

# 浙江大学实验报告

专业：电气工程及其自动化

姓名：严旭铨

学号：3220101731

日期：2024 年 2 月 29 日

地点：东三 206 教室

课程名称：电网络分析 指导老师：姚缨英 成绩：\_\_\_\_\_

实验名称：互感参数测量 实验类型：电学实验

## 实验 1 互感参数

### 实验任务

- 设计完整的互感器参数电工法测量实验方案（伏安法、三表法测  $L_1$ 、 $R_1$ ；伏安法测二次侧开路、正向串联、反向串联共 4 个  $M$  的值）
- 对实验中的误差传递做基本的分析，计算  $\Delta M$  值，并比较不同测量方法对最终测量结果的影响。
- 用示波器测量互感器  $R_1$ 、 $L_1$ ，请设计测量线路。可参考：相量法、谐振法测非理想电感，并与电工法对比。

#### 任务一：二次侧开路伏安法测量自感系数

##### 1. 实验原理

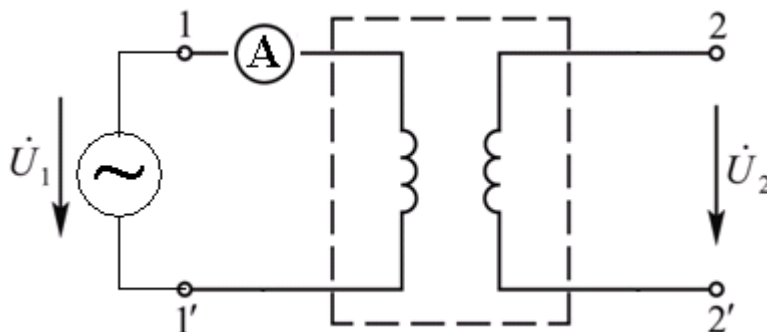


图 1

连接如图电路，测量  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $I_2$ ，11'接交流电源，22'开路。然后交换位置，调整交流电源大小，使两次所得的电流相同，以保证仪表误差最小。

关于互感线圈内阻  $R$  的测量，本次采用万用表欧姆档直接测量。再根据右边的公式，可以计算出  $L_1$  和  $M_1$ ，交换位置后同理可计算出  $L_2$  和  $M_2$ 。比较两次测量结果并分析。

$$L_1 = \frac{\sqrt{\left(\frac{U_1}{I_1}\right)^2 - R_1^2}}{\omega}$$
$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}$$

##### 2. 实验方案

- 万用表欧姆档测量互感线圈内阻  $R$ 。左边测一次，右边测一次。
- 按图 1 连接电路，用电工实验台上的交流电表测量  $U_1$  等参数。
- 将  $U_2$  侧通电， $U_1$  侧开路，重新测量上述参数。
- 根据公式计算出  $L_1$ ， $L_2$ ， $M$ 。

##### 3. 数据记录及处理

序号	1	2
$U_1/V$	8.91	7.98
$U_2/V$	1.467	1.459
$I_1/A$	0.292	0.292
$R/\Omega$	18.7	22.7
$L_1/mH$	76.7	-
$L_2/mH$	-	48.4
$M_1/mH$	16.0	-
$M1'/mH$	-	15.9

**误差分析：**

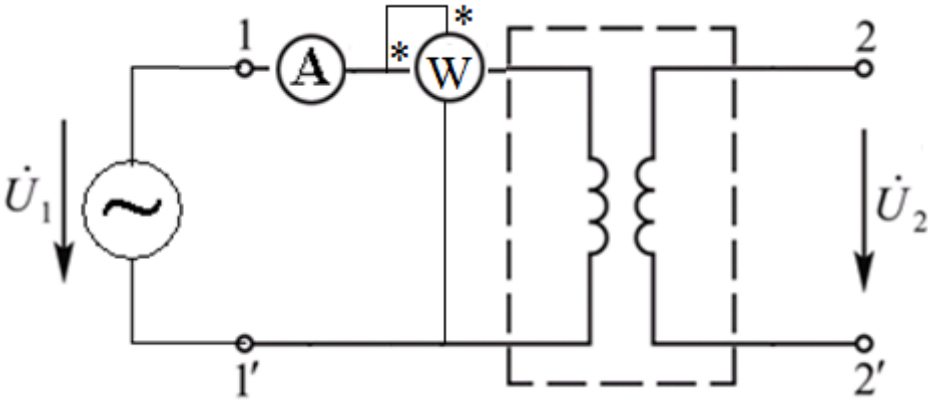
以上数据中，电压均由电工实验台的交流电压表测定，电流均由交流电流表测定，电阻由万用表 600 $\Omega$  档测定，查表确认各仪器精度后，直接利用误差计算器计算，得到

dL1/mH	dL2/mH	dM1/mH	dM2/mH
2.3	3.8	0.16	0.16
dL1/L1	dL2/L2	dM1/M1	dM1' /M1'
0.030	0.079	0.01	0.01

可以得到，M1 与 M1' 非常相近，这与理论情况是符合的。

**任务二：三表法测 L1、R1**

**1. 实验原理和方案**



如图为使用三表法测量的电路图。由公式  $P=UI\cos\phi$ ，可利用瓦特表测量  $P$ 、 $U$ 、 $I$ 、 $\phi$  等参数，从而可以计算出阻抗  $Z$ ，再由相量图可以计算得出  $R$ 、 $L$ 。

**2. 实验数据记录和处理**

U/V	I/A	P/W	Q/Var	S/VA	PF	$\phi /^\circ$	R/ $\Omega$
8.7	0.292	1.4	2	2.5	0.593	53.5	18.7

可以计算出

$|Z| = 29.8 \Omega$ ,  $L1 = 73.85mH$

任务三：正/反向串联测量互感系数

1. 实验原理和方案

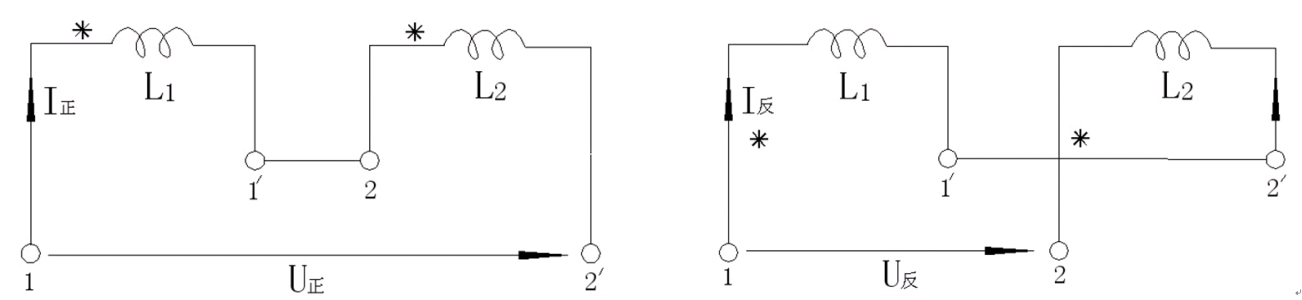


图 2 正向串联和反相串联电路图

$$M_2 = M_{\text{正}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\omega_{\text{正}}} \sqrt{\left( \frac{U_{\text{正}}}{I_{\text{正}}} \right)^2 - (R_1 + R_2)^2} - (L_1 + L_2) \right]$$
$$M_3 = M_{\text{反}} = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\omega_{\text{反}}} \sqrt{\left( \frac{U_{\text{反}}}{I_{\text{反}}} \right)^2 - (R_1 + R_2)^2} - (L_1 + L_2) \right] \times (-1)$$

分别按正向串联和反向串联连接电路，测量出正向和反向的电压、电流，计算出正向和反向的互感。再将结果与将任务一数据带入计算得到的 M4 作比较，查看结果。

$$M_4 = M_{\text{正反}} = \frac{1}{4} (L_{\text{正}} - L_{\text{反}})$$

2. 数据记录及处理

	正向串联	反向串联
U/V	18.31	14.65
I/A	0.292	0.292

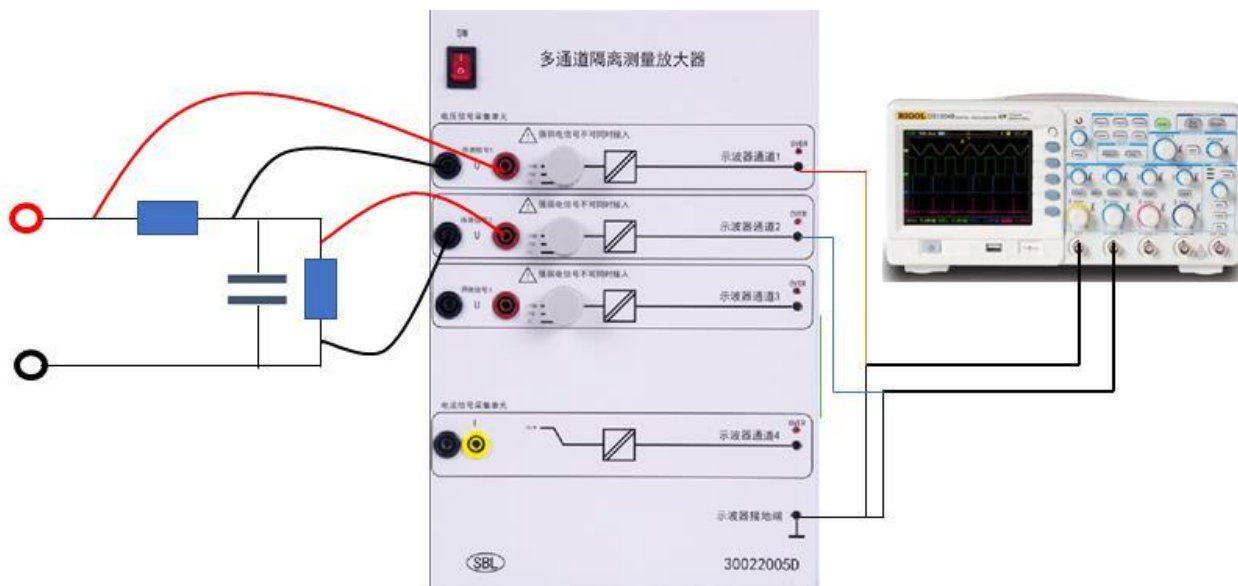
计算得：

M2/mH	dM2/mH	dM2/M2
16.4	0.197	0.012
M3/mH	dM3/mH	dM3/M3
17.5	0.283	0.016
M4/mH	dM4/mH	dM4/M4
17.8	0.018	0.010

## 任务四：（拓展）示波器观测一相量伏安法

### 1. 实验原理

交流伏安法测量等效阻抗1：

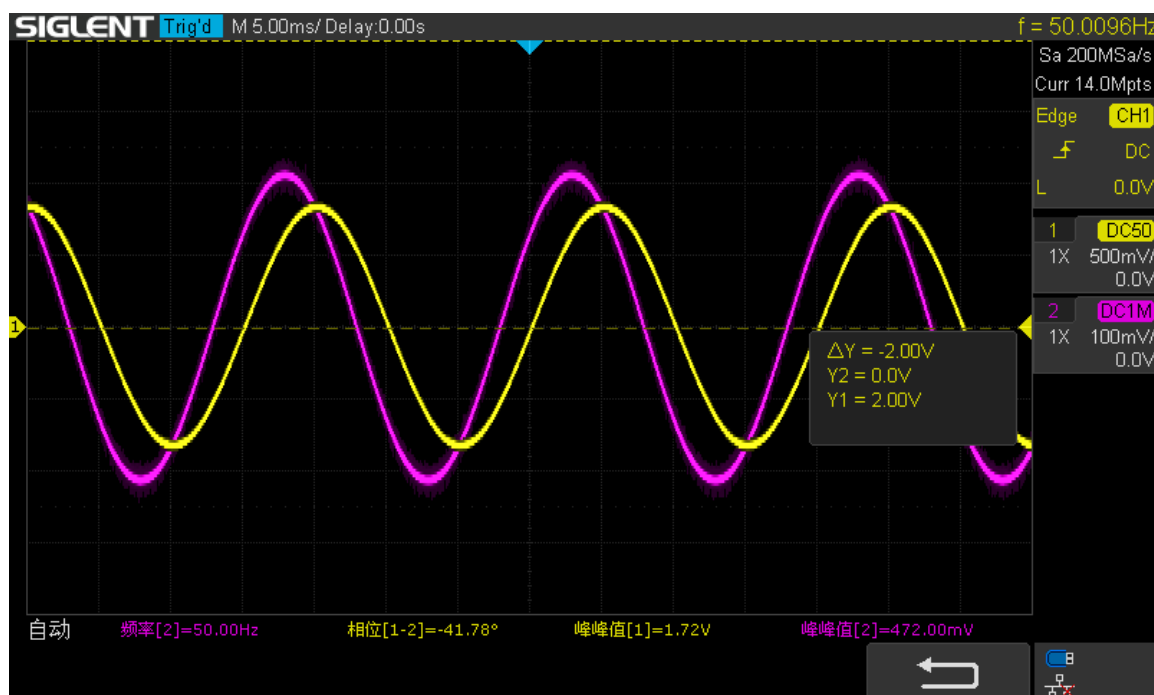


利用实验室中的隔离通道，可以做到示波器两通道间不共地测量，就像电压表测量一样，测量出线圈两端的电压，以及取样电阻两端的电压（这样就可以得到电流）。如此，根据如下公式可以计算出线圈总阻抗，由于电阻可以直接测量，故可以求出自感。

$$|Z| = \frac{RU_D}{U_R}$$

### 2. 数据处理与分析

实验中采用 50Hz,  $V_{pp} = 4V$  的正弦信号。



注：上图中相位[1-2]=-41.78°，由于示波器接入的顺序，实际上是电感超前电阻 41.78°，实验时设置有疏忽，故修正。  
R 和 L 可以由

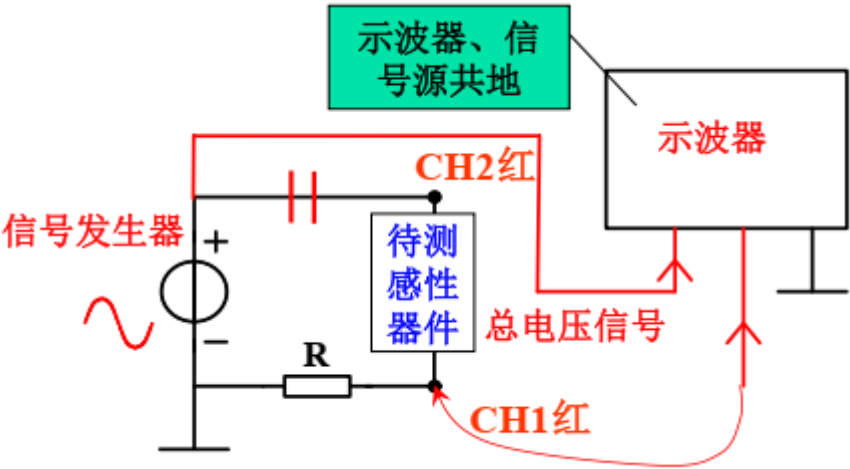
$$|Z| = \frac{U}{I}$$
$$R = |Z| \cos \varphi$$
$$L = |Z| \sin \varphi$$

得到

序号	1
Ud/V	0.472
Ur/V	1.72
R/Ω	100
相差/°	41.78
Z	27.44
R（内阻）/Ω	20.5
L/mH	82.8

任务五：（拓展）示波器观测一谐振法

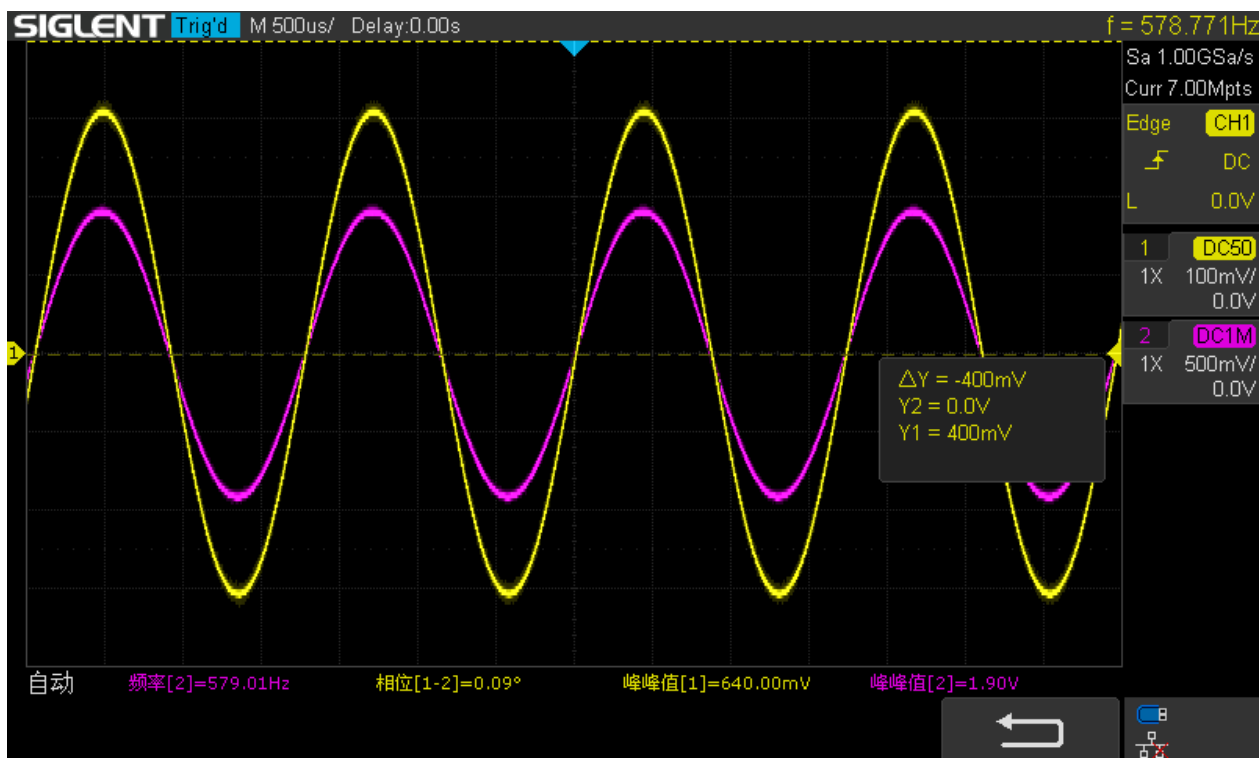
1. 实验原理



调节合适的正弦波频率，利用电容和线圈发生串联谐振，来测量谐振频率，进而计算出电感。本次实验选取 R = 20Ω，C = 1μF。当示波器上两波形相位差为 0 时即为谐振频率。由下面公式可以算出电感。

$$L = \frac{1}{\omega^2 C}$$

2. 数据处理与分析



此时频率为 579.01Hz，计算出  $L = 75.6\text{mH}$ 。

任务六：（拓展）直接用 LCR 测量仪测量。

由测量仪测得实际电感  $L1 = 78.5\text{mH}$ ，内阻  $R1 = 19.16\Omega$ 。



## 实验思考与综合分析

1. 从误差分析的计算结果来看，二次侧开路法互感的相对误差为 0.01（受限于计算器计算的精度），正向串联互感相对误差为 0.012，反向串联互感相对误差为 0.016，正反向串联综合的互感相对误差为

0.010，二次侧开路 and 正反向串联法的互感相对误差比较接近。但是从计算原理上来说，我认为正反向串联方法是精度最好的。因为它在计算的过程中，通过使  $I_{正} = I_{负}$ ，抵消掉了  $L_1$  和  $L_2$  的影响，减小了在测量过程中产生的误差。在电路原理的教材上也推荐了这一种测量方案。

2. 了解非接触电能传输原理（互感器两侧分别用电容补偿使其处于谐振状态，以便有较高的电能传输效率，请参考《电路原理》 5.3.6），回答以本互感器为磁耦合器件，能否传送电能？

现在已经问世的无线供电技术，根据其电能传输原理，大致上可以分为三类：

第一类是非接触式充电技术所采用的电磁感应原理，这种非接触式充电技术在许多便携式终端里应用日益广泛。这种类型中，将两个线圈放置于邻近位置上，当电流在一个线圈中流动时，所产生的磁通量成为媒介，导致另一个线圈中也产生电动势。

理论和经验都表明：当原边电流频率、幅值越高，原、副边距离越小，与空气相比，磁心周围介质的相对磁导率越大时，可分离式变压器的传输效率越高。但实际应用当中原副边距离不可能无限小，必须对原副边采取相应的补偿措施。

第二类是最接近实际应用的一种技术，它直接应用了电磁波能量可以通过天线发送和接收的原理。微波输能，就是将微波聚焦后定向发射出去，在接收端通过整流天线 (rectenna) 把接收到的微波能量转化为直流电能。

这和 100 年前的收音机原理基本相同：直接在整流电路中将电波的交流波形变换成直流后加以利用，但不使用放大电路等。同以前相比，这种技术的效率得到提高，并正在推动厂商将其投入实际应用。

第三类是利用电磁场的谐振方法。谐振技术在电子领域应用广泛，但是，在供电技术中应用的不是电磁波或者电流，而只是利用电场或者磁场。

要有较高的电能传输效率，则需要线圈的耦合程度较高。本实验中的互感器耦合系数

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

取  $M = 16.0\text{mH}$ ， $L_1 = 76.7\text{mH}$ ， $L_2 = 48.4\text{mH}$ ，代入计算得

$$K = 0.262$$

$K$  的范围为  $0 \sim 1$ ，当  $K = 1$  时称为全耦合，耦合程度最高。显然，本实验中的耦合系数太小了。不适合用来传送电能。