

电磁感应实验

胡谔崴 核 21 2022011139

摘要

电磁感应原理在工程中有许多应用，但基本上都是基于它在电路中的自感和互感特性。本实验希望让学生自主搭建交流电路，探究交变电流中的电磁感应特性，进而理解电磁感应特性在电路中的实现。

1. 实验仪器

(1) 信号发生器：

产生特定的交变电流信号，为整个电路供电。

(2) 电缆(连接线)、万用表、铝棒和线圈/面包板/300Ω定值电阻。

(3) 2 个电阻板。1 个电阻板上装有 10 个串联的 100 Ω 电阻和 10 个串联的 1 kΩ 电阻，另外 1 个电阻板上装有 10 个串联的 10 Ω 电阻。

2. 实验原理

(1) L-R 串联电路特性

对于 LR 串联电路，设电流 $i = I_0 \sin \omega t$ ，则电阻上的电压(降)等于 $I_0 R \sin \omega t$ ，电感上的电压(降)是 $I_0 \omega L \cos \omega t$ ，进而我们可以得到 LR 串联路上的电压是 $I_0 Z \sin(\omega t + \theta)$ ，式中，

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{X}{R}\right)$$

$$X = \omega L$$

X 又称为感抗，用于描述电感特性，因此，可以由这几个式子给出一个简单的 LR 串联电路的电压电流特性。

(2) 线圈感抗和电阻的测量

利用上述电路的电压电流特性，可以通过回路的电压电流信息测量线圈的感抗和电阻特性，连接电路如下：

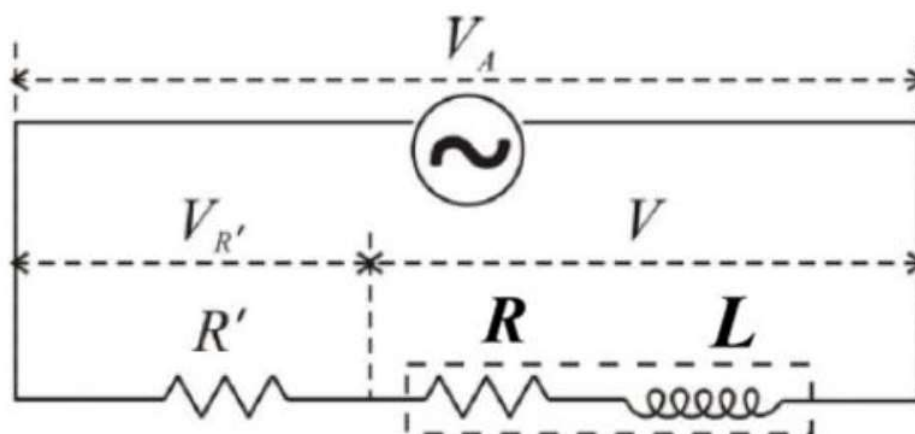


图1 线圈参数 L 、 R 测量电路

于是可得计算感抗与电阻特性的公式：

$$R = \left(\frac{R'}{2}\right)\left(\frac{V_A^2 - V^2}{V_R^2} - 1\right)$$

$$Z = \frac{V}{V_{R'}} R'$$

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2}$$

(3) 耦合回路

对于由两个线圈组成的耦合回路，电源为初级线圈供给的能量，部分消耗在初级线圈中，部分消耗在与之耦合的次级线圈中。当电流流经次级线圈时，其在初级线圈中感应出的电动势导致了初级线圈中电流的变化。从效果上看，我们可以无需知道次级线圈的参数，等效为初级线圈的电阻和感抗发生了变化，分别用等效电阻 R_{PE} 和等效感抗 X_{PE} (对应等效电感 L_{PE}) 表示。因此，在初级线圈和次级线圈中消耗的总能量就好像是消耗在初级线圈的等效电阻上一样。

根据消耗功率的等效原理，引入反射电阻与反射电感的概念，初级线圈中的反射电阻 R_R 所消耗的功率必须等于次级线圈回路中的电阻 R_S 和 R_L (图 3) 消耗的功率，反射电感 L_R 储存的能量和次级回路中的电感 L_S 储存的能量相同，即：

$$I_P^2 R = I_S^2 (R_S + R_L)$$

$$\frac{1}{2} L_R I_P^2 = \frac{1}{2} L_S I_S^2$$

于是也可以根据这种关系求互感系数 M 。

3. 实验内容

(1) 在无芯和铝芯条件下求电路的电感和电阻特性

连接电路如图所示

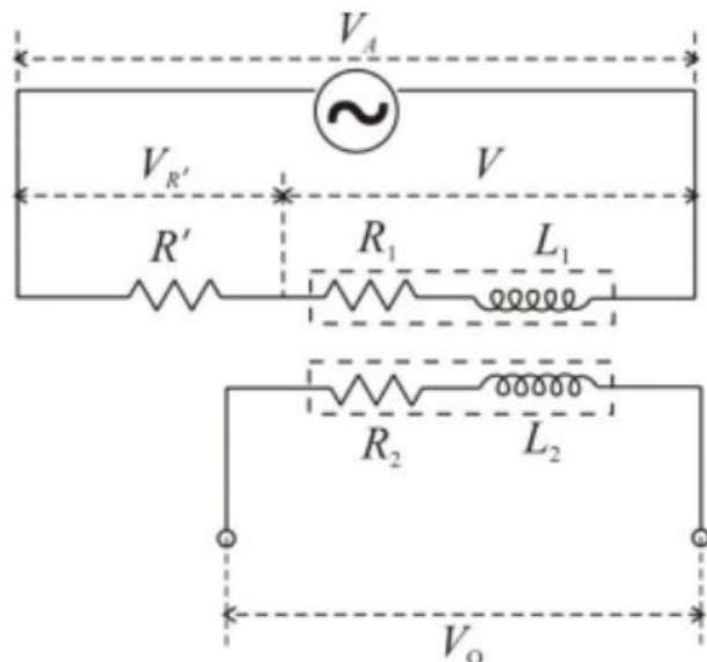


图2 线圈参数 L 、 R 和互感 M 测量电路

(1) 测量 V_A 、 $V_{R'}$ 和 V ，以及另一线圈两端的电压 V_o ，测量出线圈 1 的电阻 R_1 和电感 L_1 。

- (2) 连接另一线圈 2，通过必要的测量来确定线圈 2 的电阻 R_2 和电感 L_2 。
- (3) 将铝棒插入线圈中，重复上述步骤，测量出带铝芯的线圈 1 的电阻 R_1 和电感 L_1 。
- (4) 测量带铝芯的线圈 2 的电阻 R_2 和电感 L_2

(2) 测量互感与耦合常数

连接电路如图所示：

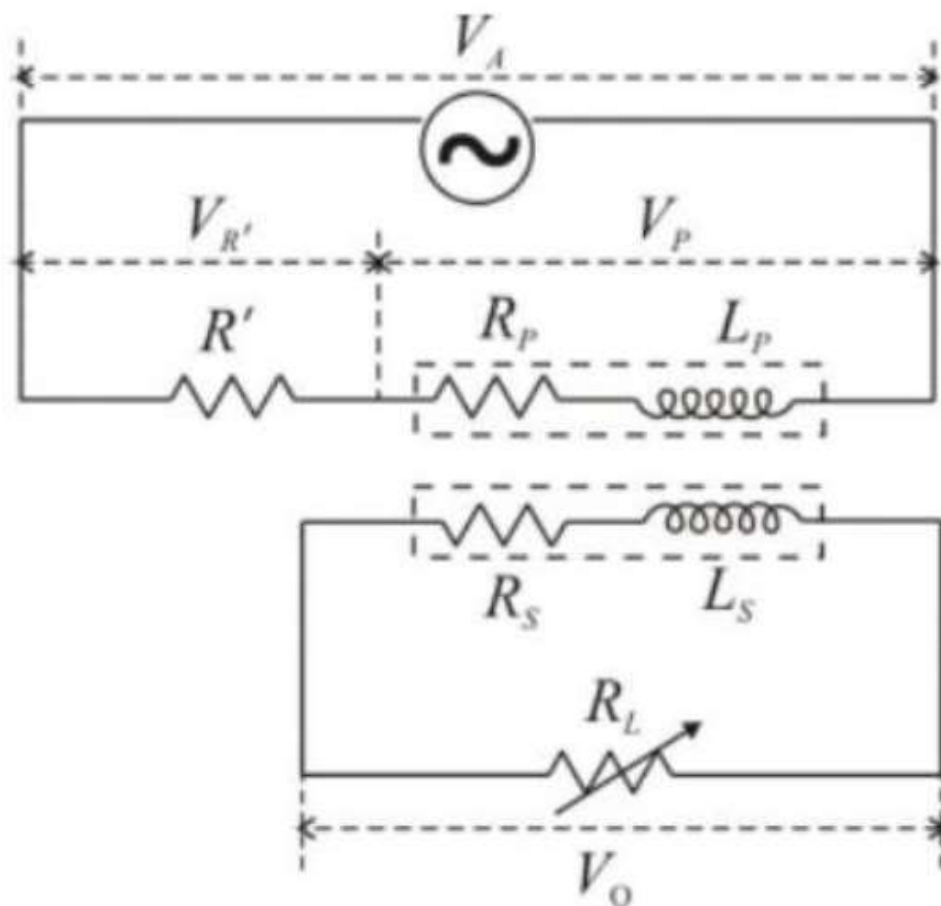


图3 变负载测量电路

(1) 如图 3 所示，使用线圈 1 作为初级线圈，线圈 2 作为次级线圈，将初级线圈与 $R'=300\ \Omega$ 的定值电阻串联，并连到信号发生器通道 1(CH1)的输出端，将次级线圈与电阻板(作为可变电阻 R_L)相连，改变 R_L 的阻值，并测量每个 R_L 时的 V_A 、 $V_{R'}$ 、 V 和输出电压 V_O 。 (R_L 的取值： $R_L=100\ \Omega$ ， $200\ \Omega$ ， \dots ， $1000\ \Omega$)

(2) 理论推导互感系数 M 、截距可用来获得次级线圈的感抗 X_s 。写出该线性关系的表达式。

(3) 涡流效应

(1) 取 $R'=300\ \Omega$ (定值电阻)， $R_L=1000\ \Omega$ (用电阻板)，通过适当的测量，计算铝芯中涡流带来的平均功率损耗 ΔP 。

4. 数据分析

(1) 根据电阻与感抗的计算公式，得到电阻和电感特性如下：

	R (Ω)	X (Ω)
a) 测线圈1, 无铝芯	62.831506	529.4131363
c) 测线圈1, 放入铝芯(有铝芯)	83.212077	441.6093231
b) 左右调换线圈, 测线圈2, 取下铝芯(无铝芯)	55.372302	630.3038529
d) 测线圈2, 放入铝芯(有铝芯)	132.55339	397.4611468

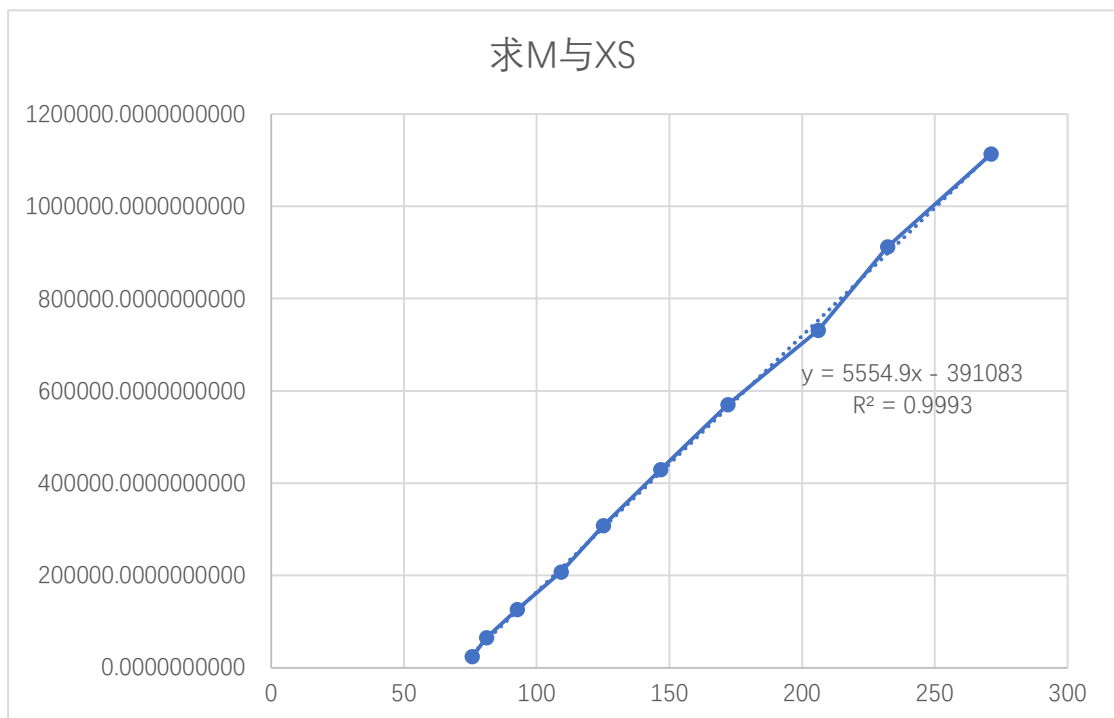
(2) 根据互感与自感特性, 计算得电路中 M 与 k 的值:

	无铝芯	有铝芯
M (mH)	75.46	51.67
k	0.820766203	0.7749054

(3) 有关互感系数与感抗的线性表达式:

$$(RS + RL)^2 = (IP^2/IS^2) * \omega^2 * M^2 - XS^2$$

(4) 作图与求 M 与 X

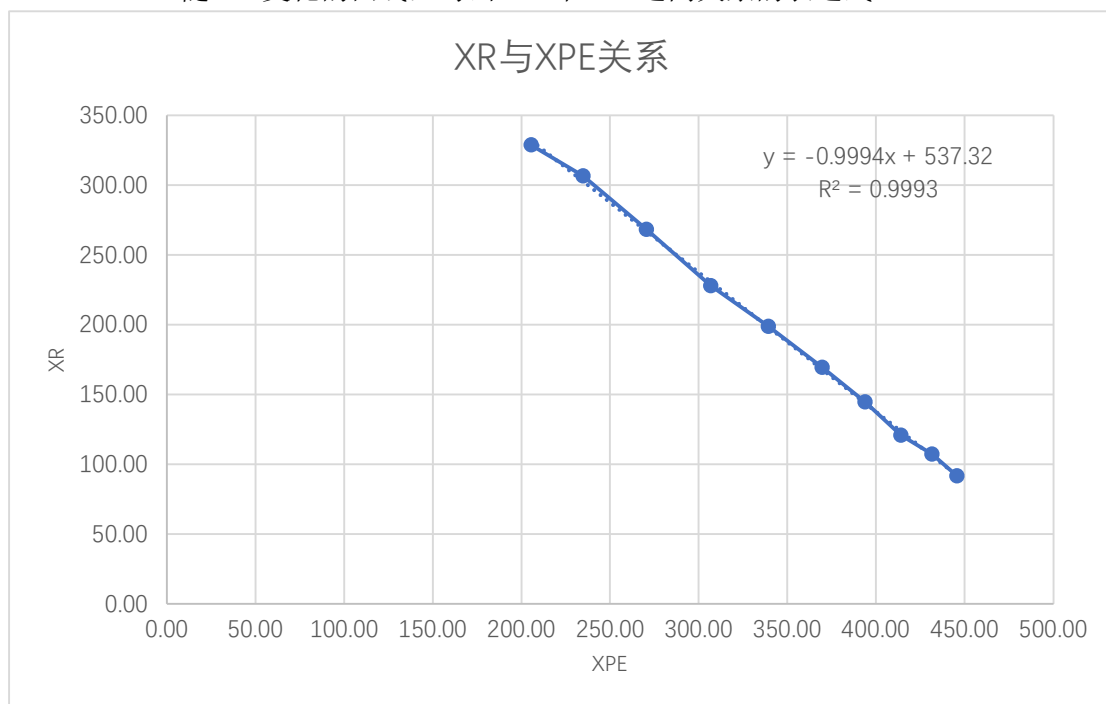


M:	74.53120152
XS:	625.3662927

(5) 对应次级电路中各个 R_L 取值时, 初级线圈的等效电阻 R_{PE} 和等效感抗 X_{PE} 。反射电阻 R_R 和反射电感 L_R 对应的反射感抗 X_R 。

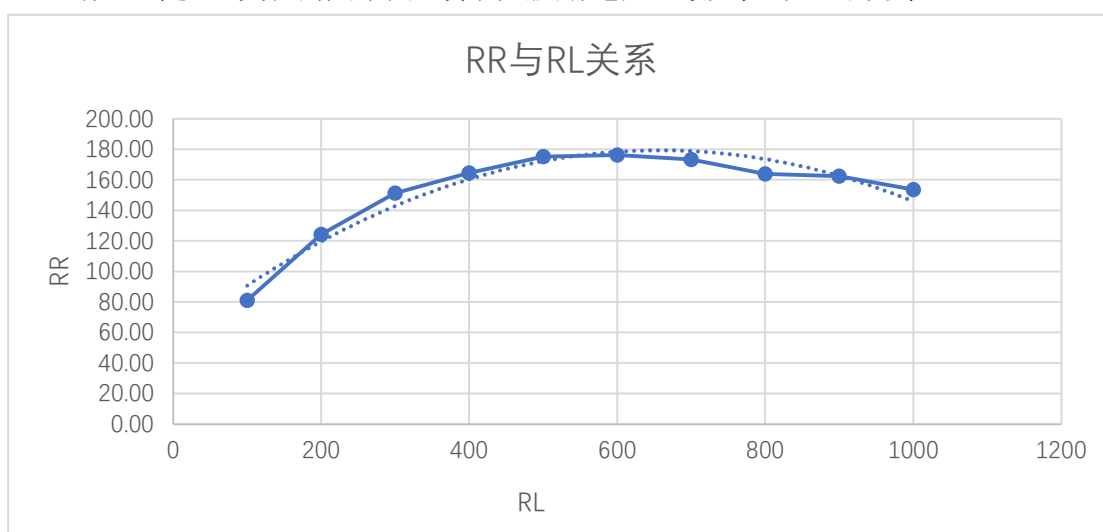
R_L (Ω)	R_{PE} (Ω)	X_{PE} (Ω)	X_R (Ω)	R_R (Ω)
100	128.89262	205.4997368	328.75719	81.03990022
200	173.70196	234.6824356	306.46856	124.1680197
300	199.27989	270.481586	268.31432	151.2785909
400	214.54821	306.8420401	227.80253	164.579291
500	222.94054	339.3710418	198.82423	175.187677
600	223.66448	369.5739216	169.53439	176.2771091
700	222.09373	393.7404666	144.61247	173.3072953
800	217.40809	413.9754763	120.74661	163.8627169
900	210.584	431.5180173	107.16649	162.4357771
1000	203.85779	445.6173019	91.770426	153.6591674

(6) X_{PE} 随 X_R 变化的曲线，写出 X_{PE} 和 X_R 之间关系的表达式。



$$X_R = -0.9994X_{PE} + 537.32$$

(7) 作 R_R 随 R_L 变化的关系图，并找出反射电阻达最大值时 R_L 的取值



当 R_L 为 600 时， R_R 最大

(8) 分别对线圈 1 和线圈 2 接上电源的情形，估算 $L_{\text{芯}}$ 和 $R_{\text{芯}}$ 的比值。

线圈1		线圈2	
L芯:	-13.9744108893196	L芯:	-37.0580676421993
R芯:	20.3805714321232	R芯:	77.1810866909504
比值	-0.685673164	比值	-0.480144414

(9) 根据理论计算，得到 $\Delta P (W) = 0.001541446$

5. 原始数据

Part 1					
f (kHz):	1				
	R' (Ω)	V_A (V)	V (V)	V_{R'} (V)	V_O (V)
a) 测线圈1, 无铝芯	540	6.772	4.500	4.558	4.005
c) 测线圈1, 放入铝芯(有铝芯)	450	6.708	4.354	4.360	3.147
b) 左右调换线圈, 测线圈2, 取下铝芯(无铝芯)	630	6.818	4.633	4.613	3.469
d) 测线圈2, 放入铝芯(有铝芯)	420	6.685	4.115	4.125	3.187
Part2 (g): 左右调换线圈, 测线圈 1; 取下铝芯(无铝芯); R'改为300Ω定值电阻; 改变RL测试					
R _L (Ω)	R' (Ω)	V_A (V)	V (V)	V_{R'} (V)	V_{RL} (V)
100	300	6.460	3.295	4.075	0.981
200	300	6.520	3.601	3.700	1.720
300	300	6.568	3.886	3.470	2.264
400	300	6.602	4.126	3.306	2.650
500	300	6.631	4.319	3.191	2.987
600	300	6.653	4.484	3.114	3.230
700	300	6.670	4.611	3.060	3.420
800	300	6.686	4.718	3.027	3.533
900	300	6.694	4.808	3.004	3.716
1000	300	6.704	4.884	2.990	3.803
Part4 (p): 放入铝芯(有铝芯), 测线圈1; R' = 300Ω定制电阻; RL = 1kΩ					
R _L (Ω)	R' (Ω)	V_A (V)	V (V)	V_{R'} (V)	V_O (V)
1000	300	6.654	4.645	3.356	3.025