

第 36 届全国中学生物理竞赛决赛

实验题 I 松耦合变压器的研究答题纸

竞赛时间：2019 年 10 月 27 日

所需时间：90 分钟

成绩评定表

题序	1	2	3	总分
得分				
评卷人				
审核人				

提示卡使用情况（请监考老师在相应位置上签名）

提示卡	使用提示卡 1	使用提示卡 2
监考人员签名		

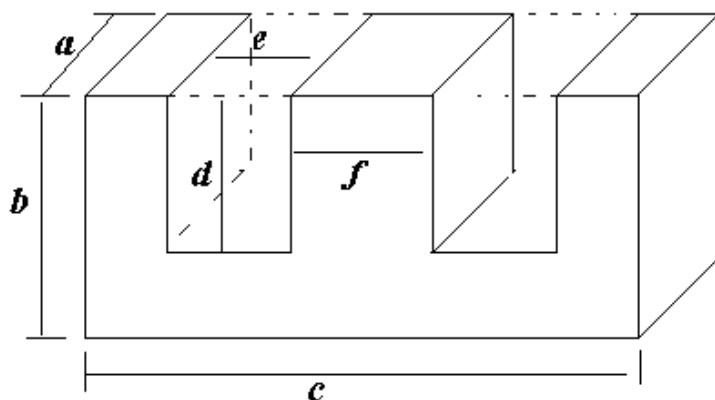
提示卡	使用提示卡 3	使用提示卡 4
监考人员签名		

得分	
----	--

1、基本参数测量（不要求重复测量）。（本部分 22 分）

(1) 变压器功率与磁芯的体积密切相关，测量一个 E 型磁芯的体积 V_e 。（5 分）

测量示意图和公式



如图所示，用游标卡尺测量 a, b, c, d, e, f 的大小。

$$V_e = a * b * c - 2a * d * e$$

数据记录 and 数据处理

数据记录如下表：

单位：mm

a	b	c	d	e	f
36.28	57.00	110.00	38.70	19.42	36.68

$$V_e = a * b * c - 2a * d * e = 172942.8(mm)^3 \approx 0.1729 \times 10^{-3} m^3$$

评分：

1、测量示意图和公式 2 分

2、数据列表记录，数据有效位数正确 1 分

3、结果有效位数 1 分

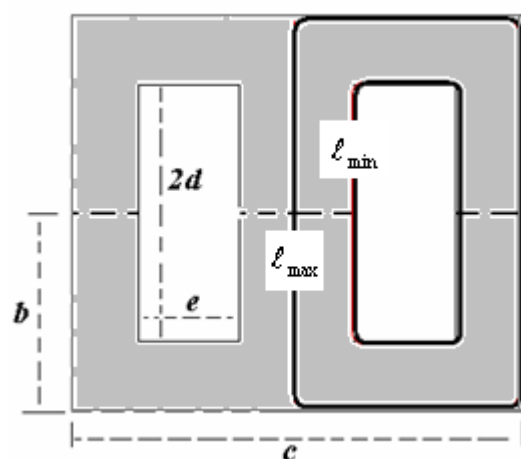
4、结果值合理 1 分（合理范围 $(0.165 - 0.178) \times 10^{-3} m^3$ ）

(2) 用一对 E 型磁芯和一对初次级线圈可组合成一个 EE 型松耦合变压器，在什么状态下松耦合变压器漏磁最小？若此状态下变压器漏磁可忽略，测量该变压器磁路长度（磁力线长度）的最大值 $\ell_{e\max}$ 和最小值 $\ell_{e\min}$ （5 分）

变压器漏磁最小的状态描述：

在 EE 型磁芯正对紧耦合，间隙为零时变压器漏磁最小。

最长磁路和最短磁路的示意图



数据记录和处理

如上图所示

最长磁路长度为： $\ell_{\max} = 4b + c = 338.00\text{mm}$

最短磁路长度为： $\ell_{\min} = 4d + 2e = 193.64\text{mm}$

评分：

5、正对，间隙为零，1 分

6、示意图 1 分

7、最长磁路 1 分（ $\pm 4\text{mm}$ 以内）

8、最短磁路 1 分（ $\pm 4\text{mm}$ 以内）

9、五位有效数字 1 分

(3) 已知初级线圈 A 的匝数 N_A 为 198.0 匝，测量次级线圈的匝数 N_B 。(5 分)

线圈编号：_____

在漏磁最小的情况下，用数字电桥测量初级线圈 A 的电感 L_A 和次级线圈 B 的电感 L_B 。

数据如下：

L_A (mH)	L_B (mH)
413.2	142.38

因为在不漏磁情况下，自感系数与线圈的匝数平方成正比。

$$N_B = \sqrt{\frac{L_B}{L_A}} N_A = \sqrt{\frac{142.38}{413.2}} \times 198.0 = 116.2 \text{匝}$$

评分：

10、 自感系数测量数据正确 2 分（样器测量值±15mH）

11、 公式 2 分

12、 结果值 1 分（116 匝 1 分, 115 匝, 117 匝得 0.5 分，其他不得分）

(4) 估算该 E 型铁氧体磁芯的相对磁导率 μ_r 。(5 分)

$$L \approx \frac{\mu_0 \mu_r N^2 S_e}{\ell_e}$$

$$\mu_r \approx \frac{L \cdot \ell_e}{\mu_0 N^2 S_e}$$

$$\ell_e \approx \frac{\ell_{e\max} + \ell_{e\min}}{2} = \frac{338.00 + 193.64}{2} = 265.82 \text{ mm}$$

磁芯中间的截面大小长为 36.28mm，宽为 36.68mm

磁芯中间的截面积：

$$S_e = a * f = 36.28 \times 36.68 = 1330.75 (\text{mm})^2 = 1.331 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\mu_r \approx \frac{L_A \cdot \ell_e}{\mu_0 N_A^2 S_e} = 1675$$

或

$$\mu_r \approx \frac{L_B \cdot \ell_e}{\mu_0 N_B^2 S_e} = 1682$$

评分：

13、 测量公式 $\mu_r \approx \frac{L \cdot \ell_e}{\mu_0 N^2 S_e}$ 2 分

14、 有效截面积 S_e 1 分

15、 有效磁路长度 ℓ_e 1 分

16、 结果值合理 1 分（样器测量值 ± 200 ）

(5) 在室温环境中，判断该 E 型铁氧体磁导率与温度是正相关还是负相关？说明判断依据。（2 分）

正相关关系

用人体手温给磁芯加热时，L 值增大。

评分：

17、 正相关 1 分，依据 1 分。

得分	
----	--

2、最大耦合系数测量(本部分 14 分)

测量原理：

初、次级线圈间漏磁最小时，互感系数最大，耦合系数最大。即松耦合变压器的间隙为零时耦合系数最大。

在 EE 型松耦合变压器中，设两个线圈的自感系数分别为 L_A 和 L_B ，互感系数为 M ；将两个线圈串联起来，测量其总的自感系数为 L ；串联方式有两种：首尾相接为顺串，尾尾相接为逆串，其相互关系式如下：

$$\text{顺串: } L_{\text{顺}} = L_A + L_B + 2M \quad (1)$$

$$\text{逆串: } L_{\text{逆}} = L_A + L_B - 2M \quad (2)$$

由 (1) 或 (2) 式可得互感系数 M 。

$$M_1 = \frac{L_{\text{顺}} - L_A - L_B}{2}$$

$$\text{或: } M_2 = \frac{L_A + L_B - L_{\text{逆}}}{2}$$

耦合系数为：

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_A \cdot L_B}} \quad (3)$$

$$\text{方法 1, 顺串时: } k_1 = \frac{L_{\text{顺}} - L_A - L_B}{2\sqrt{L_A \cdot L_B}} \quad (4)$$

$$\text{方法 2, 逆串时: } k_2 = \frac{L_A + L_B - L_{\text{逆}}}{2\sqrt{L_A \cdot L_B}} \quad (5)$$

数据记录和处理

单位: mH

L_A	L_B	$L_{\text{顺}}$	$L_{\text{逆}}$
413.2	142.38	1060.4	85.63

$$M_1 = 252.41\text{mH}$$

$$M_2 = 234.98\text{mH}$$

$$k_1 = 1.041$$

$$k_2 = 0.9687$$

不一致的主要原因。

产生系统误差的主要原因：由于初次级线圈磁场的相互作用引起顺串（或逆串）时漏磁情况发生变化。

评分：

18、 测量方法 3 分（间隙为零 1 分，顺串逆串 2 分）

19、 公式 5 分[（1），（2），（3），（4）和（5）式各 1 分，]

20、 数据顺串和逆串自感系数 L 测量 2 分。

21、 耦合系数计算 2 分

22、 误差原因 2 分（漏磁情况发生变化 2 分，漏磁 1 分）。

得分	
----	--

3、测量耦合系数与间隙的关系（本部分 24 分）

(1) 测量 EE 型松耦合变压器的耦合系数与气隙间距的关系。（20 分）

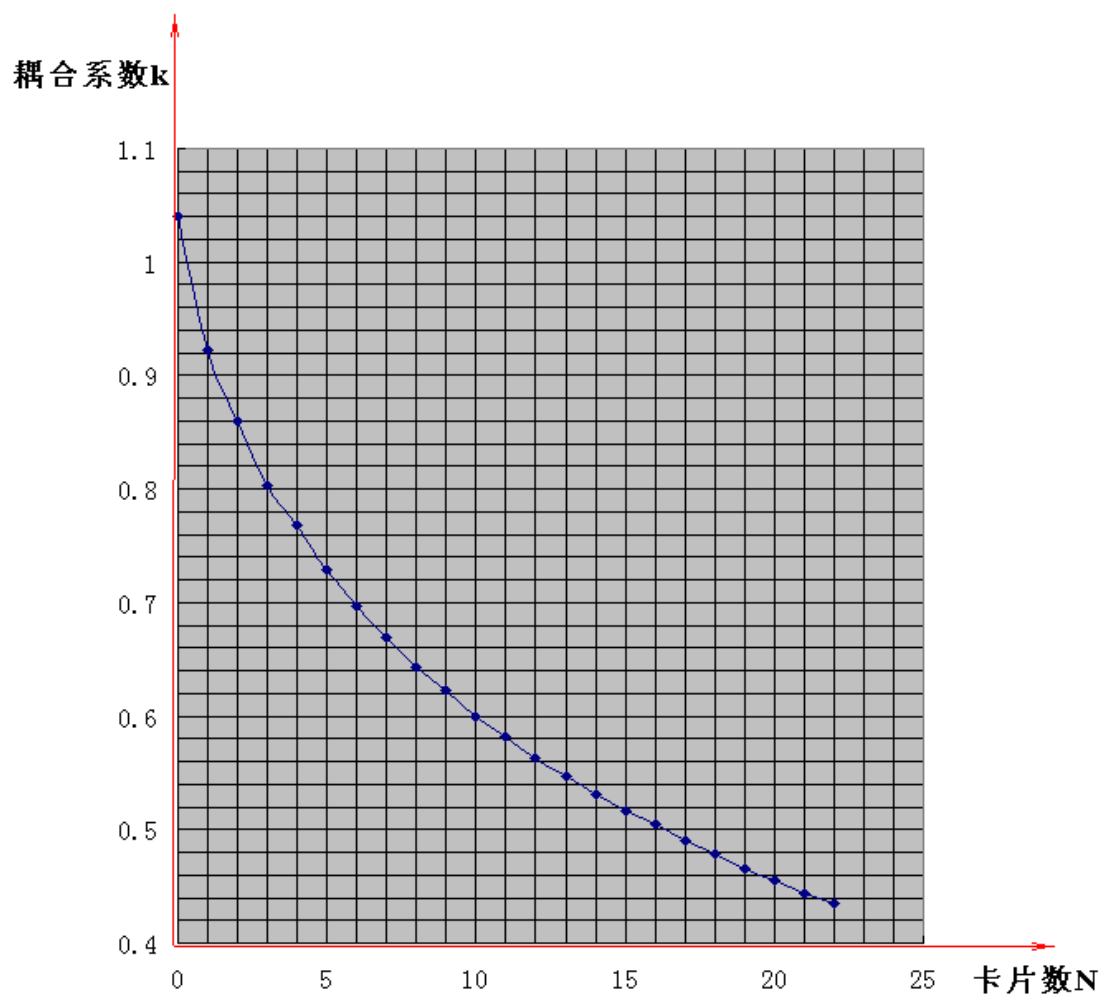
简述实验方案

将纸卡片垫入 EE 型松耦合变压器磁芯中心柱之间，以纸片的张数为单位，垫入纸片的张数代表松耦合变压器的间隙间距 h ；在松耦合变压器的不同间隙间距时，测量相应的自感系数、互感系数和耦合系数。实验方法与实验 2 相同。

列表记录数据、处理数据

卡片张数N	L_A (mH)	L_B (mH)	L_+ (mH)	M (mH)	k
0	413.2	142.38	1060.4	252.41	1.041
1	109.71	37.945	266.71	59.5275	0.9226
2	69.36	23.741	162.91	34.9045	0.8601
3	53.29	18.213	121.57	25.0335	0.8035
4	44.42	15.28	99.69	19.995	0.7675
5	38.871	13.424	85.6	16.6525	0.729
6	35.089	12.152	76.04	14.3995	0.6973
7	32.288	11.193	68.95	12.7345	0.6699
8	30.138	10.47	63.47	11.431	0.6435
9	28.442	9.893	59.22	10.4425	0.6225
10	27.074	9.429	55.67	9.5835	0.5998
11	25.924	9.04	52.79	8.913	0.5822
12	24.945	8.707	50.27	8.309	0.5637
13	24.131	8.427	48.14	7.791	0.5463
14	23.405	8.181	46.3	7.357	0.5317
15	22.785	7.97	44.66	6.9525	0.5159
16	22.221	7.78	43.26	6.6295	0.5042
17	21.73	7.613	41.95	6.3035	0.4901
18	21.291	7.46	40.83	6.0395	0.4792
19	20.892	7.325	39.748	5.7655	0.4661
20	20.534	7.202	38.809	5.5365	0.4553
21	20.212	7.092	37.93	5.313	0.4438
22	19.911	6.991	37.154	5.126	0.4345

实验数据处理作图如下：



耦合系数 k 与气隙间距 h （以纸片的张数为单位）的关系曲线。

- 23、 实验方案 4 分
- 24、 实验数据列表 1 分
- 25、 20 组以上实验数据 5 分（20 组以上 5 分，15-19 组 4 分，10-14 组 3 分，5-9 组 2 分，1-4 组 1 分）
- 26、 数据计算 5 分
- 27、 实验曲线 5 分（纵坐标平移合理 1 分，坐标标度 1 分，图名 1 分，实验点 1 分，曲线光滑 1 分）
- 28、 用逆串的方法做测量，评分标准参见顺串情况。

(2) 当耦合系数为 0.55 时，该 EE 型松耦合变压器的气隙间距为多少毫米？（4 分）

从图中可以看出，耦合系数为 0.55 时，卡片的张数位于 12 张和 13 张之间。用游标卡尺可以测出 12 张和 13 张卡片的厚度分别为：3.26mm 和 3.50mm。

间隙卡片数（张）	12	13
间隙间距 h (mm)	3.26	3.50
耦合系数 k	0.5637	0.5463

从图中可以看出，在 12 张和 13 张卡片之间，耦合系数与间隙间距可以近似为线性关系，所以有耦合系数为 0.55 时的间隙有

$$h_{0.55} = 3.26 + \frac{3.50 - 3.26}{0.5637 - 0.5463} \times (0.5637 - 0.5500) \approx 3.45mm$$

评分：

29、 纸张数判断正确 1 分（在 12 张和 14 张纸之间）

30、 线性近似计算公式 1 分

31、 计算结果 2 分（在 3.00mm---4.00mm 范围内 1 分，3 位有效数字 1 分）