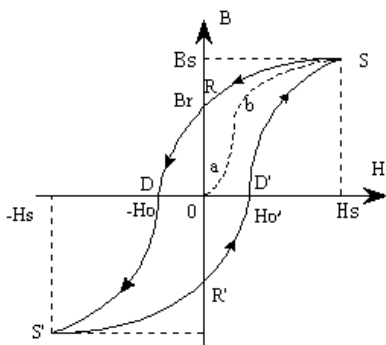


图 28-1 铁磁质起始磁化曲线和磁滞回线

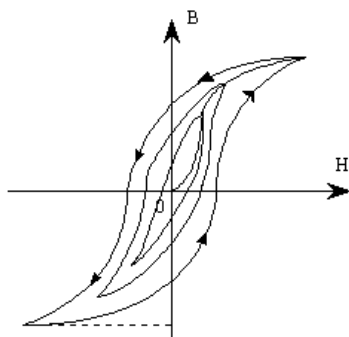


图 28-2 同一铁磁材料的一簇磁滞回线

图 28-1 还表明，当磁场按 $H_s \rightarrow 0 \rightarrow -H_0 \rightarrow -H_s \rightarrow 0 \rightarrow H_0 \rightarrow H_s$ 次序变化，相应的磁感应强度 B 则沿闭合曲线 $SRDS' R'D'S$ 变化，这闭合曲线称为磁滞回线。所以，当铁磁材料处于交变磁场中时（如变压器中的铁心），将沿磁滞回线反复被磁化→去磁→反向磁化→反向去

磁。在此过程中要消耗额外的能量，并以热的形式从铁磁材料中释放，这种损耗称为磁滞损耗，可以证明，磁滞损耗与磁滞回线所围面积成正比。

应该说明，当初始态为 $H=B=0$ 的铁磁材料，在交变磁场强度由弱到强依次进行磁化，可以得到面积由小到大向外扩张的一簇磁滞回线，如图 28-2 所示。这些磁滞回线顶点的连线称为铁磁材料的基本磁化曲线。由此曲线可近似确定其磁导率 $\mu=B/H$ 。因 B 与 H 的关系为非线性，故铁磁材料的 μ 不是常数，而是随 H 而变化（如图 28-3 所示）。铁磁材料的相对磁导率可高达数千乃至数万，这一特点是它用途广泛的主要原因之一。

磁化曲线和磁滞回线是对铁磁材料进行分类和选用的主要依据。图 28-4 为常见的两种典型的磁滞回线。其中软磁材料的磁滞回线狭长，矫顽力、剩磁和磁滞损耗均较小，是制造变压器、电机、和交流磁铁的主要材料。而硬磁材料的磁滞回线较宽，矫顽力大，剩磁强，可用来制造永磁体。

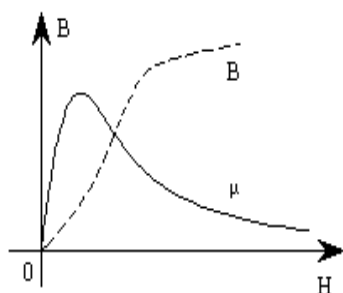


图 28-3 铁磁材料 μ

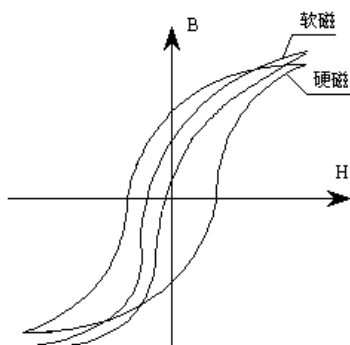


图 28-4 不同铁磁材料的磁滞回线

观察和测量磁滞回线和基本磁化曲线的线路如图 28-5 所示。

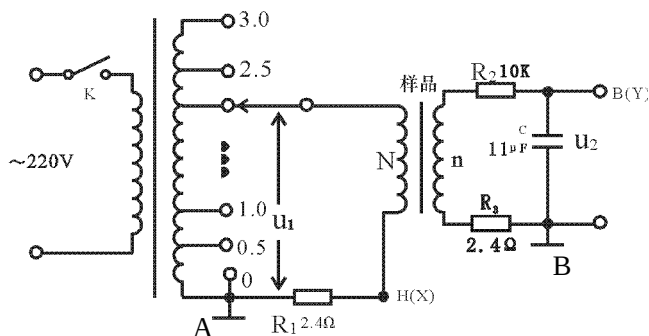


图 28-5 实验线路

被测样品为 EI 型矽钢片， N 为励磁绕组， n 为测量磁感应强度 B 而设置的绕组。 R_1 为励磁电流取样电阻。设通过 N 的交流励磁电流为 i ，根据安培环路定律，样品的磁化场强度为 $H=In/L$ ， L 为样品的平均磁路。

$$\therefore i = \frac{U_1}{R_1} \quad \therefore H = \frac{N}{LR_1} \cdot U_1 = K_1 U_1, \quad (K_1 = \frac{N}{LR_1})$$

式中的 N 、 L 、 R_1 均为已知常数，所以由 U_1 可确定 H 。

在交变磁场下，样品的磁感应强度瞬时值 B 是由测量绕组 n 和 $R_2 C_2$ 电路给定的，根据法拉第电磁感应定律，由于样品中的磁通 ϕ 的变化，在测量线圈中产生的感生电动势的大小为：

$$e = n \frac{d\phi}{dt} \quad \therefore \phi = \frac{1}{n} \int e dt \quad B = \frac{\phi}{S} = \frac{1}{nS} \int e dt, \quad S \text{ 为样品的截面积}$$

如果忽略自感电动势和电路损耗，则回路方程为 $e = i_2 R_2 + u_2$ ，式中 i_2 为感生电流， u_2 为积分电容 C_2 两端电压。设在 Δt 时间内， i_2 向电容 C_2 的充电电量为 Q ，则

$$U_2 = \frac{Q}{C_2} \quad \therefore e = i_2 R_2 + \frac{Q}{C_2}$$

如果选取足够大的 R_2 和 C_2 ，使 $i_2 R_2 \gg \frac{Q}{C_2}$ ，则 $e = i_2 R_2$

$$\therefore i_2 = \frac{dq}{dt} = C_2 \frac{du_2}{dt} \quad \therefore e = C_2 R_2 \frac{du_2}{dt}$$

$$\therefore B = \frac{C_2 R_2}{nS} U_2 = K_2 U_2, \quad (K_2 = \frac{C_2 R_2}{nS})$$

上式中 C_2 、 R_2 、 n 和 S 均为已知常数。所以由 U_2 可确定 B 。

综上所述，将图 28-5 中的 u_1 和 u_2 分别加到示波器的“X 输入”和“Y 输入”便可观察样品的 B-H 曲线。

三、实验内容

1. 实验线路：采用 HE-18 实验箱“磁滞回线的观测”线路。由于 $H = K_1 U_1$ ， $B = K_2 U_2$ ，故 U_1 、 U_2 的值即反映了 H 、 B 的大小。将“降压选择”旋钮置于 0 位。 U_1 和 U_2 分别接示波器的“X 输入”和“Y 输入”，X 输入“地”接 A 点，Y 输入“地”接 B 点。

2. 样品退磁：开启降压变压器电源，对试样进行退磁，即转动“降压选择”旋钮，令 U 从 0 增至 3V，然后再从 3V 降为 0，其目的是消除剩磁，确保样品处于磁中性状态，即 $B = H = 0$ ，如图 28-6 所示。

3. 观察磁滞回线：开启示波器电源，令光点位于坐标网格中心，令 $U = 2.2V$ ，并分别调节示波器 x 和 y 轴的灵敏度，使显示屏上出现图形大小合适的磁滞回线。若图形顶部出现如图 28-7 所示的小环，这时可降低励磁电压 U 予以消除。

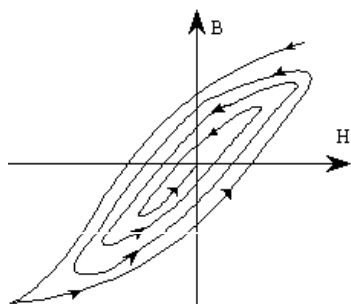


图 28-6 退磁示意图

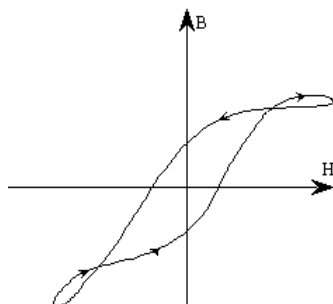


图 28-7 U_2 和 B 的相位差等因素引起的畸变

4. 观测基本磁化曲线。按步骤 2 对样品进行退磁后，从 $U=0$ 开始，逐档提高励磁电压，将在显示屏上得到面积由小到大一个套一个的一簇磁滞回线。这些磁滞回线顶点的连线就是样品的基本磁化曲线。借助示波器读出每一个磁滞回线两个顶点处的 U_1 、 U_2 值，记于下表中。

U (V)	U_1 (V)		U_2 (V)		U_2/U_1	
	右上	左下	右上	左下	右上	左下
0.5						
1.0						
1.2						
1.5						
1.8						
2.0						
2.2						
2.5						
2.8						
3.0						

四、实验报告

1. 根据实验数据，描绘基本磁化曲线，纵坐标为 B （即 $K_2 U_2$ ），横坐标为 H （即 $K_1 U_1$ ）。

2. 描绘 μ - H 曲线，纵坐标为 $\mu = \frac{B}{H} = \frac{K_2 U_2}{K_1 U_1} = K_3 \frac{U_2}{U_1}$ ($K_3 = \frac{K_2}{K_1}$)，横坐标 H （即 $K_1 U_1$ ）。

以上 $K_1 \sim K_3$ 均为确定的常数，可纳入坐标尺的比例中，从而可直接用 U_1 、 U_2 、 U_2/U_1 来作图，即可定性地表现出基本磁化曲线和 μ - H 曲线。

实验二十九 单相铁芯变压器特性的测试

一、实验目的

1. 通过测量，计算变压器的各项参数。
2. 学会测绘变压器的空载特性与外特性。

二、原理说明

1. 图 29-1 为测试变压器参数的电路。由各仪表读得变压器原边（AX，低压侧）的

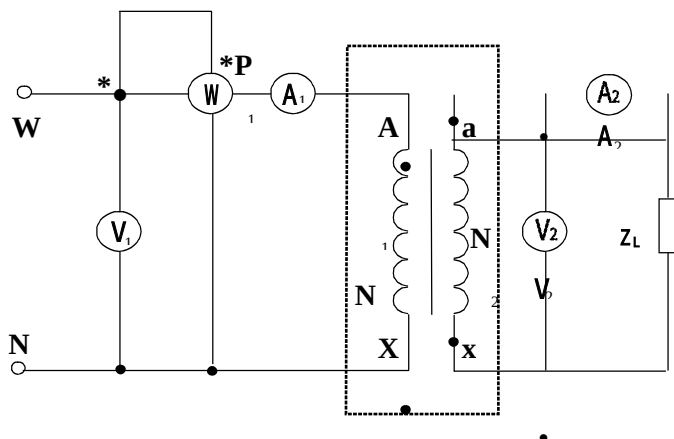


图 29-1

U_1 、 I_1 、 P_1 及副边（ax，高压侧）的 U_2 、 I_2 ，并用万用表 $R \times 1$ 档测出原、副绕组的电阻 R_1 和 R_2 ，即可算得变压器的以下各项参数值：

$$\text{电压比 } K_u = \frac{U_1}{U_2}, \quad \text{电流比 } K_I = \frac{I_2}{I_1},$$

$$\text{原边阻抗 } Z_1 = \frac{U_1}{I_1}, \quad \text{副边阻抗 } Z_2 = \frac{U_2}{I_2},$$

$$\text{阻抗比} = \frac{Z_1}{Z_2}, \quad \text{负载功率 } P_2 = U_2 I_2 \cos \phi_2,$$

$$\text{损耗功率 } P_o = P_1 - P_2,$$

$$\text{功率因数} = \frac{P_1}{U_1 I_1}, \quad \text{原边线圈铜耗 } P_{cu1} = I_1^2 R_1,$$

$$\text{副边铜耗 } P_{cu2} = I_2^2 R_2, \quad \text{铁耗 } P_{Fe} = P_o - (P_{cu1} + P_{cu2})$$

2. 铁芯变压器是一个非线性元件，铁心中的磁感应强度 B 决定于外加电压的有效值 U 。当副边开路（即空载）时，原边的励磁电流 I_{10} 与磁场强度 H 成正比。在变压器中，副边空载时，原边电压与电流的关系称为变压器的空载特性，这与铁芯的磁化曲线（ B - H 曲线）是一致的。

空载实验通常是将高压侧开路，由低压侧通电进行测量，又因空载时功率因数很低，故测量功率时应采用低功率因数瓦特表。此外因变压器空载时阻抗很大，故电压表应接在

电流表外侧。

3. 变压器外特性测试。

为了满足三组灯泡负载额定电压为 220V 的要求，故以变压器的低压(36V)绕组作为原边，220V 的高压绕组作为副边，即当作一台升压变压器使用。

在保持原边电压 $U_1 (=36V)$ 不变时，逐次增加灯泡负载（每只灯为 25W），测定 U_1 、 U_2 、 I_1 和 I_2 ，即可绘出变压器的外特性，即负载特性曲线 $U_2 = f(I_2)$ 。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~500V	2	
2	交流电流表	0~5A	1	
3	单相功率表		1	
4	试验变压器	220V/36V 50VA	1	屏内
5	自耦调压器		1	
6	白炽灯	220V, 25W	5	HE-17

四、实验内容

1. 用交流法判别变压器绕组的同名端（参照实验二十七）。

2. 利用实验屏上或者 HE-21 上的“铁芯变压器”及 HE-17 中的灯组负载，按图 29-1 线路接线。其中 W、N 为主屏上三相调压输出的插孔。A、X 为变压器的低压绕组，a、x 为变压器的高压绕组。即电源经屏内调压器接至低压绕组，高压绕组 220V 接 Z_L 即 25W 的灯组负载（3 只灯泡并联），经指导教师检查后方可进行实验。

3. 将调压器手柄置于输出电压为零的位置（逆时针旋到底），合上电源开关，并调节调压器，使其输出电压为 36V。当负载开路及逐次增加（最多亮 5 个灯泡）时，记下五个仪表的读数(自拟数据表格)，绘制变压器外特性曲线。实验完毕将调压器调回零位，断开电源。

当负载为 4 个及 5 个灯泡时，变压器已处于超载运行状态，很容易烧坏。因此，测试和记录应尽量快，总共不应超过 3 分钟。实验时，可先将 5 只灯泡并联安装好，断开控制每个灯泡的相应开关，通电且电压调至规定值后，再逐一打开各个灯的开关，并记录仪表读数。待开 5 灯的数据记录完毕后，立即用相应的开关断开各灯。

4. 将高压侧（副边）开路，确认调压器处在零位后，合上电源，调节调压器输出电压，使 U_1 从零逐次上升到 1.2 倍的额定电压($1.2 \times 36V$)，分别记下各次测得的 U_1 、 U_{20} 和

I_{10} 数据，记入自拟的数据表格，用 U_1 和 I_{10} 绘制变压器的空载特性曲线。

五、实验注意事项

1. 本实验是将变压器作为升压变压器使用，并用调节调压器提供原边电压 U_1 ，故使用调压器时应首先调至零位，然后才可合上电源。此外，必须用电压表监视调压器的输出电压，防止被测变压器输出过高电压而损坏实验设备，且要注意安全，以防高压触电。
2. 由负载实验转到空载实验时，要注意及时变更仪表量程。
3. 遇异常情况，应立即断开电源，待处理好故障后，再继续实验。

六、预习思考题

1. 为什么本实验将低压绕组作为原边进行通电实验？此时，在实验过程中应注意什么问题？
2. 为什么变压器的励磁参数一定是在空载实验加额定电压的情况下求出？

七、实验报告

1. 根据实验内容，自拟数据表格，绘出变压器的外特性和空载特性曲线。
2. 根据额定负载时测得的数据，计算变压器的各项参数。
3. 计算变压器的电压调整率 $\Delta U\% = \frac{U_{20} - U_{2N}}{U_{20}} \times 100\%$ 。
4. 心得体会及其它。

实验三十 变压器的连接与测试

一、实验目的

深入了解变压器的性能，学会灵活运用变压器。

二、原理说明

一只变压器都有一个初级绕组和一个或多个次级绕组。如果一只变压器有多个次级绕组，那么，在某些情况下，通过改变变压器各绕组端子的联接方式，常可满足一些临时性的需求。

1、如图 30-1 所示的变压器，有 15V，0.3A 和 5V，0.3A 的两个次级绕组。现在，如果想得到一组稍低于 5V 的电压，用这只变压器（不能拆它），能实现吗？

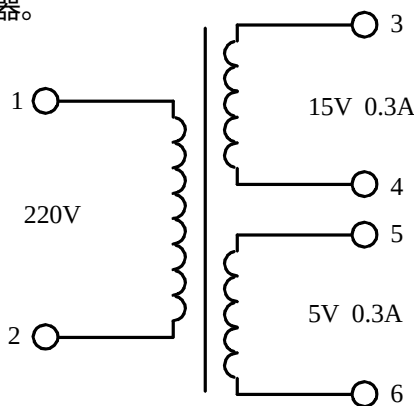


图 30-1

要降低（或升高）变压器次级绕组的输出电压，有三种方法：

- (1) 降低（或升高）初级输入电压——这需要用调压器，还受到额定电压的限制。
- (2) 减少（或增加）次级绕组匝数。
- (3) 增加（或减少）初级绕组匝数。

后两种方法似乎都要拆变压器才能做到。但是，针对我们的问题，不拆变压器也能实现：只要把 15V 绕组串入初级绕组（注意同名端，应头尾相串），再接入 220V 电源，则变压器的另一个次级绕组的输出电压就会改变。

变压器初、次级绕组的每伏匝数基本上是相同的，设为 n ，则该变压器原初级绕组的匝数为 $220n$ 匝，两个次级绕组的匝数分别为 $15n$ 和 $5n$ 匝。把一个次级绕组正串入初级绕组后，初级绕组就变成 $(220+15)n$ 匝。当变压器初级绕组的匝数改变时，由于变压器次级绕组的输出电压与初级绕组的匝数成反比，所以将 15V 绕组串入初级绕组后，5V 绕组的

输出电压 (U_{01}) 就变为：
$$U_{01} = \frac{220n}{(220+15)n} \times 5 = 4.68 \text{ (V)}$$

同理，如果把 15V 绕组反串入初级绕组，再接入 220V 电源，则 5V 绕组的输出电压 (U_{02})

就变为：
$$U_{02} = \frac{220n}{(220-15)n} \times 5 = 5.37 \text{ (V)}$$

2、将此变压器的二个次级绕组头尾相串，就可以得到 $U_{03}=15+5=20$ (V) 的次级输出电压。反之，如果将它的二个次级绕组反向串联，其输出电压就成为 $U_{04}=15-5=10$ (V)。

3、还可以将 2 个或多个输出电压相同的次级绕组相并联（注意应同名端相并联），以获得较大的负载电流。本例中，因二个次级绕组的电压不同，故不允许并联使用。

4、在将一个变压器的各个绕组进行串、并联使用时，应注意以下几个问题：

(1) 二个或多个次级绕组，即使输出电压不同，均可正向或反向串联使用，但串联后的绕组允许流过的电流应 $\leq$ 其中最小的额定电流值。

(2) 二个或多个输出电压相同的绕组，可同相并联使用。并联后的负载电流可增加到并联前各绕组的额定电流之和，但不允许反相并联使用。

(3) 输出电压不相同的绕组，绝对不允许并联使用，以免由于绕组内部产生环流而烧坏绕组。

(4) 有多个抽头的绕组，一般只能取其中一组（任意两个端子）来与其它绕组串联或并联使用。并联使用时，该两端子间的电压应与被并绕组的电压相等。

(5) 变压器的各绕组之间的串、并联都为临时性或应急性使用。长期性的应用仍应采用规范设计的变压器。

二、实验设备：

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~500V	1	
2	试验变压器	220V/15V 0.3A, 5V 0.3A	1	HE-18

三、实验内容：

- 1、用交流法判别变压器各绕组的同名端（参见实验二十七）。
- 2、将变压器的 1、2 两端接交流 220V，测量并记录二个次级绕组的输出电压。
- 3、将 1、3 连通，2、4 两端接交流 220V，测量并记录 5、6 两端的电压。
- 4、将 1、4 连通，2、3 两端接交流 220V，测量并记录 5、6 两端的电压。
- 5、将 4、5 连通，1、2 两端接交流 220V，测量并记录 3、6 两端的电压。
- 6、将 3、5 连通，1、2 两端接交流 220V，测量并记录 4、6 两端的电压。

四、实验注意事项：

1. 由于实验中用到 220V 交流电源，因此操作时应注意安全。做每个实验和测试之前，均应先将调压器的输出电压调为 0V，在接好连线和仪表，经检查无误后，再慢慢将调压器的输出电压调到 220V。测试、记录完毕后立即将调压器的输出电压调为 0V。

2. 图 30-1 中，变压器两个次级绕组所标注的输出电压是在额定负载下的输出电压。本实验中所测得的各个次级绕组的电压实际上是空载电压，要比所标注的电压高。

五、预习思考题：

- 1、图 30-1 所示变压器的初级额定电流是多少（变压器效率以 85%计）？
- 2、 U_{02} 的计算公式是如何得出的？
- 3、将变压器的不同绕组串联使用时，要注意什么？

六、实验报告：

- 1、总结变压器几种连接方法及其使用条件。
- 2、心得体会及其它。

实验三十一 三相交流电路电压、电流的测量

一、实验目的

1. 掌握三相负载作星形联接、三角形联接的方法，验证这两种接法下线、相电压及线、相电流之间的关系。
2. 充分理解三相四线供电系统中中线的作用。

二、原理说明

1. 三相负载可接成星形（又称“Y”接）或三角形（又称“ Δ ”接）。当三相对称负载作星形联接时，线电压 U_l 是相电压 U_p 的 $\sqrt{3}$ 倍。线电流 I_l 等于相电流 I_p ，即

$$U_l = \sqrt{3}U_p, \quad I_l = I_p$$

在这种情况下，流过中线的电流 $I_0 = 0$ ，所以可以省去中线。由三相三线制电源供电，无中线的星形联接称为 Y 接法。

当对称三相负载作 Δ 形联接时，有 $I_l = \sqrt{3}I_p$ ， $U_l = U_p$ 。

2. 不对称三相负载作星形联接时，必须采用三相四线制接法，即 Y_0 接法。而且中线必须牢固联接，以保证三相不对称负载的每相电压维持对称不变。

倘若中线断开，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。尤其是对于三相照明负载，无条件地一律采用 Y_0 接法。

3. 当不对称负载作 Δ 接时， $I_l \neq \sqrt{3}I_p$ ，但只要电源的线电压 U_l 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。

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~500V	1	
2	交流电流表	0~5A	1	
3	万用表		1	自备
4	三相自耦调压器		1	
5	三相灯组负载	220V, 25W 白炽灯	9	HE-17
6	电流插座		3	屏上

四、实验内容

1. 三相负载星形联接（三相四线制供电）

按图 31-1 线路组接实验电路。即三相灯组负载经三相自耦调压器接通三相对称电源。将三相调压器的旋柄置于输出为 0V 的位置（即逆时针旋到底）。经指导教师检查合格后，

方可开启实验台电源，然后调节调压器的输出，使输出的三相线电压为 220V，并按下述内容完成各项实验，分别测量三相负载的线电压、相电压、线电流、相电流、中线电流、电源与负载中点间的电压。将所测得的数据记入表 31-1 中，并观察各相灯组亮暗的变化程度，特别要注意观察中线的作用。

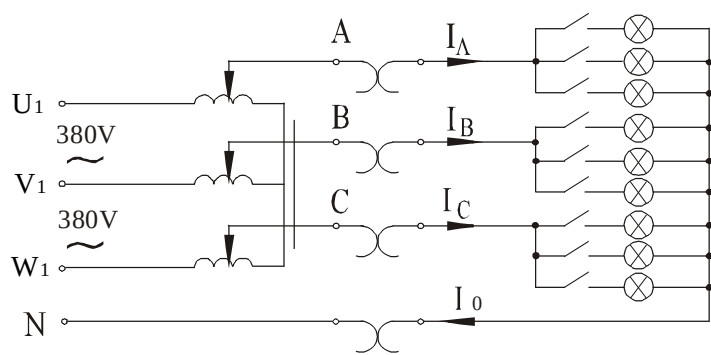


图 31-1

表 31-1

测量数据 实验内容 (负载情况)	开灯盏数			线电流 (A)			线电压 (V)			相电压 (V)			中线 电流 I_0 (A)	中点 电压 U_{N0} (V)
	A 相	B 相	C 相	I_A	I_B	I_C	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{A0}	U_{B0}	U_{C0}		
Y_0 接平衡负载	3	3	3											
Y 接平衡负载	3	3	3											
Y_0 接不平衡负载	1	2	3											
Y 接不平衡负载	1	2	3											
Y_0 接 B 相断开	1		3											
Y 接 B 相断开	1		3											
Y 接 B 相短路	1		3											

3. 负载三角形联接（三相三线制供电）

按图 31-2 改接线路，经指导教师检查合格后接通三相电源，并调节调压器，使其输出线电压为 220V，并按表 31-2 的内容进行测试。

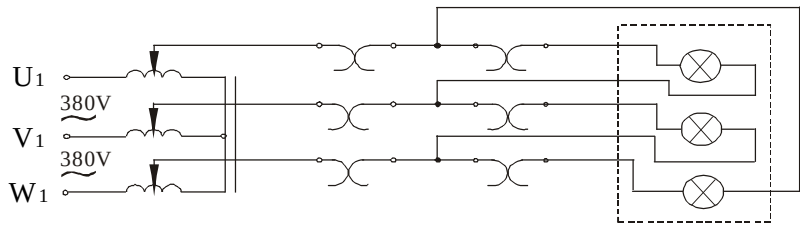


图 31-2

表 31-2

测量数据 负载情况	开 灯 盏 数			线电压=相电压(V)			线电流(A)			相电流(A)		
	A-B 相	B-C 相	C-A 相	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}
三相平衡	3	3	3									
三相不平衡	1	2	3									

五、实验注意事项

1. 本实验采用三相交流市电，线电压为 380V，应穿绝缘鞋进实验室。实验时要注意人身安全，不可触及导电部件，防止意外事故发生。
2. 每次接线完毕，同组同学应自查一遍，然后由指导教师检查后，方可接通电源，必须严格遵守先断电、再接线、后通电；先断电、后拆线的实验操作原则。
3. 星形负载作短路实验时，必须首先断开中线，以免发生短路事故。
4. 为避免烧坏灯泡，HE-17 实验箱内设有过压保护装置。当任一相电压 $>245\sim 250V$ 时，即声光报警并跳闸。因此，在做 Y 接不平衡负载或缺相实验时，所加线电压应以最高相电压 $<240V$ 为宜。

六、预习思考题

1. 三相负载根据什么条件作星形或三角形连接？
2. 复习三相交流电路有关内容，试分析三相星形联接不对称负载在无中线情况下，当某相负载开路或短路时会出现什么情况？如果接上中线，情况又如何？
3. 本次实验中为什么要通过三相调压器将 380V 的市电线电压降为 220V 的线电压使用？

七、实验报告

1. 用实验测得的数据验证对称三相电路中的 $\sqrt{3}$ 关系。
2. 用实验数据和观察到的现象，总结三相四线供电系统中中线的作用。
3. 不对称三角形联接的负载，能否正常工作？实验是否能证明这一点？
4. 根据不对称负载三角形联接时的相电流值作相量图，并求出线电流值，然后与实验测得的线电流作比较，分析之。
4. 心得体会及其它。

实验三十二 三相电路功率的测量

一、实验目的

1. 掌握用一瓦特表法、二瓦特表法测量三相电路有功功率与无功功率的方法
2. 进一步熟练掌握功率表的接线和使用方法

二、原理说明

1. 对于三相四线制供电的三相星形联接的负载（即 Y_0 接法），可用一只功率表测量各相的有功功率 P_A 、 P_B 、 P_C ，则三相功率之和（ $\Sigma P = P_A + P_B + P_C$ ）即为三相负载的总有功功率值。这就是一瓦特表法，如图 32-1 所示。若三相负载是对称的，则只需测量一相的功率，再乘以 3 即得三相总的有功功率。

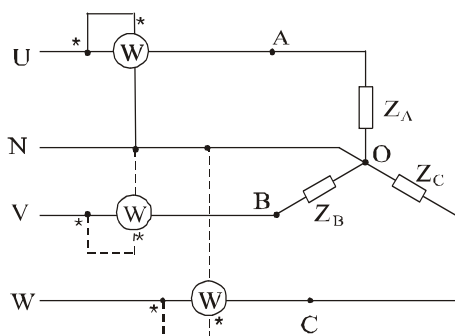


图 32-1

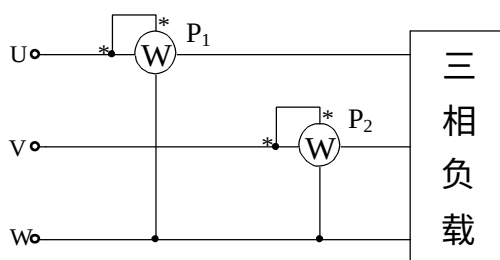


图 32-2

2. 三相三线制供电系统中，不论三相负载是否对称，也不论负载是 Y 接还是 Δ 接，都可用二瓦特表法测量三相负载的总有功功率。测量线路如图 32-2 所示。若负载为感性或容性，且当相位差 $\phi > 60^\circ$ 时，线路中的一只功率表指针将反偏（数字式功率表将出现负读数），这时应将功率表电流线圈的两个端子调换（不能调换电压线圈端子），其读数应记为负值。而三相总功率 $\Sigma P = P_1 + P_2$ （ P_1 、 P_2 本身不含任何意义）。

3. 对于三相三线制供电的三相对称负载，可用一瓦特表法测得三相负载的总无功功率 Q ，测试原理线路如图 32-3 所示。

图示功率表读数的 $\sqrt{3}$ 倍，即为对称三相电路总的无功功率。除了此图给出的一种连接法（ I_U 、 U_{VW} ）外，还有另外两种连接法，即接成（ I_V 、 U_{WU} ）或（ I_W 、 U_{UV} ）。

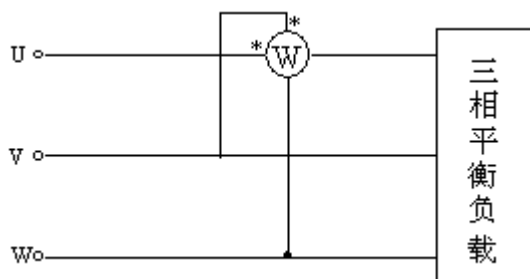


图 32-3

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	交流电压表	0~500V	1	
2	交流电流表	0~5A	1	
3	单相功率表		2	
4	万用表		1	自备
5	三相自耦调压器		1	
6	三相灯组负载	220V, 25W 白炽灯	9	HE-17
7	三相电容负载	1 μF , 2.2 μF , 4.7 μF / 500V	各 3	HE-20

四、实验内容

1. 用一瓦特表法测定三相对称 Y_0 接以及不对称 Y_0 接负载的总功率 ΣP 。实验按图 32-4 线路接线。线路中的电流表和电压表用以监视该相的电流和电压，不要超过功率表电压和电流的量程。

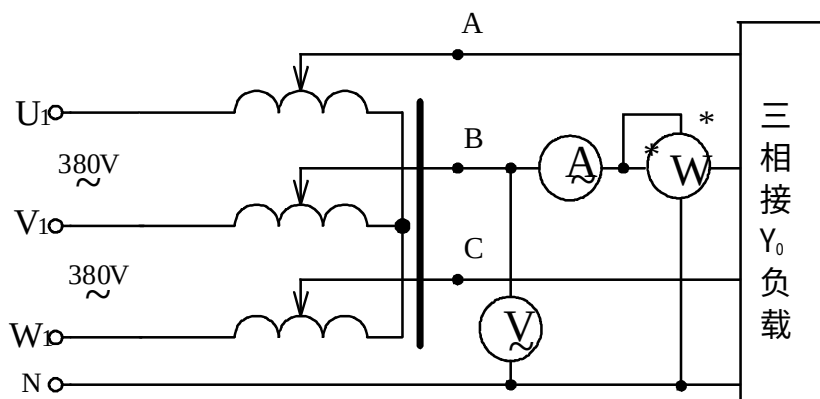


图 32-4

经指导教师检查后，接通三相电源，调节调压器输出，使输出线电压为 220V，按表 32-1 的要求进行测量及计算。

表 32-1

负载情况	开灯盏数			测量数据			计算值
	A 相	B 相	C 相	P_A (W)	P_B (W)	P_C (W)	ΣP (W)
Y_0 接对称负载	3	3	3				
Y_0 接不对称负载	1	2	3				

首先将三只表按图 32-4 接入 B 相进行测量，然后分别将三只表换接到 A 相和 C 相，再进行测量。

2. 用二瓦特表法测定三相负载的总功率

(1) 按图 32-5 接线，将三相灯组负载接成 Y 形接法。

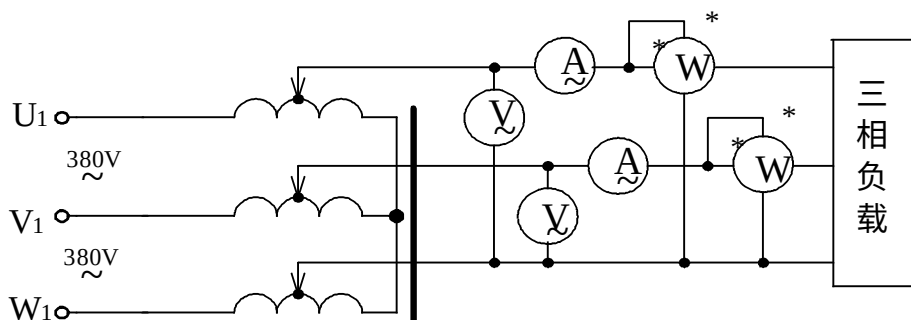


图 32-5

经指导教师检查后，接通三相电源，调节调压器的输出线电压为 220V，按表 32-2 的内容进行测量。

(2) 将三相灯组负载改成 Δ 形接法，重复(1)的测量步骤，数据记入表 32-2 中。

表 32-2

负载情况	开灯盏数			测量数据		计算值
	A 相	B 相	C 相	P_1 (W)	P_2 (W)	ΣP (W)
Y 接平衡负载	3	3	3			
Y 接不平衡负载	1	2	3			
Δ 接不平衡负载	1	2	3			
Δ 接平衡负载	3	3	3			

3. 用一瓦特表法测定三相对称星形负载的无功功率，按图 32-6 所示的电路接线。

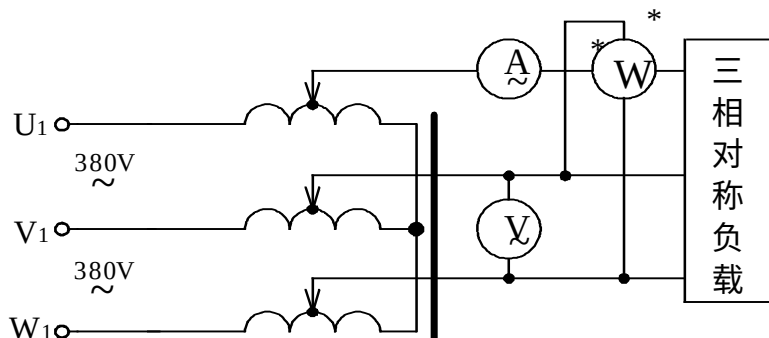


图 32-6

(1) 每相负载由白炽灯和电容器并联而成，并由开关控制其接入。检查接线无误后，接通三相电源，将调压器的输出线电压调到 220V，读取三表的读数，并计算无功功率 ΣQ ，记入表 32-3。

(2) 分别按 I_v 、 U_{wU} 和 I_w 、 U_{UV} 接法，重复 (1) 的测量，并比较各自的 ΣQ 值。

表 32-3

接 法	负载情况	测量值			计算值
		U (V)	I (A)	Q (var)	$\Sigma Q = \sqrt{3} Q$
I_u U_{vw}	(1) 三相对称灯组 (每相开 3 盏)				
	(2) 三相对称电容器 (每相 4.7 μF)				
	(3) (1)、(2)的并联负载				
I_v U_{wU}	(1) 三相对称灯组 (每相开 3 盏)				
	(2) 三相对称电容器 (每相 4.7 μF)				
	(3) (1)、(2)的并联负载				
I_w U_{UV}	(1) 三相对称灯组 (每相开 3 盏)				
	(2) 三相对称电容器 (每相 4.7 μF)				
	(3) (1)、(2)的并联负载				

五、实验注意事项

1. 每次实验完毕，均需将三相调压器旋柄调回零位。每次改变接线，均需断开三相电源，以确保人身安全。

六、预习思考题

1. 复习二瓦特表法测量三相电路有功功率的原理。
2. 复习一瓦特表法测量三相对称负载无功功率的原理。
3. 测量功率时为什么在线路中通常都接有电流表和电压表？

七、实验报告

1. 完成数据表格中的各项测量和计算任务。比较一瓦特表和二瓦特表法的测量结果。
2. 总结、分析三相电路功率测量的方法与结果。
3. 心得体会及其它。

实验三十三 单相电度表的校验

一、实验目的

1. 掌握电度表的接线方法。
2. 学会电度表的校验方法。

二、原理说明

1. 电度表是一种感应式仪表，是根据交变磁场在金属中产生感应电流，从而产生转矩的基本原理而工作的仪表，主要用于测量交流电路中的电能。它的指示器能随着电能的不断增大（也就是随着时间的延续）而连续地转动，从而能随时反应出电能积累的总数值。因此，它的指示器是一个“积算机构”，是将转动部分通过齿轮传动机构折换为被测电能的数值，由数字及刻度直接指示出来。

它的驱动元件是由电压铁芯线圈和电流铁心线圈在空间上、下排列，中间隔以铝制的圆盘。驱动两个铁心线圈的交流电，建立起合成的特殊分布的交变磁场，并穿过铝盘，在铝盘上产生出感应电流。该电流与磁场的相互作用结果产生转动力矩驱使铝盘转动。铝盘上方装有一个永久磁铁，其作用是对转动的铝盘产生制动力矩，使铝盘转速与负载功率成正比。因此，在某一段测量时间内，负载所消耗的电能 W 就与铝盘的转数 n 成正比。即 $N = \frac{n}{W}$ ，比例系数 N 称为电度表常数，常在电度表上标明，其单位是转/1 千瓦小时。

2. 电度表的灵敏度是指在额定电压、额定频率及 $\cos \phi = 1$ 的条件下，从零开始调节负载电流，测出铝盘开始转动的最小电流值 $I_{\min}$ ，则仪表的灵敏度表示为 $S = \frac{I_{\min}}{I_N} \times 100\%$ 式中的 I_N 为电度表的额定电流。 $I_{\min}$ 通常较小，约为 I_N 的 0.5%。

3. 电度表的潜动是指负载电流等于零时，电度表仍出现缓慢转动的现象。按照规定，无负载电流时，在电度表的电压线圈上施加其额定电压的 110%（达 242V）时，观察其铝盘的转动是否超过一圈。凡超过一圈者，判为潜动不合格。

三、实验设备

序号	名 称	数量	备 注
1	电度表	1	
2	单相功率表	1	
3	交流电压表	1	
4	交流电流表	1	
5	自耦调压器	1	
6	220V, 100W 白炽灯	3	自备
7	220V, 25W 灯泡	9	HE-17
8	秒表	1	
9	10k、20k/8W 电阻	各 1	HE-19
10	电表架	1	屏上/HE-21

四、实验内容与步骤

记录被校验电度表的数据：额定电流 $I_N =$ ，额定电压 $U_N =$ ，
电度表常数 $N =$ ，准确度为

1. 用功率表、秒表法校验电度表的准确度

本实验所用电度表的电表架根据实验台不同有两种：一种直接挂在控制屏的主面板上，另一种挂在挂件上（HE-21）。

利用所配电度表及屏上的电表架和 HE-17 的灯组负载，按图 33-1 接线。电度表的接线与功率表相同，其电流线圈与负载串联，电压线圈与负载并联。

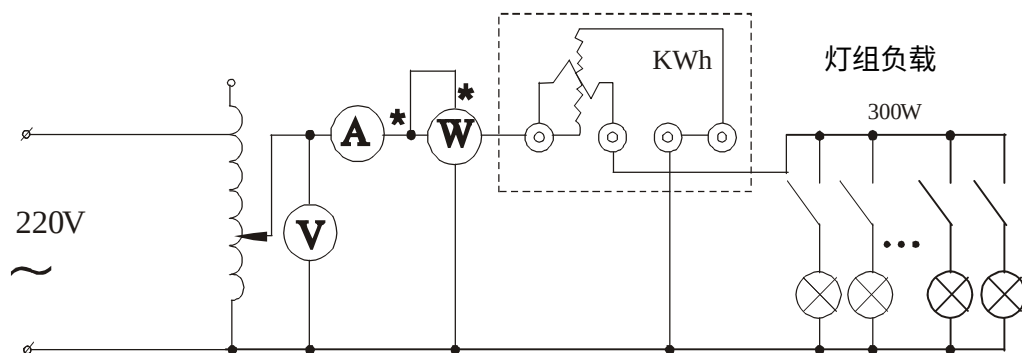


图 33-1

线路经指导教师检查无误后，接通电源。将调压器的输出电压调到 220V，按表 33-1 的要求接通灯组负载，用秒表定时记录电度表转盘的转数及记录各仪表的读数。

为了准确地记时及计圈数，可将电度表转盘上的一小段着色标记刚出现（或刚结束）时作为秒表计时的开始，并同时读出电度表的起始读数。此外，为了能记录整数转数，可先预定好转数，待电度表转盘刚转完此转数时，作为秒表测定时间的终点，并同时读出电度表的终止读数。所有数据记入表 33-1。

建议 n 取 24 圈，则 300W 负载时，需时 2 分钟左右。

表 33-1

负载情况	测 量 值						计 算 值			
	U (V)	I (A)	电表读数 (kWh)			时间 (s)	转数 n	计算 电能 W' (kWh)	Δ W/W' (%)	电度表 常数 N
			起	止	W					
300W										
300W										

为了准确和熟悉起见，可重复多做几次。

2. 电度表灵敏度的测试

电度表灵敏度的测试要用到专用的变阻器，一般都不具备。此处可将图 33-1 中的灯组负载改成三组灯组相串联，并全部用 220V/25W 灯泡。再在电度表与灯组负载之间串接

8W, 30k~10k 的电阻 (取自 HE-19 挂箱上的 8W, 10k、20k 电阻)。每组先开通一只灯泡。接通 220V 后看电度表转盘是否开始转动。然后逐只增加灯泡或者减少电阻。直到转盘开转。则这时电流表的读数可大致作为其灵敏度。请同学们自行估算其误差。

做此实验前应使电度表转盘的着色标记处于可看见的位置。由于负载很小, 转盘的转动很缓慢, 必须耐心观察。

3. 检查电度表的潜动是否合格

断开电度表的电流线圈回路, 调节调压器的输出电压为额定电压的 110% (即 242V), 仔细观察电度表的转盘有否转动。一般允许有缓慢地转动。若转动不超过一圈即停止, 则该电度表的潜动为合格, 反之则不合格。

实验前应使电度表转盘的着色标记处于可看见的位置。由于“潜动”非常缓慢, 要观察正常的电度表“潜动”是否超过一圈, 需要一小时以上。

五、实验注意事项

1. 本实验台配有一只电度表, 实验时, 只要将电度表挂在屏上的相应位置, 并用螺母紧固即可。接线时要卸下护板。实验完毕, 拆除线路后, 要装回护板。

2. 记录时, 同组同学要密切配合。秒表定时、读取转数和电度表读数步调要一致, 以确保测量的准确性。

3. 实验中用到 220V 强电, 操作时应注意安全。凡需改动接线, 必须切断电源, 接好线后, 检查无误后才能加电。

六、预习思考题

1. 查找有关资料, 了解电度表的结构、原理及其检定方法。
2. 电度表接线有哪些错误接法, 它们会造成什么后果?

七、实验报告

1. 对被校电度表的各项技术指标作出评论。
2. 对校表工作的体会。

实验三十四 功率因数及相序的测量

一、实验目的

1. 掌握三相交流电路相序的测量方法。
2. 熟悉功率因数表的使用方法，了解负载性质对功率因数的影响。

二、原理说明

图 34-1 为相序指示器电路，用以测定三相电源的相序 A、B、C（或 U、V、W）。它是由一个电容器和两个电灯联接成的星形不对称三相负载电路。如果电容器所接的是 A 相，则灯光较亮的是 B 相，较暗的是 C 相。相序是相对的，任何一相均可作为 A 相。但 A 相确定后，B 相和 C 相也就确定了。

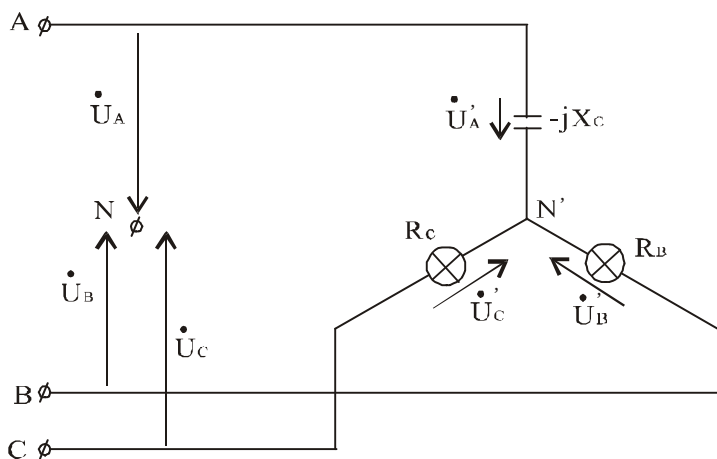


图 34-1

为了分析问题简单起见

设 $X_C = R_B = R_C = R$, $\dot{U}_A = U_p \angle 0^\circ$

$$\text{则 } \dot{U}_{N'N} = \frac{U_P \left(\frac{1}{-jR} \right) + U_P \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right) + U_P \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) \left(\frac{1}{R} \right)}{-\frac{1}{jR} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_B = \dot{U}_B - \dot{U}_{N'N} &= U_P \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - U_P (-0.2 + j0.6) \\ &= U_P (-0.3 - j1.466) = 1.49 \angle -101.6^\circ U_P \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \dot{U}'_C = \dot{U}_C - \dot{U}_{N'N} &= U_P \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) - U_P (-0.2 + j0.6) \\ &= U_P (-0.3 + j0.266) = 0.4 \angle -138.4^\circ U_P \end{aligned}$$

由于 $\dot{U}'_B > \dot{U}'_C$ ，故 B 相灯光较亮。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	单相功率表			
2	交流电压表	0~500V		
3	交流电流表	0~5A		
4	白炽灯灯组负载	25W/220V	3	HE-17
5	电感线圈	30W 镇流器	1	HE-16
6	电容器	1 μ F, 4.7 μ F		HE-16

四、实验内容

1. 相序的测定

(1) 用 220V/25W 白炽灯和 1 μ F/500V 电容器，按图 34-1 接线，经三相调压器接入线电压为 220V 的三相交流电源，观察两只灯泡的亮、暗，判断三相交流电源的相序。

(2) 将电源线任意调换两相后再接入电路，观察两灯的明亮状态，判断三相交流电源的相序。

2. 电路功率(P)和功率因数($\cos \phi$)的测定

按图 34-2 接线，按下表所述在 A、B 间接入不同器件，记录 $\cos \phi$ 表及其它各表的读数，并分析负载性质。

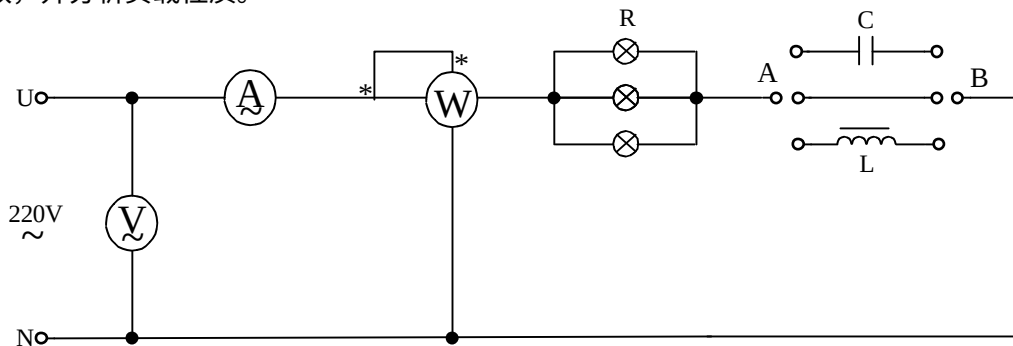


图 34-2

A、B 间	U (v)	U_R (v)	U_L (v)	U_C (v)	I (A)	P (w)	Cos (ϕ)	负载性质
短接								
接入 C								
接入 L								
接入 L 和 C (并联)								

说明：C 为 $4.7\mu\text{F}/500\text{V}$ ，L 为 30W 日光灯镇流器。

五、实验注意事项

每次改接线路都必须先断开电源。

六、预习思考题

根据电路理论，分析图 34-1 检测相序的原理。

七、实验报告

1. 简述实验线路的相序检测原理。
2. 根据 U、I、P 三表测定的数据，计算出 $\cos\phi$ ，并与 $\cos\phi$ 表的读数比较，分析误差原因。
3. 分析负载性质与 $\cos\phi$ 的关系。
4. 心得体会及其它。

实验三十五 三相鼠笼式异步电动机

一、实验目的

1. 熟悉三相鼠笼式异步电动机的结构和额定值。
2. 学习检验异步电动机绝缘情况的方法。
3. 学习三相异步电动机定子绕组首、末端的判别方法。
4. 掌握三相鼠笼式异步电动机的起动和反转方法。

二、原理说明

1. 三相鼠笼式异步电动机的结构

异步电动机是基于电磁原理把交流电能转换为机械能的一种旋转电机。

三相鼠笼式异步电动机的基本结构有定子和转子两大部分。

定子主要由定子铁芯、三相对称定子绕组和机座等组成，是电动机的静止部分。三相定子绕组一般有六根引出线，出线端装在机座外面的接线盒内，如图35-1所示，根据三相电源电压的不同，三相定子绕组可以接成星形(Y)或三角形(Δ)，然后与三相交流电源相连。

转子主要由转子铁心、转轴、鼠笼式转子绕组、风扇等组成，是电动机的旋转部分。小容量鼠笼式异步电动机的转子绕组大都采用铝浇铸而成，冷却方式一般都采用扇冷式。

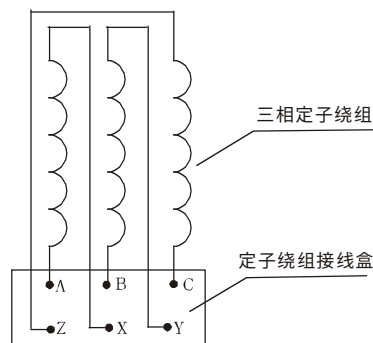


图 35-1

2. 三相鼠笼式异步电动机的铭牌

三相鼠笼式异步电动机的额定值标记在电动机的铭牌上，如下表所示为本实验装置三相鼠笼式异步电动机铭牌。

型号	DJ24	电压	380V/220V	接法	Y/ Δ
功率	180W	电流	1.13A/0.65A	转速	1400转/分
定额	连续				

其中：

1. 功率 额定运行情况下，电动机轴上输出的机械功率。
2. 电压 额定运行情况下，定子三相绕组应加的电源线电压值。
3. 接法 定子三相绕组接法，当额定电压为380V/220V时，应为Y/ Δ 接法。
4. 电流 额定运行情况下，当电动机输出额定功率时，定子电路的线电流值。

3. 三相鼠笼式异步电动机的检查

电动机使用前应作必要的检查

(1) 机械检查

检查引出线是否齐全、牢靠；转子转动是否灵活、匀称、有否异常声响等。

(2) 电气检查

a. 用兆欧表检查电机绕组间及绕组与机壳之间的绝缘性能

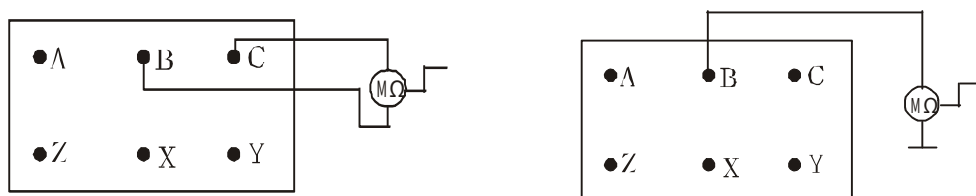


图35-2

电动机的绝缘电阻可以用兆欧表进行测量。对额定电压1kV 以下的电动机，其绝缘电阻值最低不得小于 $1000\ \Omega/V$ ，测量方法如图35-2所示。一般500V以下的中小型电动机最低应具有 $2M\Omega$ 的绝缘电阻。

b. 定子绕组首、末端的判别

异步电动机三相定子绕组的六个出线端有三个首端和三个末端。一般，首端标以A、B、C，末端标以X、Y、Z，在接线时如果没有按照首、末端的标记来接，则当电动机起动时磁势和电流就会不平衡，因而引起绕组发热、振动、有噪音，甚至电动机不能起动因过热而烧毁。由于某种原因定子绕组六个出线端标记无法辨认，可以通过实验方法来判别其首、末端（即同名端）。方法如下：

① 用万用电表欧姆挡从六个出线端确定哪一对引出线是属于同一相的，分别找出三相绕组，并标以符号，如A、X；B、Y；C、Z。将其中的任意两相绕组串联，如图35-3所示。

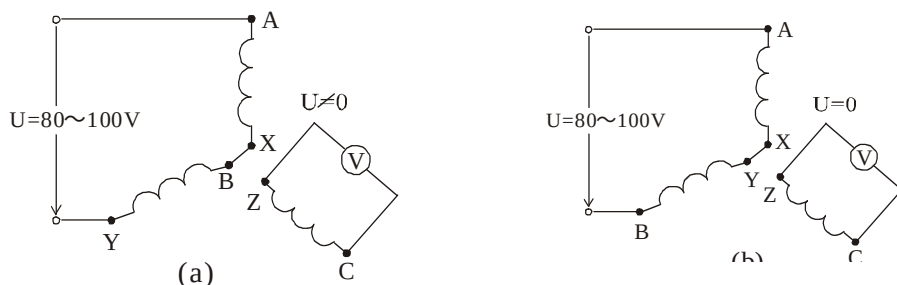


图35-3

将控制屏三相自耦调压器手柄置零位，开启电源总开关，按下启动按钮，接通三相交流电源。调节调压器输出，使在相串联两相绕组出线端施以单相低电压 $U=80\sim 100V$ ，测出第三相绕组的电压，如测得的电压值有一定读数，表示两相绕组的末端与首端相联，如图35-3(a)所示。反之，如测得的电压近似为零，则两相绕组的末端与末端(或首端与首端)相联，如图35-3(b)所示。用同样方法可测出第三相绕组的首末端。

4. 三相鼠笼式异步电动机的起动

鼠笼式异步电动机的直接起动电流可达额定电流的4~7倍，但持续时间很短，不致引

起电机过热而烧坏。但对容量较大的电机，过大的起动电流会导致电网电压的下降而影响其它的负载正常运行，通常采用降压起动，最常用的是Y- Δ 换接起动，它可使起动电流减小到直接起动的1/3。其使用的条件是正常运行必须作 Δ 接法。

5. 三相鼠笼式异步电动机的反转

异步电动机的旋转方向取决于三相电源接入定子绕组时的相序，故只要改变三相电源与定子绕组连接的相序即可使电动机改变旋转方向。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流电源	380V、220V	1	
2	三相鼠笼式异步电动机	DJ24	1	
3	兆欧表	500V	1	
4	交流电压表	0~500V	1	
5	交流电流表	0~5A	1	
6	万用电表		1	自备

四、实验内容

- 抄录三相鼠笼式异步电动机的铭牌数据，并观察其结构。
- 用万用电表判别定子绕组的首、末端。
- 用兆欧表测量电动机的绝缘电阻。

各相绕组之间的绝缘电阻 绕组对地（机座）之间的绝缘电阻

A相与B相 ($M\Omega$) A相与地（机座） ($M\Omega$)

A相与C相 ($M\Omega$) B相与地（机座） ($M\Omega$)

B相与C相 ($M\Omega$) C相与地（机座） ($M\Omega$)

4. 鼠笼式异步电动机的直接起动

(1) 采用380V三相交流电源

将三相自耦调压器手柄置于输出电压为零位置；控制屏上三相电压表切换开关置“调压输出”侧；根据电动机的容量选择交流电流表合适的量程。

开启控制屏上三相电源总开关，按启动按钮，此时自耦调压器原绕组端 U_1 、 V_1 、 W_1 得电，调节调压器输出使U、V、W端输出线电压为380V，三只电压表指示应基本平衡。保持自耦调压器手柄位置不变，按停止按钮，自耦调压器断电。

a. 按图35-4接线，电动机三相定子绕组接成Y接法；供电线电压为380V；实验线路中Q1及FU由控制屏上的接触器KM和熔断器FU代替，学生可由U、V、W端子开始接线，以后各控制实验均同此。

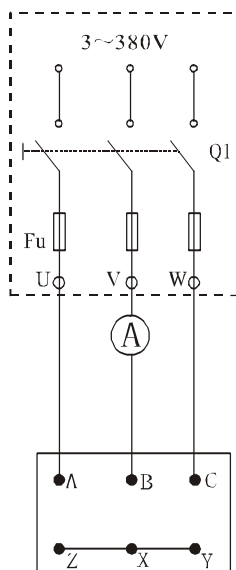


图 35-4

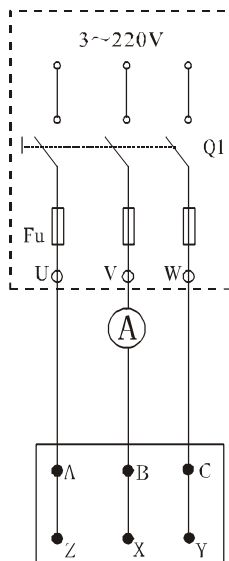


图 35-5

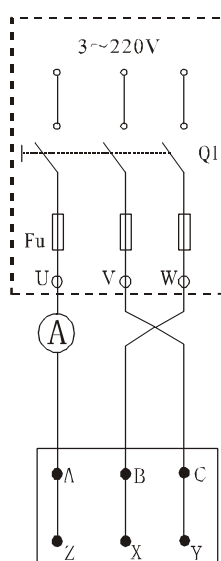


图 35-6

b. 按控制屏上启动按钮，电动机直接起动，观察起动瞬间电流冲击情况及电动机旋转方向，记录起动电流。当起动运行稳定后，将电流表量程切换至较小量程档位上，记录空载电流。

c. 电动机稳定运行后，突然拆出U、V、W中的任一相电源（注意小心操作，以免触电），观测电动机作单相运行时电流表的读数并记录之。再仔细倾听电机的运行声音有何变化。（可由指导教师作示范操作）

d. 电动机起动之前先断开U、V、W中的任一相，作缺相起动，观测电流表读数，记录之，观察电动机有否起动，再仔细倾听电动机有否发出异常的声响。

e. 实验完毕，按控制屏停止按钮，切断实验线路三相电源。

(2) 采用220V三相交流电源

调节调压器输出使输出线电压为220V，电动机定子绕组接成 Δ 接法。

按图35-5接线，重复(1)中各项内容，记录之。

5. 异步电动机的反转

电路如图35-6所示，按控制屏启动按钮，起动电动机，观察起动电流及电动机旋转方向是否反转？

实验完毕，将自耦调压器调回零位，按控制屏停止按钮，切断实验线路三相电源。

五、实验注意事项

1. 本实验系强电实验，接线前(包括改接线路)、实验后都必须断开实验线路的电源，特别改接线路和拆线时必须遵守“先断电，后拆线”的原则。电机在运转时，电压和转速均很高，切勿触碰导电和转动部分，以免发生人身和设备事故。为了确保安全，学生应穿绝缘鞋进入实验室。接线或改接线路必须经指导教师检查后方可进行实验。

2. 起动电流持续时间很短, 且只能在接通电源的瞬间读取电流表指针偏转的最大读数, (因指针偏转的惯性, 此读数与实际的起动电流数据略有误差), 如错过这一瞬间, 须将电机停车, 待停稳后, 重新起动读取数据。

3. 单相(即缺相) 运行时间不能太长, 以免过大的电流导致电机的损坏。

六、预习思考题

1. 如何判断异步电动机的六个引出线, 如何连接成Y形或 Δ 形, 又根据什么来确定该电动机作Y接或 Δ 接?

2. 缺相是三相电动机运行中的一大故障, 在起动或运转时发生缺相, 会出现什么现象? 有何后果?

3. 电动机转子被卡住不能转动, 如果定子绕组接通三相电源将会发生什么后果?

七、实验报告

1. 总结对三相鼠笼机绝缘性能检查的结果, 判断该电机是否完好可用?

2. 对三相鼠笼机的起动、反转及各种故障情况进行分析。

实验三十六 三相鼠笼式异步电动机 点动和自锁控制

一、实验目的

1. 通过对三相鼠笼式异步电动机点动控制和自锁控制线路的实际安装接线，掌握由电气原理图变换成安装接线图的知识。

2. 通过实验进一步加深理解点动控制和自锁控制的特点

二、原理说明

1. 继电—接触控制在各类生产机械中获得广泛地应用，凡是需要进行前后、上下、左右、进退等运动的生产机械，均采用传统的典型的正、反转继电—接触控制。

交流电动机继电—接触控制电路的主要设备是交流接触器，其主要构造为：

(1) 电磁系统—铁心、吸引线圈和短路环。

(2) 触头系统—主触头和辅助触头，还可按吸引线圈得电前后触头的动作状态，分动合（常开）、动断（常闭）两类。

(3) 消弧系统—在切断大电流的触头上装有灭弧罩，以迅速切断电弧。

(4) 接线端子，反作用弹簧等。

2. 在控制回路中常采用接触器的辅助触头来实现自锁和互锁控制。要求接触器线圈得电后能自动保持动作后的状态，这就是自锁，通常用接触器自身的动合触头与起动按钮相并联来实现，以达到电动机的长期运行，这一动合触头称为“自锁触头”。使两个电器不能同时得电动作的控制，称为互锁控制，如为了避免正、反转两个接触器同时得电而造成三相电源短路事故，必须增设互锁控制环节。为操作的方便，也为防止因接触器主触头长期大电流的烧蚀而偶发触头粘连后造成的三相电源短路事故，通常在具有正、反转控制的线路中采用既有接触器的动断辅助触头的电气互锁，又有复合按钮机械互锁的双重互锁的控制环节。

3. 控制按钮通常用以短时通、断小电流的控制回路，以实现近、远距离控制电动机等执行部件的起、停或正、反转控制。按钮是专供人工操作使用。对于复合按钮，其触点的动作规律是：当按下时，其动断触头先断，动合触头后合；当松手时，则动合触头先断，动断触头后合。

4. 在电动机运行过程中，应对可能出现的故障进行保护。

采用熔断器作短路保护，当电动机或电器发生短路时，及时熔断熔体，达到保护线路、保护电源的目的。熔体熔断时间与流过的电流关系称为熔断器的保护特性，这是选择熔体的主要依据。

采用热继电器实现过载保护，使电动机免受长期过载之危害。其主要的技术指标是整定电流值，即电流超过此值的20%时，其动断触头应能在一定时间内断开，切断控制回路，动作后只能由人工进行复位。

5. 在电气控制线路中，最常见的故障发生在接触器上。接触器线圈的电压等级通常

有220V和380V等，使用时必须认请，切勿疏忽，否则，电压过高易烧坏线圈，电压过低，吸力不够，不易吸合或吸合频繁，这不但会产生很大的噪声，也因磁路气隙增大，致使电流过大，也易烧坏线圈。此外，在接触器铁心的部分端面嵌装有短路铜环，其作用是为了使铁心吸合牢靠，消除颤动与噪声，若发现短路环脱落或断裂现象，接触器将会产生很大的振动与噪声。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流电源	220V		
2	三相鼠笼式异步电动机	DJ24	1	
3	交流接触器		1	HE-51
4	按 钮		2	HE-51
5	热继电器	D9305d	1	HE-51
6	交流电压表	0~500V		
7	万用电表		1	自备

四、实验内容

认识各电器的结构、图形符号、接线方法；抄录电动机及各电器铭牌数据；并用万用电表 Ω 档检查各电器线圈、触头是否完好。

鼠笼机接成 Δ 接法；实验线路电源端接三相自耦调压器输出端U、V、W，供电线电压为220V。

1、点动控制

按图36-1点动控制线路进行安装接线，接线时，先接主电路，即从220v三相交流电源的输出端U、V、W开始，经接触器KM的主触头，热继电器FR的热元件到电动机M的三个线端A、B、C，用导线按顺序串联起来。主电路连接完整无误后，再连接控制电路，即从220V三相交流电源某输出端(如V)开始，经过常开按钮SB1、接触器KM的线圈、热继电器FR的常闭触头到三相交流电源另一输出端(如W)。显然这是对接触器KM线圈供电的电路。

接好线路，经指导教师检查后，方可进行通电操作。

(1) 开启控制屏电源总开关，按启动按钮，调节调压器输出，使输出线电压为220V。

(2) 按起动按钮SB1，对电动机M进行点动操作，比较按下SB1与松开SB1电动机和接触器的运行情况。

(3) 实验完毕，按控制屏停止按钮，切断实验线路三相交流电源。

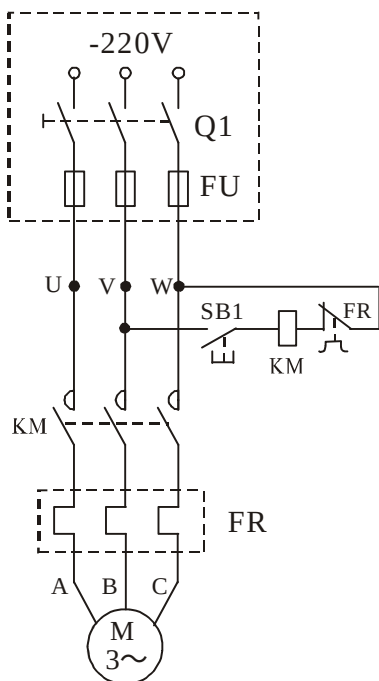


图 36-1

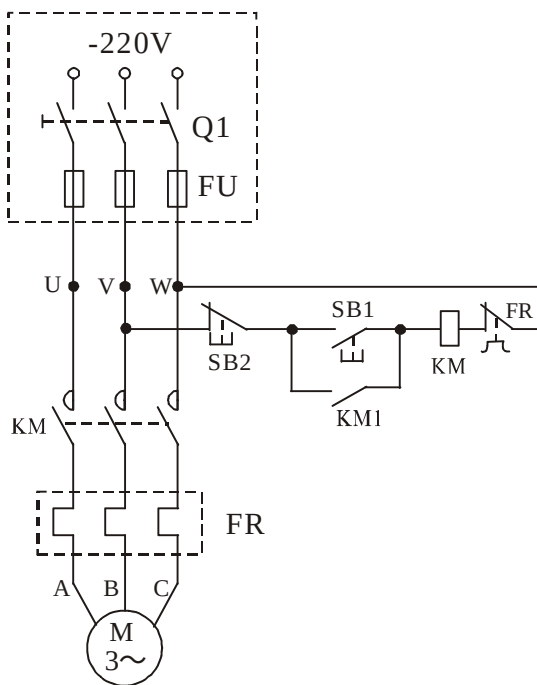


图36-2

2、自锁控制电路

按图36-2所示自锁线路进行接线，它与图36-1的不同点在于控制电路中多串联一只常闭按钮SB2，同时在SB1上并联1只接触器KM的常开触头，它起自锁作用。

接好线路经指导教师检查后，方可进行通电操作。

- (1) 按控制屏启动按钮，接通220V三相交流电源。
- (2) 按起动按钮SB1，松手后观察电动机M是否继续运转。
- (3) 按停止按钮SB2，松手后观察电动机M是否停止运转。

(4) 按控制屏停止按钮，切断实验线路三相电源，拆除控制回路中自锁触头KM，再接通三相电源，启动电动机，观察电动机及接触器的运转情况。从而验证自锁触头的作用。

实验完毕，将自耦调压器调回零位，按控制屏停止按钮，切断实验线路的三相交流电源。

五、实验注意事项

1. 接线时合理安排挂箱位置，接线要求牢靠、整齐、清楚、安全可靠。
2. 操作时要胆大、心细、谨慎，不许用手触及各电器元件的导电部分及电动机的转动部分，以免触电及意外损伤。
3. 通电观察继电器动作情况时，要注意安全，防止碰触带电部位。

六、预习思考题

1、试比较点动控制线路与自锁控制线路从结构上看主要区别是什么？从功能上看主要区别是什么？

- 2、自锁控制线路在长期工作后可能出现失去自锁作用。试分析产生的原因是什么？
- 3、交流接触器线圈的额定电压为220V，若误接到380V 电源上会产生什么后果？反之，若接触器线圈电压为380V，而电源线电压为220V，其结果又如何？
- 4、在主回路中，熔断器和热继电器热元件可否少用一只或两只？熔断器和热继电器两者可否只采用其中一种就可起到短路和过载保护作用？为什么？

实验三十七 三相鼠笼式异步电动机正反转控制

一、实验目的

- 1、通过对三相鼠笼式异步电动机正反转控制线路的安装接线，掌握由电气原理图接成实际操作电路的方法。
- 2、加深对电气控制系统各种保护、自锁、互锁等环节的理解。
- 3、学会分析、排除继电器-接触控制线路故障的方法。

二、原理说明

在鼠笼机正反转控制线路中，通过相序的更换来改变电动机的旋转方向。本实验给出两种不同的正、反转控制线路如图37-1及37-2，具有如下特点：

1、电气互锁

为了避免接触器KM1（正转）、KM2（反转）同时得电吸合造成三相电源短路，在KM1（KM2）线圈支路中串接有KM1（KM2）动断触头，它们保证了线路工作时KM1、KM2不会同时得电（如图37-1），以达到电气互锁目的。

2、电气和机械双重互锁

除电气互锁外，可再采用复合按钮SB1与SB2组成的机械互锁环节（如图37-2），以求线路工作更加可靠。

3、线路具有短路、过载、失、欠压保护等功能。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流电源	220V		
2	三相鼠笼式异步电动机	DJ24	1	
3	交流接触器		2	HE-52
4	按 钮		3	HE-51
5	热继电器		1	HE-51
6	交流电压表	0~500V	1	
7	万用电表		1	自备

四、实验内容

认识各电器的结构、图形符号、接线方法；抄录电动机及各电器铭牌数据；并用万用电表Ω档检查各电器线圈、触头是否完好。

鼠笼机接成Δ接法；实验线路电源端接三相自耦调压器输出端U、V、W，供电线电压为220V。

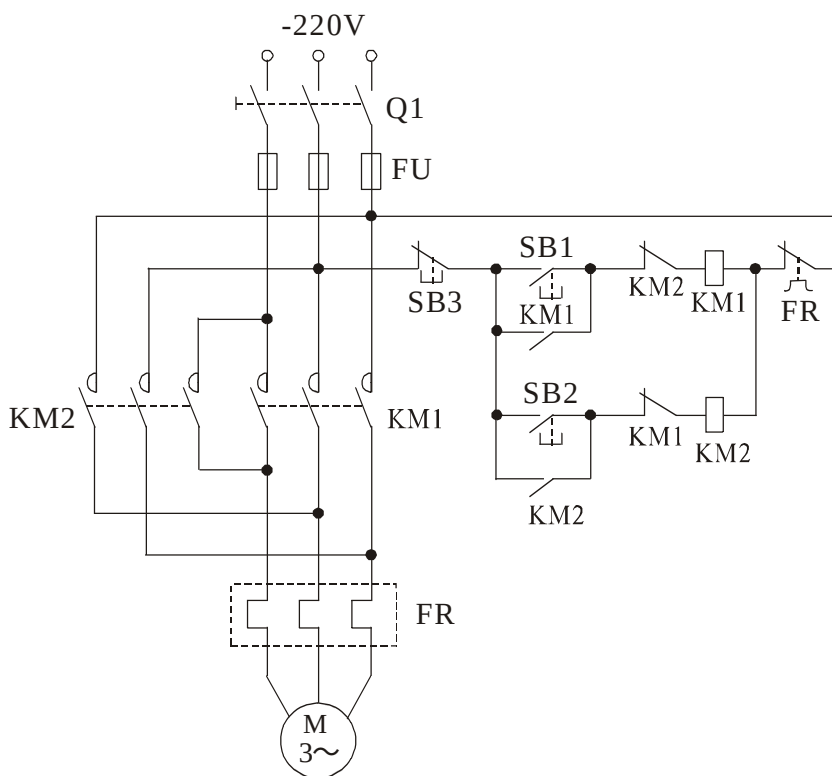


图 37-1

1、接触器联锁的正反转控制线路

按图 37-1 接线，经指导教师检查后，方可进行通电操作。

- (1) 开启控制屏电源总开关，按启动按钮，调节调压器输出，使输出线电压为 220V。
- (2) 按正向启动按钮 SB1，观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。
- (3) 按反向启动按钮 SB2，观察并记录电动机和接触器的运行情况。
- (4) 按停止按钮 SB3，观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。
- (5) 再按 SB2，观察并记录电动机的转向和接触器的运行情况。
- (6) 实验完毕，按控制屏停止按钮，切断三相交流电源。

2、接触器和按钮双重联锁的正反转控制线路

按图 37-2 接线，经指导教师检查后，方可进行通电操作。

- (1) 按控制屏启动按钮，接通 220V 三相交流电源。

- (2) 按正向启动按钮 SB1，电动机正向启动，观察电动机的转向及接触器的动作情况。

按停止按钮 SB3，使电动机停转。

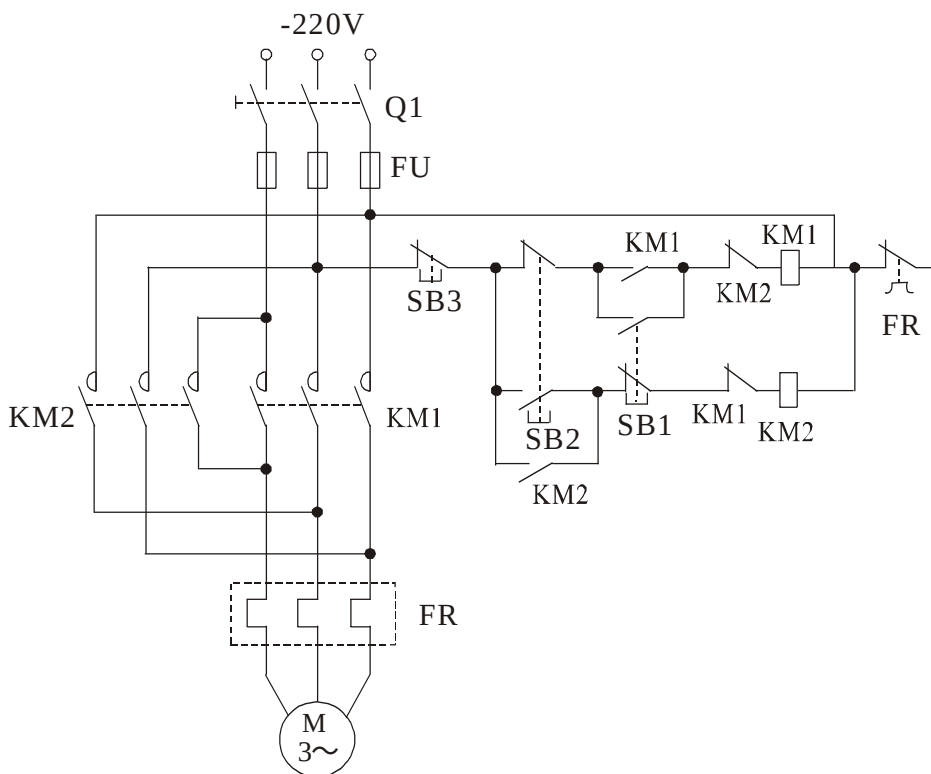


图 37-2

(3) 按反向起动按钮 SB2，电动机反向起动，观察电动机的转向及接触器的动作情况。按停止按钮 SB3，使电动机停转。

(4) 按正向(或反向)起动按钮，电动机起动后，再去按反向(或正向)起动按钮，观察有何情况发生？

(5) 电动机停稳后，同时按正、反向两只起动按钮，观察有何情况发生？

(6) 失压与欠压保护

a、按起动按钮 SB1(或 SB2)电动机起动后，按控制屏停止按钮，断开实验线路三相电源，模拟电动机失压(或零压)状态，观察电动机与接触器的动作情况，随后，再按控制屏上启动按钮，接通三相电源，但不按 SB1(或 SB2)，观察电动机能否自行起动？

b、重新起动电动机后，逐渐减小三相自耦调压器的输出电压，直至接触器释放，观察电动机是否自行停转。

(7) 过载保护

打开热继电器的后盖，当电动机起动后，人为地拨动双金属片模拟电动机过载情况，观察电机、电器动作情况。

注意：此项内容，较难操作且危险，有条件可由指导教师作示范操作。

实验完毕，将自耦调压器调回零位，按控制屏停止按钮，切断实验线路电源。

四、故障分析

1、接通电源后，按起动按钮(SB1 或 SB2)，接触器吸合，但电动机不转，且发出“嗡嗡

嗡”声响或电动机能起动，但转速很慢。这种故障来自主回路，大多是一相断线或电源缺相。

2、接通电源后，按起动按钮(SB1 或 SB2)，若接触器通断频繁，且发出连续的劈啪声或吸合不牢，发出颤动声，此类故障原因可能是：

- (1) 线路接错，将接触器线圈与自身的动断触头串在一条回路上了。
- (2) 自锁触头接触不良，时通时断。
- (3) 接触器铁心上的短路环脱落或断裂。
- (4) 电源电压过低或与接触器线圈电压等级不匹配。

五、预习思考题

1、在电动机正、反转控制线路中，为什么必须保证两个接触器不能同时工作？采用哪些措施可解决此问题，这些方法有何利弊，最佳方案是什么？

2、在控制线路中,短路、过载、失、欠压保护等功能是如何实现的？在实际运行过程中,这几种保护有何意义？

实验三十八 三相鼠笼式异步电动机 Y- Δ 降压起动控制

一、实验目的

1. 进一步提高按图接线的能力。
2. 了解时间继电器的结构、使用方法、延时时间的调整及在控制系统中的应用。
3. 熟悉异步电动机 Y- Δ 降压起动控制的运行情况和操作方法。

二、原理说明

1. 按时间原则控制电路的特点是各个动作之间有一定的时间间隔，使用的元件主要是时间继电器。时间继电器是一种延时动作的继电器，它从接受信号（如线圈带电）到执行动作（如触点动作）具有一定的时间间隔。此时间间隔可按需要预先整定，以协调和控制生产机械的各种动作。时间继电器的种类通常有电磁式、电动式、空气式和电子式等。其基本功能可分为两类，即通电延时式和断电延时式，有的还带有瞬时动作式的触头。

时间继电器的延时时间通常可在 0.4s~80s 范围内调节。

2. 按时间原则控制鼠笼式电动机 Y- Δ 降压自动换接起动的控制线路如图 38-1 所示。

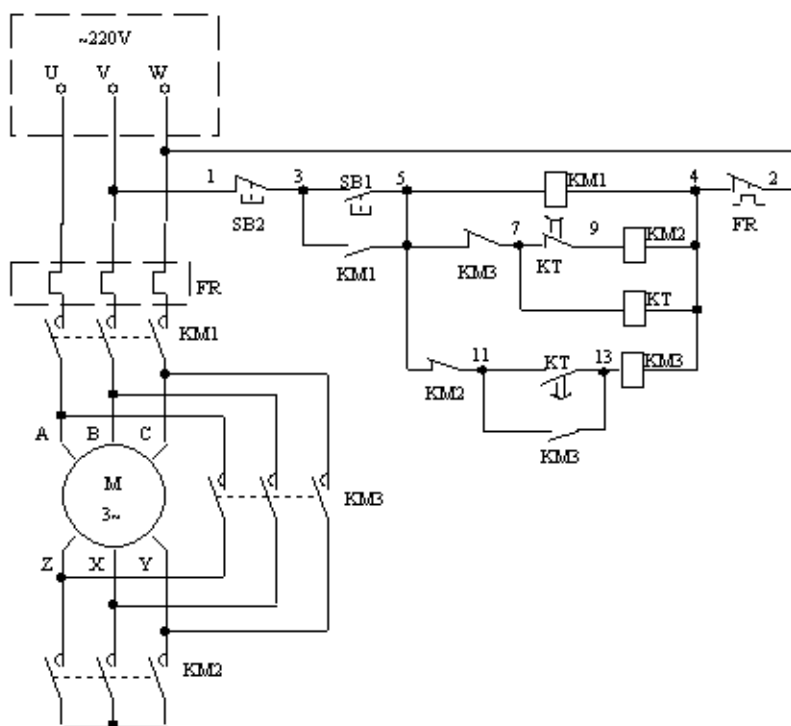


图 38-1

从主回路看，当接触器 KM1、KM2 主触头闭合，KM3 主触头断开时，电动机三相定子绕组作 Y 连接；而当接触器 KM1 和 KM3 主触头闭合，KM2 主触头断开时，电动机三相定子绕组作 Δ 连接。因此，所设计的控制线路若能先使 KM1 和 KM2 得电闭合，后经一定时间的延

时,使 KM2 失电断开,而后使 KM3 得电闭合,则电动机就能实现降压起动后自动转换到正常工作运转。图 38-1 的控制线路能满足上述要求。该线路具有以下特点:

(1) 接触器 KM3 与 KM2 通过动断触头 KM3(5-7)与 KM2(5-11)实现电气互锁,保证 KM3 与 KM2 不会同时得电,以防止三相电源的短路事故发生。

(2) 依靠时间继电器 KT 延时动合触头(11-13)的延时闭合作用,保证在按下 SB1 后,使 KM2 先得电,并依靠 KT(7-9)先断,KT(11-13)后合的动作次序,保证 KM2 先断,而后再自动接通 KM3,也避免了换接时电源可能发生的短路事故。

(3) 本线路正常运行(Δ 接)时,接触器 KM2 及时间继电器 KT 均处断电状态。

(4) 由于实验装置提供的三相鼠笼式电动机每相绕组额定电压为 220V,而 Y/ Δ 换接起动的使用条件是正常运行时电机必须作 Δ 接,故实验时,应将自耦调压器输出端(U、V、W)电压调至 220V。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流电源	220V	1	
2	三相鼠笼式异步电动机	DJ24	1	
3	交流接触器		1	HE-51
4	交流接触器		2	HE-52
5	时间继电器		1	HE-52
6	按 钮		2	HE-51
7	热继电器		1	HE-51
8	万用电表		1	自备

四、实验内容

1. 时间继电器控制 Y- Δ 自动降压起动线路

实验前应了解空气阻尼式时间继电器的结构,并结合 HE-52 实验箱,认清其电磁线圈和延时动合、动断触头的接线端子。用手推动时间继电器衔铁模拟继电器通电吸合动作,用万用电表 Ω 档测量触头的通与断,以此来大致判定触头延时动作的时间。通过调节进气孔螺钉,即可整定所需的延时时间。

实验线路电源端接自耦调压器输出端(U、V、W),供电线电压为 220V。

(1) 按图 38-1 线路进行接线,先接主回路后接控制回路。要求按图示的节点编号从左到右、从上到下,逐行连接。

(2) 在不通电的情况下,用万用电表 Ω 档检查线路连接是否正确,特别注意 KM2 与 KM3 两个互锁触头 KM3(5-7)与 KM2(5-11)是否正确接入。经指导教师检查后,方可通电。

(3) 开启控制屏电源总开关,按控制屏启动按钮,接通 220V 三相交流电源。

(4) 按起动按钮 SB2, 观察电动机的整个起动过程及各继电器的动作情况, 记录 Y- Δ 换接所需时间。

(5) 按停止按钮 SB3, 观察电机及各继电器的动作情况。

(6) 调整时间继电器的整定时间, 观察接触器 KM2、KM3 的动作时间是否相应地改变。

(7) 实验完毕, 按控制屏停止按钮, 切断实验线路电源。

2. 接触器控制 Y- Δ 降压起动线路

按图 38-2 线路接线, 经指导教师检查后, 方可进行通电操作。

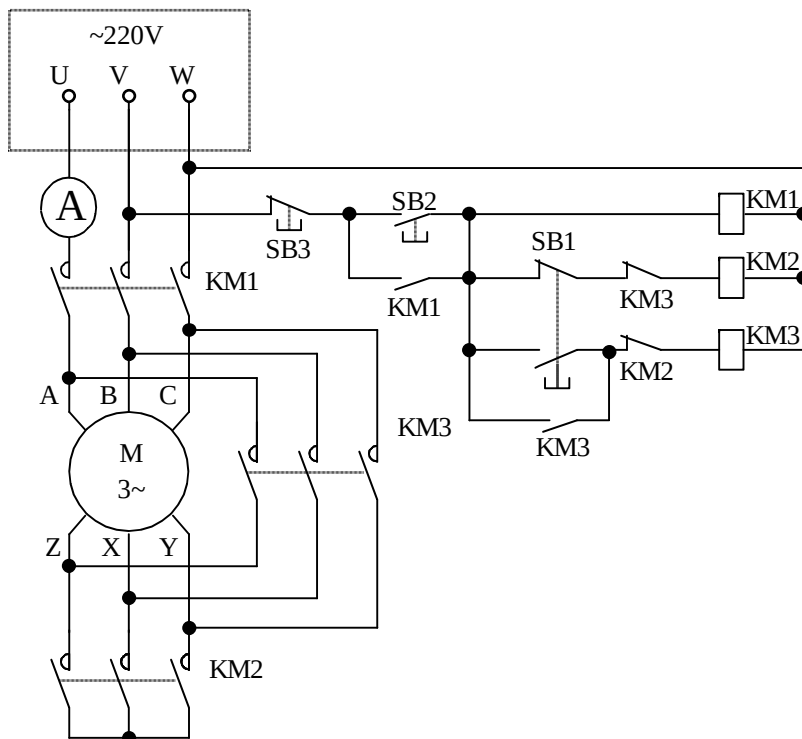


图 38-2

(1) 按控制屏启动按钮, 接通 220V 三相交流电源。

(2) 按下按钮 SB2, 电动机作 Y 接法起动, 注意观察起动时, 电流表最大读数 I_Y 起动 = ____ A。

(3) 稍后, 待电动机转速接近正常转速时, 按下按钮 SB1, 使电动机为 Δ 接法正常运行。

(4) 按停止按钮 SB3, 电动机断电停止运行。

(5) 先按按钮 SB2, 再按按钮 SB1, 观察电动机在 Δ 接法直接起动时的电流表最大读数 I_{Δ} 起动 = ____ A。

(6) 实验完毕, 将三相自耦调压器调回零位, 按控制屏停止按钮, 切断实验线路电源。

五、实验注意事项

1. 注意安全, 严禁带电操作。

2. 只有在断电的情况下,方可用万用电表 Ω 档来检查线路的接线正确与否。

六、预习思考题

- 1、采用Y- Δ 降压起动对鼠笼电动机有何要求。
- 2、如果要用一只断电延时式时间继电器来设计异步电动机的Y- Δ 降压起动控制线路,试问三个接触器的动作次序应作如何改动,控制回路又应如何设计?
- 3、控制回路中的一对互锁触头有何作用?若取消这对触头对Y- Δ 降压换接起动有何影响,可能会出现什么后果?
- 4、试画出用三刀两掷开关实现降压起动的手动控制线路。

实验三十九 三相鼠笼式异步电动机的能耗制动控制

一、实验目的

1. 通过实验进一步理解三相鼠笼式异步电动机能耗制动原理。
2. 增强实际连接控制电路的能力和操作能力。

二、原理说明

1. 三相鼠笼电动机实现能耗制动的的方法是：在三相定子绕组断开三相交流电源后，在两相定子绕组中通入直流电，以建立一个恒定的磁场，转子的惯性转动切割这个恒定磁场而感应电流，此电流与恒定磁场作用，产生制动转矩使电动机迅速停车。

2. 在自动控制系统中，通常采用时间继电器，按时间原则进行制动过程的控制。可根据所需的制动停车时间来调整时间继电器的时延，以使电动机刚一制动停车，就使接触器释放，切断直流电源。

3. 能耗制动过程的强弱与进程，与通入直流电流大小和电动机转速有关，在同样的转速下，电流越大，制动作用就越强烈，一般直流电流取为空载电流的3~5倍为宜。

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流电源	220V	1	
2	三相鼠笼式异步电动机	DJ24	1	
3	交流接触器		2	HE-52
4	时间继电器		1	HE-52
5	整流变压器	220V/26V, 6.3V	1	HE-52
6	整流桥堆		1	HE-52
7	制动电阻	10 Ω /25W	1	HE-52
8	按 钮		2	HE-51
9	万用电表		1	自备

四、实验内容

1. 鼠笼式电动机接成 Δ 接法，实验线路电源端接三相自耦调压器输出(U、V、W)，供电线电压为220V。

初步整定时间继电器的时延，可先设置得大一些(约5~10秒)。

本实验中，能耗制动电阻 R_t 为10 Ω /25W。

2. 开启控制屏电源总开关，按启动按钮，调节调压器输出，使输出线电压为220V，按停止按钮，切断三相交流电源。

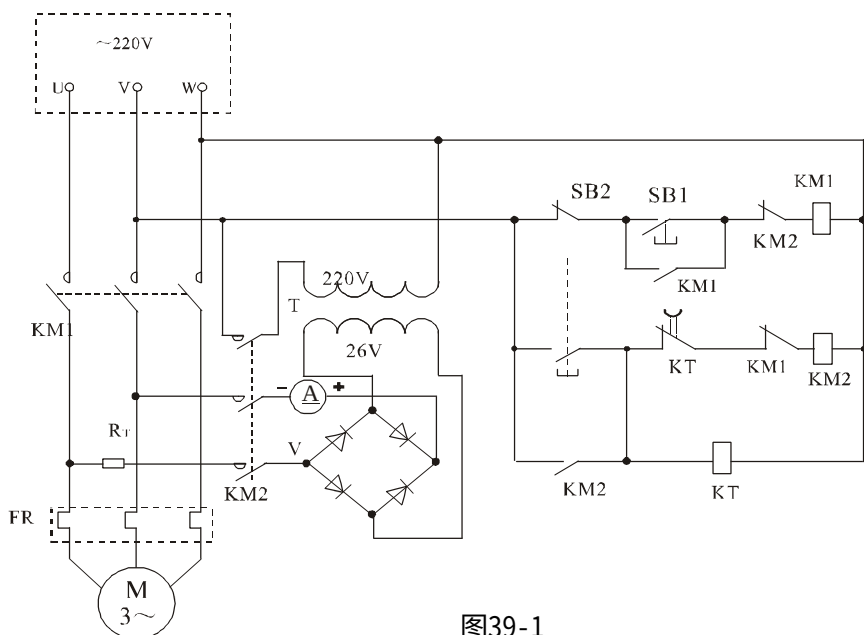


图39-1

3. 按图39-1接线，并用万用电表检查线路连接是否正确。

4. 自由停车操作

先断开整流电源（如拔去接在V相上的整流电源线），按SB1，使电动机起动运转，待电动机运转稳定后，按SB2，用秒表记录电动机自由停车时间。

5. 制动停车操作

接上整流电源（即插回接通V相的整流电源线）

a. 按SB1，使电动机起动运转，待运转稳定后，按SB2，观察并记录电动机从按下SB2起至电动机停止运转的能耗制动时间 t_z 及时间继电器延时释放时间 t_F ，一般应使 $t_F > t_z$ 。

b. 重新整定时间继电器的时延，以使 $t_F = t_z$ ，即电动机一旦停转便自动切断直流电源。

五、实验注意事项

1. 每次调整时间继电器的时延，要摇开挂箱的面板，因此在调整时都必须在断开三相电源后进行，不可带电操作。

2. 接好线路必须经过严格检查，绝不允许同时接通交流和直流两组电源，即不允许KM1、KM2同时得电。

六、预习思考题

1. 为什么交流电源和直流电源不允许同时接入电机定子绕组？
2. 电机制动停车需在两相定子绕组通入直流电，若通入单相交流电，能否起到制动作用，为什么？

七、实验报告

1. 归纳总结实验现象和结果
2. 回答思考题中的有关问题

实验四十 C620 车床电气控制

一、实验目的

- 1、通过对 C620 车床电气控制线路的实际安装接线,掌握由电气原理图变换成安装接线图的能力

- ## 2、通过实验进一步理解车床电气控制的原理

二、原理说明

图 40 为 C620 车床电气控制原理图。

C620 普通车床由主电动机 M1 和冷却泵电动机 M2 及相关电气控制系统组成，两台电动机只要求单方向运转。主电动机 M1 投入工作后，当需要用冷却油泵时，合手动开关 Q1，冷却泵电动机 M2 投入工作，由于 M2 功率小，采用手动开关 Q1 进行直接起动，可省去接触器和按钮，比较经济，操作也方便。当不需要冷却泵时，可单独关掉 M2；如 M2 过载，使热继电器动作，则两电动机 M1、M2 同时断电，停止运行。

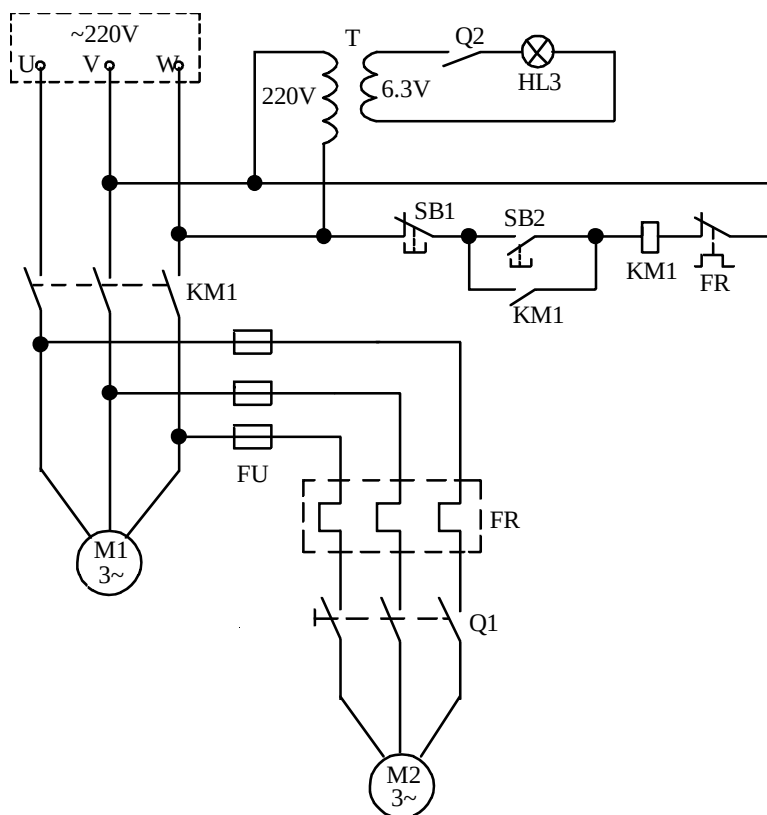


图 40

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	三相交流电源	220V	1	
2	三相鼠笼式异步电动机	DJ24	2	
3	交流接触器		1	HE-51
4	按 钮		2	HE-51
5	照明变压器	220/6.3V	1	HE-52
6	照明灯	6.3V	1	HE-51
7	热继电器		1	HE-51
8	灯组负载		1	HE-17
9	白炽灯	220V,100W	5	自备
10	开关 (代 Q2)		1	HE-19

四、实验内容

鼠笼电机M1接成 Δ 接法，实验线路电源端接三相自耦调压器输出(U、V、W)，供电线电压为220V。按图40接线。由于每台实验装置只配备一只电机，故须用灯组负载来模拟M2。经指导教师检查后，方可进行通电操作。

1. 开启控制屏电源总开关，按启动按钮，调节调压器输出，使输出线电压为220V。
2. 按下SB2，接触器KM1线圈得电，主电路中的常开主触头KM1接通，主电动机M1启动运转。
3. 接通灯组负载开关，灯亮，表示冷却泵电动机M2工作。
4. 若车床需提供照明灯，可合上开关Q2，模拟照明灯L点亮。
5. 按下SB1，KM1线圈断电，主电路中的主触头KM1断开，主电动机M1断电停止运转，同时灯组负载的亮灯熄灭，表示冷却泵电动机M2也停止运转。
6. 增加灯组负载的亮灯数，模拟冷却泵电动机M2过载，则热继电器FR动作，使控制电路的常闭触点FR断开，KM1线圈断电，使主触头断开、主电动机M1和冷却泵电动机M2同时停止运转。

五、讨论题

- 1、为什么冷却泵电机接在主触头KM1的下面？
- 2、为什么照明灯要接在主触头KM1的上面？

附注：可将两台实验装置的配件合并，即可完整地做此实验。

实验四十一 三相异步电动机顺序启动控制

一、实验目的

- 1、通过各种不同顺序控制的接线，加深对一些特殊要求机床控制线路的了解。
- 2、进一步加深学生的动手能力和理解能力，使理论知识和实际经验进行有效的结合。

二、实验设备

序 号	名 称	型 号	数 量	备 注
1	三相鼠笼异步电动机(Δ /220V)	DJ24	2	
2	继电器控制挂箱 (一)	HE-51	2	
3	继电器控制挂箱 (二)	HE-52	2	
4	灯组负载	220V, 100W	1	HE-17
5	白炽灯		3	自备

三、实验方法

1、三相异步电动机启动顺序控制 (一)：

按图 41-1 接线。因每台实验装置只配一只电机和热继电器，故须用灯组负载来模拟 M2，FR2 不接。图中 U、V、W 为实验台上三相调压器的输出插孔。

(1) 将调压器手柄逆时针旋转到底，启动实验台电源，调节调压器使输出线电压为 220V。

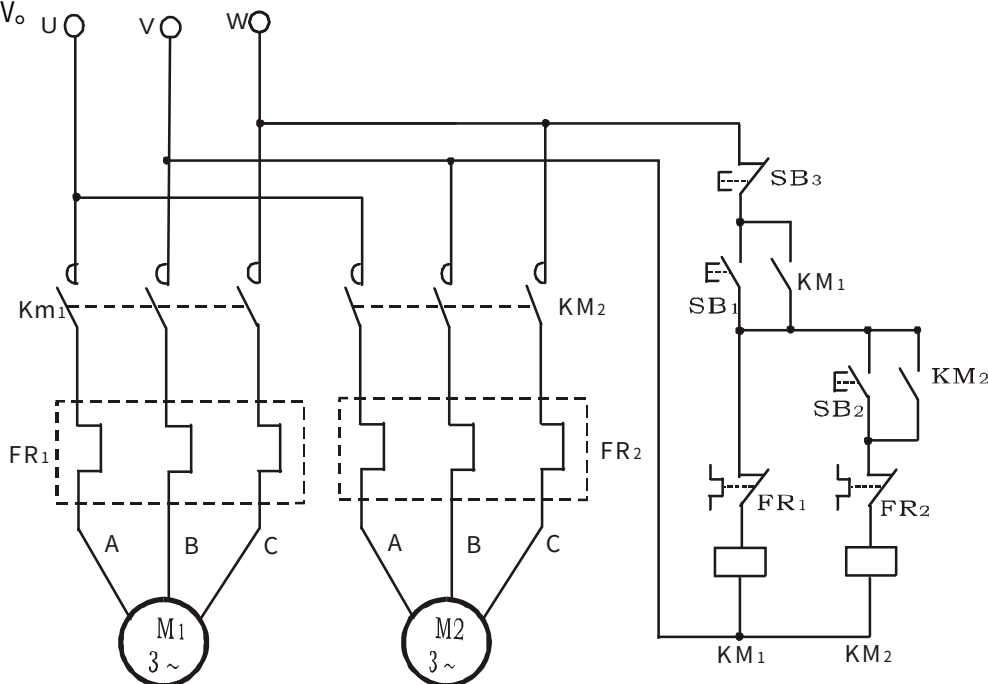


图 41-1 启动顺序控制 (一)

(2) 按下 SB₁，观察电机运行情况及接触器吸合情况。

- (3) 保持 M_1 运转时按下 SB_2 ，观察电机运转及接触器吸合情况。
- (4) 在 M_1 和 M_2 都运转时，能不能单独停止 M_2 ？
- (5) 按下 SB_3 使电机停转后，按 SB_2 ，电机 M_2 是否起动？为什么？

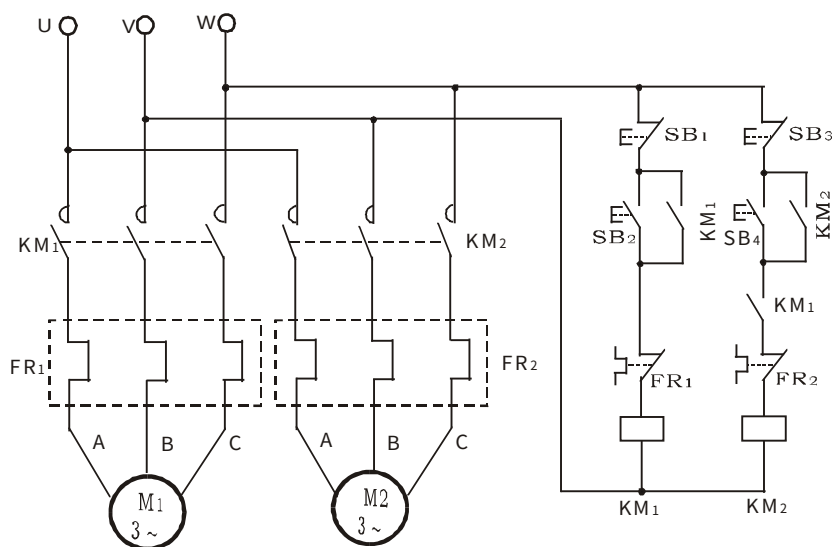


图 41-2 起动顺序控制（二）

2、三相异步电动机起动顺序控制（二）：

本实验须将两台实验装置的配件合并才能实施。

按图 41-2 接线。图中 U、V、W 为实验台上三相调压器的输出插孔。

- (1) 将调压器手柄逆时针旋转到底，启动实验台电源，调节调压器使输出线电压为 220V。
- (2) 按下 SB_2 ，观察并记录电机及各接触器运行状态。
- (3) 再按下 SB_4 ，观察并记录电机及各接触器运行状态。
- (4) 单独按下 SB_3 ，观察并记录电机及各接触器运行状态。
- (5) 在 M_1 与 M_2 都运行时，按下 SB_1 ，观察电机及各接触器运行状态。

四、讨论题

- 1、画出图 41-1、41-2 的运行原理流程图。
- 2、比较图 41-1、41-2 二种线路的不同点和各自的特点。
- 3、例举几个顺序控制的机床控制实例，并说明其用途。

(II) 附加实验

实验一 电流表、电压表的设计及量程扩展

一、实验目的

- 1、了解指针式电流表、电压表电路设计的基础知识及设计计算方法。
- 2、掌握电流表、电压表量程扩展的方法。

二、原理说明

一只指针式电流表表头（本实验以 MF47 型指针式万用表表头为例），在不添加其它元件和电路时，能测量的满刻度电流值称为该电流表的基本量程，用 I_g 表示。该表有一定的内阻，用 R_g 表示，这就是一个“基本表”。其等效电路如图 1-1。



图 1-1

由于 $U_g = R_g I_g$ ，而 R_g 不变，因此基本表可用来测量电流，也可用来测量电压。

为了便于读数，指针式电流表或电压表的标尺刻度的满度值都取 5 或 10 的整数倍。同样，基本表的 I_g 也常取 1、2 或 5 的整数倍，常用的有 1、2、5、10、20、50、100 (μA 或 mA) 等。由于加工差异，同一规格的各表， I_g 不可能完全一致。再考虑到方便设计，通常 I_g 都略小于满度刻值。如 MF47 表头 I_g 一般在 $45 \sim 48 \mu A$ ，而满刻值为 $50 \mu A$ 。同理，作电压表使用时， $I_g R_g$ 值也稍少于满刻度值。 I_g 或 $I_g R_g$ 与满度值之间的差异可在量程扩展时予以修正。

设计电流表或电压表时，应根据所需要的测量精度来选择合适的表头。当配套器件相同时， I_g 越小（价格就越贵），所做成的测量仪表的测量精度就越高。

基本表所能测量的电流和电压值都很小。要测量较大的电流或电压，就必须扩展基本表的量程。扩展后的量程首先要满足测量需要，其次要易于按原有刻度读得测量值。

例如，满度值为 $50 \mu A$ 的表头，就可扩展为 0.5、5 或 50 (mA) 等的电流量程或 1、10、25、50 (V) 等的电压量程。

电流表量程的扩展见图 1-2，要测量大于 I_g 的电流 I ，必须用分流电阻 R_A 与基本表并联。 R_A 的值按下式计算：

$$R_A = I_g R_g / (I - I_g) \quad (1)$$

电压表的量程扩展见图 1-3。要测量大于 $I_g R_g$ 的电压 U ，必须串联电阻 R_V 进行分压。 R_V 的值按下式计算：

$$R_V = (U / I_g) - R_g \quad (2)$$

应注意，为了保证量程扩展后仪表的测量精度，

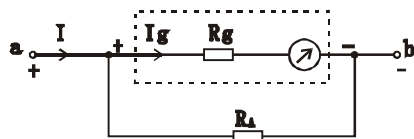


图 1-2

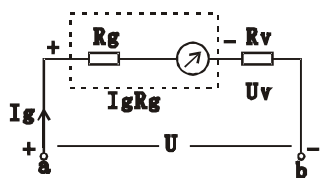


图 1-3

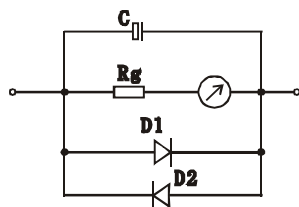


图 1-4

对分流或分压电阻的精度和稳定性都有严格的要求。此外，为了保护表头，常在基本表的两端并接电容 C 和二极管 $D1$ 、 $D2$ ，见图 1-4。

电容 C 既可减缓被测信号对表头的冲击，且在测量交流信号时起滤波作用。 $D1$ 、 $D2$ 则可使基本表两端的压降 $\leq 0.7V$ ，避免过压烧坏表头。

基本表还可用来设计制作交流电压表。普通万用表中测量交流电压采取一种最简单的办法，即：将被测交流电压经分压后再用二极管整流、电容 C 滤波转变成直流电压来测量。通常用导通压降较小的锗二极管作整流。由于二极管的伏安特性曲线在低压段是非线性的，因此，测量较小的交流电压时误差较大。

严格地说，交流电压或交流电流有正弦波、三角波、方波等不同波形，每种波形还可能有不同的频率。简单线路的交流电压表或电流表只适于测量频率在 $400Hz$ 以下的正弦波。

交流电压表的线路见图 1-5（滤波电容 C 未画出）。由于线路中有半波整流、电容滤波，加之表头偏转线圈的电感、表头内部的磁场等，因此其分压电阻 R_{vc} 的计算较复杂，此处从略。一般 R_{vc} 可通过实验确定，详见实验内容 4。

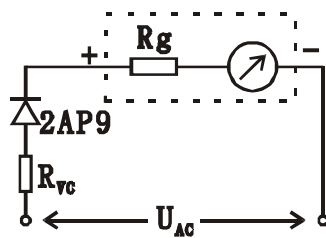


图 1-5

用基本表设计制作交流电流表的最简单方法是 $I-U$ 转换法，既让被测交流电流流过取样电阻 R ，再用交流电压挡来测量 R 两端的电压。此法的缺点是：被测交流电流较小时，需要较大阻值的取样电阻，既影响被测线路，测量误差也较大；而当被测电流较大时，则需要大功率的取样电阻。故一般普及型指针式万用表中都不设交流电流档。

三、实验设备

序号	名称	型号规格	数量	备注
1	直流电压表	0~300V	1	屏上
2	直流电流表	0~2000mA	1	屏上
3	直流稳压电源	0~30V	2	屏上
4	直流恒流源	0~500mA	1	屏上
5	基本表	MF47	1	HE-11A
6	电阻箱	0~99999.9 Ω	1	HE-19
7	台式万用表	CDM8045 等	1	自备
8	函数信号发生器		1	屏上

四、实验内容

实验前先将 HE-11A 实验箱放平，用螺丝刀将 MF47 表头进行机械调零。

1、测量 MF47 表头的满量程电流 I_g 和内阻 R_g

(1) 先将屏上恒流源的输出粗调开关拨至 $2mA$ 档，并使恒流源输出电流为 0，然后按图 1-6 接线。W 先不接入， μA 表用台式万用表的 $200\mu A$ 档。缓慢调节恒流源的输出，

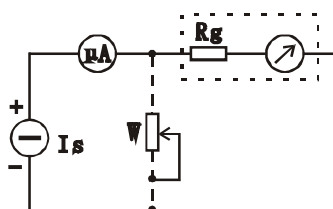


图 1-6

直至指针表头指示满度，则 μA 表的读数即为指针表头的 I_{go}

(2) 将 HE-11A 上的 10k 电位器 (W) 阻值调至最大后接入图 1-6 虚线处。缓慢调小 W 的阻值，直至指针表头指示半满度值。断开 W 连接线，用台式万用表测量 W 的阻值即为指针表的内阻 R_g 。

2、设计直流毫安表

(1) 按 (1) 式计算出 1mA 量程时基本表的分流电阻 R_{V10} 。

(2) 按图 1-2 接线，用 R_{A1} (取自 HE-19 电阻箱) 代替 R_{A0} 。

(3) 令恒流源输出电流 I 为表 1 所列值接入图 1-2 中 a、b 两端，依次读出基本表的相应指示值，记入表 1。

(4) 将量程扩展为 10mA，重复 (1) ~ (3) 步。

表 1 (单位：mA)

I	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
基本表读数					
I	2	4	6	8	10
基本表读数					

3、设计直流电压表

(1) 按 (2) 式计算 10V 量程的电压表的分压电阻 R_{V10} 。

(2) 按图 1-3 接线，用 R_{V1} (取自 HE-19 电阻箱) 代替 R_{V0} 。

(3) 令稳压电源输出电压 U 为表 2 所列值接入图 1-3 中的 a、b 两端，依次读出基本表的相应指示值，记入表 2。

(4) 将量程扩展为 50V，重复 (1) ~ (3) 步。 R_V 用 HE-11A 中的 $1\text{M}\Omega$ 加 HE-19 的电阻箱取得。将两个 0~30V 稳压电源串联使用，可输出 0~60V。

表 2 (单位：V)

U	2	4	6	8	10
基本表读数					
U	10	20	30	40	50
基本表读数					

4、设计交流电压表

(1) 取交流电压表的量程为 10V，按 (2) 式计算 R_{V0} 。

(2) 按图 1-5 接线， R_{Vc} 暂取 $R_V/2$ (用 HE-19 电阻箱)。

(3) 从函数信号发生器的功率输出接口输出 10V (用台式万用表测量) 的正弦波，接入图 1-5 的中 U_{AC} 两端。

(4) 调节 R_{Vc} 阻值，使基本表指示满度值。

(5) 令函数信号发生器的输出电压依次为表 3 所列值，相应记录基本表读数，并根据两者的偏差调整 R_{Vc} 值，直至在整个测量值内测得值的偏差为最小 (可能要测调 2~3 次)

(推荐值： R_{VC} 为 $95k\Omega$ 左右。)

(6) 如果具备相应的稳定交流电压源，则还可进行 50V、100V 等档位交流电压档的调整、测试实验。

表 3

(单位：V)

V_{AC}	0	2	4	6	8	10	$R_{VC} (\Omega)$
基本表读数 1							
基本表读数 2							
基本表读数 3							

5、设计交流电流表

在 10V 量程的交流电压表的 U_{AC} 两端并上 100Ω 的取样电阻，即成为量程为 100mA 的交流电流表。由于没有可调的交流电流源，故只能用函数信号发生器输出电压来测试。用台式万用表交流电压 20V 档测量取样电阻 100Ω 两端的电压，调节函数信号发生器的输出电压，使台式万用表的读数为表 4 所列值，并记录基本表的相应指示值。

表 4

台式表读数 (V)	0	2	4	6	8	10
相应电流 (mA)	0	20	40	60	80	100
基本表读数						

五、实验注意事项

1、电阻箱的阻值在进位或减位时，一般都应先大后小，例如：从 $9.9k$ 升到 $10k$ ，则应 $9.9k-19.9k-10k$ 。而从 $10k$ 降至 $9.9k$ ，则应 $10k-19.9k-9.9k$ 。

2、直流信号接入基本表时，应注意极性，以免指针反偏而打坏。

六、预习思考题

1、在设计电压表或电流表时，一般应考虑哪些方面？

2、要用一只基本表设计有三个电流量程和三个电压量程的电压电流表，用一只多档位开关来切换测量量程，请画出其电路原理示意图。

七、实验报告

1、总结电表设计和量程扩展的原理和计算方法。

2、分析实验数据中误差及其产生的原因。

2、完成预习思考题 2。

实验二 指针式欧姆表的设计及测试

一、实验目的

学会指针欧姆表的设计、计算方法，加强对欧姆定律的理解及实际应用能力。

二、原理说明

指针式欧姆表的设计原理是基于欧姆定理。即在被测电阻 R_X 上直接或间接施加某一电压，再用微安表（或毫安表，以下称基本表）直接或间接地测出流过 R_X 的电流，并将电流的指示值对应地标成 R_X 值，则该表就成为欧姆表了。按照基本表与被测

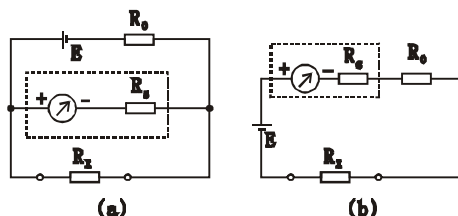


图 2-1

电阻 R_X 的连接方式，欧姆表有并接式和串接式两种，分别如图 2-1 (a)、(b) 所示。图中点线框内为基本表。其量程（即满度值）为 I_g ，内阻为 R_g 。 R_0 为线路的限流电阻。

1、并接式欧姆表

在图 2-1 (a) 中，基本表的指示值 I_X 为：

$$I_X = \frac{E}{\left(\frac{R_g}{R_X} + 1\right)R_0 + R_g}。当 R_X=0 时，I_X=0，$$

表针处于零位；而当 $R_X=\infty$ 时， I_X 的指示应为基本表的满度值 I_g ，故表针满偏。

2、串接式欧姆表

在图 2-1 (b) 中，基本表的指示值 I_X 为：

$$I_X = \frac{E}{R_g + R_0 + R_X}。当 R_X=0 时，I_X 最大，为微$$

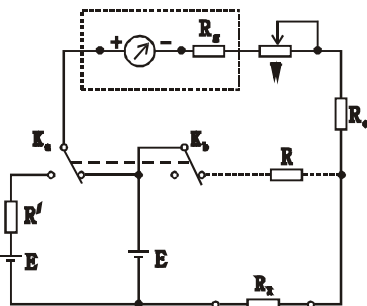


图 2-2

安表的满度值 I_g ，表针应满偏；而当 $R_X=\infty$ 时， $I_X=0$ ，表针处于零位。由此可见，这两种接法的欧姆表，其指针偏转的规律正好相反。普通指针万用表欧姆档大都采用串联接法。本实验也采用串联接法，线路如图 2-2 所示。 R_0 为限流电阻，以保证当 $R_X=0$ 时，流过基本表的电流 $\leq I_g$ 。 k_a 、 k_b 、 R 、 R' 为换档开关和分档电阻，详见下文。 E 、 E' 为电压源，通常采用干电池。新电池输出电压较高，随着使用时间的加长，其输出电压会逐渐降低。这两种情况都会导致 $R_X=0$ 时， $I_X \neq I_g$ 。通常要求在 $(0.85 \sim 1.10)E$ （或 E' ）的电压范围内，可通过调节 W ，使得 $R_X=0$ 时， $I_X=I_g$ ，使表针满偏。故 W 称为调零电位器。当 E 降至最

低允许值时，可将 W 调至零位，故 R_0 的取值应满足： $\frac{0.85E}{R_g + R_0} \geq I_g$ 。当 E 为最高允许

值时，可将 W 调至最大值，故 W 的取值应满足： $\frac{1.1E}{R_g + R_0 + W} \geq I_g$ 。本实验的 E 和 E'

均采用直流稳压电源，电压值不会变动，故实验中不必调零。 W 只用作 R_0 的补足。

在图 2-2 中, 令 $R_g + W + R_0 = R_{内}$, 则基本表的指示值为 $I_X = \frac{E}{R_{内} + R_X} \dots\dots (1)$ 。
由此式可以看出：

1、当 E 值一定时, I_X 与 R_X 的关系为非线性关系。因此, 欧姆值 (即 I_X) 的指示刻度是不均匀的。

2、当 $R_X = 0$ 时, $I_X = E/R_{内} = I_g$ 。如果 $R_X = R_{内}$, 则 $I_X = E/(2R_{内}) = I_g/2$ 。这时, 欧姆表的指针位于标尺的中心阻值处。该阻值称为欧姆表的中心阻值, 记为 $R_{中}$, 它等于欧姆表的

总内阻。因而 (1) 式可改写为: $I_X = \frac{E}{R_{中} + R_X}$ 。常用的指针式万用表中, 欧姆 $\times 1$ 档的中值电阻一般为 $10 \sim 30 \Omega$ 。

3、当 $R_X \ll R_{中}$ 时, 指针接近满偏, 读数需估测。由于 R_X 本身值很小, 相对而言误差较大。当 $R_X \gg R_{中}$ 时, 即使 R_X 有较大变化, I_X 的变化却很小, 因而测量误差也很大。为使 R_X 的测量较准确, 应使 $R_{中}$ 与 R_X 处于同一数量级。当 R_X 不太大时, 可如图 2-2 虚线所示, 用并联 R 来降低 $R_{中}$ 。 R 的取值原则为: 并联 R 后, 新的中心阻值为:

$$R_{中1} = \frac{R R_{内}}{R + R_{内}}。R_{中1} \text{ 确定后, 即可按此式求得 } R \text{ 值。}$$

为了能准确测量不同数量级的 R_X , 欧姆表通常设有多个档位, 如 $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1k$ 、 $\times 10k$ 等档位, 各档的中心阻值即为 $R_{中} \times$ 倍率。

但是, 当 R_X 很大时, 如果所需的 $R_{中} > R_{内}$, 就不能再用并联电阻的方法了。这时, 应断开 R , 如图 2 所示, 将 K 拨向另一侧, 串联接入 R' 。串入 R' 后, 如果仍采用 E , 则

$$\text{当 } R_X = 0 \text{ 时, } I_X = \frac{E}{R' + R_{内}} < I_g, \text{ 而按测量要求, 此时 } I_X \text{ 必须等于 } I_g。 \text{ 因此不能再用 } E,$$

$$\text{须改用 } E', \text{ 使 } I_X = \frac{E'}{R' + R_{内}} = I_g。 R' \text{ 与 } E' \text{ 应满足: } R' + R_{内} = R'_{中} \text{ (高阻档的中心}$$

阻值), $E' = I_g R'_{中}$ 。一般指针式万用表欧姆档中, 串 R' 的高阻档只设一档。

很明显, I_g 越小 (亦即基本表的灵敏度越高), 在同一 E 值下, $R_{内}$ 可以越大, 不但使并接的 R 可达较大的值, 从而使可分档位数相应增多, 而且在串入 R' 后, 所需 E' 电压也可相应降低。

三、实验设备

序号	名称	型号和规格	数量	备注
1	基本表	MF47 万用表表头	1	HE-11A
2	元件箱		1	HE-19
3	数字万用表	四位半	1	自备

四、实验内容

实验前请认真阅读实验的原理说明。在 HE-11A 实验箱上，基本表为 MF47 型万用表表头，带有欧姆刻度，中心值为 16.5。实验时，E 取 1.5V。欧姆表的分档及各档的 $R_{中}$ 见表 1。实验前先将表头机械调零。

1、将实验一中实验内容 1 测得的 I_g 和 R_g 记入表 1，再根据测得和已知的数据，计算 $R_0+W = (E/I_g) - R_g$ ， $R_1 \sim R_4 = R_{中} R_{内} / (R_{内} - R_{中})$ ， $R' = R'_{中} - R_{内}$ ，记入表 1。

2、按图 2-2 (K 拨向右侧) 接线， R_0 用 HE-19 中的 20k+8.2k，W 用 HE-11A 上的 RP_2 (10k 调至最大)，R 取 R_1 值 (HE-19 电阻箱) 即 $\times 10$ 档，E 取直流稳压电源输出的 1.5V。

3、从 HE-11A 或 HE-19 中选取表 2 所列电阻作为 R_x ，并用台式万用表测量阻值，记入表 2。

4、接入 1.5V 电压后，令 $R_x=0$ ，调节 W (即调准 R_0+W 值)，使表头满偏，以后换档，不必再调节 W。

- 5、用基本表测量表 2 所选 R_x ，记入表 2 相应栏中。
- 6、R 取 R_3 值，即 $\times 100$ 档，重复第 5 步。
- 7、按图 2-2 (K 拨向左侧) 接线，令直流稳压电源输出 $E' = I_g R'_{中}$ ， R' 取自 HE-19 中的 100k 加电阻箱，重复第 5 步。

表 1

$R_g =$	Ω	$I_g =$	μA	$R_0+W =$	Ω
档位		$R_{中} (\Omega)$		$R (R') (\Omega)$	
$\times 1$		16.5		$R_1 =$	
$\times 10$		165		$R_2 =$	
$\times 100$		16.5k		$R_3 =$	
$\times 1k$		16.5k		$R_4 =$	
$\times 10k$		$R'_{中} =$		$R' =$	

表 2

被 验 电 阻	标称值 (Ω)	30	100	300	1k	3k	10k	10k+ 20k	100 k	100k+2 00k
	万用表测量值									
本 表 测 量 值	$\times 10$ 档									
	$\times 100$ 档									
	$\times 10k$ 档									

五、实验注意事项

- 1、不得将任何有源或带电元件接入 MF47 表头两端，否则会损坏表头。
- 2、接线或测量时，应先连接好各元件，最后加电源。

六、预习思考题

- 1、简述指针式欧姆表设计的基本原理及计算方法。
- 2、本实验中，欧姆表可否再增加 $\times 0.1$ 、 $\times 0.01$ 、 $\times 100k$ 、 $\times 1M$ 档？为什么？

七、实验报告

- 1、根据实验数据，分析、计算欧姆表各档的测量误差。
- 2、请用一只量程 $I_g=10\mu A$ 、内阻 $R_g=2k\Omega$ 的微安表设计出一只四档位（ $\times 1$ 、 $\times 10$ 、 $\times 100$ 、 $\times 1k$ ）欧姆表。中心阻值取为 10 。画出其原理示意图，标出各元件参数。其中 E 取 $1.5V$ ，应保证 E 降至 $1.3V$ 时欧姆表仍可正常使用。

实验三 已知和未知电阻元件伏安特性的测绘

一、实验目的

1. 学会识别常用电阻元件的方法。
2. 掌握线性电阻、非线性电阻元件伏安特性的逐点测试法。
3. 掌握实验台上直流电工仪表和设备的使用方法。

二、原理说明

任何一个电器二端元件的特性可用该元件上的端电压 U 与通过该元件的电流 I 之间的函数关系 $I=f(U)$ 来表示,即用 $I-U$ 平面上的一条曲线来表征,这条曲线称为该元件的伏安特性曲线。

1. 线性电阻器的伏安特性曲线是一条通过坐标原点的直线,如图 3-1 中 a 所示,该直线的斜率等于该电阻器的电阻值。

2. 一般的白炽灯,其灯丝电阻从冷态开始随着温度的升高而增大。通过白炽灯的电流越大,其温度越高,阻值也越大。灯丝的“冷电阻”与“热电阻”的阻值可相差几倍至十几倍,它的伏安特性如图 3-1 中 b 曲线所示。

3. 一般的半导体二极管是一个非线性电阻元件,其伏安特性如图 3-1 中 c 所示。其正向压降很小(一般的锗管约为 $0.2\sim 0.3V$,硅管约为 $0.5\sim 0.7V$),正向电流随正向压降的升高而急骤上升。而反向电压从零一直增加到十多至几十伏时,其反向电流增加很小,粗略地可视为零。可见,二极管具有单向导电性,但反向电压加得过高,超过管子的极限值,则会导致管子击穿损坏。

4. 稳压二极管是一种特殊的半导体二极管,其正向特性与普通二极管类似,但其反向特性较特别,如图 3-1 中 d 所示。在反向电压开始增加时,其反向电流几乎为零,但当电压增加到某一数值时(称为管子的稳压值,有各种不同稳压值的稳压管),电流将突然增加,以后它的端电压将基本维持恒定,当反向电压继续升高时其端电压仅有少量增加。

注意:流过二极管或稳压二极管的电流不能超过管子的极限值,否则管子就会烧坏。

对于一个未知的电阻元件,可以参照对已知电阻元件的测试方法进行测量,再根据测得数据描绘其伏安特性曲线,再与已知元件的伏安特性曲线相对照,即可判断出该未知电阻元件的类型及某些特性,如线性电阻的电阻值、二极管的材料(硅或锗)、稳压二极管的稳压值等。

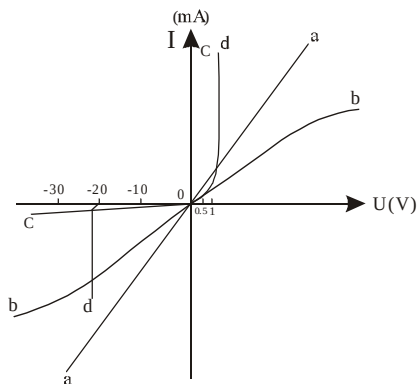


图 3-1

三、实验设备

序号	名称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压电源	0~30V	1	
2	万用表	FM-30 或其它	1	

3	直流数字电流表	0~2000mA	1	
4	直流数字电压表	0~300V	1	
5	二 极 管	1N4007, 2AP9	1	HE-11A
6	稳 压 管	2CW51	1	HE-11A
7	白 炽 灯	12V, 0.1A	1	HE-11A
8	线性电阻器	200 Ω , 510 Ω 、1k/8W	1	HE-11A

四、实验内容

1. 测定线性电阻器的伏安特性

按图 3-2 接线，调节稳压电源的输出电压 U ，使 R 两端的电压依次为下表 U_R 所列值，记下相应的电流表读数 I_0 。

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

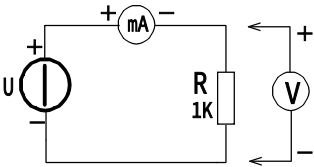


图 3-2

2. 测定非线性白炽灯泡的伏安特性

将图 3-2 中的 R 换成一只 12V, 0.1A 的灯泡，重复 1 的测量。 U_L 为灯泡的端电压。

U_L (V)	0.1	0.5	1	2	3	5	8	10
I (mA)								

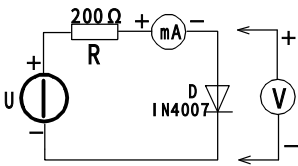


图 3-3

3. 测定半导体二极管的伏安特性

按图 3-3 接线， R 为限流电阻器。测二极管的正向特性时，其正向电流不得超过 36mA，二极管 D 的正向压降 U_{D+} 按下表所列取值。测反向特性时，只需将图 3-3 中的二极管 D 反接，且其反向电压 U_{D-} 可加到 30V。

正向特性实验数据

U_{D+} (V)	0.10	0.30	0.50	0.55	0.60	0.65	0.70	0.75
I (mA)								

反向特性实验数据

U_{D-} (V)	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30
I (mA)							

4. 测定稳压二极管的伏安特性

(1) 正向特性实验：将图 3-3 中的二极管换成稳压二极管 2CW51，重复实验内容 3 中的正向测量。 U_{Z+} 为 2CW51 的正向压降。

U_{Z+} (V)	
I (mA)	

(2) 反向特性实验：将图 3-3 中的 R 换成 510Ω ，2CW51 反接，测量 2CW51 的反向特性。稳压电源的输出电压 U_O 从 $0\sim 20V$ ，测量 2CW51 二端的电压 U_{Z-} 及电流 I ，由 U_{Z-} 的变化情况可看出其稳压特性。

$U_O(V)$	
$U_{Z-}(V)$	
$I(mA)$	

5、未知电阻元件伏安特性的测试

测试未知电阻元件的伏安特性时，操作应特别细心，否则就可能会损坏被测器件。

(1) 按图 3-3 接线，但 R 用 510Ω ，二极管 D 不接入，先将稳压电源的输出电压 U 调至最低 (0 或 $0.1V$)，再任选一种未知元件接入线路。

(2) 缓慢调节稳压电源的输出电压 U ，以毫安表每次增加 $3mA$ 为测试点，依次记录每个电流测试点下元件两端的电压值 U_x 。如果电流达到 $36mA$ 或者 U_x 达到 $30V$ ，则停止测试，并将 U 调至最低。

(3) 将稳压电源正、负输出端的连接线互换位置，重复 (2)。

(4) 另选一种未知元件接入线路，重复 (2) (3) 的测量，自拟表格记录。

注意：各 HE-11A 实验箱中未知元件的排列顺序和元件方向是随机的，各不相同。

$I_x(mA)$	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36
$U_x(V)$													
$I_x(mA)$	0	-3	-6	-9	-12	-15	-18	-21	-24	-27	-30	-33	-36
$U_x(V)$													

五、实验注意事项

1. 测二极管正向特性时，稳压电源输出应由小至大逐渐增加，应时刻注意电流表读数不得超过 $36mA$ 。稳压源输出端切勿碰线短路。

2. 如果要测定 2AP9 的伏安特性，则正向特性的电压值应取 $0, 0.10, 0.13, 0.15, 0.17, 0.19, 0.21, 0.24, 0.30(V)$ ，反向特性的电压值取 $0, 2, 4, \dots, 10(V)$ 。

3. 进行不同实验时，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、思考题

1. 线性电阻与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？
2. 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，其坐标变量应如何放置？
3. 稳压二极管与普通二极管有何区别，其用途如何？
4. 在图 5-3 中，设 $U=2V$ ， $U_{D+}=0.7V$ ，则 mA 表读数为多少？

七、实验报告

1. 根据各实验结果数据，分别在方格纸上绘制出已知和未知电阻元件的伏安特性曲线，总结、归纳被测各元件的特性，判定未知元件的类型及性质。
3. 必要的误差分析
4. 心得体会及其它。

实验四 受控源的设计和研究

一、实验目的

通过测试受控源的外特性及其转移参数，进一步理解受控源的物理概念，加深对受控源的认识和理解。

二、原理说明

1. 电源有独立电源（如电池、发电机等）与非独立电源（或称为受控源）之分。受控源与独立源的不同点是：独立源的电势 E_s 或电激流 I_s 是某一固定的数值或是时间的某一函数，它不随电路其余部分的状态而变。而受控源的电势或电激流则是随电路中另一支路的电压或电流而变的一种电源。

受控源又与无源元件不同，无源元件两端的电压和它自身的电流有一定的函数关系，而受控源的输出电压或电流则和另一支路（或元件）的电流或电压有某种函数关系。

2. 独立源与无源元件是二端器件，受控源则是四端器件，或称为双口元件。它有一对输入端（ U_1 、 I_1 ）和一对输出端（ U_2 、 I_2 ）。输入端可以控制输出端电压或电流的大小。施加于输入端的控制量可以是电压或电流，因而有两种受控电压源（即电压控制电压源 VCVS 和电流控制电压源 CCVS）和两种受控电流源（即电压控制电流源 VCCS 和电流控制电流源 CCCS）。它们的电路符号如图 4-1 所示。

3. 受控源的输出电压（或电流）与控制支路的电压（或电流）成正比变化时，则称该受控源是线性的。受控源的控制端参数与受控端参数之间的关系式称为转移函数。

理想受控源的控制支路中只有一个独立变量（电压或电流），另一个独立变量等于零，即从输入口看，理想受控源或者是短路（即输入电阻 $R_1=0$ ，因而 $U_1=0$ ）或者是开路（即输入电导 $G_1=0$ ，因而输入电流 $I_1=0$ ）；从输出口看，理想受控源或是一个理想电压源或者是一个理想电流源。

4. 本实验中用集成运算放大器线路来构成四种受控源。

A、压控电压源 VCVS

VCVS 的原理图见图 4-2。其转移函数为： $U_2=f(U_1)$ ， $\mu=U_2/U_1=R_1/R_2$ 称为转移电压比或电压增益。改变 R_1 、 R_2 之值可获得所需的转移电压比。

B、压控电流源 VCCS

VCCS 的原理图见图 4-3。其转移函数为： $I_2=f(U_1)$ ， $g_m=I_2/U_1=1/R$ 称为转移电导。 R 值确定了转移电导的值。

C、流控电压源 CCVS

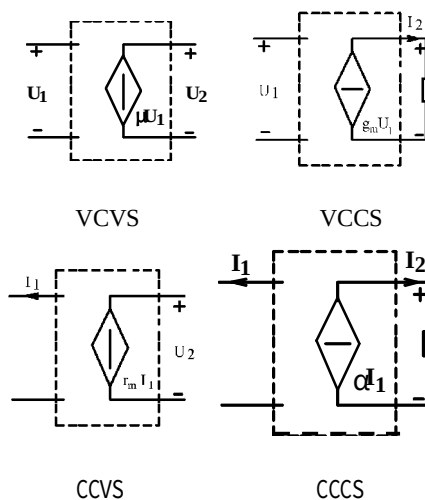


图 4-1

CCVS 的原理图见图 4-4。其转移函数为： $U_2=f(I_1)$ ， $r_m=U_2/I_1=R$ 称为转移电阻，即 R 值确定了转移电阻的大小。

D、流控电流源 CCCS

CCCS 的原理图见图 4-5。其转移函数为： $I_2=f(I_1)$ ， $\alpha=I_2/I_1=1+R_1/R_2$ 称为转移电流比或电流增益，由 R_1 和 R_2 的值决定。

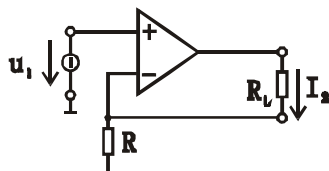


图 4-2

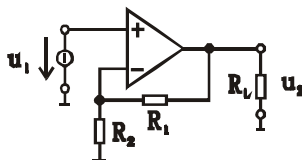


图 4-3

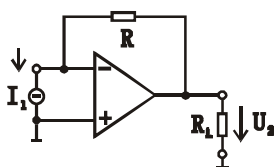


图 4-4

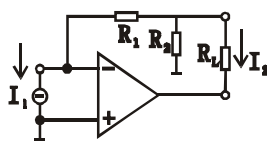


图 4-5

三、实验设备

序号	名 称	型号与规格	数量	备注
1	可调直流稳压源	0~30V	1	
2	可调恒流源	0~500mA	1	
3	直流数字电压表	0~300V	1	
4	直流数字电流表	0~2000mA	1	
5	可变电阻箱	0~99999.9Ω	1	HE-19
6	受控源实验电路板		1	HE-13A

四、实验内容

本实验中，四种受控源中的 R_1 、 R_2 和 R 均采用 $1k\Omega$ 电阻， R_L 采用 HE-19 上的电阻箱。需要测量电流时，应在所测支路中串入电流插座，再用毫安表测量电流。两个运放的正、负电源已在箱内连好，只需将外部电源引入实验箱的电源插口即可工作。

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 4-2。

(1) 不接电流表，固定 $R_L=2k\Omega$ ，调节稳压电源输出电压 U_1 ，测量 U_1 及相应的 U_2 值，记入下表。

U_1 (V)	0	1	2	3	5	7	8	9	μ
U_2 (V)									

在方格纸上绘出电压转移特性曲线 $U_2=f(U_1)$ ，并在其线性部分求出转移电压比 μ 。

(2) 接入电流表，保持 $U_1=2V$ ，利用电阻箱改变 R_L 的阻值，测 U_2 及 I_L ，绘制负载特性曲线 $U_2=f(I_L)$ 。

R_L (Ω)	50	70	100	200	300	400	500	∞
U_2 (v)								
I_L (mA)								

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 4-3。

(1) 固定 $R_L=2k\Omega$ ，调节稳压电源的输出电压 U_1 ，测出相应的 I_L 值，绘制 $I_L=f(U_1)$ 曲线，并由其线性部分求出转移电导 g_{mo} 。

U_1 (V)	0.1	0.5	1.0	2.0	3.0	3.5	3.7	4.0	g_m
I_L (mA)									

(2) 保持 $U_1=2V$ ，令 R_L 从大到小变化，测出相应的 I_L 及 U_2 ，绘制 $I_L=f(U_2)$ 曲线。

R_L ($k\Omega$)	5	4	2	1	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0
I_L (mA)										
U_2 (v)										

3. 测量受控源 CCCS 的转移特性 $U_2=f(I_1)$ 与负载特性 $U_2=f(I_L)$ ，实验线路如图 4-4。

(1) 固定 $R_L=2k\Omega$ ，调节恒流源的输出电流 I_s ，按下表所列 I_s 值，测出 U_2 ，绘制 $U_2=f(I_1)$ 曲线，并由其线性部分求出转移电阻 r_{mo} 。

I_1 (mA)	0.1	1.0	3.0	5.0	7.0	8.0	9.0	9.5	r_m
U_2 (v)									

(2) 保持 $I_s=2mA$ ，按下表所列 R_L 值，测出 U_2 及 I_L ，绘制负载特性曲线 $U_2=f(I_L)$ 。

R_L ($k\Omega$)	0.5	1	2	4	6	8	10
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 4-5。

(2) 参见 3(2) 测出 I_L ，绘制 $I_L=f(I_1)$ 曲线，并由其线性部分求出转移电流比 α 。

I_1 (mA)	0.1	0.2	0.5	1	1.5	2	2.2	α
I_L (mA)								

(2)保持 $I_s = 1\text{mA}$ ，令 R_L 为下表所列值，测出 I_L ， 绘制 $I_L = f(U_2)$ 曲线。

R_L ($k\Omega$)	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	5	10	20
I_L (mA)										
U_2 (v)										

五、实验注意事项

1. 每次组装线路，必须事先断开供电电源，但不必关闭电源总开关。

六、预习思考题

1. 受控源和独立源相比有何异同点？比较四种受控源的代号、 电路模型、控制量与被控量的关系如何？
2. 四种受控源中的 r_m 、 g_m 、 α 和 μ 的意义是什么？如何测得？
3. 若受控源控制量的极性反向，试问其输出极性是否发生变化？
4. 受控源的控制特性是否适合于交流信号？

七、实验报告

1. 根据实验数据， 在方格纸上分别绘出四种受控源的转移特性和负载特性曲线，并求出相应的转移参量。
2. 对预习思考题作必要的回答。
3. 对实验的结果作出合理的分析和结论， 总结对四种受控源的认识和理解。
4. 心得体会及其它。