

哈尔滨工业大学（深圳）

电路实验 IA 实验指导书

2019 年春

编者：赵飞、吴屏、王丹丹

要求：请按“实验指导书”要求做实验。实验前，请预习，完成实验报告的预习部分，实验后，整理数据，完成实验报告的其他部分

目录

实验一电路元件与电路基本定律	1
1.1 实验目的	1
1.2 实验预习要求	1
1.3 实验仪器与器件	1
1.4 实验原理	1
1.4.1 稳压管的伏安特性	1
1.4.2 基尔霍夫定律	2
1.4.3 叠加定理和齐性定理	3
1.5 实验步骤	3
1.5.1 稳压管伏安特性的测量	4
1.5.2 基尔霍夫定律	5
1.5.3 叠加定理和齐性定理	6
1.6 实验注意事项	8
1.7 故障分析与检查排除	8
1.8 实验思考题	9
1.9 实验报告要求	9
实验二电路定理	10
2.1 实验目的	10
2.2 实验预习要求	10
2.3 实验仪器与器件	10
2.4 实验原理	10
2.4.1 戴维南定理和诺顿定理	10
2.4.2 最大功率传输定理	12
2.4.3 特勒根定理与互易定理	12
2.4.4 自主探究性小实验设计	13
2.5 实验步骤	13
2.5.1 戴维南定理和诺顿定理	13
2.5.2 最大功率传输定理	15
2.5.3 特勒根定理与互易定理	16
2.6 实验注意事项	17
2.7 故障分析与检查排除	17
2.8 实验思考题	17
2.9 实验报告要求	17
实验三元件参数测量和阻抗的串并联	18
3.1 实验目的	18
3.2 实验预习要求	18
3.3 实验仪器与器件	18
3.4 实验原理	19
3.4.1 阻抗、导纳	19

3.4.2 总阻抗、总导纳	20
3.5 实验步骤	21
3.5.1 元件参数测量	21
3.5.2 阻抗的串联、并联和混联	22
3.6 实验注意事项	24
3.7 故障分析与检查排除	24
3.8 实验思考题	24
3.9 实验报告要求	24
实验四日光灯功率因数校正实验	26
4.1 实验目的	26
4.2 实验预习要求	26
4.3 实验仪器与器件	26
4.4 实验原理	26
4.5 实验步骤	27
4.6 注意事项	29
4.7 故障分析与检查排除	29
4.8 实验思考题	29
4.9 实验报告要求	29
实验五三相电路	30
5.1 实验目的	30
5.2 实验预习要求	30
5.3 实验仪器与器件	30
5.4 实验原理	30
5.4.1 三相电源相序的测量方法	30
5.4.2 负载星形联结和负载三角形联结对称的测量	31
5.4.3 三相电路功率的测量	32
5.5 实验步骤	33
5.5.1 电源相序的测量	33
5.5.2 三相电路的电压电流测量	33
5.5.2.2 负载星形联结	33
5.5.2.2 负载三角形联结	35
5.5.3 三相电路功率的测量	35
5.5.3.2 三相四线制电路中各相负载的功率测量	35
5.5.3.2 三相三线制电路中各相负载的功率测量	36
5.5.4 设计实验（选做）	36
5.6 实验注意事项	36
5.7 故障分析与检查排除	37
5.8 实验思考题	37
5.9 实验报告要求	37
实验六互感电路的测量	38
6.1 实验目的	38
6.2 实验预习要求	38

6.3	实验仪器与器件	38
6.4	实验原理	38
6.4.1	同名端的判定方法	38
6.4.2	互感系数 M 的测定	39
6.5	实验步骤	40
6.5.1	测定两互感耦合线圈的同名端	40
6.5.2	测定两互感耦合线圈的互感系数 M	41
6.6	实验注意事项	43
6.7	故障分析与检查排除	43
6.8	实验思考题	44
6.9	实验报告要求	44

实验一电路元件与电路基本定律

1.1 实验目的

1. 学习和掌握常用电工电子仪器仪表的使用方法；
2. 掌握电流、电压参考方向的含义及其应用；
3. 掌握线性和非线性元件伏安特性的测量方法；
4. 通过实验验证并加深对基尔霍夫定律、电位、叠加定理和齐性定理的理解。

1.2 实验预习要求

1. 复习基尔霍夫定律、叠加定理和齐性定理的理论知识，完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据；
2. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项；
3. 根据实验电路计算所要求测试的理论数据，填入实验报告中。

1.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke17B+
3	直流电压电流表	1 块	30111047
4	电阻	若干	
5	稳压二极管	1 只	ZPD9.1
7	测电流插孔	3 只	
8	电流插孔导线	3 条	
9	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
10	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm
10	直流恒流源	1 台	SL1500

1.4 实验原理

1.4.1 稳压管的伏安特性

稳压二极管是一种典型的非线性电阻器件，当施加其两端的反向电压较小时，通过的电流几乎为零，当反向电压增高到一定数值时，通过的电流会急剧增加，稳压管反向击穿。当反向电流在较大范围内变化时，稳压管两端的电压基本保持不变，利用这一特性可以起到稳定电压的作用。稳压二极管与普通二极管的主要区别在于稳压管工作在 PN 结的反向击穿状态，其反向击穿是可逆的，只要不超过稳压管的允许值，

PN 结就不会过热损坏，当外加反向电压去除后，稳压管恢复原性能，所以具有良好的重复击穿特性。当稳压管正偏时，相当于一个普通二极管。稳压二极管的伏安特性曲线如图 1-1 所示。

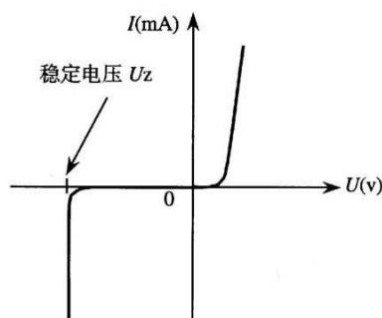


图 1-1 稳压二极管的伏安特性曲线

1.4.2 基尔霍夫定律

1.4.2.1 基尔霍夫电流定律 (KCL)

在集中参数电路中，任一时刻流出（或流入）任一节点的支路电流代数和等于零，即：

$$\sum i_k = 0 \quad (i_k \text{ 表示第 } k \text{ 条支路电流}) \quad \text{式 (1-1)}$$

此时，若取流出节点的电流为正，则流入节点的电流为负。它反映了电流的连续性，说明了节点上各支路电流的约束关系，它与电路中元件的性质无关。

要验证基尔霍夫电流定律，可选一电路节点，按图中的参考方向测定出各支路电流值，并约定流入或流出该节点的电流为正，将测得的各电流代入式 (1-1)，加以验证。

1.4.2.2 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在集中参数电路中，任一时刻，沿任一回路各支路电压的代数和等于零，即：

$$\sum U_k = 0 \quad (U_k \text{ 表示第 } k \text{ 条支路电压}) \quad \text{式 (1-2)}$$

它说明了电路中各段电压的约束关系，它与电路中元件的性质无关。式 (1-2) 中，通常规定支路或元件电压的参考方向与回路绕行方向一致者取正号，反之取负号。

关于电压、电流的实际方向与参考方向的对应关系，参考方向是为了分析、计算电路而人为设定的。实验中测量的电压、电流的实际方向，由电压表、电流表的“正”端所标明。在测量电压、电流时，若电压表、电流表的“正”端与参考方向的“正”方向一致，则该测量值为正值，否则为负值。

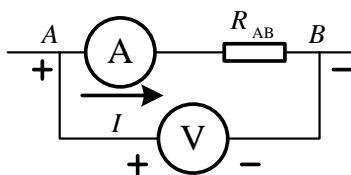


图 1-2 电压，电流的实际方向和参考方向

关于电位与电位差，在电路中，电位的参考点选择不同，各节点的电位也相应改变，但任意两节点间的电位差不变，即任意两点间电压与参考点电位的选择无关。

1.4.3 叠加定理和齐性定理

1.4.3.1 叠加定理

叠加定理：在线性唯一解的电路中，由几个独立电源共同作用产生的响应等于各个独立电源单独作用时产生相应响应的代数叠加。

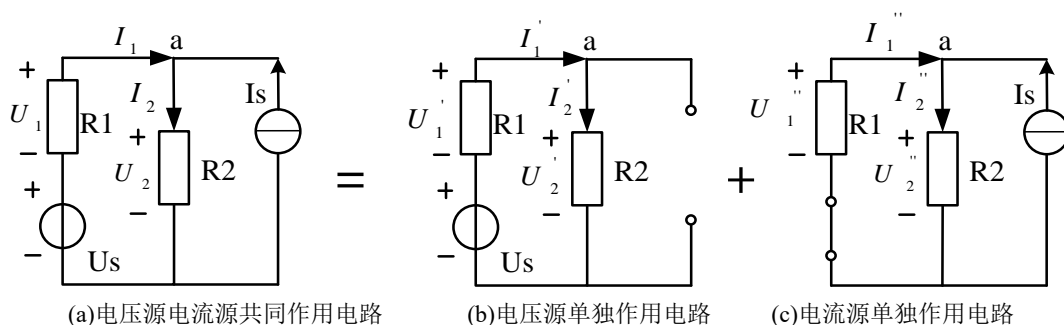


图 1-3 叠加定理原理图

图 1-3 所示实验电路中有一个电压源 U_s 及一个电流源 I_s 。设 U_s 和 I_s 共同作用时，在电阻 R_1 上产生的电压、电流分别为 U_1 、 I_1 ，在电阻 R_2 上产生的电压、电流分别为 U_2 、 I_2 ，图 1-3(a)所示。为了验证叠加原理令电压源和电流源分别作用。当电压源 U_s 不作用，即 $U_s=0$ 时，在 U_s 处用短路线代替；当电流源 I_s 不作用，即 $I_s=0$ 时，在 I_s 处用开路代替；而电源内阻都必须保留在电路中。

(1) 设电压源 U_s 单独作用时（电流源支路开路）引起的电压、电流分别为 U_1' 、 U_2' 、 I_1' 、 I_2' ，如图 1-3 (b) 所示。

(2) 设电流源单独作用时（电压源支路短路）引起的电压、电流分别为 U_1'' 、 U_2'' 、 I_1'' 、 I_2'' ，如图 1-3(c) 所示。

这些电压、电流的参考方向均已在图中标明。验证叠加定理，即验证式 (1-3) 成立。

$$\begin{cases} U_1 = U_1' + U_1'' \\ U_2 = U_2' + U_2'' \\ I_1 = I_1' + I_1'' \\ I_2 = I_2' + I_2'' \end{cases} \quad \text{式 (1-3)}$$

1.4.3.2 齐性定理

齐性定理：在只有一个激励 X 作用的线性电路中，设任一响应为 Y ，记作 $Y' = f(X)$ ，若将该激励乘以常数 K ，则对应的响应 Y' 也等于原来响应乘以同一常数，即 $Y' = f(KX) = Kf(X) = KY$ 。

对于线性直流电路，其电路方程为线性代数方程，此时齐性定理可直观表述为：若电路中只有一个激励，则响应与激励成正比。

1.5 实验步骤

在进行实验操作之前，请对实验仪器及元件进行检测，确保仪器仪表工作正常，元件参数值和电路图

所标参数吻合。

检测内容包括：

- 1、直流电压源，直流电流源工作是否正常；
- 2、用万用表检测电流插头的通断；
- 3、根据电路图从元件盒中找到需要的电阻，并用万用表的电阻测试端（ Ω 档），测量电阻值，确保阻值正确；

完成上述工作后，才能进行实验：

1.5.1 稳压管伏安特性的测量

1. 确定稳压二极管的正负极，根据所选稳压二极管的型号，确定稳压电源的输出，测量其正向特性和反向特性，并画出稳压管的伏安特性曲线。

注意事项：

用数字万用表确定二极管的正负极，测量时将红表笔插入“HzV Ω ”插孔，黑表笔插入“COM”插孔，红表笔极性为+，黑表笔极性为-。将功能转换开关置于二极管测量档，红表笔接被测二极管正极，黑表笔接被测二极管负极。

2. 稳压管正向特性的测量：按图 1-4（a）连接实验电路， $R=1k\Omega$ ，将稳压电源的输出电压 U_s 由 0V 逐渐调至 6V，用直流电流表测量电流 I ，用万用表测量稳压管两端电压 U ，测量数据填入表 1-1。所选数据既要满足正向特性曲线的整体要求，又能反应曲线变化的细节。
3. 稳压管反向特性的测量：按图 1-4（b）连接实验电路（稳压管反接），将稳压电源的输出电压 U_s 由 0V 逐渐调至 14V，用直流电流表测量电流 I ，用万用表测量稳压管两端电压 U ，测量数据填入表 1-2。所选数据既要满足反向特性曲线的整体要求，又能反应曲线变化的细节。
4. 根据表 1-1 和表 1-2 数据，在坐标纸上绘出稳压二极管的伏安特性曲线。

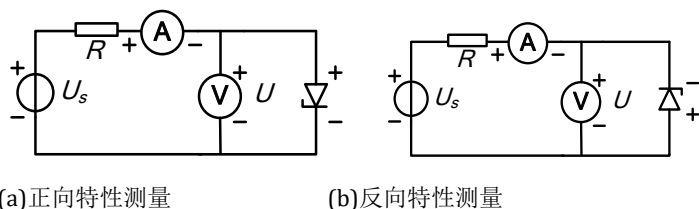


图 1-4 稳压管伏安特性测量电路

表 1-1 稳压管正向特性测量数据

U_s/V	0.2V	0.8V	1.2V	1.8V	2.2V	3V	4.5V	6V
U/V								
I/mA								

表 1-2 稳压管反向特性测量数据

U_s/V	5V	8.5V	9.3V	9.8V	10.5V	11.5V	12.5V	14V
U/V								
I/mA								

1.5.2 基尔霍夫定律

1.5.2.1 验证基尔霍夫定律（KCL 和 KVL）的实验线路

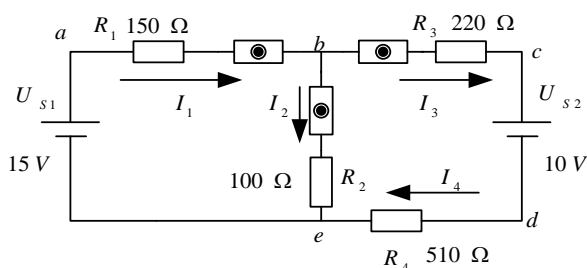


图 1-5 验证基尔霍夫定律实验线路

1.5.2.2 基尔霍夫电流定律（KCL）的验证

1. 使用电阻，测电流插孔，短路端子，导线等，按图 1-5 验证基尔霍夫定律实验线路接线， U_{s1} 、 U_{s2} 用直流稳压电源 DP832A 提供，调节 $U_{s1}=15V$ ， $U_{s2}=10V$ 。

注意事项：

电源的红色接线柱为“+”，黑色接线柱为“-”，不可短接，接好电路，检查后，才能上电，打开电源。

2. 用直流电压电流表中的电流表（30111047）依次测出电流 I_1 、 I_2 、 I_3 ，（以节点 b 为例），数据记入表 1-3 验证 KCL 实验数据内。

注意事项：

测电流插孔是默认短路的，当插入测电流导线时为开路，接入电流表后，将电流表串入电路中。

根据图中的电流参考方向，按照电流由“+”端子流入，“-”端子流出的原则将电流插座接入电路电流测试线的红线接入电流表的“+”，黑线接入电流表的“-”。

3. 根据 KCL 定律式（1-1）计算 ΣI ，将结果填入表 1-3，验证 KCL。

表 1-3 验证 KCL 实验数据

节点 b	$I_1(\text{mA})$	$I_2(\text{mA})$	$I_3(\text{mA})$	$\Sigma I=0$ 是否成立
理论计算值				
测量值				

1.5.2.3 基尔霍夫电压定律（KVL）的验证

1. 使用电阻，测电流插孔，短路端子，导线等，按图 1-5 验证基尔霍夫定律实验线路接线， U_{s1} 、 U_{s2} 用直流稳压电源 DP832A 提供。调节 $U_{s1}=15V$ ， $U_{s2}=10V$ 。
2. 用万用表的直流电压档，依次测出回路 1（绕行方向： $beab$ ）和回路 2（绕行方向： $bcdeb$ ）中各支路电压值，数据记入表 1-3 内。

注意事项：

用万用表的直流电压档测试电压：按照参考方向测量电压值，被测量的正负号即在显示屏上显示出来。由于数字万用表的“+”端被“V,A,mA”等替代，“-”端被“COM”替代，测量时需要检查万用表的红色黑色表笔是否在万用表的正确位置，且可靠连接。红色表笔与被测电压的“+”端连接，黑色表笔与被测电

压的“-”端连接，即可读出电压的大小和正负。

3. 根据 KVL 定律式 (1-2)，计算 ΣU ，将结果填入表 1-4，验证 KVL。

表 1-4 验证 KVL 实验数据

回路 1 (beab)		$U_{be}(\text{V})$	$U_{ea}(\text{V})$	$U_{ab}(\text{V})$		ΣU 是否成立
	理论值					
	测量值					
回路 2 (bcdeb)		$U_{bc}(\text{V})$	$U_{cd}(\text{V})$	$U_{de}(\text{V})$	$U_{eb}(\text{V})$	ΣU 是否成立
	理论值					
	测量值					

1.5.2.4 电位的测定

1. 仍按图 1-5 接线。
2. 分别以 c 、 e 两点作为参考节点（即 $V_c=0$ 、 $V_e=0$ ），测量图 1-5 中各节点电位，将测量结果记入表 1-5 不同参考点电位与电压中。
3. 通过计算验证：电路中任意两点间的电压与参考点的选择无关。

表 1-5 不同参考点电位与电压

测试值(V)	V_a	V_b	V_c	V_d	V_e
c 节点					
e 节点					

计算值(V)	U_{ab}	U_{bc}	U_{cd}	U_{de}	U_{eb}	U_{ea}
c 节点						
e 节点						

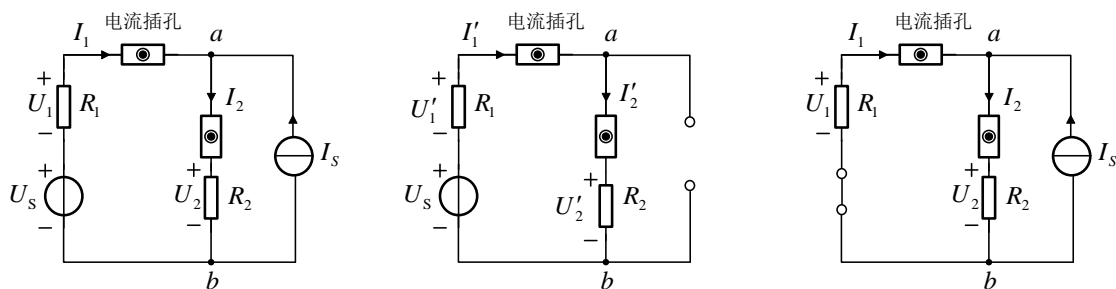
1.5.3 叠加定理和齐性定理

1.5.3.1 验证叠加定理

1. 按图 1-6 接线，

取直流稳压电源 $U_S=10\text{V}$ ， $I_S=20\text{mA}$ ，电阻 $R_1=220\Omega$ ， $R_2=100\Omega$ ， X_{s1} 和 X_{s2} 为测电流插孔，根据图中的电流参考方向，按照电流由“+”端子流入，“-”端子流出的原则将电流插座接入电路。

注意事项：电压源禁止短路，电流源禁止开路。



a) U_s 、 I_s 共同作用 b) U_s 单独作用 c) I_s 单独作用

图 1-6 验证叠加原理的实验线路

2. 当 U_s 、 I_s 两电源共同作用时，测量各支路电流和电压值。

使用直流电压电流表板，测试直流电流，使用万用表的直流电压档测试直流电压，在测试数据时，应按照图中的参考方向测试各电压、电流。既要测试电压、电流的大小，还要判断电压、电流的真实方向是否与参考方向一致，一致时，为正，否则为负值。

测量表 1-6 第一行所列内容。

3. 当电源 U_s 单独作用时，测量各电流和电压的值。

当电源 U_s 单独作用时，电流源 I_s 开路，将电流源支路移开，使用直流电压电流表板，测试电流，使用万用表的直流电压档测试直流电压，将数据记入表 1-6 第二行中。

4. 当电源 I_s 单独作用时，测量各电流和电压的值。

当电源 I_s 单独作用时，电压源 U_s 置零（电压源处短路，电流源处开路），将电压源支路断开，在这位置用短接端子短路，然后，使用直流电压电流单元，测试电流，使用万用表的直流电压档测试直流电压，将数据记入表 1-6 第三行中。

表 1-6 验证叠加原理实验数据

测量数据	U_s ， I_s 共同作用	$U_1 =$	$U_2 =$	$I_1 =$	$I_2 =$
	U_s 单独作用	$U'_1 =$	$U'_2 =$	$I'_1 =$	$I'_2 =$
	I_s 单独作用	$U''_1 =$	$U''_2 =$	$I''_1 =$	$I''_2 =$
	计算结果, 式(1-3)				
理论计算数据	U_s ， I_s 共同作用	$U_1 =$	$U_2 =$	$I_1 =$	$I_2 =$
	U_s 单独作用	$U'_1 =$	$U'_2 =$	$I'_1 =$	$I'_2 =$
	I_s 单独作用	$U''_1 =$	$U''_2 =$	$I''_1 =$	$I''_2 =$
	计算结果, 式(1-3)				

注意事项：

实验中使用的电源一般由电子元件组成的直流电压源或直流恒流源，直接关掉电源后，它们将成为负载，且不满足理想电压源内阻为 0 以及理想恒流源内阻无穷大的要求。因此，在线性电路叠加定理的实验中，当测量某一电源单独作用产生的电压或电流时，其他电源应从电路中去掉。将移去电压源的支路短路，

移去电流源的支路开路，以满足叠加定理的要求。

1.5.3.2 验证齐性定理

1. 按图 1-7 接线，电阻 $R_1=100\Omega$ ， $R_2=220\Omega$ ，调整直流电压源 U_s ，使电源输出自 2V 起，按照 2V 递增，分别测试两只电阻上的电压 U_1 ， U_2 及电路中的电流 I 的值，观察其是否按等幅度递增，记录填入表 1-7 中，并根据齐性定理判断实验结果的正确性。

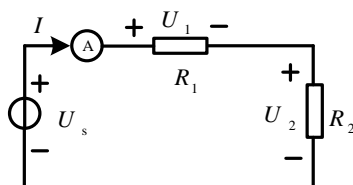


图 1-7 齐性定理验证电路

表 1-7 齐性电路验证实验测试表格

U_s/V	U_1/V		U_2/V		I/mA	
	理论值	测试值	理论值	测试值	理论值	测试值
2						
4						
6						
8						

1.6 实验注意事项

1. 不允许带电接线。
2. 用电压表和电流表调好电压源和电流源的数值，电源才能接入电路。
3. 在实验过程中，不允许带电换线、换元件。
4. 在实验过程中，电压源不允许短路，电流源不允许开路。
5. 测量电压、电流时，电压表要与被测元件并联，电流表要与被测支路串联。
6. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据，方可进行下一步实验。
7. 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。
8. 遵守实验室的各项规章制度。

1.7 故障分析与检查排除

(1) 实验中常见故障

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

(2) 故障检查

故障检查方法很多，一般是根据故障类型，确定部位、缩小范围，在小范围内逐点检查，最后找出故障点

并给予排除。简单实用的方法是用万用表（电压档或电阻档）在通电或断电状态下检查电路故障。

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

②断电检查法：用万用表的电阻档（或欧姆表），在断开电源情况下，根据实验原理，电路某两点应该导通无电阻（或电阻极小），万用表测出开路（或电阻极大）；某两点应该开路（或电阻很大），但测得的结果为短路（或电阻极小），则故障即在此两点间。

1.8 实验思考题

1. 在基尔霍夫验证实验中，参考点的选择与各节点的电压是否有关？与两节点间的电压是否有关？
2. 电压源和电流源带有输出显示，而实验中又使用直流电压表，电流表，请问电压电流值应该使用哪个仪表确定，为什么？
3. 在叠加原理验证实验中，通过对实验数据的计算，判别电阻上的功率是否也符合叠加原理？
4. *叠加定理的验证实验图 1-3，可根据图 1-8 的线路图再次验证叠加定理(选做)：

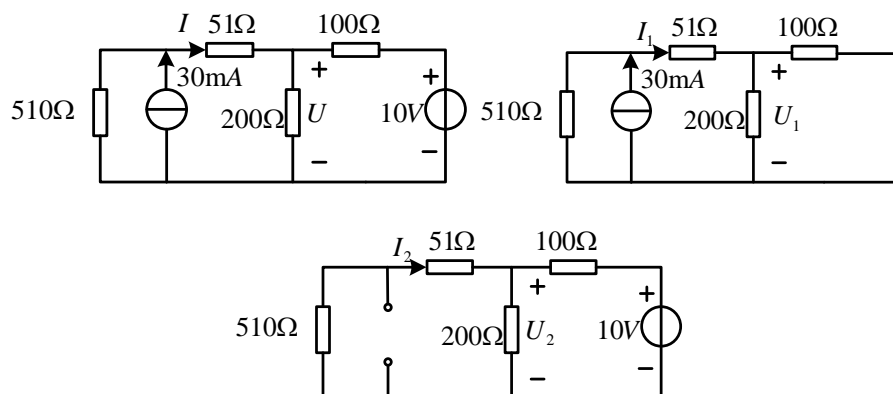


图 1-8 叠加定理验证实验线路图二

1.9 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由曲线得出的数据在实验后完成，并填入相应的数据记录表中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验二电路定理

2.1 实验目的

1. 学习和掌握常用电工电子仪器仪表的使用方法；
2. 通过实验验证并加深对戴维南定理和诺顿定理的理解；
3. 加深对最大功率传输定理的理解和认识；
4. 了解特勒根定理、互易定理和对偶原理。

2.2 实验预习要求

1. 复习戴维南定理、诺顿定理、最大功率传输定理，以及特勒根定理、互易定理和对偶原理的理论知识，完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据；
2. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项；
3. 根据实验电路计算所要求测试的理论数据，填入实验报告中。

2.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	直流稳压电源	1 台	DP832A
2	手持万用表	1 台	Fluke17B+
3	直流电压电流表	1 块	30111047
4	电阻	若干	
5	可变电阻	1 只	
6	测电流插孔	3 只	
7	电流插孔导线	3 条	
8	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
9	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm
10	直流恒流源	1 台	SL1500

2.4 实验原理

2.4.1 戴维南定理和诺顿定理

戴维南定理：线性含源一端口网络的对外作用可以用一个电压源串联电阻的电路来等效代替。其中电压源的源电压等于此一端口网络的开路电压，而电阻等于此一端口网络内部各独立电源置零（电压源处短路，电流源处开路）后所得无独立源一端口网络的等效电阻。如图 2- 1 所示。

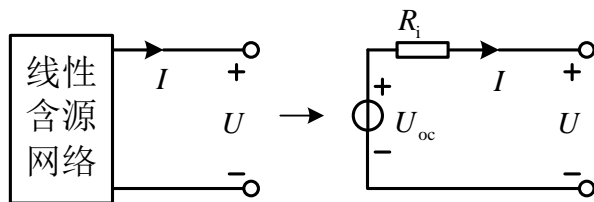


图 2-1 戴维南定理图示

诺顿定理：线性含源一端口网络的对外作用可以用一个电流源并联电导的电阻来等效代替，其中电流源的源电流等于此一端口网络的短路电流，而电导等于此一端口网络内部各独立源置零（电压源处短路，电流源处开路）后所得无独立源一端口网络的等效电导。如图 2-2 所示。

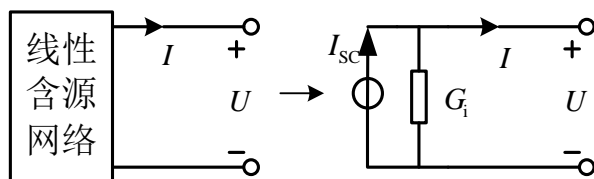


图 2-2 诺顿定理图示

一般情况下，含源一端口网络既可以用戴维南电路等效代替，也可以用诺顿电路等效代替。特殊情况下，若 $R_i = 0$ ，则只能等效为戴维南电路，并成为电压源，若 $G_i = 0$ ，则只能等效为诺顿电路，成为电流源。求等效电路相当于确定端口电压与电流的直线方程。根据直线方程的形式，设计出确定等效电路的实验方法。实际应用时，加以选择。下面介绍几种测量等效电路参数的实验方法。

(1) 测量开路电压和短路电流

如果一端口网络允许开路和短路，可分别测量开路电压 U_{oc} 和短路电流 I_{sc} ，如图 2-3 所示，得到直线在电压坐标轴和电流坐标轴上的截距，分别对应等效电路中的电压源的电压和电流源的电流，而等效电阻和等效电导分别为：

$$R_i = \frac{U_{oc}}{I_{sc}} \quad G_i = \frac{I_{sc}}{U_{oc}}$$

(2) 测量开路电压和等效电阻

当一端口网络不允许短路时，可按图 2-3(a) 测量端口的开路电压 U_{oc} ；然后将一端口网络内独立电源置零（电压源处短路，电流源处开路），用万用表测出一端口网络的等效电阻 R_i （参见图 2-4(a)，或在端口处外加电源，通过测量端口电压 U 与电流 I ，计算 $U/I = R_i$ ，参见图 2-4(b)）。

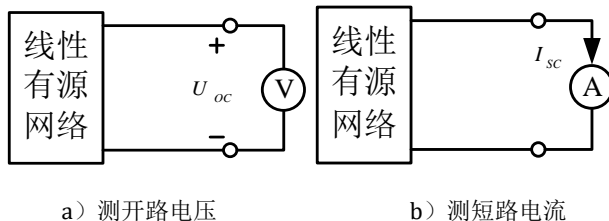


图 2-3 方法一的原理示意图

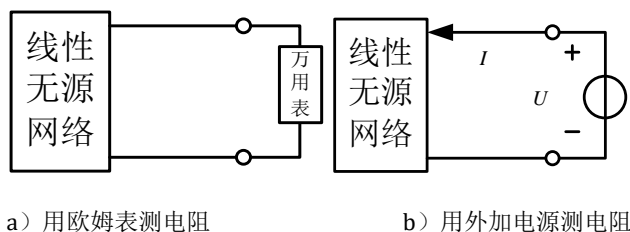


图 2-4 方法二测量等效电阻的原理示意图

(3) 测量短路电流和等效电阻

当一端口网络不允许开路时，将方法二中测量端口的开路电压更改为测量端口的短路电流 I_{SC} 即可。

2.4.2 最大功率传输定理

一个实际的电源或者一个含源的一端口网络，不管它内部的具体电路如何，都可以等效成为具有一定电动势 U_{oc} 和一定内阻 R_0 的电路，如图 2-5 所示。负载获得的功率为

$$P = I^2 R_L = \frac{U_{oc}^2 R_L}{(R_0 + R_L)^2}$$

负载 R_L 在从小变大的过程中，存在某一阻值，使其能够从电源获得最大的功率，可通过实验手段讨论负载获得最大功率的条件。

电路负载获得最大功率的条件是 $R_L = R_0$ ，负载吸收的功率与电源内阻消耗的平均功率相等，所以负载获得最大功率时，电路的传输效率只有 50%。

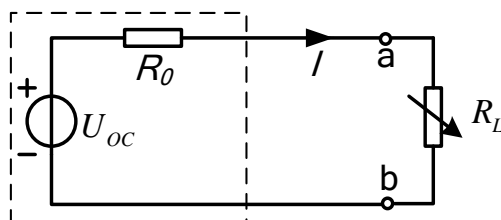


图 2-5 含源一端口网络等效电路

2.4.3 特勒根定理与互易定理

基尔霍夫定律和特勒根定理对集中参数电路具有普遍的适应性。

基尔霍夫定律和特勒根定理适用于任何集总参数电路，它与元件的性质无关。只与电路的拓扑结构有关。

特勒根定律一：对于网络 N 共用 n 个结点， b 条支路，其支路电压、支路电流向量分别为 $U = [U_1 \cdots U_b]^T$ ， $I = [I_1 \cdots I_b]^T$ ，且各支路电压与电流参考方向相关联。则 $U^T I = 0$ 或 $I^T U = 0$ ，即 $\sum_{k=1}^b U_k I_k = 0$ 。特勒根定理一又称为功率守恒定理。

特勒根定理二：对于网络 N 和 \hat{N} ，可以由不同的元件构成，但它们具有相同的拓扑结构，即 $A = \hat{A}$ ，其中各网络的支路电压、支路电流向量分别为 $U = [U_1 \cdots U_b]^T$ ， $I = [I_1 \cdots I_b]^T$ ， $\hat{I} = [\hat{I}_1 \cdots \hat{I}_b]^T$ ， $\hat{U} = [\hat{U}_1 \cdots \hat{U}_b]^T$ ，且各网络中支路上的电压与电流参考方向关联，则 $U^T \hat{I} = 0$ 或 $\hat{I}^T U = 0$ ，即 $\sum_{k=1}^b U_k \hat{I}_k = 0$ ；以及 $\hat{U}^T I = 0$ ，或 $I^T \hat{U} = 0$ ，即 $\sum_{k=1}^b \hat{U}_k I_k = 0$ 。特勒根定理二又称为拟功率守恒定理。

互易定理一：对于一无源线性二端口网络，无论以哪个端口作激励端，哪个端口作响应端，其电流响应和电压激励的比值相同，即为

$$\left. \frac{I_2}{U_{S1}} \right|_{U_{S2}=0} = \left. \frac{I_1}{U_{S2}} \right|_{U_{S1}=0}$$

当 $U_{S1} = U_{S2}$ 时，有 $I_2 = I_1$ ，即将两个端口的激励电压和响应电流互换位置后，响应电流值不变。

互易定理二：对于不含受控源的单一激励的线性电阻电路，互易激励（电流源）与响应（电压）的位置，其响应与激励的比值仍然保持不变。当激励 $I_{S1} = I_{S2}$ 时，则响应 $U_2 = U_1$ 。

2.4.4 自主探究性小实验设计

对偶原理：

在对电路进行分析研究时，可以发现电路中有许多具有相似性的内容成对出现，包括结构、定律、定理、元件、变量等。例如：支路电压 u 与支路电流 i 是对偶变量，电阻 R 与电导 G 是对偶元件，KCL 与 KVL 是对偶定律，戴维南定理与诺顿定理是对偶定理。

设计小实验验证对偶原理：

设计两个含有对偶元件和变量的对偶电路，自制表格进行相关参数测试，列写对应的各元件和变量的对偶关系式，验证电路的对偶性。

2.5 实验步骤

在进行实验操作之前，请对实验仪器及元件进行检测，确保仪器仪表工作正常，元件参数值和电路图所标参数吻合。

检测内容包括：

- 1、直流电压源，直流电流源工作是否正常；
- 2、用万用表检测电流插头的通断；
- 3、根据电路图从元件盒中找到需要的电阻，并用万用表的电阻测试端（ Ω 档），测量电阻值，确保阻值正确；

完成上述工作后，才能进行实验：

2.5.1 戴维南定理和诺顿定理

戴维南定理和诺顿定理的验证实验的电路接线图，如图 2-6 所示。虚线框内为含源一端口网络，其端口 ab 可以处于开路或短路状态。

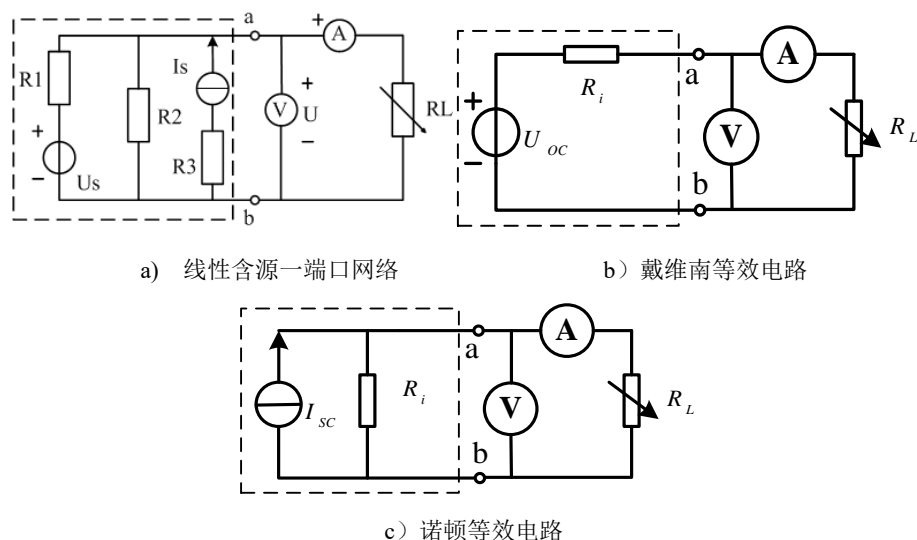


图 2-6 戴维南和诺顿定理的验证电路

2.5.1.1 测量有源一端口网络的等效电路参数

按照图 2-6 a) 接线, $U_s=10.2\text{V}$, $I_s=20\text{mA}$, $R_1=510\ \Omega$, $R_2=220\ \Omega$, $R_3=100\ \Omega$, R_L 为 $0\sim 10\text{k}\Omega$ 可调电阻, 按照实验原理 2.4.1 中的 3 种测量方法, 测试 ab 一端口网络的戴维南和诺顿等效电路参数, 计算电路参数, 并将测试和计算结果填入表 2-1 中。

表 2-1 线性含源一端口电阻网络等效电路参数测试

测试方法	测量值	等效电路参数的计算
方法一		
方法二		
方法三		

2.5.1.2 测量有源一端口网络的外特性

一端口右侧的电路为外电路, 测量方法如下:

- 1) 将外电路断开, 用万用表的直流电压档测试开路电压 U_{OC} , 连接外电路, 可调电阻用短接导线代替, 测量其短路电流 I_{SC} , 计入表 2-2 的相应位置;
- 2) 将短接导线去掉, 此位置换成 $0\sim 10\text{k}\Omega$ 的可调电阻, 调节 R_L 的值, 测量该网络外特性 $U = f(I)$, 填入表 2-2 中,

注意事项:

可以使用直流电压电流表单元测试电压, 也可以使用万用表的直流电压档测试电压, 由于需要多次测试数据, 所以可以将万用表的表笔换成导线进行测量更加方便。

2.5.1.3 测定戴维南等效电路的外特性

- 1) 根据戴维南定理的要求, 用 2.5.1.1 中测得的含源网络的开路电压 U_{OC} 和等效电阻 R_i 组成戴维南等效电路, 如图 2-6 (b);
- 2) 调节 R_L , 测量外特性 $U' = f(I')$, 填入表 2-2;
- 3) 在同一坐标系中画出 2 条外特性曲线, 如图 2- , 并根据外特性曲线讨论电源的等效变换, 验证戴维南定理的正确性。

注意事项: R_L 调节, 尽量使得 U' 和 I' 均匀分布。

2.5.1.4 测定诺顿等效电路的外特性

- 1) 根据诺顿定理的要求, 用 2.5.1.1 中测得的含源网络的短路电流 I_{SC} 和等效电阻 R_i 组成诺顿等效电路, 如图 2-6(c);
- 2) 调节 R_L , 测量外特性 $U'' = f(I'')$, 填入表 2-2;

注意事项: R_L 调节, 尽量使得 U'' 和 I'' 均匀分布。

- 3) 根据表 2-2 的数据, 在同一坐标系中画出 3 条外特性曲线, 如图 2- , 并根据外特性曲线讨论电源的等效变换, 验证戴维南定理和诺顿定理的正确性。

表 2-2 含源一端口网络及等效电路外特性数据

参数	改变 R_L	第一组	第二组	第三组	第四组	第五组	U_{oc}	I_{sc}
$U = f(I)$	I/mA						0	理论值:
								测量值:
	U/V						理论值:	0
							测量值:	
$U' = f(I')$	I'/mA						0	理论值:
								测量值:
	U'/V						理论值:	0
							测量值:	
$U'' = f(I'')$	I''/mA						0	理论值:
								测量值:
	U''/V						理论值:	0
							测量值:	

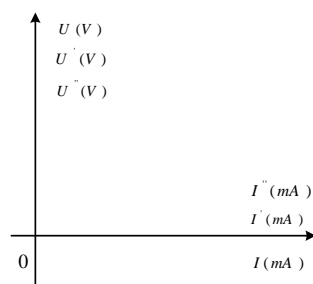


图 2-7 外特性坐标曲线图

2.5.2 最大功率传输定理

- 1) 实验电路如图 2-7 所示，其中 $R_0=1\text{k}\Omega$ ， $U_{oc}=8\text{V}$ ， R_L 为 $10\text{k}\Omega$ 滑动变阻器。
- 2) 理论计算功率 P_L 最大时， $R_L=$ _____。
- 3) 调节 R_L 值，使 $U_L=U_{oc}/2$ ，记录电流 I 、电压 U_L ，填入表 2-3 中。
- 4) 改变 R_L 值，测量端口电压 U_L 、端口电流 I ，填入表 2-3 中。
- 5) 根据表 2-3 中 U 、 I 的值，计算 R_L 电阻值和功率 P_L 值，填入表 2-3 中。

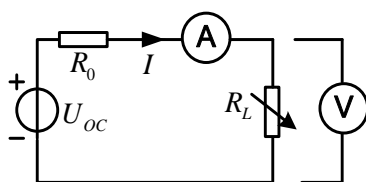


图 2-7 外特性坐标曲线图

表 2-3 验证最大功率传输定理数据

测量数据	I/mA								
	U_L/V				$U_{oc}/2=$				
计算 R_L/Ω									
计算结果	P_L/W								

2.5.3 特勒根定理与互易定理

- 1) 电流的测量。按照图 2-98 的参考方向测量流入、流出节点 a 的电流 I_1 、 I_2 、 I_3 或 \hat{I}_1 、 \hat{I}_2 、 \hat{I}_3 ，计入表 2-4 中，并计算 $\sum_k I_k = 0$ 或 $\sum_k \hat{I}_k = 0$ 是否成立。

注意事项：所测电流值的正负号，应根据电流的实际流向与参考方向的关系来确定，而约束方程 $\sum I_k = I_1 + I_2 + I_3$ 中 I 前边的正负号是由基尔霍夫电流定律根据电流的参考方向确定的，这是对电流参考方向的二次定义，实验中应予以注意。

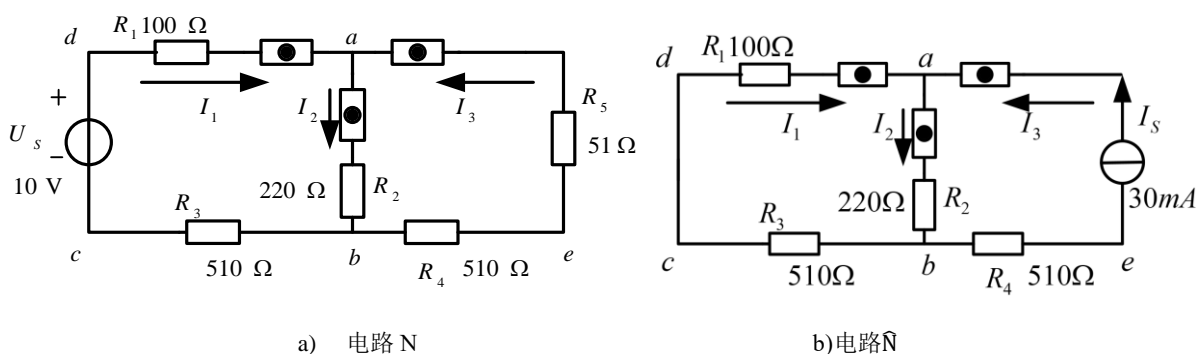


图 2-98 拓扑结构相同的两个电路

- 2) 回路中各节点之间电压的测量。按照表格中规定的回路参考方向进行各节点之间电压的测量，将测量结果记入表格中，并计算 $\sum_k U_k = 0$ 或 $\sum_k \hat{U}_k = 0$ 是否成立。
- 3) 根据表 2-4 的数据，电流与电压取相关关联参考方向，计算 $\sum_k U_k I_k = 0$ ， $\sum_k \hat{U}_k \hat{I}_k = 0$ ， $\sum_k U_k \hat{I}_k = 0$ ， $\sum_k \hat{U}_k I_k = 0$ 是否成立，若不成立请分析原因。将计算结果及必要的计算步骤记入表 2-5 中。

表 2-4 电路 N 与 \hat{N} 测量数据及计算结果

节点 a	测量值	I_1/mA	I_2/mA	I_3/mA	/	$\sum I_k = 0$
	电路 N					
	测量值	\hat{I}_1/mA	\hat{I}_2/mA	\hat{I}_3/mA	/	$\sum \hat{I}_k = 0$
	电路 \hat{N}					
回路 a-b-c-d-e	测量值	U_{ab}/V	U_{bc}/V	U_{cd}/V	U_{da}/V	$\sum U_k = 0$
	电路 N					
	测量值	\hat{U}_{ab}/V	\hat{U}_{bc}/V	\hat{U}_{cd}/V	\hat{U}_{da}/V	$\sum \hat{U}_k = 0$
	电路 \hat{N}					
回路 a-b-e-a	测量值	U_{ab}/V	U_{be}/V	U_{ea}/V	/	$\sum U_k = 0$
	电路 N					
	测量值	\hat{U}_{ab}/V	\hat{U}_{be}/V	\hat{U}_{ea}/V	/	$\sum \hat{U}_k = 0$
	电路 \hat{N}					

表 2-5 根据测量值的计算结果

$\sum_k U_k I_k = \sum_k P_k = 0$	
$\sum_k U_k \hat{I}_k = 0$	

$\sum_k \widehat{U}_k I_k = 0$	
$\sum_k \widehat{U}_k \widehat{I}_k = 0$	

2.6 实验注意事项

1. 不允许带电接线。
2. 用电压表和电流表调好电压源和电流源的数值，电源才能接入电路。
3. 在实验过程中，不允许带电换线、换元件。
4. 在实验过程中，电压源不允许短路，电流源不允许开路。
5. 测量电压、电流时，电压表要与被测元件并联，电流表要与被测支路串联。

2.7 故障分析与检查排除

参见实验一中 1.7。

2.8 实验思考题

1. 总结利用等效电源定理化简复杂电路的适用条件。
2. 如何判断含源支路是发出功率还是吸收功率？
3. 最大功率传输定理的应用范围？是否适用于交流电路？
4. 总结二次定义的参考方向对应用特勒根定理的重要性。

2.9 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由曲线得出的数据在实验后完成，并填入相应的数据记录表中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验三元件参数测量和阻抗的串并联

3.1 实验目的

1. 正确掌握电量仪的使用方法；
2. 学会用相位法和功率法测量电感线圈、电阻器、电容器的参数，学会根据测量数据计算出串联参数 R 、 L 、 C 和并联参数 G 、 B_L 、 B_C ；
3. 通过对电阻器、电感线圈、电容器串联、并联和混联后阻抗值的测量，研究阻抗串并联、混联的特点；
4. 通过测量阻抗，加深对复阻抗、阻抗角、相位差等概念的理解；
5. 学习用电压表、电流表结合画向量图法测量复阻抗。

3.2 实验预习要求

1. 复习阻抗，导纳以及正弦电路的相量分析法的理论知识；完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据。
2. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项；
3. 根据实验电路计算所要求测试的理论数据，填入实验报告相关表格中。

3.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	三相空气开关	1 块	32121001
2	单相调压器	1 块	30121058
3	单相电量仪	1 块	30121098
4	测电流插座	3 个	
5	电阻	1 只	15 Ω /10W
6	电感线圈	1 个	500N+铁芯
7	电容	1 只	220 μ F/70V
8	小电容	1 只	2.2 μ F
9	手持万用表	1 台	Fluke17B+
10	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
11	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm×298mm

3.4实验原理

3.4.1 阻抗、导纳

电感线圈、电阻器、电容器是常用的元件。电感线圈是由导线绕制而成的，必然存在一定的电阻 R_L ，因此，电感线圈的模型可用电感 L 和电阻 R_L 来表示。电容器则因其介质在交变电场作用下有能量损耗或有漏电，可用电容 C 和电阻 R_C 作为电容器的电路模型。线绕电阻器是用导线绕制而成的，存在一定的电感 L ，可用电阻 R 和电感 L 作为电阻器的电路模型。图 3-1 是它们的串联电路模型。

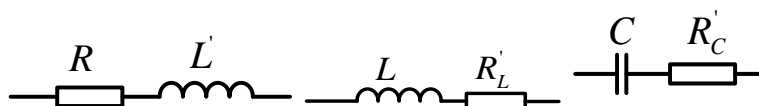


图 3-1 串联模型

根据阻抗与导纳的等效变化关系可知，电阻与电抗串联的阻抗，可以用电导 G 和电纳 B 并联的等效电路代替，由此可知电阻器、电感线圈和电容器的并联电路模型如图 3-2 所示。

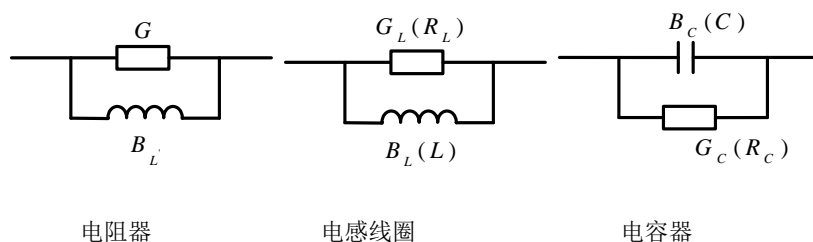


图 3-2 电阻器、电感线圈、电容器的并联电路模型

值得指出的是：对于电阻器和电感线圈可以用万用表的欧姆档测得某值，但这值是直流电阻，而不是交流电阻（且频率越高两者差别越大）；而在电容器模型中， R_C 也不是用万用表欧姆档测出的电阻，它是用来反映交流电通过电容器时的损耗，需要通过交流测量得出。

在工频交流电路中的电阻器、电感线圈、电容器的参数，可用下列方法测量：

方法一：相位表法

在图 3-3 中，可直接从各电表读得阻抗 Z 的端电压 U ，电流 I 及其相位角 φ 。当阻抗 Z 的模 $|Z| = U/I$ 求得后，再利用相位角便不难将 Z 的实部和虚部求出。如：当测出电感线圈两端电压 U 、流过电感线圈电流 I 及其相位角 φ ，显然 $R_L = \frac{U \cos \varphi}{I}$ ， $L = \frac{U \sin \varphi}{I\omega}$ 。其并联参数 G 、 B_L 如何根据 U 、 I 、 φ 值计算，由实验者自行推导。

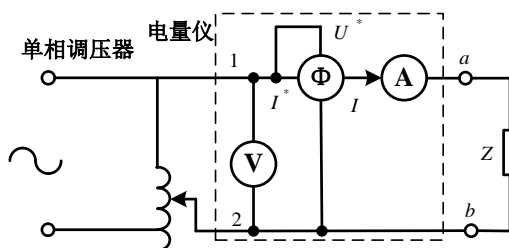


图 3-3 相位表法测量

方法二：功率表法

在生产部门，功率表较多，相位表较少，将图 3-3 中的相位表换为电量仪，如图 3-4 所示，由图 3-4 可直接测得阻抗的端电压，流过的电流及其功率，根据公式 $P=UI\cos\varphi$ 即可求得相位角 φ ，其余与上法相同，从而求得 Z 的实部与虚部。

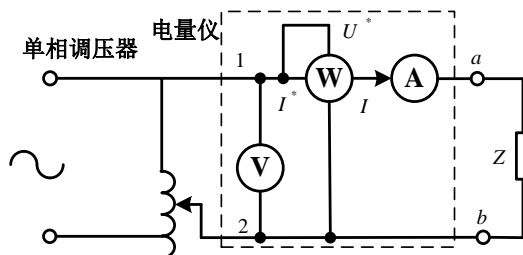


图 3-4 功率表法测量

功率表法不能判断被测阻抗是容性还是感性，本实验采用如下方法加以判断：在被测网络输入端并接一只适当容量的小电容，如电流表的读数增大，则被测网络为容性，（即虚部为负），若电流表读数减小，则为感性（即虚部为正）。

3.4.2 总阻抗、总导纳

交流电路中两个元件串联后总阻抗等于两个复阻抗之和，即：

$$Z_{\text{总}}=Z_1+Z_2$$

两个元件并联，总导纳等于两个元件的复导纳之和，即：

$$Y_{\text{总}}=Y_1+Y_2$$

两个元件并联，然后再与另一个元件串联，则总阻抗应为：

$$Z_{\text{总}}=Z_3+\frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}$$

在实验 3.4.1 中，用 V 、 A 、 φ 表法或 V 、 A 、 W 表法测元件阻抗是很方便的，但如果没有相位表和功率表，仅有电压表和电流表而又欲测复阻抗，则可以用下面所述的画向量图法来确定相位角。

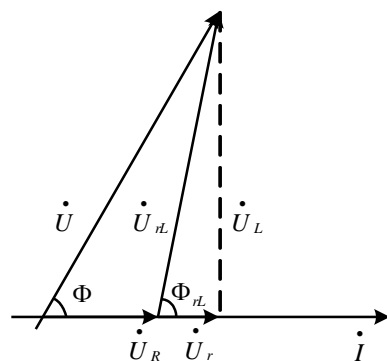


图 3-5

如果图 3- 的电阻器和电感线圈的复阻抗有待测量，可以用电压表分别测出有效值 U 、 U_R 、 U_{rL} ，用电流表测出电流有效值 I ，（电阻 R 的感性分量可忽略不计，阻性分量计算根据实验 3.4.1 实际值代入。）绘制向量图如图 3-5 所示。

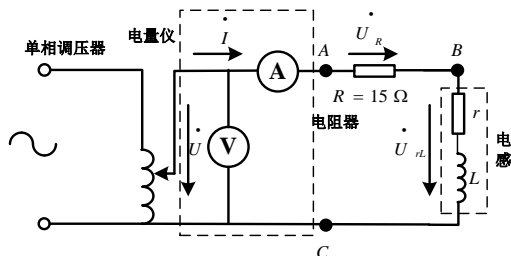


图 3-6

在绘制向量图时，由于相位角不能测出，只好利用电压 U 、 U_R 、 U_{rL} 组成闭合三角形，根据所测电压值按某比例尺（如每厘米表示 3V）截取线段，用几何方法画出电压三角形，然后根据电阻器的电压与电流同

相位，确定画电流向量的位置，电流的比例尺也可以任意确定（如每厘米 0.1A）。

根据电压表、电流表所测得的值以及从画出的向量图用量角器量出的相位角值，显然可得出复阻抗 Z_{AB} 、 Z_{BC} 及串联后的总阻抗 Z_{AC} ，从而得出 r 、 L 的值。

这种方法也适用于阻抗并联，可以根据上述相似的办法画出电流三角形，再根据其中一支路元件的电压与电流相位关系确定电压向量。为了使从图中量出的角度精确，建议作图应大一些，即选取电流比例尺小一些，如每厘米代表 0.1A 或 0.05A。

3.5 实验步骤

在进行实验操作之前，请对实验仪器及元件进行检测，确保仪器仪表工作正常，元件参数值和电路图所标参数吻合。

检测内容包括：

- 1、单相调压器电压是否归零；
- 2、电量仪工作是否正常；（这里使用的电量仪既可以测试相位，又可以测试功率，测相位时，选择 Φ 测试档，测试功率时，选择 W 测试档）
- 3、根据电路图从元件盒中找到所需电阻，并用万用表的电阻测试端（ Ω 档），测量电阻值，确保阻值正确；
- 4、根据电路图从元件盒中找到需要的电容，并用万用表的电容测试端，测量电容值，确保容值正确；
- 5、从元件盒中找到需要的电感线圈，将铁芯插入电感线圈中；

完成上述工作后，才能进行实验：

3.5.1 元件参数测量

1. 按图 3-3 接线。打开三相空气开关，打开电量仪的开关，将单相调压器旋钮逆时针归零。
2. 图中阻抗 Z 分别取： $R=15\Omega$ 、**电感线圈 $L=28\text{mH}$ （500 圈+磁芯）**和电容器 $C=220\mu\text{F}$ 。调节单相调压器使电量仪中的电流表的读数为 0.5A 左右，使用电量仪测量电压、电流及相位角值，也可使用万用表的交流电压档测试电压，记录于表 3-1 中。

注意事项：

使用电量仪测试相位角时，电量仪上电流测试端口标注着 A，需要串联进入电路，电压测试端口标注着 V，需要并联在电路上，并且两者的*端口需要连接在一起。按上下箭头按钮选择 Φ ，指示灯亮，在第一行显示相位角的角度值。

例如，右图第一行显示的角度是 53 度，第二行是测试的交流电压为 220V，第三行是串联测试的交流电流 5A。

电路连接完毕后，检查后，才可上电，调节调压器的时候，顺时针为增加，注意小心操作，加电压太高可能引起元器件过功率损坏。

由于电量仪既可以测试相位角也可以测试功率，所以下面表 3-1 和表 3-2 可以一起做

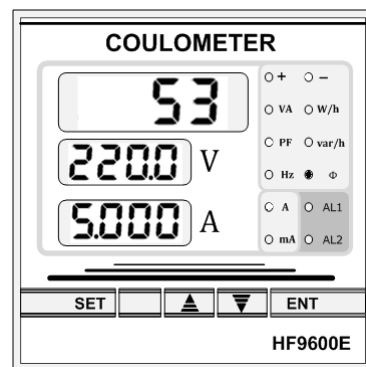


表 3-1 相位法测量元件参数

	电流 I (A)	电压 U (V)	相位角 φ
电感线圈			
电阻器			
电容器			

3. 同步骤 2，测量电压及功率值，记录于表 3- 2 中。在电量仪上，按上下箭头按钮选择 W，指示灯亮，在第一行显示功率值。

表 3-2 功率法测试元件参数

	电流 I (A)	电压 U (V)	$P(W)$	正负
电感线圈				
电阻器				
电容器				

4. 计算。

根据步骤 2 计算出表 3-3。

$$\text{例：电感：电阻值} + j \text{电感值} = \frac{U}{I} \cos \varphi + j \frac{U}{I} \sin \varphi$$

$$L = \frac{U \sin \varphi}{I \cdot 2\pi f}$$

下面所有的计算值，可以使用 $f=50Hz$ 等效计算。

表 3-3 相位法计算值

	电阻值（实部）	感抗/容抗（虚部）	电感值/电容值
电感线圈			
电阻器			
电容器			

根据步骤 3、4 计算表 3-4。

$$\varphi = \arccos \frac{P}{UI}$$

表 3-4 功率法计算值

	电阻值（实部）	感抗/容抗（虚部）	电感值/电容值
电感线圈			
电阻器			
电容器			

3.5.2 阻抗的串联、并联和混联

1. 研究阻抗的串联、并联和混联

1) 测量电阻器与电感线圈串联的阻抗 $Z_{\text{总}}$ ，自行选用仪器设备，设计实验电路图并画出记录数据的表格。（可按照 3.5.1 的方法来测试，自行设计电路图，并画出电路图，记录数据）

注意：自行设计电路图实验时，单相调压器的输出电流不要超过 0.5A。否则电阻容易过功率损坏。

表 3-5 电阻器和电感线圈串联的复阻抗测试

	电流 I (A)	电压 U (V)	相位角 φ or 功率 P (W)
$Z_{\text{总}}$			
	电阻值（实部）	感抗/容抗（虚部）	电感值/电容值

根据测试数据，求出 $Z_{总}$ ，利用实验 3.5.1 数据计算出 Z_1 、 Z_2 ，验证串联时 $Z_{总}=Z_1+Z_2$ 。

2) 测量电阻器与电感线圈并联的总导纳 $Y_{总}$ ，自行设计实验电路和记录数据的表格。（可按照 3.5.1 的方法来测试，自行设计电路图，并画出电路图，记录数据）

表 3-6 电阻器和电感线圈并联的负阻抗测试

	电流 I (A)	电压 U (V)	相位角 φ or 功率 P (W)
$Y_{总}$			
	电导值 (实部)	电纳值 (虚部)	电感值/电容值

根据测试数据，求出 $Y_{总}$ ，利用实验 3.5.1 数据计算出 Y_1 、 Y_2 ，验证并联时 $Y_{总}=Y_1+Y_2$ 。

3) 测量电阻器与电感线圈并联，再与电容器串联后的总阻抗 $Z_{总}$ ，自行设计实验电路与记录数据的表格。（可按照 3.5.1 的方法来测试，自行设计电路图，并画出电路图，记录数据）

表 3-7 电阻器与电感线圈并联，再与电容器串联后的总阻抗 $Z_{总}$

	电流 I (A)	电压 U (V)	相位角 φ or 功率 P (W)
$Z_{总}$			
	电阻值 (实部)	感抗/容抗 (虚部)	电感值/电容值

根据测试数据求出 $Z_{总}$ ，利用实验 3.5.1 数据计算出 Z_1 、 Z_2 、 Z_3 ，验证 $Z_{总}=Z_3+\frac{Z_1Z_2}{Z_1+Z_2}$ 。

2. 用伏特表-安培表法测元件参数

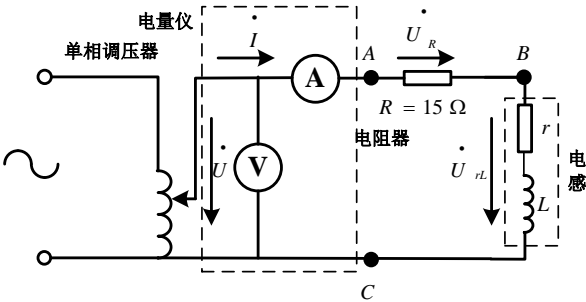
4) 按图 3- 接线，调节调压器使 $I=0.5A$ ，用万用电表交流电压档测量 U 、 U_R 、 U_{rL} 之值。

表 3-8 使用伏特表-安培表法测元件参数

	电流 I (A)	电压 U (V)	电压 U_R (V)	电压 U_{rL} (V)
$Z_{总}$				
	电阻值 (实部)	感抗/容抗 (虚部)	电感值/电容值	

根据测试数据，画出各电压向量图，求出复阻抗 Z_1 (电阻器)、 Z_2 (电感线圈) 及 $Z_{总}$ ，求出电感线圈的电阻 r 和电感量 L 。

注意事项：万用表的交流电压档，用 V 的，不能使用 mV 的交流电压档。



5) 按图 3-6 接线，调节调压器使流过电感线圈的电流为 1A，使用万用表的交流电流档，测出电流 I 、 I_1 、 I_2 及交流电压 U 的有效值，测量电流时，使用测电流插座，串入电路中，使用测电流导线接到万用表进行测量。

注意事项：使用万用表的交流电流档测试时，使用 A 档，且万用表的红色端，应该选择 A 端口，黑色端位 COM 口。电流测量和电压测量使用的接线端口不一致！

表 3-9 使用伏特表-安培表法测元件参数

	电压 U (V)	电流 I (A)	电流 I_1 (A)	电流 I_2 (A)
$Y_{\text{总}}$				
	电导值 (实部)	电纳值 (虚部)	电感值/电容值	

根据测试数据，画出各电流向量图，求出复导纳 Y_1 (电阻器)、 Y_2 (电感线圈) 和 $Y_{\text{总}}$ 。

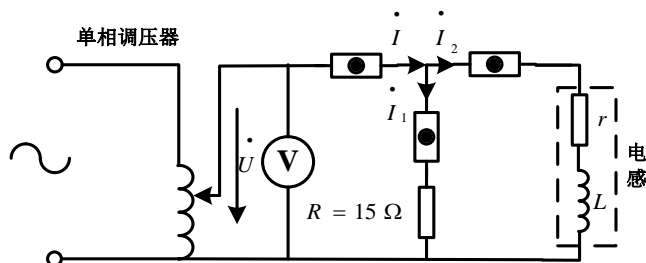


图 3-6

3.6 实验注意事项

1. 不允许带电接线。
2. 用单相调压器需要逆时针旋到 0，才能上电，并且每次实验都应该断开三相电，改接电路后，再上电实验。
3. 在实验过程中，不允许带电换线、换元件。
4. 在实验过程中，注意功率仪的电压表和电流表的接法，“*”端为一个点。
5. 使用万用表测量电压和电流时，接的端口不一致，注意更换。
6. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据，方可进行下一步实验。
7. 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。
8. 遵守实验室的各项规章制度。

3.7 故障分析与检查排除

参见实验一中 1.7。

3.8 实验思考题

1. 相位法和功率法测得的电阻值，电感值，电容值是否一致？如果存在少许差异，请进行可能的原因分析。
2. 比较相位法与电压表、电流表向量图法测出的阻抗与导纳是否一致。如果存在少许差异，请进行可能的原因分析。

3.9 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；

2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由曲线得出的数据在实验后完成，并填入相应的数据记录表中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验四日光灯功率因数校正实验

4.1 实验目的

1. 进一步理解交流电路中电压、电流的相量关系。
2. 学习日光灯电路的连接方法，熟悉日光灯的工作原理。
3. 通过实验掌握提高感性负载电路功率因数的方法。

4.2 实验预习要求

1. 熟悉 R 、 L 串联电路中电压与电流的关系。
2. 预习日光灯的工作原理，启动过程。
3. 在 R 、 L 串联与 C 并联的电路中，如何求 $\cos\varphi$ 值。完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据。

4.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	三相空气开关	1 块	32121001
2	三相熔断器	1 块	30121002
3	日光灯开关板	1 块	30121012
4	日光灯镇流器板带电容	1 块	30121036
5	单相电量仪	1 块	30121098
6	安全导线与短接桥（强电短接桥黑色）	若干	P12-1 和 B511

4.4 实验原理

本实验中 RL 串联电路用日光灯代替，日光灯原理电路如图 4-1 所示。日光灯电路主要由日光灯管、辉光启动器和镇流器组成。

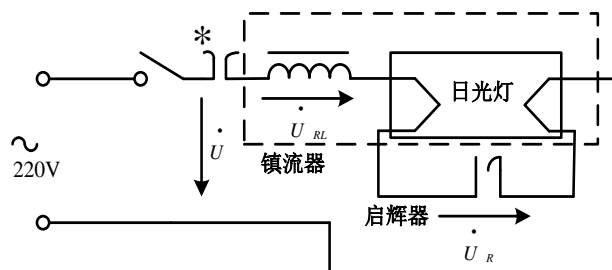


图 4-1 日光灯线路图

灯管工作时，可以认为是一电阻负载。镇流器是一个铁心线圈，可以认为是一个电感量较大的感性负载，两者串联构成一个 RL 串联电路。日光灯起辉过程如下：当接通电源后，启动器内双金属片动片与定片间的气隙被击穿，连续发生火花，双金属片受热伸长，使动片与定片接触。灯管灯丝接通，灯丝预热而发射电子，此时，启动器两端电压下降，双金属片冷却，因而动片与定片分开。镇流器线圈因灯丝电路断电而感应出很高的感应电动势，与电源电压串联加到灯管两端，使管内气体电离产生弧光放电而发光，此时启动器停止工作，（因启动器两端所加电压值等于灯管点燃后的管压降，对 40W 管电压，只有 100V 左右，这个电压不再使双金属片打火）。镇流器在正常工作时起限流作用。

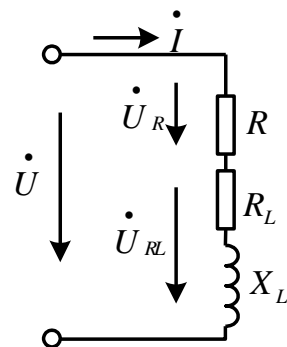


图 4-2 日光灯等效电路图

日光灯工作时整个电路可用图 4-2 等效串联电路来表示。

日光灯电路的功率因数较低，一般在 0.5 以下，为了提高电路的功率因数，可以采用与电感性负载并联电容器的方法。此时总电流 I 是日光灯电流 I_{RL} 和电容器电流 I_C 的相量和： $\dot{I} = \dot{I}_C + \dot{I}_{RL}$ ，日光灯电路并联电容器后的相量图如图 4-3 所示。由于电容支路的电流 I_C 超前于电压 U 90° 角。抵消了一部分日光灯支路电流中的无功分量，使电路的总电流 I 减小，从而提高了电路的功率因数。电压与电流的相位差角由原来的 φ_1 减小为 φ_C ，故 $\cos \varphi_C > \cos \varphi_1$ 。当电容量增加到一定值时，电容电流 I_C 等于日光灯电流中的无功分量， $\varphi_C = 0$ 。此时总电流下降到最小值，整个电路呈电阻性。若继续增加电容量，总电流 I 反而增大，整个电路变为容性负载，功率因数反而下降。

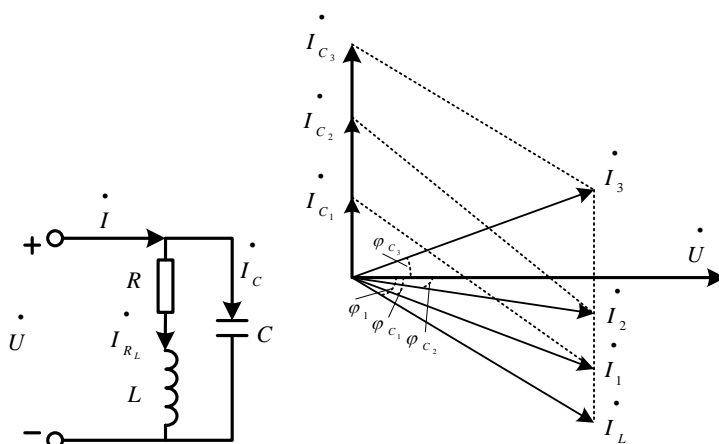


图 4-3 日光灯并联电容器调节功率因数原理

4.5 实验步骤

注意事项：

强电实验，注意接线和操作安全，手不能碰线路中金属裸露的地方。

测试的数据较多，需更换电路较多，先断电，再更换电路，检查完毕后才能上电。

1. 日光灯电路连接操作。按图 4-1 接好线路，接通电源，观察日光灯的启动过程。

注意事项：本次实验电压较高，连接电路应使用强电专用导线，并严格遵守“先接线后通电”，“先断电后拆线”的操作顺序。注意日光灯电路的正确连接，日光灯灯管与镇流器必须串联，以免损坏灯管。

2. 日光灯电路测量操作。测日光灯电路的端电压 U ，灯管两端电压 U_R 、镇流器两端电压 U_{RL} 、电路电流 I 以及总视在功率 S 、有功功率 P 、无功功率 Q ，相位角 $\cos \phi$ ，灯管的视在功率 S_R 、有功功率 P_R 、无功功率 Q_R ，镇流器的视在功率 S_{RL} 、有功功率 P_{RL} 、无功功率 Q_{RL} 。数据记录于表 4-1。

3. 并联补偿电容提高功率因数的实验研究。日光灯电路两端并联电容，接线如图 4- 4。逐渐加大电容量，每改变一次电容量，都要测量端电压 U ，总电流 I ，日光灯电流 I_{RL} ，电容电流 I_C 以及总有功功率 P 之值，记录于表 4-2（注意上电后测量数据，稳定后再读数。数据测试较多，请同学们分析下怎么让提高测试效率，减少重复接线）。
4. 根据实验测量数据，绘制日光灯负载并联电容器(1 μF ，3.7 μF 及 6.7 μF)前后的相量图，包括： I_{RL} ， I ， I_C ，对比相量图合成的 I 和实际测试的 I ，说明感性负载并联电容可以提高功率因数的原理。

注意事项：

此处测电流不允许使用测电流插孔，因为电压较高，只能使用电量仪的电流表或者万用表，测不同的电流需要更换电路，更换电路前，一定要断电。使用万用表不能使用 mA 档（400mA），需要使用 A 档。如果测试数据跳动，请记录平均值。

并联电容时，如果开关不关上，会有打火的声音，危险，对电容的寿命也有影响。一定要关上开关，再并联电容。

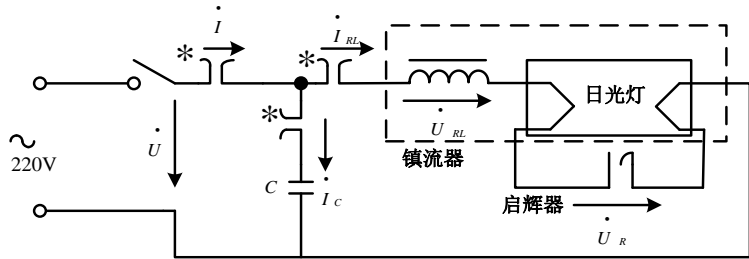


图 4- 4 日光灯并联电容器调节功率因数电路连接图

表 4- 1 日光灯电路参数测量记录

U	U_R	U_{RL}	I	S	P	Q
S_R	P_R	Q_R	S_{RL}	P_{RL}	Q_{RL}	$\cos\varphi$

表 4- 2 日光灯两端并联电容器后的参数测量记录

电容 (μF)	测量数据						计算
	$U(V)$	$I(A)$	$I_{RL}(A)$	$I_C(A)$	$P(W)$	φ	$\cos\varphi$
1							
2							
3							
3.7							
4.7							
5.7							
6.7							

4.6 注意事项

1. 遵守实验室的各项规章制度。
2. 在实验过程中不允许带电换线、换元件。更换电路，拆换元器件，必须断电再操作，检查后才能重新上电。
3. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据，签字，方可进行下一步实验。
4. 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。

4.7 故障分析与检查排除

参见实验一中 1.7。

4.8 实验思考题

1. 并联电容提高 $\cos\varphi$ 时，电容的选择应考虑哪些原则？
2. 并联电容后，单相功率表的相位、有功功率，无功功率，视在功率有何变化？为什么？

4.9 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由数据得出的曲线在实验后完成，并画在坐标纸上，贴在报告中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验五三相电路

5.1 实验目的

1. 掌握三相负载的两种联结方式；
2. 掌握三相电源相序和功率的测量方法；
3. 了解三相电路中电压、电流的线值和相值的关系；
4. 了解三相四线制中线的作用。

5.2 实验预习要求

1. 学习电路教材中三相电路部分的相应内容，试分析若三相电源某根相线断路时，三相负载工作是否正常；当某相负载出现断路或短路故障时，其他相负载能否正常工作。
2. 预习有关数字万用表、三相电能质量分析仪等仪器设备使用的相关知识。
3. 预习实验中所用到的相关定理、定律和有关概念。完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据。
4. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项。

5.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	三相熔断器	1	30121002
2	数字万用表	1	Fluke17B+
3	三相电源	1	
4	三相空气开关	1 块	32121001
5	白炽灯	8 只	
6	安全导线与短接桥	若干	
7	三相电能质量分析仪	1	Fluke 434II
8	电流探头	3	I5S （和 Fluke 434II配套）
9	电容	若干	1 μ F, 2 μ F, 4.7 μ F (500Vac, 日光灯板上)

5.4 实验原理

5.4.1 三相电源相序的测量方法

三相电源相序的测定：三相电源从超前到滞后的次序称为相序。实验室测定三相电源的相序常使用相序指示灯，如图 5- 1 所示。它由电容器和两个功率相同的白炽灯构成星形连接，接至三相对称电源。根据

两个白炽灯亮度差异可确定对称三相电源的相序。

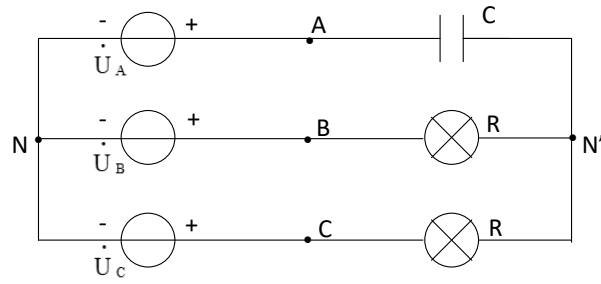


图 5-1 相序指示器

假设三相电源的相序如图 5-1 所示，即把接电容器的作为 A 相，设 $R = 1/\omega C$ ，对图 5-1 列节点电压方程可得

$$\dot{U}_{NN'} = \frac{j\omega C \dot{U}_{AN} + \dot{U}_{BN}/R + \dot{U}_{CN}/R}{j\omega C + 1/R + 1/R} = \frac{j + a^2 + a}{j + 1 + 1} \dot{U}_{AN} \approx (-0.2 + j0.6) \dot{U}_{AN}$$

B 相和 C 相所接的白炽灯电压分别为：

$$\dot{U}_{BN'} = \dot{U}_{BN} - \dot{U}_{N'N} = a^2 \dot{U}_{AN} - (-0.2 + j0.6) \dot{U}_{AN} \approx (1.5 \angle -101.5^\circ) \dot{U}_{AN}$$

$$\dot{U}_{CN'} = \dot{U}_{CN} - \dot{U}_{N'N} = a \dot{U}_{AN} - (-0.2 + j0.6) \dot{U}_{AN} \approx (0.4 \angle 138^\circ) \dot{U}_{AN}$$

因为 $U_{BN'} = 1.5U_{AN}$, $U_{CN'} = 0.4U_{AN}$ ，所以白炽灯较亮的那一相是 B 相，较暗的是 C 相。

5.4.2 负载星形联结和负载三角形联结对称的测量

1. 三相负载的星形联结方式

三相负载星形（或称 Y 形）联结方式如图 5-2 所示，即将三相负载的末端 X' 、 Y' 、 Z' 连接在一起（图中的 N' 点，此点称中性点）。另一端分别接至三相电源 A 、 B 、 C 端。若将 N 点和 N' 点相连，电源和负载用了 4 根导线，故称三相四线制。从电源 A 、 B 、 C 端引出的 3 根导线称为相线（俗称火线），中性点之间的连线称中性线（也称零线）。在负载星形连接的三相正弦电流电路中，线电流等于相电流，若相电压对称，则线电压有效值为相电压有效值的 $\sqrt{3}$ 倍。

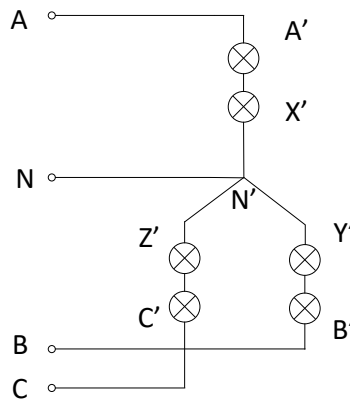


图 5-2 三相负载的星形联结

2. 三相负载的三角形联结方式

三相负载的三角形联结如图 5-3 所示，将三相负载按始端和末端依次相连，再将每相的始端或末端与电源相连。在三角形联结的三相正弦电路中，线电压等于相电压，若相电流对称，则线电流的有效值为相电流有效值的 $\sqrt{3}$ 倍。

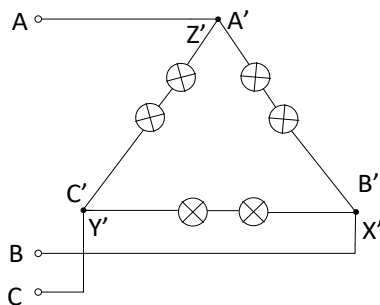


图 5-3 三相负载的三角形联结

5.4.3 三相电路功率的测量

1. 对称三相正弦电路

对称三相正弦电路中，负载不论接成星形还是三角形，其有功功率为

$$P = \sqrt{3}U_L I_L \cos \varphi$$

式中 φ 是相电流滞后相电压的相位差， $\cos \varphi$ 是负载各相的功率因数，也是对称三相负载的功率因数。

对称三相电路的有功功率等于其中一相有功功率的 3 倍。

对称三相电路无功功率为

$$Q = \sqrt{3}U_L I_L \sin \varphi$$

对称三相电路的视在功率为

$$S = \sqrt{3}U_L I_L$$

2. 不对称三相电路

不对称三相电路中，各相电压之间和各相电流之间均无特定关系，只能分别测量各相的功率。负载的有功功率应等于其中各相有功功率之和，即

$$P = P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C$$

不对称三相电路的无功功率为

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C$$

不对称三相负载的功率因数定义为

$$\lambda = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}$$

三相电能质量分析仪可以替代传统实验方法的电压表、电流表和功率表。测量时应先确定三相电源的相序，并注意电流钳夹的接线方向，才能保证正确测量功率值。

5.5 实验步骤

注意事项:

- ◆本次实验是强电实验,电压较高,切记保证不带电作业。即:在接线、查线、改线、拆线时要切断电源。并严格遵守“先接线后通电”,“先断电后拆线”的操作顺序,确保人身安全和仪器仪表的安全。
- ◆使用三相电源时,不要使用电感,否则会产生 220V 以上的电压,易发生危险或损坏设备。
- ◆负载联结方式改变时,分析仪的接线方式不需要改变。
- ◆因有高温,做实验时勿触摸灯泡,也不要将导线等物体放在灯泡上。

5.5.1 电源相序的测量

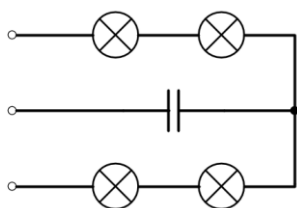


图 5-4 相序器

三相负载如图 5-4 所示, 其中一个负载为 $1\mu\text{F}$ 或者 $2\mu\text{F}$ 的电容 (日光灯的表板处), 另两个负载为两只灯泡, 为便于观察亮度, 四只灯泡的颜色应相同。通过实验的方法验证三相交流电源相序是否与实验台给出的相序一致。

- (1) 本次实验电源为线电压 220V、频率 50Hz 的工频交流电, 输出端 L1、L2、L3 三个接线柱为 A 相、B 相和 C 相输出端, 下方 N 线接线柱为零线。空气开关使用时应扳至上方, 如发生短路开关将自动跳下断开电源。
- (2) 将图 5-4 所示的相序器接到对称三相电源上, 不接中线, 当接电容的一相为 A 相时, 灯泡较亮的一相为 B 相, 较暗的一相为 C 相。

5.5.2 三相电路的电压电流测量

5.5.2.2 负载星形联结

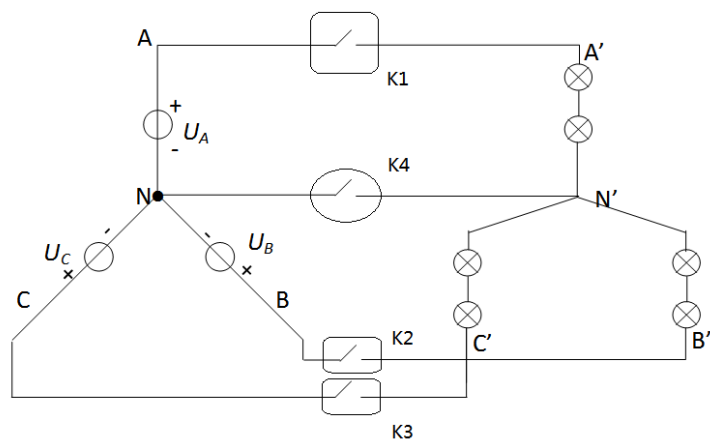


图 5-5 三相四线制白炽灯照明系统

三相四线制电路如图 5- 5 所示，其中，K1，K2，K3 为板上的三相空开，K4 可以使用日光灯板上的 QS，负载星形联结且每相两只白炽灯。其中 A、B、C 分别为三相电源的输出端，N 和 N'分别为电源中性点和负载中性点。

- 1) 测量各相负载电压、线电压、线电流、N 和 N'的电压和电流，将结果填入表 5- 1。总结负载对称时线电压和相电压之间的关系，拍照给老师检查。
- 2) 结合 5.5.1 的相序结果在图 5- 6 中绘制三相相电压、线电流波形示意图。

表 5- 1 三相四线制对称负载电压、电流测量结果

相电压/V			线电压/V			中线电流/mA	中线电压/V
$U_{A'N'}$	$U_{B'N'}$	$U_{C'N'}$	$U_{A'B'}$	$U_{B'C'}$	$U_{C'A'}$	I_N	U_{NN}
负载星形联结时，相电压与线电压之间数值关系：							

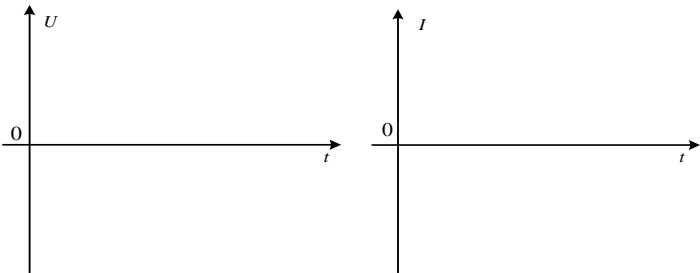


图 5- 6 三相相电压、线电流波形示意图

- 3) 保持电路其它部分不变，断开 N 和 N'之间的连线，测量以上的电压、电流，测量数据填入表 5-2 中，分析比较对称负载无中线和有中线的区别。
- 4) 将 C 相负载的白炽灯多加 2 只，即 4 只白炽灯串联工作，其它两相仍为 2 只串联工作（不对称负载），分别测量有中线和无中线时的各电量值，测量数据填入表 5- 2 中。

表 5- 2 测量数据记录表

		对称负载		不对称负载	
		有中线	无中线	有中线	无中线
相电压 (V)	$U_{A'N'}$				
	$U_{B'N'}$				
	$U_{C'N'}$				
电流 (A)	I_A				
	I_B				
	I_C				
	I_N				

测量提示：1.本次实验为高电压实验，连接电路时应使用三相实验专用导线、三相实验专用转换夹、三相实验专用电流插头；2.三相电压的测量可使用数字万用表或者用电能质量分析仪；3.负载不对称但有中性线时，各相负载电压仍对称，但此时的中性线电流不为零，中性线的作用在于使星形联结的不对称负载的相电压对称。4. 5.5.2.1 可和 5.5.3.1 的功率测量同时进行。

5.5.2.2 负载三角形联结

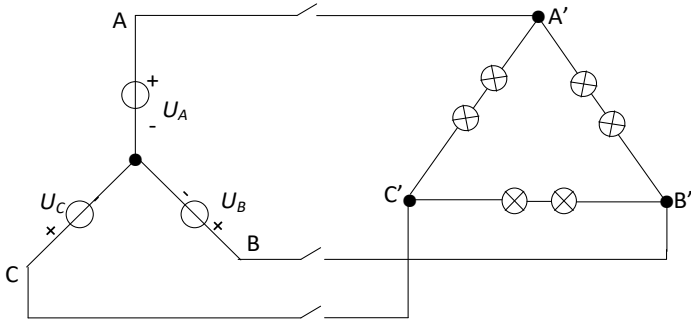


图 5-7 负载三角形联结

电路如图 5- 7 所示。其中，A、B、C 分别为三相电源的输出端， $A'B'$ 、 $B'C'$ 、 $C'A'$ 间各接两盏内阻相同的白炽灯。

- 1) 测量线电流和相电流，总结线和相电流之间的关系填入表 5- 3 和表 5- 4 中。
- 2) 测量不对称负载（将 C 相负载的白炽灯多加 2 只，即 4 只串联工作，其它两相仍为 2 只串联工作）时的各电量。

提示：三相三线制对称三相电路发生断线、短路等故障时，则成为不对称三相电路，将出现中性点位移现象，实验中各相白炽灯会出现亮暗不一致的现象。

表 5-3 负载三角形联结电压、电流测量结果

相电流/A			线电流/A			相电压/V		
$I_{A'B'}$	$I_{B'C'}$	$I_{C'A'}$	I_A	I_B	I_C	$U_{A'B'}$	$U_{B'C'}$	$U_{C'A'}$
负载三角形联结时，相电流与线电流之间数值关系：								

表 5-4 测量数据记录表

		对称负载	不对称负载
相电压 (V)	$U_{A'B'}$		
	$U_{B'C'}$		
	$U_{C'A'}$		
电流 (A)	I_A		
	I_B		
	I_C		

5.5.3 三相电路功率的测量

5.5.3.2 三相四线制电路中各相负载的功率测量

设置三相电能质量分析仪中的电压、频率、电流的测量范围，选择合适的接线方式。实验电路参考图 5-2，负载星形联结（对称负载时，每相串联两盏白炽灯），当负载为表 5-5 中各种情况时，选择合适的方

法测量各相负载的功率，测量数据填入表中。根据功率测量结果计算电路的总功率，并对实验结果进行分析总结。

表 5-5 三相四线制功率测量

实验内容	有功功率/W			视在功率/V·A			无功功率/var		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
对称负载									
不对称负载 (两相接白炽灯，C 相接 4.7 μ F 电容)									
C 相线断线									

5.5.3.2 三相三线制电路中各相负载的功率测量

保持负载星形联结，断开中性线，测量表 5-6 中负载各种情况下的功率，测量数据填入表中。根据功率测量结果计算电路的总功率，并对实验结果进行分析总结。

提示：请将功率分析仪 N 线接至负载中性点。

表 5-6 三相三线制功率测量

实验内容	有功功率/W			视在功率/V·A			无功功率/var		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
对称负载									
不对称负载 (两相接白炽灯，C 相接 4.7 μ F 电容)									
C 相线断线									
C 相负载短路									

5.5.4 设计实验（选做）

自主设计单相电源裂相为对称三相交流电源的电路图，并分析其原理。

5.6 实验注意事项

1. 遵守实验室的各项规章制度。
2. 在实验过程中不允许带电换线、换元件。
3. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据，签字，方可进行下一步实验。
4. 全部实验做完后，关掉电源，拆线，整理实验台，物归原处，方可离开实验室。

5.7 故障分析与检查排除

1. 电源正常供电且电路连接正确时，若接通开关白炽灯不亮。可用万用表测量白炽灯内阻，若读数为无穷大证明灯丝已断，切断电源及时更换。

5.8 实验思考题

1. 当相序器的电容值改变时，两只灯泡的亮度会有怎样的变化？
2. 试分析若三相电源某根相线断路时，三相负载工作是否正常；当某相负载出现断路或短路故障时，其他相负载能否正常工作。
3. 星形联结时，分析比较对称负载无中线和有中线的区别。每相负载都开两只灯泡时，N 和 N'之间的存在是否对电路有影响？
4. 根据表 5- 2 数据，计算负载星形联接有中线时的相、线电压的数值关系。并按比例画出不对称负载有中线时各电量的相量图。
5. 三相电能质量分析仪测量功率时，有功功率或功率因数出现负值应该如何处理？

5.9 实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；
2. 数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
3. 由数据得出的曲线在实验后完成，并画在坐标纸上，贴在报告中。
4. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
5. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
6. 实验思考题需要写在实验报告里面。

实验六互感电路的测量

6.1 实验目的

1. 掌握互感线圈同名端的判定方法。
2. 掌握互感线圈互感系数的测量方法。

6.2 实验预习要求

1. 熟悉同名端及互感系数的测定方法。
2. 预习实验中所用到的相关定理、定律和有关概念。完成实验报告中的内容：实验的目的、实验原理，实验指导书要求的理论计算数据。
3. 预习实验中所用到的实验仪器的使用方法及注意事项。

6.3 实验仪器与器件

	名称	数量	型号
1	三相空气开关	1 块	32121001
2	单相调压器	1 块	30121058
3	单相电量仪	1 块	30121098
4	双路可调直流电源	1 块	DP832A
5	互感耦合线圈	1 组	1000N*1 500N*2
6	回型铁芯	1 副	-
7	电阻	2 只	10 Ω *1 510 Ω *1
8	发光二极管	1 只	红色 ϕ 5mm
9	电容	1 只	220 μ F*1
10	短接桥和连接导线	若干	P8-1 和 50148
11	实验用 9 孔插件方板	1 块	300mm \times 298mm
12	单位开关	1 个	-
13	示波器	1 台	TEK DSOX2014A
14	电压探头	2	N2841A(与 TEK DSOX2014A 配套)

6.4 实验原理

6.4.1 同名端的判定方法

两个或两个以上具有互感的线圈中，感应电动势（或感应电压）极性相同的端钮定义为同名端（或称

同极性端)。在电路中,常用“•”或“*”等符号标明互感耦合线圈的同名端。同名端可以用实验方法来确定,常用的有直流法和交流法。

1. 直流法

如图 6-1 所示,当开关 S 合上瞬间, $\frac{di_1}{dt} > 0$, 在 1-1' 中产生的感应电压 $u_1 = M \frac{di_1}{dt} > 0$, 2-2' 线圈的 2 端与 1-1' 线圈中的 1 端均为感应电压的正极性端,1 端与 2 端为同名端。(反之,若电压表反偏转,则 1 端与 2' 端为同名端。)

同理,如果在开关 S 打开时, $\frac{di_1}{dt} < 0$, 同样可用以上的原理来确定互感线圈内感应电压的极性,以此确定同名端。

上述同名端,也可以这样来解释,就是当开关 S 打开或闭合瞬间,电位同时升高或降低的端钮即为同名端。如图 1 中,开关 S 合上瞬间,电压表若正偏转,则 1、2 端的电位都升高,所以,1、2 端是同名端。这是若将开关 S 再打开,电压表必反偏转,1、2 端的电位都为降低。(思考:无指针式电压表时,利用实验室现有设备,如何利用直流法来判定同名端。)

2. 交流法

如图 6-12 所示,将两线圈的 1'-2' 串联,在 1-1' 加交流电源。分别测量 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 和 \dot{U}_{12} 的有效值,若 $U_{12} = U_1 - U_2$, 则 1 端和 2 端为同名端;若 $U_{12} = U_1 + U_2$, 则 1 端与 2' 端为同名端。

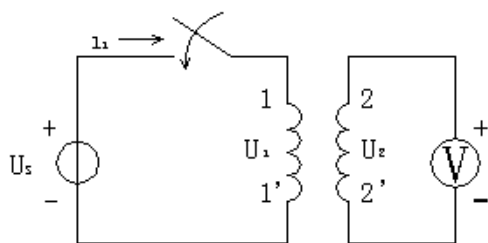


图 6-1 直流法测同名端

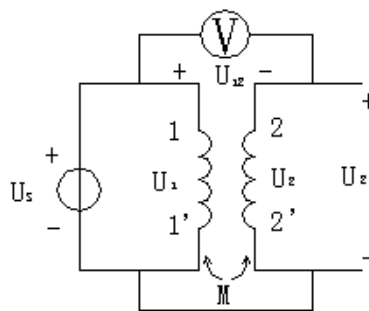


图 6-2 交流法测同名端

6.4.2 互感系数 M 的测定

测量互感系数的方法较多,这里介绍两种方法。

1) 互感电动势法测量互感系数:

如图 6-3 表示的两个互感耦合线圈的电路,当线圈 1-1' 接正弦交流电压,在线圈 2-2' 即可产生互感电压 $\dot{U}_2 = j\omega M \dot{I}_1$, 其中 ω 为电源的角频率, I_1 为线圈 1-1' 中的电流。当电压表的内阻足够大时,可认为

测出的电压 U_2 , 由计算可得互感系数 $M = \frac{U_2}{\omega I_1}$ 。

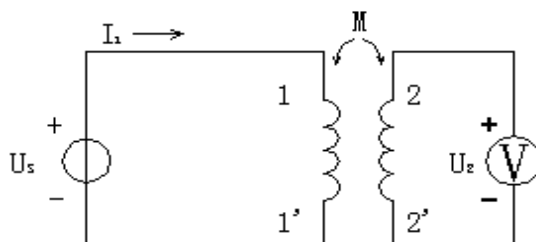


图 6-3 测量开路互感电压

2) 等效电感法测量互感系数:

利用两个互感耦合线圈串联的方法,也可以测量它们之间的互感系数,如图 6-4 所示。二端口耦合电感串联可用一个电感来等效,如电流从同名端流入,称为正串(或顺接),如电流从异名端流入,称为反串(或反接)。

正串时:

$$u = u_1 + u_2 = \left(L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \right) + \left(L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \right) = (L_1 + L_2 + 2M) \frac{di}{dt} = L_{eq} \frac{di}{dt}$$

可得电感正串时的等效电感为: $L_{正} = L_1 + L_2 + 2M$ 。

同理,反串时的等效电感为: $L_{反} = L_1 + L_2 - 2M$ 。

只要分别测出 $L_{正}$ 、 $L_{反}$, 则 $M = (L_{正} - L_{反}) / 4$ 。

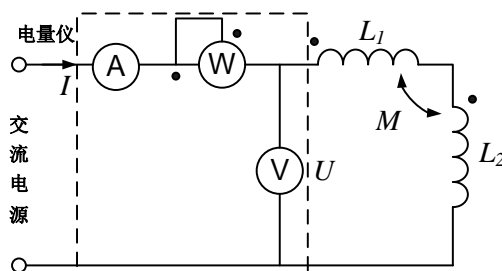


图 6-4 等效电感法测互感系数

6.5 实验步骤

注意事项:

更换元器件,更换电路,一定要断电后,才能操作,更换后,检查完,才能重新上电。输入电压禁止短路。

6.5.1 测定两互感耦合线圈的同名端

分别用图 6-1 所示的直流法 (U_s 取 5V) 和图 6-1 所示的交流法 (U_s 取 5V_{rms}), 测定两端耦合线圈的同名端, 注意两种方法测定的同名端是否相同。在测量时, 两个线圈都必须插入一个条形铁芯 (或者将两线圈内插入一个公共 U 型铁芯), 以增强耦合的程度。使用相同匝数的两线圈 (L_1 与 L_2 线圈匝数同为 500), 记下两线圈的同名端编号。(由于没有指针式电压表, 直流法时可用发光二极管或示波器来观察。)

直流法测试时, 使用单位开关, 当使用发光二极管时, 回路中要串联电阻限制电流至几十 mA, 否则发光二极管容易损坏。下面给出一个使用发光二极管的电路图供参考, 图 6-5, 也可自己设计, 该部分在实验报告中自行完成。

交流法测试时， U_s 为单相调压器输出工频电压交流有效值为 5V 左右。分别测量 \dot{U}_1 、 \dot{U}_2 和 \dot{U}_{12} 的有效值，记录数据： \dot{U}_1 =____， \dot{U}_2 =____， \dot{U}_{12} =____。

将其中一个线圈倒过来再测试同名端， \dot{U}_1 =____， \dot{U}_2 =____， \dot{U}_{12} =____。同名端有变化吗？为什么？

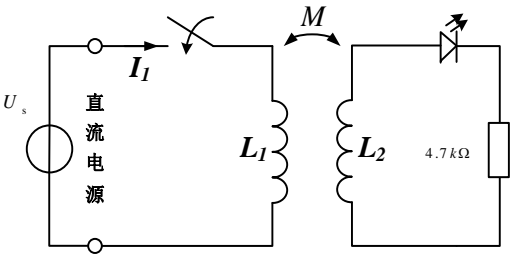


图 6-5 直流法测试同名端

6.5.2 测定两互感耦合线圈的互感系数 M

1. 用开路互感电压法

实验电路如图 6- 6 所示，接入 5V 工频电源电压，改变 L_2 的匝数，在线圈内插入不同的介质材料，观察线圈匝数和介质材料变化对互感的影响，测量 I_1 和 U_2 ，计算相应的 M 值，填入表 6- 1 中。

使用电量仪的电流表测试电流 I_1 ，使用电量仪的电压表监测输入电压，使用万用表交流电压表测试 U_2 。

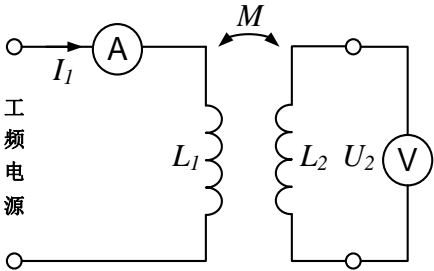


图 6-6 测量开路互感电压

表 6-1 测互感系数实验数据（一）

线圈匝数 L_1/L_2		500/500			500/1000		
介质变化		同为空心	U 形铁芯	回形铁芯	同为空心	U 形铁芯	回形铁芯
测量值	I_1 (mA)						
	U_2 (V)						
计算值	M (mH)						

2. 用等效电感法

按图 6-4 接线，接入 12V 工频电源，使用 U 型磁芯做成的耦合电感，分别测量 L_1 与 L_2 (L_1 与 L_2 线圈匝数同为 500) 顺向串联和反向串联时的电压 U 、电流 I 及功率 P ，记入表 6-2 中（电感中的电阻可由 $R=P/I^2$ 计算得到），计算 $L_{正}$ 、 $L_{反}$ 及 M 。由计算得到的 $L_{正}$ 、 $L_{反}$ 可得 M 值为： M = ____。

表 6-2 测互感系数实验数据（二）

U 型磁芯	测量			计算		
串接方式	P/W	U/V	I/mA	R	X_L	L
正串						
反串						
回型磁芯	测量			计算		
串接方式	P/W	U/V	I/mA	R	X_L	L
正串						
反串						

使用回型磁芯做成的耦合电感，分别测量 L_1 与 L_2 (L_1 与 L_2 线圈匝数同为 500) 顺向串联和反向串联时的电压 U 、电流 I 及功率 P 。对比使用 U 型磁芯的实验结果，说明差异的原因：

原因：_____

等效电感法测试出来的互感，请同学们自行对比使用开路互感电压法测试出来的互感值，是否一致。并写出思考原因。

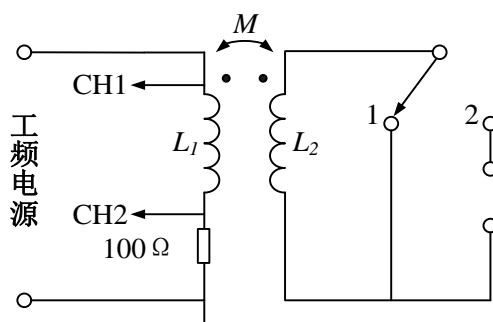


图 6-7 示波器观察二次回路负载对一次的影响

3. 观察二次回路负载对一次回路的影响

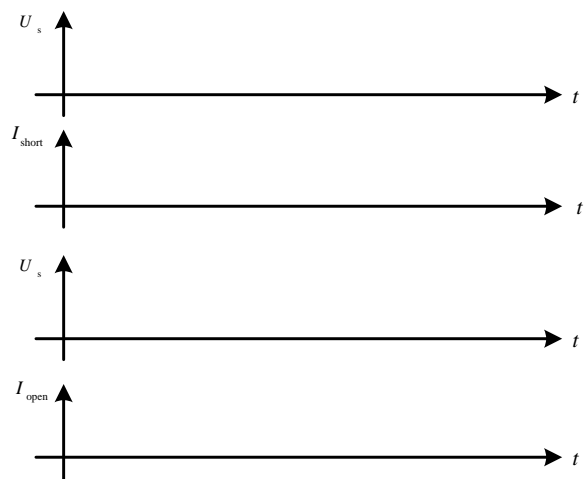
按图 6-7 接线，选择回型磁芯的两电感 (L_1 与 L_2 线圈匝数同为 500)，分别在二次回路短路及二次回路开路两种情况下用示波器观察一次回路电压和电流的波形，为了用示波器观测电流波形，在一次电路中串联一个 100 欧姆电阻。定性画出两种情况下观察到的波形并作比较（需要画出有效值，幅值，时间刻度，相位差等参数），分析二次回路负载对一次回路的影响及原因。

影响及原因：_____

注意：输入电压 U_s 控制在 10V 以下，串联电阻的功率控制在额定要求的 60% 以下，比如 2W 的电阻，保证上面消耗的功率在 1.2W 以下，防止过热损坏。

选择 U 型磁芯的两电感，分别在二次回路短路及二次回路开路两种情况下用示波器观察一次回路电压和电流的波形，为了用示波器观测电流波形，在一次电路中串联一个 100 欧姆电阻。请分析结果和使用回型磁芯两电感的不同的原因。

原因：_____



4. 观察互感现象

1) 将低电压交流有效值为 $U_s=8V$ 加在 L_1 侧, L_2 侧接入 LED 发光二极管与 510Ω 电阻串联的支路。此时注意观察 LED 发光管的亮度, 如发光管不亮, 可适当增大 L_1 侧交流电压, 直到 LED 发光管亮度适中。

2) 画出设计的电路图 (含参数)。

电路图:

3) 将 U 型铁芯从两个线圈中抽出和插入, 观察 LED 亮度的变化。请分析原因。

6.6 实验注意事项

1. 遵守实验室的各项规章制度。
2. 在实验过程中不允许带电换线、换元件。
3. 做完每一项实验时要请指导老师检查数据, 签字, 方可进行下一步实验。
4. 全部实验做完后, 关掉电源, 拆线, 整理实验台, 物归原处, 方可离开实验室。

6.7 故障分析与检查排除

参见实验一中 1.7。

6.8实验思考题

1. 用直流法判断同名端时，将开关闭合和断开，判断同名端的结果是否一致？
2. 定性分析两线圈的介质变化会对互感产生怎样的影响。

6.9实验报告要求

1. 实验步骤、过程需要写在实验报告上；数据处理过程要写在实验报告上，数据，曲线等必须手写，原始测量数据在课堂上需要老师确认。
2. 由数据得出的曲线在实验后完成，并画在坐标纸上，贴在报告中。
3. 实验结果分析及实验结论要根据实验结果给出。
4. 实验的感想、意见和建议写在实验结论之后。
5. 实验思考题需要写在实验报告里面。