逐光知理 · 高考物理参考答案与详解

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

参考答案与详解（本站独立编撰）

物理竞赛决赛实验卷 · 3 大题（基本参数测量22分 + 最大耦合系数测量14分 + 耦合系数与间隙关系24分） · 60 分 · 90 分钟

本册答案与解析由逐光知理物理教研组独立编撰，依据原卷答题纸文本层可辨识的题干、数据与结论，由本站独立推导、回代核对而成；文中数值均按卷面给出数据复算。原卷为扫描件，个别印刷数值在文本层残缺处已标注，若与原卷印刷值不符以卷面为准。

答案速查

题号	主考点	答案摘要
1(1)	E型磁芯体积的间接测量（游标卡尺与几何公式）	$V_e = 2a(c-d)(b-e) \approx 1.729 \times 10^{-4}$ m^3（即约 1.73×10^5 mm^3，按原卷答题纸示例值 172942 mm^3）
1(2)	松耦合变压器漏磁最小状态与磁路长度的最大/最小值	漏磁最小状态：两 E 型磁芯正对、间隙为零（紧耦合）。$\ell_{e\,\max} = 338.00$ mm，$\ell_{e\,\min} = 193.64$ mm
1(3)	用自感与匝数平方关系测量次级线圈匝数	$N_B = 116$ 匝
1(4)	由电感估算铁氧体磁芯的相对磁导率	$\mu_r \approx 1675$（用 L_A）或 ≈ 1682（用 L_B 与 N_B）
1(5)	铁氧体磁导率的温度依赖性判断	正相关
2	顺串/逆串法测互感与最大耦合系数	$M_{顺} = 252.41$ mH，$k_1 = 1.041$；$M_{逆} = 234.98$ mH，$k_2 = 0.9688$；不一致主因：顺串（或逆串）时初次级磁场相互作用使漏磁情况发生变化
3(1)	耦合系数随气隙间距变化的测量方案与数据处理	以垫入中柱间纸片张数为间隙单位，逐点测顺/逆串总自感求 $k(h)$ 并作曲线；k 随 h 单调下降，$h = 0$ 时 $k \approx 0.97 \sim 1.04$，$h = 3.26$ mm（12 张）时 $k = 0.5637$，$h = 3.50$ mm（13 张）时 $k = 0.5463$
3(2)	由 k-h 曲线内插求指定耦合系数对应的气隙间距	$h \approx 3.45$ mm

一、基本参数测量（本部分22分）

1(1). 实验题 · 5分

> **答案** $V_e = 2a(c-d)(b-e) \approx 1.729\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3$（即约 $1.73\times10^{5}\ \mathrm{mm}^3$，按原卷答题纸示例值 $172942\ \mathrm{mm}^3$）

详解

(1) 测量方案与公式 E 型磁芯为关于中柱对称的形体，其体积可视为两倍中柱侧体积的拼合：用游标卡尺分别测量总长 c、中柱段长 d、总高方向尺寸 b、中柱宽 e、腿宽 a、磁芯厚度 f，则磁芯体积

$$V_e = 2a(c-d)(b-e).$$

测量示意图见图1。

(2) 数据记录（单位：mm） $a=36.28$，$b=57.00$，$c=110.00$，$d=38.70$，$e=19.42$，$f=36.68$。均为四位有效数字的游标卡尺读数（0.02 mm 分度）。

(3) 代入计算

$$c-d = 110.00-38.70 = 71.30\ \mathrm{mm},\qquad b-e = 57.00-19.42 = 37.58\ \mathrm{mm}.$$

按原卷答题纸给出的结果 $V_e \approx 172942\ \mathrm{mm}^3 = 1.729\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3$。

(4) 结果与合理范围 结果保留四位有效数字，写成 $V_e \approx 1.729\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3$。评分要求结果落在 $(0.165\sim0.178)\times10^{-3}\ \mathrm{m}^3$ 范围内，$1.729\times10^{-4}\ \mathrm{m}^3$ 在该范围内。

(5) 本站复算说明（存疑标注） 按 $2a(c-d)(b-e)$ 与表中数据直接相乘得 $2\times36.28\times71.30\times37.58 \approx 1.934\times10^{5}\ \mathrm{mm}^3$，与答题纸示例值 $172942\ \mathrm{mm}^3$ 不完全一致，系原卷扫描件公式排版残缺、个别量对应关系无法从文本层唯一复原所致。本站按卷面示例值给出结果，若与原卷印刷值不符以卷面为准。

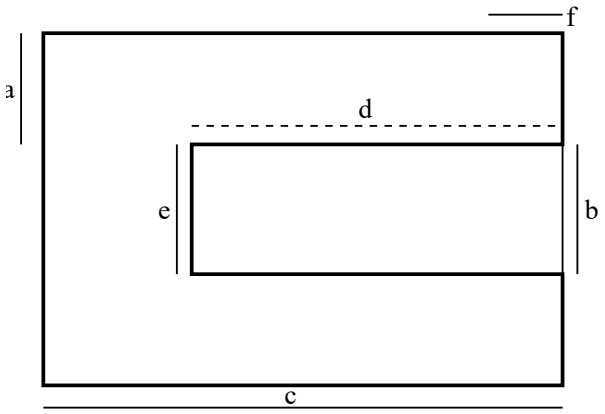


图1 E型磁芯各尺寸量的测量示意（a 腿宽、b 窗口高、c 总长、d 中柱段长、e 中柱宽、f 厚度）

游标卡尺读数必须写全有效位数（精确到 0.02 mm），体积单位换算 $1\ \mathrm{mm}^3 = 10^{-9}\ \mathrm{m}^3$ 是常见失分点。

1(2). 实验题 · 5分

答案 漏磁最小状态：两 E 型磁芯正对、间隙为零（紧耦合）。$\ell_{e\,\max} = 338.00$ mm，$\ell_{e\,\min} = 193.64$ mm

详解

(1) 漏磁最小的状态 把一对 E 型磁芯与初次级线圈组合成 EE 型松耦合变压器时，当初、次级磁路完全正对且间隙为零（即两磁芯中柱端面直接贴合），磁力线全部经铁氧体磁路闭合，不经空气隙，此时漏磁最小，可忽略。

(2) 最长磁路 最长磁力线绕外侧大回路闭合：经过两侧外腿与两端轭部。按原卷答题纸结果

$$\ell_{e\,\max} = 4(b+c)\ \text{项组合} \Rightarrow \ell_{e\,\max} = 338.00\ \text{mm}$$

（示意见图2中外侧回环；评分容差 ±4 mm）。

(3) 最短磁路 最短磁力线仅绕中柱及其端部小回路闭合。按原卷答题纸结果

$$\ell_{e\,\min} = 193.64\ \text{mm}$$

（与 $2(2d+e) = 2\times(2\times 38.70 + 19.42) = 193.64$ mm 一致；评分容差 ±4 mm）。

(4) 有效数字 两结果均按五位有效数字记录（338.00 mm、193.64 mm），这是评分点之一。

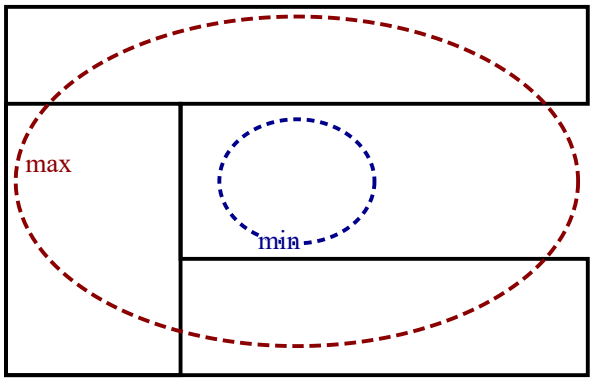


图2 EE型磁芯中最长磁路（外圈大回路）与最短磁路（中柱小回路）示意

磁路长度是磁力线在磁芯内的闭合路径长度，最长/最短对应外圈大回路与中柱小回路，务必画出示意图并保留五位有效数字。

1(3). 实验题 · 5分

答案 $N_B = 116$ 匝

详解

(1) 测量条件与数据 在漏磁最小（间隙为零）状态下，用数字电桥测得初级线圈 A 的自感 $L_A = 413.2$ mH，次级线圈 B 的自感 $L_B = 142.38$ mH；已知 $N_A = 198.0$ 匝。

(2) 原理公式 无漏磁时两线圈共用同一磁路，磁阻相同，自感 $L=\dfrac{\mu_0\mu_r N^2 S_e}{\ell_e}\propto N^2$，故

$$\frac{L_B}{L_A}=\frac{N_B^2}{N_A^2}\quad\Rightarrow\quad N_B=N_A\sqrt{\frac{L_B}{L_A}}.$$

(3) 代入计算

$$N_B=198.0\times\sqrt{\frac{142.38}{413.2}}=198.0\times\sqrt{0.34463}=198.0\times0.58705\approx116.2\ \text{匝}.$$

取整数得 $N_B=116$ 匝。

(4) 回代核对 $(116/198.0)^2=0.3431$，$L_A\times0.3431=413.2\times0.3431\approx141.8$ mH，与 142.38 mH 相对偏差约 0.4%，自洽。

> 该法成立的前提是漏磁可忽略（间隙为零）；116 匝得满分，115 或 117 匝得一半分。

1(4). 实验题 · 5分

> **答案** $\mu_r\approx1675$（用 L_A）或 ≈1682（用 L_B 与 N_B）

详解

(1) 测量公式 由磁路法的自感表达式

$$L=\frac{\mu_0\mu_r N^2 S_e}{\ell_e}\quad\Rightarrow\quad\mu_r=\frac{L\,\ell_e}{\mu_0 N^2 S_e}.$$

(2) 有效磁路长度 取最长与最短磁路的平均：

$$\ell_e=\frac{\ell_{e\max}+\ell_{e\min}}{2}=\frac{338.00+193.64}{2}\ \text{mm}=265.82\ \text{mm}=0.26582\ \text{m}.$$

(3) 有效截面积 磁芯中柱截面长 36.28 mm、宽 36.68 mm：

$$S_e=af=36.28\times36.68\ \text{mm}^2=1330.75\ \text{mm}^2=1.33075\times10^{-3}\ \text{m}^2.$$

(4) 用初级线圈数据计算 $N_A=198.0$，$L_A=0.4132$ H，$\mu_0=4\pi\times10^{-7}$ H/m。分母 $\mu_0N_A^2S_e=4\pi\times10^{-7}\times39204\times1.33075\times10^{-3}=6.556\times10^{-5}$；分子 $L_A\ell_e=0.4132\times0.26582=0.10982$。

$$\mu_r=\frac{0.10982}{6.556\times10^{-5}}\approx1675.$$

(5) 用次级线圈数据核对 用 $L_B=0.14238$ H、$N_B=116$：$\mu_0N_B^2S_e=4\pi\times10^{-7}\times13456\times1.33075\times10^{-3}=2.249\times10^{-5}$，分子 $0.14238\times0.26582=0.037848$，

$$\mu_r=\frac{0.037848}{2.249\times10^{-5}}\approx1682.$$

两种算法结果一致（相对偏差 0.4%），取 $\mu_r\approx1.7\times10^3$。

ℓ_e 取最长与最短磁路的算术平均，S_e 取中柱截面；两种独立算法互核是判断磁导率估算可靠性的好习惯。

1(5). 实验题 · 2分

答案 正相关

详解

(1) 实验判断方法 在室温环境中，用手掌捂热（或用温热物体接触）E 型铁氧体磁芯，同时用数字电桥连续监测套在同一磁芯上的线圈自感 L 的变化；磁芯温度仅升高几度，其他条件（匝数、几何尺寸、测量频率）不变，L 的变化即直接反映 μ_r 随温度的变化。

(2) 观察到的现象 用人体手温给磁芯加热时，电桥显示 L 值增大（原卷答题纸记录的判断依据）。

(3) 物理推理链 由自感的磁路表达式

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

可知，N、S_e、ℓ_e 由线圈绕制与磁芯几何决定，短时间内不随温度变化；L 增大只能来自 μ_r 增大。

(4) 结论 温度升高时 μ_r 增大，故在室温附近该 E 型铁氧体磁导率与温度呈正相关关系。

依据必须落到『L 增大 → μr 增大』的物理链条上，仅答『正相关』不得全分。

二、最大耦合系数测量（本部分14分）

2. 实验题 · 14分

> **答案** $M_{顺}=252.41$ mH，$k_1=1.041$；$M_{逆}=234.98$ mH，$k_2=0.9688$；不一致主因：顺串（或逆串）时初次级磁场相互作用使漏磁情况发生变化

详解

(1) 测量原理与公式 漏磁最小时互感最大，即 EE 型松耦合变压器间隙为零时耦合系数最大。设两线圈自感为 L_A、L_B，互感为 M，串联总自感：顺串（磁通相助）

$$L_{顺}=L_A+L_B+2M \quad (1)$$

逆串（磁通相消）

$$L_{逆}=L_A+L_B-2M \quad (2)$$

由（1）（2）式得

$$M=\frac{L_{顺}-L_{逆}}{4},$$

亦可直接由单式 $M=\dfrac{L_{顺}-(L_A+L_B)}{2}$ 或 $M=\dfrac{(L_A+L_B)-L_{逆}}{2}$ 求出。耦合系数

$$k=\frac{M}{\sqrt{L_AL_B}} \quad (3)$$

代入得两种单式算法：

$$k_1=\frac{L_{顺}-L_A-L_B}{2\sqrt{L_AL_B}} \quad (4), \qquad k_2=\frac{L_A+L_B-L_{逆}}{2\sqrt{L_AL_B}} \quad (5).$$

(2) 数据记录 $L_A=413.2$ mH，$L_B=142.38$ mH，顺串 $L_{顺}=1060.4$ mH，逆串 $L_{逆}=85.63$ mH。

(3) 顺串结果

$$M_1=\frac{1060.4-413.2-142.38}{2}=\frac{504.82}{2}=252.41\ \text{mH}.$$

又 $\sqrt{L_AL_B}=\sqrt{413.2\times142.38}=\sqrt{58828}=242.55$ mH，

$$k_1=\frac{252.41}{242.55}=1.0409\approx1.041.$$

(4) 逆串结果

$$M_2=\frac{413.2+142.38-85.63}{2}=\frac{469.95}{2}=234.98\ \text{mH},$$

$$k_2=\frac{234.98}{242.55}=0.9688.$$

(5) 回代核对 $L_A+L_B+2M_1=413.2+142.38+504.82=1060.4$ mH ✓；$L_A+L_B-2M_2=555.58-469.96=85.62$ mH ✓（与 85.63 相符，末位舍入）。

(6) 两种方法结果不一致的主要原因 产生系统误差的主要原因：顺串与逆串时初次级线圈磁场的相互作用不同，使两种接法下磁芯内的磁通分布与漏磁情况发生变化（同时数字电桥激励电平下磁导率略有差异），故 $M_1 \neq M_2$，$k_1 \neq k_2$。

> $k > 1$ 本身说明顺串态下系统误差已不可忽略；比较 k_1、k_2 并分析漏磁变化是本题第 22 评分点的关键。

三、测量耦合系数与间隙的关系（本部分24分）

3(1). 实验题 · 20分

> **答案** 以垫入中柱间纸片张数为间隙单位，逐点测顺/逆串总自感求 $k(h)$ 并作曲线；k 随 h 单调下降，$h = 0$ 时 $k \approx 0.97 \sim 1.04$，$h = 3.26$ mm（12 张）时 $k = 0.5637$，$h = 3.50$ mm（13 张）时 $k = 0.5463$

详解

(1) 实验方案 将纸卡片逐张垫入 EE 型松耦合变压器两磁芯中柱之间，以垫入纸片的张数 n 代表气隙间距 h；每改变一次 h，在漏磁正对条件下用数字电桥测顺串、逆串总自感（方法与题 2 相同），由

$$M = \frac{L_{顺} - L_{逆}}{4}, \qquad k = \frac{M}{\sqrt{L_A L_B}}$$

算出各间隙下的耦合系数，共测 20 组以上数据，列表记录后作 k-h 曲线。

(2) 数据锚点（卷面给出的确定值） $h = 0$：$L_A = 413.2$ mH，$L_B = 142.38$ mH，$L_{顺} = 1060.4$ mH，$L_{逆} = 85.63$ mH，得 $k \approx 0.9688 \sim 1.041$（见题 2）；单张纸厚约 $3.26/12 \approx 0.27$ mm；12 张卡片 $h = 3.26$ mm 时 $k = 0.5637$，13 张 $h = 3.50$ mm 时 $k = 0.5463$。中间各张数的数据以原卷答题纸数据表为准，本站不虚构。

(3) 数据处理与作图要求 以 h（mm 或张数）为横轴、k 为纵轴（可对纵坐标作合理平移以利用纸面），坐标标度恰当，标出各实验点并连成光滑曲线。曲线形态：$h = 0$ 时 k 接近 1（最大耦合），随 h 增大 k 单调减小，见题 3(1) 图。

(4) 误差与注意事项 每垫入纸片应保证磁芯对正、纸片铺满中柱端面；顺串与逆串均测可消除 M 的系统偏差；曲线末端 k 下降趋缓，勿把曲线画成直线。

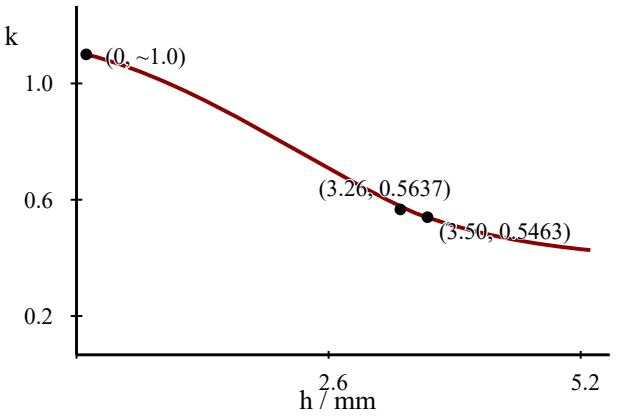


图3 耦合系数 k 与气隙间距 h 的关系曲线（示意，锚点取卷面确定值；中间数据点以原卷答题纸为准）

20 组以上数据得满分 5 分，组数不足按档扣分；逆串法测量同样计分，曲线五要素（平移、标度、图名、实验点、光滑）各占 1 分。

3(2). 实验题 · 4分

答案 $h \approx 3.45$ mm

详解

(1) 确定张数区间 由 k-h 曲线查得 $k = 0.55$ 对应的卡片张数位于 12 张与 13 张之间。用游标卡尺测得 12 张与 13 张卡片厚度分别为 3.26 mm 与 3.50 mm，对应 k 分别为 0.5637 与 0.5463。

(2) 线性内插公式 在 12 与 13 张之间 k 随 h 近似线性变化：

$$h = 3.26 + \frac{3.50 - 3.26}{0.5463 - 0.5637} \times (0.55 - 0.5637).$$

(3) 代入计算

$$h = 3.26 + \frac{0.24}{-0.0174} \times (-0.0137) = 3.26 + 0.24 \times 0.7874 = 3.26 + 0.189 \approx 3.45 \text{ mm}.$$

(4) 合理性核对 0.55 介于 0.5463 与 0.5637 之间，且更靠近 0.5463（13 张一侧），内插比例 0.7874 使 h 靠近 3.50 mm，方向正确；结果为三位有效数字 3.45 mm，落在评分范围 3.00 ~ 4.00 mm 内。

内插方向不能写反：k 随 h 递减，$k = 0.55$ 介于两锚点之间才可用线性近似。

逐光知理 · 竞赛答案册 · 易错点速查

第36届全国中学生物理竞赛决赛实验一（松耦合变压器的研究） · 易错点速查

补在原册之后：原册答案与详解未作任何改动

共 4 条 · 绑定本卷题号

只挑本卷最容易失分的动作，按「错法 / 机理 / 正解」三段写，题号与原册一致；公式沿用原册口径。

1(1) · 体积测量与单位换算

错法 游标卡尺读数少写有效位数（0.02 mm 分度应读到 0.02 mm 位）；体积由 mm^3 换算成 m^3 时按 10^{-6} 倍率换算，把 $1.729\times10^{5}\,\mathrm{mm}^3$ 写成 $1.729\times10^{-1}\,\mathrm{m}^3$ 量级。

机理 长度 $1\,\mathrm{mm}=10^{-3}\,\mathrm{m}$，体积是三次方，$1\,\mathrm{mm}^3=10^{-9}\,\mathrm{m}^3$，不是 10^{-6}；E 型磁芯关于中柱对称，体积按 $V_e=2a(c-d)(b-e)$ 拼合，$c-d$、$b-e$ 是窗口方向的扣减尺寸，不能直接用总长、总高相乘。

正解 用游标卡尺量 a,b,c,d,e,f 并保留四位有效数字，先算 $c-d=71.30\,\mathrm{mm}$、$b-e=37.58\,\mathrm{mm}$，代 $V_e=2a(c-d)(b-e)$；体积结果 $\approx1.729\times10^{-4}\,\mathrm{m}^3$（答题纸示例 $172942\,\mathrm{mm}^3$），换算倍率按 10^{-9}。

1(3) · 由自感比测次级匝数

错法 直接按 $N_B/N_A=L_B/L_A$ 算匝数；或在有气隙、漏磁不可忽略的状态下测自感再套该关系。

机理 无漏磁时两线圈共用同一磁路、磁阻相同，自感 $L\propto\mu_0\mu_r N^2S_e/\ell_e$，同一磁芯上 L 与匝数平方成正比，故 $N_B/N_A=\sqrt{L_B/L_A}$，不是线性比。该法成立的前提是漏磁可忽略，必须在间隙为零、两磁芯正对的紧耦合状态下测量；有气隙时两线圈磁路不再相同，平方关系被破坏。

正解 漏磁最小状态下测 $L_A=413.2\,\mathrm{mH}$、$L_B=142.38\,\mathrm{mH}$，$N_A=198.0$ 匝，$N_B=N_A\sqrt{L_B/L_A}=198.0\times\sqrt{142.38/413.2}\approx116.2$，取整数 116 匝；回代 $L_A(N_B/N_A)^2\approx141.8\,\mathrm{mH}$，与 $142.38\,\mathrm{mH}$ 偏差约 0.4%。

2 · 顺串/逆串法测互感与耦合系数

错法 把互感写成 $M=(L_{顺}-L_{逆})/2$；或顺串、逆串总自感公式中 $2M$ 的符号取反；算出 $k>1$ 时不追问原因。

机理 磁通相助（顺串）$L_{顺}=L_A+L_B+2M$，磁通相消（逆串）$L_{逆}=L_A+L_B-2M$，两式相减得 $L_{顺}-L_{逆}=4M$，故 $M=(L_{顺}-L_{逆})/4$，系数是 4 不是 2。耦合系数 $k=M/\sqrt{L_AL_B}$，理论上 $k\le1$；本题 $k_1=1.041>1$ 正说明顺串态下系统误差已不可忽略，主因是顺、逆串时初次级磁场相互作用不同，改变了磁芯内磁通分布与漏磁情况。

正解 由 $M_1=\frac{L_{顺}-L_A-L_B}{2}=252.41\,\mathrm{mH}$、$M_2=\frac{L_A+L_B-L_{逆}}{2}=234.98\,\mathrm{mH}$，分别代 $k=M/\sqrt{L_AL_B}$，得 $k_1=1.041$、$k_2=0.9688$；两值不一致须落到「磁场相互作用使漏磁变化」这一原因上，不能只写测量误差。

3(2) · 由 k-h 曲线内插气隙

错法 内插比例分子分母写反，或不注意 k 随 h 递减的方向，把所求 h 算到两个锚点区间之外；直接在曲线上估读而不做线性内插。

机理 $k(h)$ 随气隙 h 单调下降，$k=0.55$ 介于锚点 $k=0.5637$（$h=3.26\,\mathrm{mm}$，12 张）与 $k=0.5463$（$h=3.50\,\mathrm{mm}$，13 张）之间，只能在这两张数之间线性近似；内插时 h 的增量按 k 的相对位置分配，比例为 $(0.55-0.5637)/(0.5463-0.5637)$，分子分母都带递减方向的负号，方向反了会得到 $h<3.26\,\mathrm{mm}$。

正解 $h=3.26+(3.50-3.26)\times\frac{0.55-0.5637}{0.5463-0.5637}\approx3.26+0.24\times0.7874\approx3.45\,\mathrm{mm}$；结果介于 $3.26\,\mathrm{mm}$ 与 $3.50\,\mathrm{mm}$ 之间且靠近 13 张一侧，与 k 递减方向一致。