

电工基础实验指导书

上海交通大学电工原理教研组

1980年12月

实验课前指导

预习报告和实验报告格式

学习实验守则

- (一) 叠加原理及等效发电机定理的研究
- (二) 交流电路的基本测量
- (三) r 、 L 、 C 串联电路共振的研究
- (四) 并联电路的共振与功率因数的提高
- (五) 三相电路的电压与电流的研究
- (六) 三相电路功率的测量
- (七) 非正弦周期电流电路的研究
- (八) 含有电容器的电路充电放电过渡过程的研究
- (九) 非线性电阻器伏安特性的测定
- (十) 受控电源
- (十一) 一阶电路的频率响应和方波响应
- (十二) 运算放大器实现数学运算
- (十三) 回转器
- (十四) 接地电阻的研究
- (十五) 恒定磁通磁路的研究
- (十六) 交流电桥的研究
- (十七) 直流补偿器的研究

附录 关于常用仪器设备的说明

实验课前指导

一、实验的重要意义

实验是研究自然科学的极为重要的环节。我们知道，科学理论的建立与发展，是以大量的经验材料为依据的。这些经验材料，一方面是人们从生产实践中积累起来的，另一方面则是通过实验而获得的。当然，也有许多科学理论是从既有的定律经过逻辑推理或数学推导得到的，然而那些既有的定律，仍归是建立在经验材料的基础上的。并且，经过推理或推导所得到的科学理论，还需要通过进一步的实验或实验检验。实验作为科学研究中获得经验材料与验证原理的方法之一，其重要性是不言而喻的。

本课程中，实验课的作用主要是：

1. 巩固课堂所讲授的理论，通过实验及对现象的观察能增强感性认识，并且在对理论的验证中能更牢固地掌握基本知识。
2. 进行实验技能的训练。对一般常用仪表设备，要求能正确而熟练地使用和操作，逐步地为使用精密与灵敏的仪器以及进行复杂的实验打下基础。
3. 培养理论联系实际的作用，为将来从事科学研究或实际工作的需要而进行实验打下初步基础。

二、对实验课的一般指示

实验课应起的作用已如上述，为了使这些作用奏效，下面几方面的要求是应该达到的：

1. 对于常用的电工仪表，控制 and 调节设备，要求能够进行选择、调整与熟练使用。对电子仪器、精密及灵敏的仪表和仪器，则要求一般地掌握其性能、用法和注意事项。
2. 要求能够正确地联接线路，合理地安排仪器和布线，并掌握检查电路和寻找故障与处理故障的方法。对人身及设备的安全和防护设施也要求掌握。
3. 要求掌握观察实验现象以及读取、选择和检查数据的方法。

有了有效数字的概念。对实验报告的编写，工程曲线的绘制，坐标尺度的选用，实验结果的分析 and 计算等，要能正确进行。

现对实验课中的预习、实验室工作的进行和实验报告的编写等提出一般要求。

1. 预习

预习时首先要仔细阅读指导书，复习有关的理论，明确实验目的和要求，很好地了解实验原理和实验方法。在此基础上，简要地写一份预习报告，其内容包括：(1) 实验的主要任务，(2) 实验设备，(3) 所需测量的物理量，并列出记录表格。如果实验还要求事先计算与设计，则也应在预习报告中完成。

2. 实验室工作的进行

在实验室工作中，应注意下列几点：

(1) 仪表设备的配备与检查

每次实验开始时，应把实验中所需用到的仪表设备配齐，并检查其类型及量程是否合用。有些仪表还要检查其指针是否在零点位置。所使用的仪表设备的编号，应一一登记在记录纸上。

(2) 连接电路

首先应该把仪表设备布置到便于操作和读数，然后进行接线。接线时，宜按照电路图先接主要串连电路（由电源的一端开始，顺次而行，再回到电源的另一端），然后再连分支电路。遇到较复杂电路时，可先把电路分成几个较简单的组成部分，先把各组成部分分别连接好，再接次序把这些组成部分连接成最后的电路。接头应足够紧密。仪表设备的设置，要注意避免可能发生的相互影响（如磁场影响等）。接线完成后必须检查一遍，如有错误，应立即纠正。

电路与电源的连接，实验的实际操作与测量，是在电路接受检查无误后进行的。

(3) 设备的操作与数据的记录

数据应该记录在事先准备好的表格中，零乱与无序的记录常常是造成错误和失败的原因。在许多情况下，为了减少误差，往往需要重复实验并重新读取数据。有时在操作中或在读书和记录中，需要适当

的分工和合作。

当需要把读数绘成曲线时，读数的多少和分布情况，应以足够描绘一条光滑而完整的曲线为准则。读数的分布可随曲线的曲率而异。在曲率较大处应多读几点，在曲率较小处则可少读几点。读取数据后，可先把曲线粗略地描绘一下，如发现有所不足之处，就应进行补偿。

电路应在检查记录数据没有遗漏或没有不合理的情况后才予以拆除，以便在必要时补遗或修正。

(4) 人身与设备的安全

在实验过程中，应随时注意安全。当电路接通电源后，千万不可用手触及带电部分，改接或拆除电路时，必须先把电源断开。即使在电压较低时也需要这样做，借以养成良好的习惯。当有不正常现象或事故发生时，应首先切断电源，然后再进行检查。使用仪器设备时，切忌违反使用方法，尤须注意不得超过仪器设备的标准值。电路拆除后，仪器设备应放归原处。

3. 实验报告

实验报告应在整理与计算实验记录的基础上写出，报告的主要内容应包括：(1)实验目的；(2)实验任务；(3)所使用的实验设备及其规格、型号与编号等（其中尤其须要注意仪表的量程）；(4)电路图；(5)经过整理的数据及计算结果（列成表格）；(6)表示实验结果的图形；(7)结论与讨论。在有些情况下，还应把实验原理的简述、实验的设计及计算公式等列入。

描绘图形要求整洁匀称，并注明名称。曲线图应绘在方格纸上，其坐标轴的交点并不一定是 $(0, 0)$ 点，坐标轴上应注明所代表的物理量的符号。比例尺的选取，应以便于数据的表示和计算，并可插入其他数值为原则。坐标轴上必须注明单位，每隔数格应标出一数量，每格所代表的数量宜取1、2、5、10或其倍数。实验数据写在坐标纸上用“○”“×”“△”等符号标出。连接曲线时应使曲线光滑，而不必强使它通过所有的点子；未被曲线所通过的点子应大致均匀地分布在曲线的两侧。

还须指出，有关测量与计算的准确度问题，是值得我们注意的。

现将略阐述如下：

1. 误差

由于测量仪表本身的限制与观察上的出入以及其他偶然的影响，测量上的误差是难以避免的。这些误差可依靠人为的办法使之尽可能减小。在同一条件下，对同一测量对象可进行多次测量并取其平均值：

$$N = \frac{N_1 + N_2 + \cdots + N_k}{k}$$

此平均值被认为是比较接近于真实值的。这就是我们在许多情况下往往要进行多次测量的理由。

每一次的测量值与平均值之差的绝对值，即为该次测量的绝对误差。如进行 k 次测量，则绝对误差分别为 $\Delta N_1 = |N_1 - N|$ 、 $\cdots$
 $\Delta N_k = |N_k - N|$ ，而其平均绝对误差为

$$\Delta N = \frac{\Delta N_1 + \Delta N_2 + \cdots + \Delta N_k}{k}$$

测量结果可记为 $N \pm \Delta N$ 。当被测量的有公认值时，则 $\Delta N = \text{公认值} - \text{平均值}$ 。

$\frac{\Delta N}{N}$ 叫做平均相对误差，实验的准确程度是用相对误差来表示的。

测量中误差的发生，往往涉及仪表量程的选择。如果量程小于被测的量，则不但得不到读数，且有损伤仪表的危险。但是，量程也不宜太大，否则所得的读数可能误差很大。一般说来，对刻度均匀的仪表，在选择量程时，应注意到指针所指刻度不宜小于其最大刻度的30%；对刻度不均匀的仪表，则不宜小于40%。

2. 有效数字

在许多情况下，被测量的量通过测量仪表的指示而表现其大小时，仪表上的指示位置并不恰好与仪表的刻度符合，这就需要估计法来帮忙。估计法就是在仪表刻度的最小分度下，再凭目力和经验来估计一位数字。这个估计出来的数字称为欠准数字。超过一位欠准数字的估计是没有什么意义的。

在实验数据的记录中，有效数字是包括而且仅包括一位由估计而得的欠准数字的。在记录有效数字时应注意下列几点：

(1) 有效数字的位数与小数点无关，例如 4567 与 45.67 都是四位有效数字。

(2) “零”在数字之间或数字之末算作有效数字，在数字之前不算作有效数字。例如 1.02, 3.04, 500 都是三位有效数字，而 0.012 只有二位有效数字。4.50 和 4.5 的意义不同，前者中的 5 是准确数字，0 是欠准数字，而后者中的 5 为欠准数字，所以在 4.50 中的 0 不可省去。

(3) 遇有大数字和小数字时，有效数字的记法如下： 4.6×10^5 ， 460×10^3 ，分别为二位及三位有效数字，不可认为具有同一准确度。小的数字如 0.0046 可写为 4.6×10^{-3} 。

以有效数字进行运算时，其运算结果的记法，根据有效数字的定义有下列两个基本原则：

(1) 只保留一位欠准数字；

(2) 去掉第二位欠准数字时要用四舍五入法。

几个数相加或相减，其最后的得数在小数点以后的位数，应保留与该几个数中小数点后位数最少的一个相同的位数，例如 $11.23 + 33.4 = 44.6$ 。几个数相乘除时，其最后得数只需要保留与该几个数中位数最少的一个位数相同的位数，但有时需多保留一位，有时需多保留一位，例如 $44.01 \times 2.11 = 92.9$ 及 $2.537 \times 6.83 = 16.07$ 。保留更多的位数不但毫无意义，而且会使人们对实验的准确程度作过高的估计，这也是不许可的。

实验报告一律用 16 开大小的纸张，格式如下页。

预 习 报 告

一、实验名称

二、实验主要任务

三、实验设备

名 称	规 格	数 量

四、实验线路

五、记录表格

六、预习计算（非所有实验都有）

七、注意事项

实 验 报 告

姓 名

班 级

实验组别

同组者

实验日期

指导教师

实验名称

一、实验目的

二、实验任务

三、实验设备

名 称	规格、型号	编 号	数 量

四 实验电路图

五、实验结果

- 1、将经过整理的数据及计算结果列成表格;
- 2、计算示例及公式

- ## 2、计算示例及公式

六 实验曲线

七 结论与讨论

验曲线			
论与讨论			

学 生 实 验 守 则

- 一、实验前必须做好预习，以备指导教师检查，不预习者不得进行本次实验，以后于规定时间来补做。
- 二、线路接完后，必须复查，报经教师认可后方可接通电源。
- 三、注意人身安全，严禁带电改接线路。
- 四、爱护仪器、仪表，遵守使用规则，防止设备事故。
- 五、遇有事故，首先切断电源，并立即报告教师。
- 六、实验完毕后，数据应交教师审查，如有差错须按教师指示，立即补做或以后重做。
- 七、爱护公物，注意清洁卫生，严禁室内吸烟，随地吐痰，不要随意动用与实验无关的设备、器材。
- 八、实验结束，拆除线路，做好整理工作。
- 九、对于违反操作规则以及玩弄仪器设备而造成事故或损坏器材者，除于批评教育外，并视情节轻重给予当事者责令书面检查，停止实验以及赔偿损失等处理。

实验一 叠加原理及等效发电机定理的研究

一、实验目的

1. 通过实验来验证线性电路理论中的叠加原理及等效发电机定理(含源二端网络定理), 借以巩固理论知识。

2. 进一步熟悉直流仪表的使用方法。

二、原理与说明

线性电路理论中的叠加原理及等效发电机定理(含源二端网络定理), 对于线性电路的分析与计算具有重要意义, 因此有必要通过实验进行验证, 这将有助于牢固地掌握它们。本实验将在直流下进行。

1. 叠加原理

几个电动势在线性电路中共同作用时, 它们对于电路中任何部分所产生的电流或电压, 等于这些电动势单独作用时在该部分所产生的电流或电压的代数和。

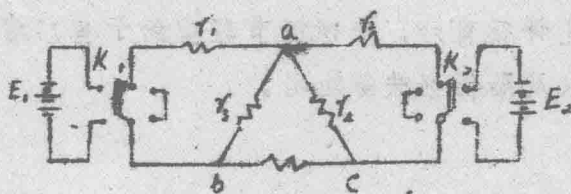


图 4-1

我们采用图 4-1 所示的电路通过实验来验证这一原理。电路中有两个电源, 其电动势分别为 E_1 及 E_2 。在 E_1 单独作用时, E_2 需自电路中取去, 这可通过把双刀双掷开关 K_2 合至短接的一侧来实现。应当注意, 这样做的结果电源的内阻也被略去了, 只有在电源的内阻较电路的其他电阻小得多的情况下, 这种做法才是允许的。 E_2 单独作用的情况, 可用类似的方法来进行。把开关 K_1 及 K_2 各合至 E_1 及 E_2 , 则为 E_1 与 E_2 共同作用于电路的情况。进行每次测量时, 安培计应串联接入所研究的支路中(实际上可以用电流插口预先接入所欲测量的电流的支路中去, 而把电流插头接于安培计上, 利用这种设备就能较方便地用一只安培计对各支路电流进行测量), 伏特计应并联在所研究的支路或元件上, 但须注意各个情况下电流与电压的方向。

在预先选定正方向的情况下，从仪表的接法可以决定被测量的正负，然后取其代数和。

2. 等效发电机定理（含源二端网络定理）

一个含源线性二端网络就它的外部特性来说，可以用电动势 E 与电阻 r 串联表示的含源支路来代替，电动势 E 等于网络的开路电压 U_0 ，电阻 r 等于网络的入端电阻 r_i 。

在研究线性电路某一个别支路中的电流、电压及其所吸收的功率时，应用等效发电机定理显得特别方便。

！本实验将仍采用图 4-1 所示的电路，而先在 E_1 与 E_2 同时作用的情况下进行研究。例如，我们要研究 bc 支路的电流、电压及功率等，就可把 bc 支路以外的部分看成是以 b 及 c 为端钮的含源二端网络。根据等效发电机定理，这一含源二端网络可变换成一个由电动势 E （等于网络的 $b-c$ 端的开路电压 U_0 ）及电阻 r （等于网络的 $b-c$ 端的入端电阻 r_i ）所组成的含源支路（等效发电机）。

在测量含源二端网络的入端电阻时，可把网络中的电源取出（当然，这样做的结果是电源的内阻也同时被取出，因而影响到含源二端网络入端电阻的真实值，但因电源的内阻与网络的其他电阻相比是很小的，故实际上的影响是不大的，因而可略去，然后在网络的 $b-c$ 端施以另一电压（如图 4-2 所示）。在求得 $b、c$ 间的电压 U' 及流入网络的电流 I' 后，即可算出含源二端网络的入端电阻，即为等效发电机的内阻。

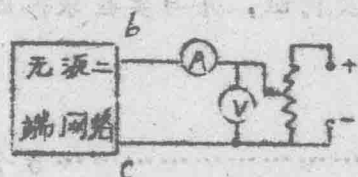


图 4-2

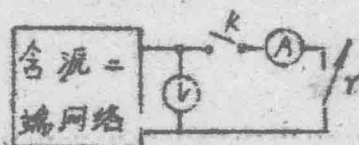


图 4-3

本定理的实验验证可以这样来进行：一方面用实验方法作出含源

二端网络的外特性曲线（即表示其输出电压与电流的关系曲线）；另一方面根据该含源二端网络的等效发电机的 E_0 及 r_0 ，列出方程 $U = E_0 - I r_0$ ，并绘成曲线（即等效发电机的外特性曲线）。把这两条外特性曲线进行比较，二者的一致即是所要求的验证结果。含源二端网络外特性曲线的录取，可用图 4—3 所示电路来进行。当开关 K 打开的情况下，可测得网络的空载情况； K 合上后，调节变阻器 r （从最大值调到零），可测得一系列的输出电压及电流值，用以绘出含源二端网络的实验外特性曲线。

三、任务与步骤

1. 验证叠加原理。任意选择电路中的几个支路来研究，必须注意电流及电压的正方向，这可从测量时仪表的极性来判断。从仪表的正极到负极即表示被测电流或电压的正方向。但是，在叠加时被测电流或电压是正值还是负值，则需要根据预先选定的正方向来决定。如果被测电流或电压与选定的正方向一致，则为正值；如果相反，则为负值。

2. 把图 4—1 所示电路中 bc 支路取出后的其余部分作为含源二端网络，进行等效发电机定理的实验验证。在测定含源二端网络的外特性时，可把 bc 支路原有的电阻取出而换以变阻器 r ，并接成图 4—3 所示的电路。调节变阻器 r 以得到一系列的 U 与 I ，用以绘制含源二端网络的外特性曲线。

3. 根据实验电路各电源电动势的值及各电阻的值，用理论方法计算上述含源二端网络的等效发电机的电动势及内阻，并与实验求得的结果相比较。

四、实验设备

定值电阻	5 个
电阻箱	1 个
直流毫安计	1 个
直流伏特计	1 个
电流插口	若干个
电流插头	1 个

测量棒..... 1 副
双刀双掷开关..... 2 个
直流电源 (不同电压的)..... 2 组

五、思考问题

1. 在验证叠加原理时, 安培计的内阻或伏特计的内阻对实验的准确性有何影响?

2. 支路 bc 中的电阻为何值时, 此支路才能吸收最大功率? 试考虑如何应用实验方法来进行验证。如有可能, 验证最好在本实验中进行。

实验二 交流电路的基本测量

一、实验目的

1. 学习常用的交流仪表设备（伏特计、安培计、瓦特计、调压变压器等）的使用方法，熟悉交流电路实验中的基本操作方法。

2. 掌握测定交流电路参数的简单方法，并加深对阻抗、阻抗角及相位差等概念的理解。

二、原理与说明

1. 交流电路中的参数为电阻、电感及电容，对于交流电路中常用的电阻器、电感线圈及电容器等实际元件来讲，它们的制作是使得这些参数的作用根据所预定的使用目的表现出来的。

就低频时的应用而言，实验中常用的变阻器可略去其电感及分布电容而看成是纯电阻。在正弦电流的情况下，加于电阻两端的电压 U 与流过其中的电流 I 的关系如下式所示：

$$\dot{U} = r \dot{I},$$

电压与电流同相，电阻中所吸收的平均功率

$$P = UI = rI^2.$$

根据这些关系，可以通过简单的实验方法把电阻测出。

电容器在低频时，其引线电感完全可以略去，介质损失一般也小到允许忽略的程度，因而可以认为只具有电容 C 。在正弦电流的情况下，电容电抗 $\omega_0 = \frac{1}{\omega C}$ ，加于电容两端的电压 U 以及流过其中的电

流 I 有如下关系：

$$\dot{U} = -j\omega_c \dot{I} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I} = \frac{\dot{I}}{\omega C} \angle -90^\circ$$

电压滞后于电流的相角为 90° ，电容中所吸收的平均功率为零。由此看出，可通过电压与电流的测量由式

$$C = \frac{I}{\omega U}$$

算出电容 C 。

电感线圈的导线中具有电阻，在低频应用时把线匝间的分布电容略去后，电感线圈可以由电阻及电感这两个参数来表示。在正弦电流的情况下，电感线圈的复阻抗

$$Z = r_L + j\omega_L = r_L + j\omega L = \sqrt{r_L^2 + x_L^2} \angle \varphi = Z \angle \varphi$$

式中 r_L 为线圈的电阻， L 为线圈的电感，阻抗角 $\varphi = \lg \frac{x_L}{r_L}$ 。加

于电感线圈上的电压 U 与流过其中的电流 I 的关系是

$$\dot{U} = (r_L + jx_L) \dot{I} = Z \angle \varphi \dot{I}。$$

电压超前（越前）于电流的相角为 φ ，电感线圈中所吸收的平均功率

$$P = UI \cos \varphi = I^2 r_L$$

由此看出，电感线圈的阻抗 Z 可以通过电压与电流的有效值计算出来，

电阻 r_L 可以通过功率 P 与电流 I 计算出来。然后再通过关系式 $x_L =$

$\sqrt{Z^2 - r_L^2}$ 可算出 x_L ，从而求出电感 L 。

把上述的变阻器、电容器以及电感线圈相串联后，其复阻抗 Z ，

$$= (r + r_L) + j(\omega_L - \omega_C) = \sqrt{(r + r_L)^2 + (x_L - x_C)^2} \angle \varphi$$

$= z_1 \angle \varphi_1$ ，其中阻抗角 $\varphi_1 = \lg \frac{\omega_L - \omega_C}{r + r_L}$ 。加于此串联电路的电压

U 与电流 I 的关系为

$$U = Z_1 I = z_1 \angle \varphi_1 I。$$

电压与电流之间的相位差（等于阻抗角）可根据 ω_L 是大于或小于 ω_C

决定其正负。此电路所吸收的功率

$$P = UI \cos \varphi_1$$

在量得电压、电流的有效值及功率后就可把阻抗 z_1 、功率因数 $\cos \varphi_1$ 及 φ_1 的绝对值算出。

2. 在正实验中，一方面要通过测量电压、电流及功率的方法把元件的参数求出，另一方面要通过测量来熟悉几种常用的交流仪表与调压变压器的使用方法。此外，还要结合实验作出矢量（相量）图以

巩固理论知识。

图 5—1 绘出了测定电感线圈参数的电路图。在测定变阻器的电阻及电容器的电容时仍可用此电路，只要把电感线圈换以变阻器或电容器即可。

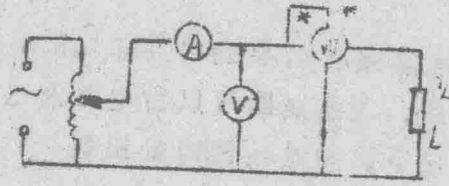


图 5—1

对三者串联的电路进行测量时，也仿照此电路接线。

交流伏特计及安培计是没有极性的。表上的刻度给出的是电压或电流的有效值，在使用时要注意量程的选取。瓦特计有电流与电压两组线圈，分别有两对接头，必须正确地接于电路中才能给出正确的读数且保证仪表的安全。调压变压器是供调节加于电路上的交流电压至所需大小的设备，它有一定的接线与操作方法，特别需要注意的是，不要把调压变压器的输入端钮与输出端钮接错，在使用前输出电压先调到零，然后在使用中再把输出电压调到所需的大小。附录中给出了伏特计、安培计、瓦特计及调压变压器的说明供参考。本实验所用的仪表与设备是交流电路实验常常用到的。

这里，我们再补充叙述一种决定任意非纯电阻性的负载是感性还是容性（即负载的阻抗角 φ 是正或负）的实验方法（例如，由上述变阻器、电感线圈及一个任意电容值的电容箱串联而成的负载在按图 5—1 所示电路来研究时，如果事先不知道电容器的容抗及线圈的感抗就不能判断这个负载是容性的还是感性的）。先对此负载进行一次测量，在量得负载两端的电压 U ，流经其中的电流 I 及它所吸收的功率 P 之后，可算出负载的电抗 ω 。然后把一个电容为 C' 的电容器与负载串联（电容 C' 的大小应如此选择，使得这个电容的电抗 $\omega_{C'}$ 比原有负载的电抗小两倍，即 $\omega_{C'} < 2\omega$ ），然后进行第二次测量，并使外加电压与上次测量时相同。这时，如果电流小于上次测得者，则负载为容性；如果电流大于上次测得者，则负载为感性。

三、任务与步骤

1. 用图 5—1 所示的电路测定变阻器的电阻。在用安培计、伏