

GRADUS

物理 II

解答册

循迹而上 · 拾级登顶

寻迹 · 梦叶子 编著

目录

0.1 摩擦起电与电荷守恒	1
0.2 库仑定律	2
0.3 一个悬而未决的问题：电荷凭什么“隔空”施力？	4
0.4 场的思想：法拉第的力线	7
0.5 电场强度：场的“强度读数”	7
0.6 点电荷的场强与叠加	8
0.7 匀强电场	9
0.8 电荷组的场：等量同号与等量异号	9
0.9 电场力做功与电势能	13
0.10 电势：电势能的“强度读数”	14
0.11 电势差与场强的关系： $U = Ed$	16
0.12 场强与电势的关系辨析（高频易错）	16
0.13 图像分析法：电势图、场强图、势能图	16
0.14 匀加与匀减：电场力做功，能量说了算	20
0.15 偏转：类平抛的标准动作	21
0.16 组合：先加速后偏转（示波器模型）	23
0.17 技法小结：电场运动题的三板斧	23
0.18 电容：储存电荷的本领	27
0.19 平行板电容器的决定式	28
0.20 静电的利用与防范	30
0.21 电流：电荷的定向移动	33
0.22 电阻与欧姆定律	35
0.23 伏安法测电阻（实验）	36
0.24 电表改装：一个表头，三种表	36
0.25 电动势与内阻	39

0.26 动态电路分析（含容/含表）	41
0.27 实验：测电源的电动势和内阻	42
0.28 多用电表：电表里的“瑞士军刀”	43
0.29 电功与电功率 / 8.2 焦耳定律与非纯电阻	46
0.30 最大功率：滑动变阻器怎么取？	48
0.31 磁现象与磁感线 / 9.2 电流的磁场：右手螺旋定则	52
0.32 磁感应强度：磁场版的“场强”	53
0.33 安培力的大小与方向	57
0.34 平行导线相互作用	58
0.35 安培力与运动学（伏笔）	59
0.36 洛伦兹力	62
0.37 洛伦兹力永不做功	63
0.38 圆周运动	64
0.39 质谱仪	65
0.40 回旋加速器	66
0.41 有界磁场	66
0.42 磁铁插线圈	70
0.43 磁通量	72
0.44 感应电流的条件	74
0.45 法拉第定律	76
0.46 楞次定律	77
0.47 互感与自感	78
0.48 感应图像与电量通式	79
0.49 动生电动势	82
0.50 恒力滑轨	83
0.51 自感	88
0.52 涡流	89
0.53 正弦交流电的产生	93
0.54 有效值：交流电的“等效直流”	94
0.55 电感与电容对交流的阻碍	96
0.56 变压器：互感升降压	99
0.57 远距离输电：为什么要升压	100

0.58 麦克斯韦电磁场理论	105
0.59 电磁波谱与应用	106
0.60 LC 振荡电路与电磁波的发射、接收	108
0.61 敏感元件	111
0.62 传感器系统	113
0.63 静电应用：复印、除尘、起电、避雷	117
0.64 磁场与现代科技：磁悬浮、无线充电、霍尔推进器	119
0.65 电路与现代科技：除颤器、加速器	120

0.1 摩擦起电与电荷守恒

例题 1.1 解析

思考路径：

• 读题：三个球、三步接触——第一步 C 触 A，第二步 C 触 B；“完全相同”是关键，说明每一步都均分；

- 第一步：C (0) 接触 A (+4q) → 总电荷 +4q，均分后各 +2q；
- 第二步：C 现在是 +2q，接触 B (-2q) → 先中和再均分，总电荷 0，各带 0；
- 验算守恒：初始 +4q - 2q = +2q，终态 A(+2q) + B(0) + C(0) = +2q，一致。

规范解：

(1) C 接触 A: $Q_C = Q_A = \frac{4q + 0}{2} = +2q$;

(2) C (+2q) 接触 B (-2q): 总电荷 +2q + (-2q) = 0，均分后 $Q_B = Q_C = 0$ 。

答：最终 A 带 +2q，B、C 均不带电。

易错点：接触问题“顺序敏感”——若先让 C 接触 B 再接触 A，结果是 A、C 各 +1q、B 不变 (-2q)，每一步都必须重算；另外均分的是“总电荷（先中和）”，不是把两者电量直接平均。

A1 解析

思路：摩擦起电是电子转移，“得负失正”。

规范解：玻璃棒带正电，丝绸带负电；橡胶棒带负电；实质是电子转移；谁得到电子，谁就带负电。

答：正、负、负；电子转移；负。

易错点：丝绸与玻璃棒——玻璃棒失去电子带正电；毛皮与橡胶棒——橡胶棒得到电子带负电。别把“得负失正”记反。

A2 解析

思路：完全相同金属球接触后电荷均分，均分的是总电荷。

规范解：总电荷 = 0 + 3q = 3q，接触分开后各带 $Q = \frac{3q}{2} = +1.5q$ 。

接触前总电荷 3q，接触后总电荷 1.5q + 1.5q = 3q，守恒。

答：两球各带 +1.5q；总电荷量始终为 +3q。

易错点：均分后是 +1.5q（可以是分数倍 q），不必强求整数；验算守恒能检查计算。

A3 解析

思路：按接触顺序一步步算，每步均分总电荷。

规范解：

$$C(0) \text{ 接触 } A(+6q): Q_A = Q_C = \frac{6q+0}{2} = +3q;$$

$$C(+3q) \text{ 接触 } B(-4q): \text{总电荷 } +3q - 4q = -q, \text{ 均分后 } Q_B = Q_C = -\frac{q}{2}.$$

终态: $A = +3q$, $B = -0.5q$, $C = -0.5q$ 。

验算: 初始 $6q - 4q = +2q$; 终态 $3q - 0.5q - 0.5q = +2q$, 守恒。

答: A 带 $+3q$, B、C 各带 $-0.5q$ 。

易错点：第二步是 $+3q$ 与 $-4q$ “先中和”剩 $-q$ 再均分，别直接算 $(+3-4)/2$ 忘了先求和——其实 $(3q-4q)/2 = -0.5q$ 一步也对，关键是总电荷的符号别搞错。

0.2 库仑定律

例题 1.2 解析

思考路径：

- 读题：两电荷异号 ($+2 \times 10^{-8}$ 与 -1×10^{-8}) $\rightarrow$ 力为引力；
- 代入公式：只代绝对值算大小， $F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$ ；
- 量级预期： $10^{-8} \times 10^{-8} = 10^{-16}$ ，乘以 10^9 再除以 0.09 ，得 10^{-5} N 量级——微观电荷的力很小。

规范解：

$$F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{2 \times 10^{-8} \times 1 \times 10^{-8}}{0.3^2} = \frac{9 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-16}}{0.09} = 2 \times 10^{-5} \text{ N}.$$

答：两电荷间静电力为 2×10^{-5} N，方向为引力（互相吸引）。

易错点：公式代绝对值、方向靠“同斥异吸”判断——写成负值会让人误解为“排斥”；另外注意 r 取米 (0.3 m) 不要带 cm 直接算。

例题 1.3 解析

思考路径：

- 两个力都写出来，共同分母都是 r^2 ，可以约掉——比值与距离无关，只比 ke^2 与 Gm_em_p ；
- 库仑力用 e^2 的绝对值；万有引力只算质量乘积；
- 数量级估算： $k/G \approx 1.35 \times 10^{20}$ ，再乘 $e^2/(m_em_p) \approx 2.6 \times 10^{19}$ ，得 10^{39} 量级。

规范解：

$$F_E = k \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \approx 8.2 \times 10^{-8} \text{ N};$$

$$F_G = G \frac{m_e m_p}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 1.67 \times 10^{-27}}{(5.3 \times 10^{-11})^2} \approx 3.6 \times 10^{-47} \text{ N};$$

$$\frac{F_E}{F_G} \approx \frac{8.2 \times 10^{-8}}{3.6 \times 10^{-47}} \approx 2.3 \times 10^{39}.$$

答：库仑力约 $8.2 \times 10^{-8} \text{ N}$ ，万有引力约 $3.6 \times 10^{-47} \text{ N}$ ，电力约为引力的 2×10^{39} 倍。

易错点：这个 10^{39} 倍的数字就是“微观世界电力统治”的由来——原子、分子、化学键全靠电磁力维持；要会写“约 10^{39} 倍”的数量级结论，不必背死精确值。

A4 解析

思路：异号相吸；代入绝对值算大小。

$$\text{规范解：} F = k \frac{|q_1 q_2|}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-8} \times 6 \times 10^{-8}}{0.3^2} = \frac{9 \times 10^9 \times 1.8 \times 10^{-15}}{0.09} = 1.8 \times 10^{-4} \text{ N}.$$

答：静电力大小 $1.8 \times 10^{-4} \text{ N}$ ，方向为引力（互相吸引）。

易错点： $|q_1 q_2| = 1.8 \times 10^{-15}$ 是乘积，别漏指数；符号不影响大小。

A5 解析

思路：平方反比 + 正比，两个变化独立乘起来。

$$\text{规范解：距离变 3 倍} \rightarrow \text{力变 } \frac{1}{3^2} = \frac{1}{9};$$

电荷量变 4 倍 $\rightarrow$ 力变 4 倍；

同时变化 $\rightarrow$ 力变为 $\frac{1}{9} \times 4 = \frac{4}{9}$ 。

答： $\frac{1}{9}$ ；同时变化后为 $\frac{4}{9}$ 。

易错点：平方反比作用在“距离”，正比作用在“电荷量”，两者要分开算再相乘，别把电荷量的 4 倍也平方。

A6 解析

思路：两个电荷等距同大小，方向相反——先算各自力再合成。

$$\text{规范解：} +Q \text{ 对 } +q: \text{斥力，方向沿 } +x, \text{大小 } F_1 = k \frac{Qq}{a^2};$$

$$-Q \text{ 对 } +q: \text{引力，方向沿 } -x, \text{大小 } F_2 = k \frac{Qq}{a^2}.$$

$$\text{合力 } F = F_1 - F_2 = 0.$$

答：原点处电荷受合力为零。

易错点：两力等大反向时合力为零，这是“场强叠加会抵消”的雏形（第 2 章正式学）；注意

+Q 与 +q 是斥力、-Q 与 +q 是引力，方向别画反。

A7 解析

思路：库仑定律适用条件是点电荷； $r \rightarrow 0$ 时带电体不能再看作点电荷。

规范解：

(1) 错。 $r \rightarrow 0$ 时两带电体已不能看作点电荷，库仑定律公式不再适用，不能推出 $F \rightarrow \infty$ ；

(2) 错。库仑定律只适用于真空中（可近似推广到空气、介质中需修正）的点电荷，带电体大小形状不可忽略时需修正；

(3) 错。摩擦起电只是电子转移，正负电荷成对出现，总电荷守恒，没有“创造”电荷。

易错点：“ $r \rightarrow 0$ 时 F 无穷大”是最经典的错误——凡是公式失效于极限处，第一反应是检查适用条件。

0.3 一个悬而未决的问题：电荷凭什么“隔空”施力？

A8 解析

思路：同第 1.3 例题，比值与距离无关，直接比较 ke^2 与 Gm_e^2 。

规范解： $F_E = k \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(1.0 \times 10^{-10})^2} \approx 2.3 \times 10^{-8} \text{ N}$ ；

$$F_G = G \frac{m_e^2}{r^2} = 6.67 \times 10^{-11} \times \frac{(9.1 \times 10^{-31})^2}{(1.0 \times 10^{-10})^2} \approx 5.5 \times 10^{-51} \text{ N}；$$

$$\text{比值 } \frac{F_E}{F_G} \approx 4.2 \times 10^{42}。$$

答：库仑力约为万有引力的 10^{42} 倍——微观世界引力完全可以忽略。

易错点：电子与电子之间是“同号相斥”，两力方向相反（库仑力把电子推开、引力把电子拉近），但比较“大小”时只算绝对值；数量级结论“约 10^{42} 倍”要会写。

B 层·真题研习

B1 解析（2023·上海学业水平等级考）

思路：接触后均分——每步先求总电荷再除以 2，按顺序走。

规范解： x(+4 μC) 与 y(0) 接触： $Q_y = \frac{4+0}{2} = +2 \mu\text{C}$ ；

y(+2 μC) 与 z(-10 μC) 接触：总电荷 $+2 - 10 = -8 \mu\text{C}$ ， $Q_y = \frac{-8}{2} = -4 \mu\text{C}$ 。

选 A。

易错点：第二步是“先中和再均分”——(+2) 与 (-10) 不是直接平均成 -4 就完事，要意识到中和掉的 8 μC 是等量正负抵消，本质还是总电荷除以 2。

B2 解析（2022·上海物理学业水平测试）

思路：圆环上每一小段都是点电荷，用微元法把整环的力合成；只有沿轴线方向的分量保留。

规范解：把圆环分成 N 小段，每段电荷 $q' = \frac{Q}{N}$ 。每段对 q 的库仑力沿“段—电荷”连线，只有轴向分量贡献：

$$F = N \cdot k \frac{q'q}{d^2 + R^2} \cdot \cos \theta, \text{ 其中 } \cos \theta = \frac{d}{\sqrt{d^2 + R^2}},$$

$$\text{得 } F = k \frac{Qqd}{(d^2 + R^2)^{3/2}} < k \frac{Qq}{d^2}. \text{ 故第一空填 “<”。}$$

$$\text{由 } k = \frac{Fr^2}{q^2}, \text{ 代入 SI 基本单位: } F \text{ 为 } \text{kg} \cdot \text{m/s}^2, r \text{ 为 } \text{m}, q \text{ 为 } \text{A} \cdot \text{s},$$

$$\text{得 } k \text{ 的单位为 } \text{kg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-4} \cdot \text{A}^{-2}.$$

易错点：圆环产生的力永远比“全部电荷集中在圆心”的等效点电荷力小，因为侧向分量抵消了；单位推导要会从 $k = Fr^2/q^2$ 一步步换算，A（安培）是 SI 基本单位，电荷量 $q = It$ 的单位是 $\text{A} \cdot \text{s}$ 。

C 层 · 创新拓展

C1 解析（静电喷漆 · 同号相斥）

思路：库仑斥力公式直接算；重力是 mg ；比例题把 m 、 q 一并代入。

规范解：

$$(1) F = k \frac{q^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.0 \times 10^{-12})^2}{(1.0 \times 10^{-3})^2} = \frac{9 \times 10^{-15}}{1 \times 10^{-6}} = 9.0 \times 10^{-9} \text{ N}.$$

$$(2) G = mg = 5.0 \times 10^{-13} \times 9.8 \approx 4.9 \times 10^{-12} \text{ N};$$

$$\frac{F}{G} \approx \frac{9.0 \times 10^{-9}}{4.9 \times 10^{-12}} \approx 1.8 \times 10^3.$$

$$(3) F' = k \frac{(2q)^2}{r^2} = 4F, \text{ 斥力变为原来的 4 倍。}$$

答：(1) $9.0 \times 10^{-9} \text{ N}$ ；(2) 约为重力的 1.8×10^3 倍，斥力远超重力，漆雾颗粒彼此推开、雾化均匀不粘连；(3) 4 倍。

易错点：两个颗粒都带 q ，乘积是 q^2 ，不是 $q+q$ ；“电量变为 2 倍”是对每个颗粒而言，乘积变 4 倍，别忘了平方。

C2 解析（静电复印 · 墨粉吸附）

思路：库仑引力 $F = k \frac{|qQ|}{r^2}$ 代绝对值；加速度 $a = F/m$ ；近似匀加速吸到鼓面，用 $d = \frac{1}{2}at^2$ 。

规范解：

$$(1) F = k \frac{|qQ|}{d^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3.0 \times 10^{-14} \times 2.0 \times 10^{-9}}{(1.0 \times 10^{-3})^2} = \frac{5.4 \times 10^{-13}}{1 \times 10^{-6}} = 5.4 \times 10^{-7} \text{ N}.$$

$$(2) a = \frac{F}{m} = \frac{5.4 \times 10^{-7}}{8.0 \times 10^{-15}} = 6.75 \times 10^7 \text{ m/s}^2;$$

$$t = \sqrt{\frac{2d}{a}} = \sqrt{\frac{2 \times 10^{-3}}{6.75 \times 10^7}} \approx 5.4 \times 10^{-6} \text{ s} \approx 5.4 \mu\text{s}.$$

$$(3) mg = 8.0 \times 10^{-15} \times 9.8 \approx 7.8 \times 10^{-14} \text{ N}; \quad \frac{F}{mg} \approx 6.9 \times 10^6.$$

答：(1) $5.4 \times 10^{-7} \text{ N}$ ；(2) 加速度 $6.75 \times 10^7 \text{ m/s}^2$ ，约 $5.4 \mu\text{s}$ 吸附到位；(3) 约为重力的 7×10^6 倍——静电吸附力远胜重力，所以复印能在瞬间完成墨粉转移。

(注：墨粉颗粒质量与带电量取印刷行业常见量级，为命题设定值。)

易错点：距离 d 在库仑公式里要平方 (1 mm 是 10^{-3} m ，平方后 10^{-6})；“吸到鼓面”的位移近似取初始间距 d ，用匀加速时间公式，不要漏掉 $2d$ 里的 2。

本章综合 · S 层

S1 解析 (接触均分 · 库仑定律 · 平方反比)

思路：先接触 (均分 + 守恒)，再库仑力，再平方反比；最后用对称性解释均分。

规范解：

(1) C(0) 接触 A(+8q)：各 +4q；C(+4q) 接触 B(-2q)：总电荷 +2q，均分后各 +q。

终态：A = +4q，B = +q，C = +q。验算： $8q - 2q = 6q$ ， $4q + q + q = 6q$ ，守恒。

(2) A、B 相距 r ： $F = k \frac{(4q)(q)}{r^2} = \frac{4kq^2}{r^2}$ ，同号相斥。

(3) 距离 $2r$ ： $F' = k \frac{4q^2}{(2r)^2} = \frac{kq^2}{r^2} = \frac{F}{4}$ ，力变为原来的 $\frac{1}{4}$ 。

(4) 两球完全相同，接触瞬间可看作一个整体，电荷会沿两个等势的球面重新分布，由对称性各分一半；这本质是电荷守恒 + 几何对称的结果，不是“电荷自己知道要平均”。

易错点：A、B 是同号 (+4q 与 +q)，库仑力是斥力别写成引力；距离 $2r$ 时代入的是 $(2r)^2$ ，结果 $1/4$ ，别算成 $1/2$ 。

S2 解析 (三点电荷平衡)

思路：三个电荷都在平衡——对 q_3 列合力为零；同号电荷之间没有平衡点 (两力同向)，平衡点只能位于两同号电荷之间。

规范解：

(1) 设 q_3 放在距 A 为 x 处 ($0 < x < L$)。平衡条件：

$$k \frac{Qq_3}{x^2} = k \frac{4Qq_3}{(L-x)^2}, \text{ 即 } \frac{1}{x^2} = \frac{4}{(L-x)^2}, \text{ 得 } L-x = 2x, x = \frac{L}{3}.$$

(2) q_3 带正电或负电均能平衡——正电荷受两个斥力，负电荷受两个引力，力的大小只由位置决定，与电性无关。

(3) 不稳定平衡。若 q_3 稍向 A 靠近：距 A 更近、距 B 更远，A 的力增大而 B 的力减小，合力把它推得更远；无论正负电荷都是如此，一碰就跑。

易错点：平衡点只能夹在两同号电荷中间 (异号电荷之间两力同向不可能平衡)；位置由“距离平方反比”唯一决定，与 q_3 电量大小、电性都无关；“平衡”还要补一句“稳定与否”，考察的是扰动后的受力趋势。

0.4 场的思想：法拉第的力线

A1 解析

思路：电场线是“地图”不是“轨迹”；三条规则逐条核对。

规范解：A 错——电场线描述场强分布，不是粒子运动轨迹（粒子轨迹还要看初速度与受力，且只在电场线为直线时才可能重合）；B 错——电场线不能相交；C 对——电场线从正电荷出发，终止于负电荷或无穷远；D 错——匀强电场的电场线是平行等距的直线。

选 C。

易错点：“电场线就是轨迹”是最常见的误解；匀强电场电场线必须“平行且等距”，只平行不等距（比如板边缘）就不是匀强。

0.5 电场强度：场的“强度读数”

例题 2.1 解析

思考路径：

- 求场强：比值定义 $E = F/q$ ，方向与正电荷受力方向相同（向右）；
- “拿走试探电荷”：E 是电场本身的性质，与有没有探针无关——这正是比值定义法意义；
- 数值预期： $6 \times 10^{-6} \div 2 \times 10^{-8} = 300$ ，量级合理。

规范解： $E = \frac{F}{q} = \frac{6 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-8}} = 300 \text{ N/C}$ ，方向向右。

拿走试探电荷后，场强仍为 300 N/C（向右），不变。

答：该点场强 300 N/C 向右；场强与探针无关。

易错点：若把试探电荷换成负电荷，受力方向会反向（向左），但场强方向仍按“正电荷受力方向”定义（向右）——别用负电荷受力方向直接当场强方向。

A2 解析

思路：先算 E，再判断换电荷后 E 不变、只变受力。

规范解：(1) $E = \frac{F}{q} = \frac{6 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-8}} = 300 \text{ N/C}$ ，方向向右。

(2) E 不变，仍为 300 N/C 向右； $F' = |q'|E = 1 \times 10^{-8} \times 300 = 3 \times 10^{-6} \text{ N}$ ，方向向左（负电荷受力与场强方向相反）。

答：场强 300 N/C 向右；换电荷后场强不变，受力 $3 \times 10^{-6} \text{ N}$ 向左。

易错点：场强方向只由电场决定；负电荷受力方向与场强方向相反——“受力方向”和“场强

方向”是两个方向，别混。

A3 解析

思路：点电荷场强 $E = kQ/r^2$ ，正电荷背离、负电荷指向。

规范解： $E = k\frac{Q}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{4 \times 10^{-9}}{0.2^2} = \frac{36}{0.04} = 900 \text{ N/C}$ ，方向背离 +Q（沿连线向外）。

改为 $-4 \times 10^{-9} \text{ C}$ 后：大小仍为 900 N/C，方向反向——指向 Q。

答：900 N/C 背离电荷；改负后大小不变、方向反向。

易错点：电荷量变负，只是方向翻转，大小不变（平方反比只取绝对值）。

0.6 点电荷的场强与叠加

例题 2.2 解析

思考路径：

- 两同号电荷，场强哪里可能抵消？只有两电荷之间（ $0 < x < 3$ ）两场强方向才相反；
- 设零点在 $x = d$ ，列方程 $k\frac{Q}{d^2} = k\frac{4Q}{(3-d)^2}$ ；
- 解完必须验证：该点两个场强是否确实等大反向。

规范解：设零点在 $x = d$ （ $0 < d < 3$ ）。

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4}{(3-d)^2}, \text{ 开方得 } 3-d = 2d, d = 1 \text{ m}.$$

验证： $d = 1$ 处，+Q 产生 $E_1 = kQ$ （向右），+4Q 产生 $E_2 = k\frac{4Q}{4} = kQ$ （向左），恰好抵消。

答：场强为零的位置在 $x = 1 \text{ m}$ 处。

（补充：+Q 左侧 $x = -3 \text{ m}$ 处还有一解： $\frac{1}{d'^2} = \frac{4}{(3+d')^2}$ ， $3+d' = 2d'$ ， $d' = 3 \text{ m}$ 。）

易错点：两同号电荷间“中点的场强方向”各自指向外——别把方向画同向；验算是解电场叠加题的保险栓，解完一定代回去检查。

A4 解析

思路：等量同号，中点两电荷等距、电荷等量 $\rightarrow$ 场强等大反向。

规范解：+Q 在 O 点产生的场强 $E_1 = k\frac{Q}{a^2}$ ，方向背离左端 +Q（向右）；右端 +Q 产生的 $E_2 = k\frac{Q}{a^2}$ ，方向背离右端 +Q（向左）。

合场强 $E = E_1 - E_2 = 0$ 。

答：连线中点合场强为零。

易错点：中点合场强为零是因为“等大反向”——这是叠加的抵消结果，不是“没有电场”；换个非中点位置，两场强大小不等，合场强就不为零。

A5 解析

思路：等量异号，中点两场强同向 → 相加，套结论 $E = \frac{2kQ}{a^2}$ 。

规范解： $E = \frac{2kQ}{a^2} = \frac{2 \times 9 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-8}}{0.1^2} = \frac{360}{0.01} = 3.6 \times 10^4 \text{ N/C}$ 。

方向：从 +Q 指向 -Q（沿连线指向负电荷一侧）。

答：中点场强 $3.6 \times 10^4 \text{ N/C}$ ，方向从 +Q 指向 -Q。

易错点：等量同号中点“抵消”、等量异号中点“叠加”，一字之差结果截然不同——“同号中点零、异号中点叠加”是选择底牌。

0.7 匀强电场

A6 解析

思路：匀强电场 $E = U/d$ 直接算；电场线方向从高电势指向低电势，即从正板指向负板。

规范解： $E = \frac{U}{d} = \frac{200}{0.02} = 1.0 \times 10^4 \text{ V/m} = 10^4 \text{ N/C}$ 。

电场线方向从正极板指向负极板。

答：板间场强 10^4 N/C ；方向从正板指向负板。

易错点：U 用伏特、d 用米；电场线方向沿电势降低方向，别画反。

0.8 电荷组的场：等量同号与等量异号

例题 2.3 解析

思考路径：

• 中点 O：+Q 在左、-Q 在右，两场强都指向 -Q，同向叠加 → $E = \frac{2kQ}{a^2}$ ；

• 中垂线上 P 点：两电荷到 P 等距，各自场强大小相等，只有沿“连线方向”的分量保留，垂直分量抵消；

• P 距 O 为 a：两电荷到 P 的距离为 $\sqrt{2}a$ ，沿连线方向的分量要乘 $\cos 45^\circ$ 。

规范解：

(1) $E_O = \frac{2kQ}{a^2} = \frac{2 \times 9 \times 10^9 \times 3 \times 10^{-9}}{0.2^2} = \frac{54}{0.04} = 1350 \text{ N/C}$ ，方向沿 x 轴从 +Q 指向 -Q。

(2) 每个电荷在 P 点场强 $E_1 = k \frac{Q}{(\sqrt{2}a)^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{3 \times 10^{-9}}{0.08} = 337.5 \text{ N/C}$; 两场强方向关于中垂线对称, 合场强沿连线方向:

$$E_P = 2E_1 \cos 45^\circ = 2 \times 337.5 \times 0.707 \approx 477 \text{ N/C}, \text{ 方向仍从 } +Q \text{ 指向 } -Q.$$

答: (1) 1350 N/C; (2) 约 477 N/C, 方向从 +Q 指向 -Q。

易错点: 中垂线上的矢量叠加必须“分解、抵消、合成”三步走, 直接相加是错的; 等量异号电荷中垂线场强从中点向外递减 (不是先增后减), 中点最大。

A7 解析

思路: 三条电场线/电荷组结论逐条核对。

规范解:

(1) 对。匀强电场电场线平行等距。

(2) 错。等量同号电荷连线中点场强为零, 但该点电势不为零 (两正电荷电势叠加) ——“ $E=0$ 处 φ 不一定为 0”。

(3) 对。电场线越密, 场强越大。

易错点: “场强为零”和“电势为零”是两件独立的事——第 3 章会专门辨析, 这里先记住等量同号中点的反例。

A8 解析

思路: 两套电荷组的对称性结论直接调用。

规范解: 等量同号电荷连线的中垂线上: 中点处两场强等大反向、合场强为零; 从中点向两侧, 场强先增大后减小 (E - y 图像像字母 M, 最大值在距中点约 $a/\sqrt{2}$ 处)。

等量异号电荷连线的中垂线上 (取无穷远为零势): 中垂线是等势线, 电势处处为零; 场强方向沿连线方向 (指向 $-Q$ 一侧), 大小从中点向两侧逐渐减小 (中点处最大 $2kQ/a^2$)。

易错点: 同号中垂线“先增后减”、异号中垂线“单调递减”, 方向也完全不同 (同号沿中垂线向外、异号沿连线方向) ——两张图要分别记住。

B 层·真题研习

B1 解析 (2023·重庆卷)

思路: 在 x_0 处合场强为零, 两电荷在该点的场强必须等大反向; 先判方向定位置, 再列方程。

规范解: Q_1 为负电荷 (在原点), 它在 x 轴正半轴产生的场强指向原点 (沿 $-x$)。要使该点场强为零, Q_2 (正电荷) 必须放在原点左侧 (x 轴负半轴), 使它在 x_0 处产生的场强沿 $+x$ 。设 Q_2 距原点为 L , 则:

$$k \frac{|Q_1|}{x_0^2} = k \frac{8|Q_1|}{(x_0 + L)^2}, \text{ 开方得 } x_0 + L = 2\sqrt{2}x_0, L = (2\sqrt{2} - 1)x_0.$$

选 B。

易错点：先判方向再列方程——若不先确定 Q_2 在负半轴，直接列 $kQ_1/x_0^2 = 8kQ_1/(x_0 - L)^2$ 会得到矛盾结果；场强叠加题第一步永远是“画方向”。

B2 解析 (2024 · 海南卷)

思路：等量同号（负）电荷中垂线场强公式 $E(y)$ ；求最大值用均值不等式或求导；C、D 考查沿中垂线/连线运动的受力趋势。

规范解：设中垂线上某点到 O 的距离为 y ，合场强 $E(y) = \frac{2kqy}{(r^2 + y^2)^{3/2}}$ （两个 $-q$ 的场沿中垂线的分量叠加）。

由 $dE/dy = 0$ 得 $y = \frac{r}{\sqrt{2}}$ 时场强最大， $E_{max} = \frac{4kq}{3\sqrt{3}r^2}$ 。

A 错——最大点到 O 的距离是 $r/\sqrt{2}$ ，不是 r ；B 对；C 对——M 点 ($y = r > r/\sqrt{2}$) 在中垂线场强的下降区，电子受力（背离电荷群）随距离增大而减小，加速度一直减小；D 对——N 点在连线上距 O 为 x ($x \ll r$)，电子受的合力近似正比于位移 x 、指向 O，做简谐运动。

选 BCD。

易错点：中垂线场强有“最大值点”（在 $y = r/\sqrt{2}$ 处，不在中点）；电子带负电、受力方向与场强方向相反，注意 C 项“加速度一直减小”要求释放点在下降区；D 项简谐运动要求小位移 ($x \ll r$) 的线性恢复力。

B3 解析 (2026 · 河北卷 · 电场线)

思路：电场线的三条基本性质：从正电荷（或无穷远）出发、终止于负电荷（或无穷远）；不闭合；不相交。

规范解：探头感应出正电荷，正电荷是电场线的“源头”：电场线从它出发，终止于负电荷（飞行器上感应出的负电荷一侧）或无穷远。故 B 正确；A 错（电场线不闭合，闭合的是磁感线）；C 错（不相交）；D 错（电场线从正电荷出发，不是终止）。

答：B。

易错点：(1) 电场线“从正出发、终止于负”是硬规则，感应起电场景同样适用；(2) 别把“闭合”的磁感线记性移植给电场线；(3) 静电感应中正电荷在探头、负电荷在飞行器近端，电场线由探头指向飞行器。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (高压静电除尘 · 电晕放电)

思路：点电荷场强 $E = kQ/r^2$ 代数值；击穿条件 $E \geq E_0$ 反解半径。

规范解：

$$(1) E = k\frac{Q}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{5.0 \times 10^{-8}}{(0.5 \times 10^{-2})^2} = \frac{450}{2.5 \times 10^{-5}} = 1.8 \times 10^7 \text{ V/m}.$$

$1.8 \times 10^7 \text{ V/m} > 3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ ，该处发生电离放电。

$$(2) \text{ 令 } k\frac{Q}{r_c^2} = E_0, r_c = \sqrt{\frac{kQ}{E_0}} = \sqrt{\frac{450}{3.0 \times 10^6}} = \sqrt{1.5 \times 10^{-4}} \approx 1.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 1.2 \text{ cm}.$$

(3) 场强与 r^2 成反比, 针尖半径极小, 尖端附近 r 很小、场强极大, 轻易超过击穿场强产生电晕放电; 粗电极表面场强弱, 不易放电。

答: (1) $1.8 \times 10^7 \text{ V/m}$, 已放电; (2) 击穿半径约 1.2 cm ; (3) 尖端集中电荷、场强极大, 正是“尖端放电”的原理。

易错点: r 用米 ($0.5 \text{ cm} = 5 \times 10^{-3} \text{ m}$) 且要平方; 击穿半径约 1.2 cm 表示针尖周围 1.2 cm 内都处于电离区, 这是除尘器“电晕区”的实际尺度。

C2 解析 (空气净化器·集尘板吸附)

思路: 匀强电场 $E = U/d$; 电场力 $F = qE$; 加速度 $a = F/m$; 从板正中出发, 位移 $d/2$ 用 $d/2 = \frac{1}{2}at^2$ 求时间。

规范解:

$$(1) E = \frac{U}{d} = \frac{4.0 \times 10^3}{4.0 \times 10^{-3}} = 1.0 \times 10^6 \text{ V/m}.$$

$$(2) F = qE = 2.0 \times 10^{-14} \times 1.0 \times 10^6 = 2.0 \times 10^{-8} \text{ N};$$

$$a = \frac{F}{m} = \frac{2.0 \times 10^{-8}}{1.0 \times 10^{-12}} = 2.0 \times 10^4 \text{ m/s}^2.$$

$$(3) \text{从板正中到板面位移 } \frac{d}{2} = 2.0 \times 10^{-3} \text{ m};$$

$$t = \sqrt{\frac{2 \cdot d/2}{a}} = \sqrt{\frac{d}{a}} = \sqrt{\frac{4.0 \times 10^{-3}}{2.0 \times 10^4}} = \sqrt{2.0 \times 10^{-7}} \approx 4.5 \times 10^{-4} \text{ s}.$$

答: (1) $1.0 \times 10^6 \text{ V/m}$; (2) $2.0 \times 10^{-8} \text{ N}$ 、 $2.0 \times 10^4 \text{ m/s}^2$; (3) 约 $4.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ (不到半毫秒)。

易错点: 板间场强 $1.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ 低于空气击穿场强 ($3 \times 10^6 \text{ V/m}$), 说明该净化器设计安全——数值自洽是个好习惯; “从板正中”的位移是 $d/2$, 别用整板距 d 。

本章综合·S层

S1 解析 (正方形电荷组·对称与叠加)

思路: 对称性先砍掉一半工作量; 一个电荷变号后, 新场强 = 原抵消结果 + 变号引起的“差值场”。

规范解:

(1) 四个顶点电荷相同, O 到各顶点等距 $a/\sqrt{2}$, 各电荷在 O 产生的场强大小相等, 方向沿对角线指向/背离中心; 对称的两组 (相对顶点) 等大反向, 全部抵消。

答: $E_O = 0$ 。

(2) 原 A 处 $+q$ 在 O 的场强沿对角线从 A 指向 O , 大小 $E_A = k \frac{q}{(a/\sqrt{2})^2} = \frac{2kq}{a^2}$ 。改 $-q$ 后该场强反向 (从 O 指向 A)。其余三个电荷的贡献相互抵消, 故合场强等于“ A 点贡献的 2 倍反向”:

$$E_O = 2 \times \frac{2kq}{a^2} = \frac{4kq}{a^2}, \text{ 方向沿对角线由 } O \text{ 指向 } A.$$

$$(3) F = q_0 E_O = \frac{4kq q_0}{a^2}, \text{ 方向由 } O \text{ 指向 } A \text{ (正试探电荷受力与场强同向)}.$$

答: (1) 0; (2) $\frac{4kq}{a^2}$, 指向 A ; (3) $\frac{4kq q_0}{a^2}$, 指向 A 。

易错点：O 到顶点的距离是 $a/\sqrt{2}$ (对角线的一半)，平方后是 $a^2/2$ ，所以场强是 $2kq/a^2$ ，不是 kq/a^2 ；“一个变号”等效于“把原贡献反向后再加回来”，即 2 倍，别漏系数。

S2 解析 (匀强电场与点电荷叠加)

思路：匀强电场 + 点电荷场强都是矢量，先各自算、再代数加减 (同一直线)。

规范解：

(1) P 在 O 右侧 0.3 m：点电荷场强 $E_Q = k\frac{Q}{r^2} = 9 \times 10^9 \times \frac{1.0 \times 10^{-9}}{0.3^2} = \frac{9}{0.09} = 100 \text{ N/C}$ ，方向向右 (背离 +Q)。

合场强 $E = E_0 + E_Q = 2000 + 100 = 2100 \text{ N/C}$ ，方向向右。

(2) Q 改负： $E_Q = 100 \text{ N/C}$ 方向向左， $E = 2000 - 100 = 1900 \text{ N/C}$ ，方向向右。

(3) 可以。匀强场向右 2000，负点电荷的场在它左侧某处向左；设抵消点距 O 为 x (在 O 左侧)，令 $k\frac{|Q|}{x^2} = 2000$ ：

$$x^2 = \frac{9 \times 10^9 \times 1.0 \times 10^{-9}}{2000} = 4.5 \times 10^{-3}, \quad x \approx 0.067 \text{ m} = 6.7 \text{ cm}。$$

答：(1) 2100 N/C 向右；(2) 1900 N/C 向右；(3) 可以，O 左侧约 6.7 cm 处合场强为零。

易错点：叠加要带方向 (同向加、反向减)，别只加绝对值；抵消点在“点电荷的另一侧”——负点电荷左侧场强向左、正好与匀强场相反，别把抵消点放在正电荷右侧 (那里两点场强都向右，永远抵消不了)。

0.9 电场力做功与电势能

例题 3.1 解析

思考路径：

- 沿电场线方向电势降低——A 在上游，电势高；
- 电势差用 $U_{AB} = Ed$ ， d 取沿电场方向的距离 0.05 m；
- 电势差带符号： $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ ，与 U_{BA} 互为相反数。

规范解：A 在左侧 (上游)，电势高。

$$U_{AB} = Ed = 1000 \times 0.05 = 50 \text{ V}。$$

答： $U_{AB} = 50 \text{ V}$ ，A 点电势高。

易错点： U_{AB} 是“起点减终点”，问 U_{BA} 则为 -50 V ；电势差的正负由“起点减终点”决定，别弄反。

A1 解析

思路：沿电场线电势降低； $U = Ed$ 沿电场方向取投影。

规范解：A 在左（上游），电势高。

$$U_{AB} = EL = 500 \times 0.1 = 50 \text{ V}。$$

答： $U_{AB} = 50 \text{ V}$ ，A 点电势高。

易错点：d 必须是沿电场方向的距离；若 A、B 连线与电场方向有夹角，要取沿电场方向的分量。

A2 解析

思路：电场力做正功 = 电势能减少； $W_{AB} = qU_{AB}$ 。

规范解： $U_{AB} = \frac{W_{AB}}{q} = \frac{4 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-8}} = 200 \text{ V}；$

电势能变化量 $\Delta E_p = -W_{AB} = -4 \times 10^{-6} \text{ J}$ （减少 $4 \times 10^{-6} \text{ J}$ ）。

答： $U_{AB} = 200 \text{ V}$ ；电势能减少 $4 \times 10^{-6} \text{ J}$ 。

易错点：正电荷从高电势到低电势，电场力做正功、电势能减少； $\Delta E_p = E_{pB} - E_{pA} = -W_{AB}$ ，负号别丢。

A3 解析

思路：电势能 $E_p = q\varphi$ ，负电荷的“喜好”与正电荷相反。

规范解： $\Delta E_p = q(\varphi_2 - \varphi_1) = (-3 \times 10^{-9}) \times (-50 - 100) = (-3 \times 10^{-9}) \times (-150) = +4.5 \times 10^{-7} \text{ J}。$

答：电势能增加 $4.5 \times 10^{-7} \text{ J}$ 。

易错点：负电荷从高电势移到低电势，电势能是“增加”的（负电荷在低电势处电势能大）；代公式时 q 和 φ 都要带符号，两个负号相乘结果为正。

0.10 电势：电势能的“强度读数”

例题 3.2 解析

思考路径：

- 板间场强： $E = \frac{U}{d}$ ，注意 d 是板间垂直距离；
- 电子从负极到正极：电子带负电被正极吸引，电场力做正功 $W = eU$ ；
- 全部转化为动能： $eU = \frac{1}{2}m_e v^2$ ，反解 v——这是“电场力做功 = 动能变化”的能量视角。

规范解：

(1) $E = \frac{U}{d} = \frac{200}{0.02} = 1.0 \times 10^4 \text{ V/m}。$

(2) 由动能定理 $eU = \frac{1}{2}m_e v^2$:

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 200}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 8.4 \times 10^6 \text{ m/s}.$$

答: 板间场强 10^4 V/m ; 电子到达正极板时速度约 $8.4 \times 10^6 \text{ m/s}$ (约光速的 3%)。

易错点: 电子加速用的是 $W = eU$ (电量 $\times$ 电势差), 与路径无关; 若换质子 (质量约 1836 倍), 同一电压下速度只有电子的 $1/\sqrt{1836}$ ——比荷决定加速效果。

A4 解析

思路: 等势面、电场线、电势升降方向三条关系逐条核对。

规范解:

(1) 对。等势面处处与电场线垂直。

(2) 对。等势面上各点电势相同, $W = qU = 0$ 。

(3) 错。电场线方向指向“电势降低最快”的方向 (沿电场线电势降低), 不是升高最快的方向。

答: (1) 对; (2) 对; (3) 错。

易错点: 电场线指向电势“下降最快”的方向; “电势升高最快”的方向是电场线的反方向。

A5 解析

思路: $E = U/d$ 的 d 取垂直板面的距离; 沿板面方向两点在同一等势面 (近似) 上。

规范解:

(1) $E = \frac{U}{d} = \frac{400}{0.04} = 1.0 \times 10^4 \text{ V/m}.$

(2) 沿板面方向的两点到两板的垂直距离相同, 处于同一等势面附近, 电势差为零 (等势面上任意两点的电势差为 0)。

答: (1) 10^4 V/m ; (2) 电势差为 0。

易错点: $U = Ed$ 里 d 是“沿电场方向的投影”, 两板倾斜时取垂直板面的距离, 不是沿板面的斜距; 等势面方向移动电荷不做功、电势差为零。

A6 解析

思路: 中点两场强等大反向 $\rightarrow E = 0$; 电势是标量叠加, 直接相加。

规范解:

(1) 两 $+Q$ 在中点产生的场强等大反向, $E = 0$ 。

(2) 每个 $+Q$ 到中点距离为 a , 中点电势 $\varphi = k\frac{Q}{a} + k\frac{Q}{a} = \frac{2kQ}{a}$:

$$\varphi = \frac{2 \times 9 \times 10^9 \times 1 \times 10^{-9}}{0.1} = 180 \text{ V}。$$

答：(1) 场强为零；(2) 电势 180 V（取无穷远为零）。

易错点：场强是矢量（抵消）、电势是标量（相加）——“ $E=0$ 处 φ 不一定为 0” 的完整数值例子：这里 $E=0$ 而 $\varphi=180 \text{ V}$ 。

A7 解析

思路：电子伏特定义—— $1 \text{ eV} = \text{电子经过 } 1 \text{ V 电势差获得的能量} = e \times 1 \text{ V}$ 。

规范解： $E_k = eU = 1.6 \times 10^{-19} \times 100 = 1.6 \times 10^{-17} \text{ J} = 100 \text{ eV}$ 。

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100}{9.1 \times 10^{-31}}} = \sqrt{\frac{3.2 \times 10^{-17}}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 5.9 \times 10^6 \text{ m/s}。$$

答：动能 $1.6 \times 10^{-17} \text{ J}$ (100 eV)；速度约 $5.9 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。

易错点：100 eV 是能量单位不是电压； $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ 的换算要熟练，C 层还会用。

0.11 电势差与场强的关系： $U = Ed$

（本节无独立 A 题，A5 已综合考查 $U = Ed$ 的应用。）

0.12 场强与电势的关系辨析（高频易错）

A8 解析

思路：把“场强零”和“电势非零”分开说：场强看叠加抵消，电势看标量叠加。

规范解：中点处两 $+Q$ 产生的场强等大反向、完全抵消，所以 $E=0$ ；但两个正电荷都在该点产生正的标量电势（180 V，见 A6），标量相加不为零。

一句话：场强是矢量叠加的“抵消”结果，电势是标量叠加的“累计”结果，两者没有必然联系。

易错点：经典反例必须背熟——等量同号电荷中点 $E=0$ 但 $\varphi \neq 0$ ；反过来，无穷远 $\varphi=0$ 而 E 不为 0。

0.13 图像分析法：电势图、场强图、势能图

例题 3.3 解析

思考路径：

• φ - x 图斜率就是 $-\frac{d\varphi}{dx}$, 即 $E = -\text{斜率}$;

• 斜率为负 ($-2 \times 10^3 \text{ V/m}$) $\rightarrow E$ 为正, 场强沿 $+x$ (电势沿 $+x$ 降低, 场强指向降低最快的方向);

• 斜率恒定 $\rightarrow$ 场强处处相同 $\rightarrow$ 匀强电场。

规范解: 斜率 $= -\frac{d\varphi}{dx} = -E$, 即 $E = -\text{斜率} = 2 \times 10^3 \text{ N/C}$, 方向沿 $+x$ 。

答: 场强大小 $2 \times 10^3 \text{ N/C}$, 方向沿 $+x$; 斜率恒定说明这是匀强电场。

易错点: 斜率带负号的反转——斜率负, 场强沿 $+x$; 斜率正, 场强沿 $-x$ 。别把“斜率正负”直接当成“场强方向”。

A9 解析

思路: 同上, $E = -\text{斜率}$; 直线 $\rightarrow$ 匀强。

规范解: (1) $E = -\text{斜率} = -500 \text{ N/C}$, 负号表示方向沿 $-x$ 。

(2) 是匀强电场—— φ - x 图为直线, 电势均匀变化, 场强处处相同 (500 N/C 沿 $-x$)。

答: (1) 500 N/C , 方向沿 $-x$; (2) 是, 理由如上。

易错点: 斜率为正说明电势沿 $+x$ 升高, 场强指向降低最快的方向即 $-x$; “直线 = 匀强”是必背结论。

B 层·真题研习

B1 解析 (2022·天津卷)

思路: M、N 在同一个以正点电荷为圆心的圆上——到电荷距离相等, 电势相等、场强大小相等但方向不同。

规范解: 正点电荷的电场中, 到电荷等距的各点电势相同; M、N 在圆上, 故电势相同 (A 对)。场强大小相等但方向沿各自半径、不同 (B 错)。电势相等则 $W_{MN} = qU_{MN} = 0$, 电势能不变, 谈不上“始终增大”或“始终做正功” (C、D 错)。

选 A。

易错点: 场强是矢量——大小相等不代表场强相同, 方向不同就是不同场强; 同一等势面上移动电荷电场力做功为零, 电势能不变。

B2 解析 (2023·全国乙卷)

思路: 正点电荷的场中, 距电荷越远电势越低; 负电荷在低电势处电势能大; M、N 到 O 等距 $\rightarrow$ 电势相等 $\rightarrow$ 电场力从 M 到 N 总功为零。

规范解: $\varphi = k\frac{Q}{r}$, 故 $\varphi_P < \varphi_M = \varphi_N$ (OP 最大)。

A 错: 负电荷沿轨迹被吸向 O, 电势能先减小后增大 (先靠近 O 电势升高、负电荷电势能减小)。

B 对: $E_P = q\varphi$ ($q < 0$), $\varphi_P < \varphi_N$ 而 q 为负 $\rightarrow E_{pP} > E_{pN}$ 。

C 对: M、N 等势, 电场力从 M 到 N 做功为零; 小球只受重力和电场力, 电场力不做功则机械能守恒, $E_{\text{机械}M} = E_{\text{机械}N}$ 。

D 错: M 到 N 电场力先做正功后做负功, 不是“始终不做功”。

选 BC。

易错点: 负电荷的“喜好”相反——电势越低电势能越大, B 项要算符号不能想当然; “机械能守恒”的条件是电场力不做功 (或做功代数和为零), M、N 等势正好满足。

C 层·创新拓展

C1 解析 (质子刀·电子伏特)

思路: $E_k = qU$ 直接算动能; $v = \sqrt{2E_k/m}$ 求速度; α 粒子比荷不同按比例比。

规范解:

$$(1) E_k = eU = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^4 = 1.6 \times 10^{-15} \text{ J} = 10^4 \text{ eV} = 10 \text{ keV}。$$

$$(2) v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-15}}{1.67 \times 10^{-27}}} = \sqrt{1.92 \times 10^{12}} \approx 1.4 \times 10^6 \text{ m/s}。$$

$$(3) \alpha \text{ 粒子: } q_\alpha = 2e, m_\alpha = 4m_p, v_\alpha = \sqrt{\frac{2 \cdot 2e \cdot U}{4m_p}} = \sqrt{\frac{eU}{m_p}} = \frac{v_p}{\sqrt{2}}。$$

答: (1) $1.6 \times 10^{-15} \text{ J}$ (10 keV); (2) 约 $1.4 \times 10^6 \text{ m/s}$; (3) α 粒子的末速度是质子的 $\frac{1}{\sqrt{2}}$ (约 0.71 倍, 约 $9.9 \times 10^5 \text{ m/s}$)。

易错点: α 粒子“带 $2e$ 、质量 $4m_p$ ”两个因素都要进公式——动能是质子的 2 倍, 但质量是 4 倍, 速度是 $\sqrt{2/4} = 1/\sqrt{2}$ 倍; 电子伏特 (eV) 与伏特 (V) 不是一回事。

C2 解析 (闪电与避雷针)

思路: 平均场强 $E = U/d$; 放电能量 $W = QU$; 避雷针是“尖端放电”引雷入地。

规范解:

$$(1) E = \frac{U}{d} = \frac{1.0 \times 10^8}{1.0 \times 10^3} = 1.0 \times 10^5 \text{ V/m}。$$

$$(2) W = QU = 20 \times 1.0 \times 10^8 = 2.0 \times 10^9 \text{ J};$$

$$\text{月用电 } 200 \text{ kWh} = 200 \times 3.6 \times 10^6 = 7.2 \times 10^8 \text{ J};$$

$$\frac{2.0 \times 10^9}{7.2 \times 10^8} \approx 2.8 \text{ (个月)}。$$

(3) 避雷针顶部尖端非常尖锐, 尖端附近电场强度极大, 超过空气击穿场强时发生尖端放电, 雷电沿避雷针这根“低电阻通路”泄放入地, 保护建筑——这是“静电的防范”。

答: (1) $1.0 \times 10^5 \text{ V/m}$; (2) $2.0 \times 10^9 \text{ J}$, 约相当于 2.8 个月的家庭用电; (3) 尖端放电引雷入地。

易错点: 单位换算—— $1 \text{ km} = 10^3 \text{ m}$, $1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$; “尖端放电”是静电防范的核心原理 (避雷针、静电除尘器则利用尖端放电产生电离)。

本章综合·S 层

S1 解析 (平行板·能量视角)

思路: $E = U/d$; 电子加速用动能定理 $eU = \frac{1}{2}mv^2$; 电势能减少量 = 电场力做功 = eU ; 从板正中出发电压减半。

规范解:

$$(1) E = \frac{U}{d} = \frac{500}{0.01} = 5.0 \times 10^4 \text{ V/m}。$$

$$(2) v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 500}{9.1 \times 10^{-31}}} = \sqrt{1.76 \times 10^{14}} \approx 1.33 \times 10^7 \text{ m/s}。$$

$$(3) \text{电势能减少量} = eU = 1.6 \times 10^{-19} \times 500 = 8.0 \times 10^{-17} \text{ J}。$$

$$(4) \text{板正中到正极板的电压为 } \frac{U}{2} = 250 \text{ V}:$$

$$v' = \sqrt{\frac{2e \cdot U/2}{m_e}} = \frac{v}{\sqrt{2}} \approx 9.4 \times 10^6 \text{ m/s}, \text{ 是 (2) 的 } \frac{1}{\sqrt{2}} \text{ 倍}。$$

答: (1) $5.0 \times 10^4 \text{ V/m}$; (2) $1.33 \times 10^7 \text{ m/s}$; (3) $8.0 \times 10^{-17} \text{ J}$; (4) $\frac{1}{\sqrt{2}}$ 倍 (约 $9.4 \times 10^6 \text{ m/s}$)。

易错点: 动能定理里的 U 是“初末位置间的电势差”——从板正中出发, 电势差只有一半, 速度是 $1/\sqrt{2}$ 倍, 别用整板电压; 电势能减少量就是 eU , 与路径无关。

S2 解析 (φ - x 图像·功与能量)

思路: 每段斜率 = $-E$; 电场力做功 $W = q(\varphi_{\text{起}} - \varphi_{\text{终}}) = -\Delta E_p$ 。

规范解:

$$(1) 0 \sim 2 \text{ m 段: 斜率} = (0 - 2000)/2 = -1000 \text{ V/m}, E_1 = 1000 \text{ N/C 沿 } +x;$$

$$2 \sim 4 \text{ m 段: 斜率} = (1000 - 0)/2 = +500 \text{ V/m}, E_2 = 500 \text{ N/C 沿 } -x。$$

$$(2) \varphi_0 = 2000 \text{ V}, \varphi_4 = 1000 \text{ V},$$

$$W = q(\varphi_0 - \varphi_4) = 1 \times 10^{-8} \times (2000 - 1000) = 1 \times 10^{-5} \text{ J (正功)};$$

$$\text{电势能减少 } 1 \times 10^{-5} \text{ J}。$$

$$(3) 0 \sim 2 \text{ m: } W_1 = q(\varphi_0 - \varphi_2) = 1 \times 10^{-8} \times 2000 = 2 \times 10^{-5} \text{ J, 正功};$$

$$2 \sim 4 \text{ m: } W_2 = q(\varphi_2 - \varphi_4) = 1 \times 10^{-8} \times (0 - 1000) = -1 \times 10^{-5} \text{ J, 负功};$$

$$\text{总功 } W = W_1 + W_2 = 1 \times 10^{-5} \text{ J, 一致}。$$

答: (1) $1000 \text{ N/C 沿 } +x$ 、 $500 \text{ N/C 沿 } -x$; (2) 做正功 $1 \times 10^{-5} \text{ J}$, 电势能减少 $1 \times 10^{-5} \text{ J}$; (3) $0 \sim 2 \text{ m}$ 做正功 $2 \times 10^{-5} \text{ J}$, $2 \sim 4 \text{ m}$ 做负功 $1 \times 10^{-5} \text{ J}$ 。

易错点: 正电荷沿 $+x$ 运动时, 第一段场强也沿 $+x$ (顺电场做正功), 第二段场强沿 $-x$ (逆电场做负功)——“场强方向由斜率正负决定”要先判准; 电势能变化量是 $-W$, 别把正负写反。

0.14 匀加与匀减：电场力做功，能量说了算

例题 4.1 解析

思考路径：

- 质子从静止经电压加速 $\rightarrow$ 动能定理 $eU = \frac{1}{2}m_p v^2$ ，能量视角一步到位；
- 代入公式： v 与距离无关，只与 U 和比荷有关；
- 量级预期： $2eU/m_p \approx 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5000 / 1.67 \times 10^{-27} \approx 10^{12}$ ，开方得 10^6 m/s。

规范解：由 $eU = \frac{1}{2}m_p v^2$ ：

$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5000}{1.67 \times 10^{-27}}} = \sqrt{9.58 \times 10^{11}} \approx 9.8 \times 10^5 \text{ m/s}。$$

答：质子末速度约 9.8×10^5 m/s（约光速的千分之三）。

易错点：若粒子有初速度，用动能定理完整形式 $qU = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2$ ，别漏初动能；“经过 n 个相同加速电场”，速度按 $\sqrt{n}$ 倍增大（动能 n 倍）。

A1 解析

思路：动能定理 $eU = \frac{1}{2}mv^2$ 直接反解。

规范解： $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100}{9.1 \times 10^{-31}}} = \sqrt{3.52 \times 10^{13}} \approx 5.9 \times 10^6 \text{ m/s}。$

答：电子末速度约 5.9×10^6 m/s。

易错点：电子比荷约为质子的 1836 倍，同一电压下电子速度约为质子的 43 倍——比荷决定加速效果。

A2 解析

思路：同一电压 U ， $v = \sqrt{2qU/m}$ ，速度与 $\sqrt{m}$ 成反比。

规范解： $v_e = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}}$ ， $v_p = \sqrt{\frac{2eU}{m_p}}$ ，

$$\frac{v_e}{v_p} = \sqrt{\frac{m_p}{m_e}} = \sqrt{1836} \approx 42.8。$$

答：电子的末速度大，约为质子的 42.8 倍。

易错点：速度比是质量比的平方根，不是质量比本身；电子、质子电荷量相同（都是 e ），电荷量项不用比。

A3 解析

思路：电场力与初速度反向 $\rightarrow$ 匀减速； $a = qE/m$ （用比荷算加速度）， $s = v_0^2/2a$ ， $t_1 = v_0/a$ 。

规范解：

$$(1) a = \frac{eE}{m} = 1.76 \times 10^{11} \times 3.0 \times 10^3 = 5.28 \times 10^{14} \text{ m/s}^2, \text{ 方向与初速度相反。}$$

$$(2) s = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{(4.0 \times 10^6)^2}{2 \times 5.28 \times 10^{14}} = \frac{1.6 \times 10^{13}}{1.056 \times 10^{15}} \approx 0.0152 \text{ m} = 1.52 \text{ cm};$$

$$t_1 = \frac{v_0}{a} = \frac{4.0 \times 10^6}{5.28 \times 10^{14}} \approx 7.6 \times 10^{-9} \text{ s}。$$

答：加速度 $5.28 \times 10^{14} \text{ m/s}^2$ （反向）；减速距离约 1.52 cm，用时约 7.6 ns。

易错点：用比荷 e/m 直接乘场强求加速度，省得背电子质量；“逆着电场射入”加速度与初速度反向，方向判断别丢。

A4 解析

思路：把减速距离 s 与电场宽度 L 比较—— $s > L$ 则穿过（没减到零）， $s < L$ 则反向。

规范解：由 A3， $s = 1.52 \text{ cm} > L = 1.0 \text{ cm}$ ，电子不能减速到零，直接穿过电场。

$$\text{穿出速度 } v = \sqrt{v_0^2 - 2aL} = \sqrt{(4.0 \times 10^6)^2 - 2 \times 5.28 \times 10^{14} \times 0.01} = \sqrt{1.6 \times 10^{13} - 1.056 \times 10^{13}} = \sqrt{5.44 \times 10^{12}} \approx 2.33 \times 10^6 \text{ m/s}。$$

答：能穿过，穿出时速度约 $2.33 \times 10^6 \text{ m/s}$ （小于初速度）。

易错点：“减速陷阱”第一反应是算 $s = v_0^2/2a$ 再与电场长度比较——若电场比 s 还短，粒子还没减到零就穿出去了，绝不能直接套“减速到零再反向”的结论。

0.15 偏转：类平抛的标准动作

例题 4.2 解析

思考路径：

- 垂直射入 $\rightarrow$ 类平抛：水平匀速求时间，竖直匀加速求侧移；
- 竖直加速度 $a = \frac{eU}{md}$ ；穿过时间 $t = \frac{L}{v_0}$ ；
- 侧移 $y = \frac{1}{2}at^2$ ，三段分步算再合并。

规范解：

$$a = \frac{eU}{md} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 200}{9.1 \times 10^{-31} \times 0.02} \approx 1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2;$$

$$t = \frac{L}{v_0} = \frac{0.06}{2 \times 10^7} = 3 \times 10^{-9} \text{ s};$$

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 1.76 \times 10^{15} \times (3 \times 10^{-9})^2 \approx 7.9 \times 10^{-3} \text{ m} = 7.9 \text{ mm}。$$

答：电子出电场时侧移约 7.9 mm。

易错点：直接套 $y = \frac{qUL^2}{2mdv_0^2}$ 也行，但三段分解不容易算错；板长加倍 y 变 4 倍、电压加倍 y 变 2 倍，比例关系要熟。

A5 解析

思路： $a = eU/(md)$, $t = L/v_0$, $y = \frac{1}{2}at^2$ 。

规范解： $a = \frac{eU}{md} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 100}{9.1 \times 10^{-31} \times 0.01} = 1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$;

$$t = \frac{L}{v_0} = \frac{0.02}{1.0 \times 10^7} = 2 \times 10^{-9} \text{ s};$$

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 1.76 \times 10^{15} \times 4 \times 10^{-18} = 3.5 \times 10^{-3} \text{ m} = 3.5 \text{ mm}。$$

答：侧移量 3.5 mm。

易错点：时间由水平速度决定 ($t = L/v_0$)，别用竖直运动求时间； v_0 是 10^7 量级， v_0^2 是 10^{14} ，指数要小心。

A6 解析

思路： $v_y = at$, $\tan \theta = v_y/v_0 = 2y/L$ 。

规范解： $v_y = at = 1.76 \times 10^{15} \times 2 \times 10^{-9} = 3.52 \times 10^6 \text{ m/s}$;

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{3.52 \times 10^6}{1.0 \times 10^7} = 0.352 \text{ (也可用 } \frac{2y}{L} = \frac{7.0 \times 10^{-3}}{0.02} = 0.35 \text{ 验算)}。$$

出射速度反向延长线过偏转板的中点。

答： $\tan \theta \approx 0.35$ ；反向延长线过板中点。

易错点：“ $\tan \theta = 2y/L$ ”是背下的结论，用它验算最省事；反向延长线过中点是示波器作图的关键几何性质。

A7 解析

思路：从公式 $y = \frac{qUL^2}{2mdv_0^2}$ 里找出 y 与 L 、 U 的幂次关系。

规范解： $y \propto L^2$ (L 在公式里是平方)，故板长加倍， $y' = 4y$;

$y \propto U$ (U 一次方)，故电压加倍， $y' = 2y$ 。

答：板长加倍侧移变 4 倍；电压加倍侧移变 2 倍。

易错点： y 对 L 是平方关系、对 U 是一次关系——别把“板长加倍”也当成 2 倍； v_0^2 在分母， v_0 加倍 y 变 1/4。

0.16 组合：先加速后偏转（示波器模型）

例题 4.3 解析

思考路径：

• 先加速后偏转，直接套组合公式 $y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1}$ —— q 、 m 已消掉；

• 代入时单位统一用米；算完检查量级： $0.04^2 = 1.6 \times 10^{-3}$ ，分子 $U_2 \times L^2$ 很小，分母 $4dU_1$ 不小，得 10^{-3} m 量级合理。

规范解： $y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1} = \frac{200 \times 0.04^2}{4 \times 0.01 \times 1000} = \frac{0.32}{40} = 0.008 \text{ m} = 8 \text{ mm}$ 。

答：电子在偏转板边缘处的偏转量为 8 mm。

易错点：组合公式里 q 、 m 都没出现——换质子、换 α 粒子，只要 U_1 、 U_2 相同，偏转量就相同，这就是示波器“一视同仁”的原理；加速电压 U_1 增大，偏转量减小（ $y \propto 1/U_1$ ）。

A8 解析

思路：组合公式与比荷无关，三种粒子侧移相同。

规范解： $y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1} = \frac{200 \times 0.04^2}{4 \times 0.01 \times 2000} = \frac{0.32}{80} = 4.0 \times 10^{-3} \text{ m} = 4 \text{ mm}$ 。

电子、质子、 α 粒子的 q 、 m 不同，但组合公式中二者全部消掉，侧移量都为 4 mm。

答：三者侧移量相同，均为 4 mm。

易错点：单独看偏转段，侧移 $y = qUL^2/(2mdv_0^2)$ 是“与比荷成正比”的；但先加速后偏转时 v_0^2 也含 q/m ，两者一比就消掉了——只有“组合系统”才有“与比荷无关”的结论，别把两个公式的结论混淆。

0.17 技法小结：电场运动题的三板斧

（本节为方法总结，无独立习题；B、C、S 层已覆盖三板斧应用。）

B 层·真题研习

B1 解析（2022·北京卷）

思路：板间匀强电场 $E = U/d$ ，静电力 $F = qE$ ；从静止加速用动能定理；撤电压后匀速段分段求时间。

规范解：

$$(1) F = qE = q \frac{U}{d}.$$

$$(2) \text{ 由 } qU = \frac{1}{2}mv^2 \text{ 得 } v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}.$$

(3) 设全程加速度 $a = \frac{F}{m} = \frac{qU}{md}$ 。

前半段 $d/2$ 匀加速: $\frac{d}{2} = \frac{1}{2}at_1^2$, $t_1 = \sqrt{\frac{d}{a}}$, 末速度 $v_1 = at_1 = \sqrt{ad}$;

后半段 $d/2$ 匀速: $t_2 = \frac{d/2}{v_1} = \frac{d}{2\sqrt{ad}}$;

$$t = t_1 + t_2 = \sqrt{\frac{d}{a}} \left(1 + \frac{1}{2}\right) = \frac{3}{2}\sqrt{\frac{d}{a}} = \frac{3}{2}\sqrt{\frac{md^2}{qU}}。$$

答: (1) $\frac{qU}{d}$; (2) $\sqrt{\frac{2qU}{m}}$; (3) $\frac{3}{2}\sqrt{\frac{md^2}{qU}}$ 。

易错点: 撤电压后粒子做匀速直线运动, 后半段时间用“位移/速度”, 不能继续用匀加速公式; “运动 $d/2$ 时撤去”意味着前半段匀加速、后半段匀速, 两段分开算再相加。

B2 解析 (2022 · 湖北卷)

思路: 油滴静止 $\rightarrow$ 平衡 $qE = mg$, $E = U/d$, $m = \rho \cdot \frac{4}{3}\pi r^3 \rightarrow qU \propto r^3$ 。

规范解: $q\frac{U}{d} = \rho\frac{4}{3}\pi r^3 g$, 即 $qU \propto r^3$ (同一密度 ρ 、同一板距 d)。

电压变为 $2U$ 后, 需满足 $q' \cdot 2U \propto r'^3$ 。

A. $q'=q$, $r'=r$: $q \cdot 2U$ 与 r^3 不匹配; B. $q'=2q$, $r'=r$: $2q \cdot 2U = 4qU \neq kr^3$; C. $q'=2q$, $r'=2r$: $4qU$ vs $k(2r)^3 = 8kr^3$, 不匹配; D. $q'=4q$, $r'=2r$: $4q \cdot 2U = 8qU$, $k(2r)^3 = 8kr^3$, 匹配。

选 D。

易错点: 质量与 r^3 成正比, 所以平衡条件里 qU 与 r^3 成正比——体积的立方关系是这题的钥匙; 逐项代入验证, 别凭直觉猜。

B3 解析 (2026 · 云南卷 · 匀强电场中的抛体运动)

思路: 小球受重力 + 电场力, 合力恒定 $\rightarrow$ 类抛体运动, 用“运动分解”: 竖直方向两个已知时刻定 a_y , 水平方向定 $a_x \rightarrow$ 由牛顿第二定律求场强分量 $\rightarrow$ 合成 E ; 电势沿电场方向降低。

规范解: 设抛出速度为 (v_x, v_y) , 合加速度 (a_x, a_y) :

竖直: $v_y \times 1 - \frac{1}{2}a_y = 3$; $v_y \times 2 - \frac{1}{2}a_y \times 4 = 0 \rightarrow v_y = a_y \rightarrow \frac{1}{2}a_y = 3 \rightarrow a_y = 6 \text{ m/s}^2$ (向下)。

水平: $v_x \times 1 + \frac{1}{2}a_x = 0$; $v_x \times 2 + \frac{1}{2}a_x \times 4 = 3 \rightarrow v_x = -\frac{1}{2}a_x \rightarrow a_x = 3 \text{ m/s}^2$ (向右)。

电场力分量: 竖直方向合力 $ma_y = 0.6 \text{ N}$ (向下), 重力 $1 \text{ N} \rightarrow$ 电场力竖直向上 $0.4 \text{ N} \rightarrow E_y = \frac{0.4}{10^{-6}} = 4 \times 10^5 \text{ V/m}$; 水平 $E_x = \frac{ma_x}{q} = \frac{0.3}{10^{-6}} = 3 \times 10^5 \text{ V/m}$ 。

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} = \sqrt{9 + 16} \times 10^5 = 5.0 \times 10^5 \text{ V/m}。$$

电场水平分量向右, O 在 N 左方 $\rightarrow$ 沿电场方向电势降低: $\varphi_O > \varphi_N$ 。

答: C。

易错点: (1) 别把“重力”漏掉——电场力只是合力的一部分, 先算合加速度再反推场强; (2) 竖直方向“2 s 回等高”给出 $v_y = a_y$ 的隐藏条件; (3) 电势比较看电场方向投影, 不是看距离。

B4 解析 (2025 · 全国卷 · 电场中的运动轨迹)

思路：正电荷受电场力方向 = 电场方向。若初速度与电场同向或反向，做直线运动（轨迹与电场线平行）；若初速度与电场有夹角，做类抛体曲线运动。轨迹不可能始终垂直于电场线——那需要电场力不做功且不断改变方向，与匀强电场矛盾。

规范解：A、B 错：沿电场方向运动则电势降低，逆电场方向运动则电势升高——“一定”过于绝对；C 对：初速度沿电场线（同向或反向），合力沿电场线，轨迹为直线；D 错：若轨迹是垂直于电场线的直线，则速度始终垂直于电场力方向、电场力不做功，但匀强电场中电场力恒定，垂直初速只会产生类平抛（轨迹是抛物线），不会走直线。

答：C。

易错点：(1) “仅受电场力” = 类抛体/直线运动二选一，由初速度方向决定；(2) 垂直于电场线的直线轨迹需要“向心力”类条件，匀强电场给不了；(3) 电势升降看“沿电场方向位移”的符号，与“一定”这类绝对词搭配要警惕。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (离子推进器)

思路：加速用 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ；推力用动量定理 $F\Delta t = \Delta p = nmv\Delta t$ 。

规范解：

$$(1) v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1000}{2.18 \times 10^{-25}}} = \sqrt{1.47 \times 10^9} \approx 3.83 \times 10^4 \text{ m/s}。$$

$$(2) F = \frac{\Delta p}{\Delta t} = nmv = 1.0 \times 10^{18} \times 2.18 \times 10^{-25} \times 3.83 \times 10^4 \approx 8.4 \times 10^{-3} \text{ N} \approx 8.4 \text{ mN}。$$

(3) 离子推进器推力小（毫牛级）但比冲极高、能长时间持续工作——适合卫星的姿态调整、轨道维持和深空探测的长时间加速；化学火箭推力大但燃料消耗极快。

答：(1) 约 $3.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ ；(2) 约 8.4 mN ；(3) 小推力、长时间、高效率，适合轨道维持与深空任务。

易错点：推力公式里是“每秒喷出离子数 $\times$ 单个离子动量”； 8 mN 看似微不足道，但持续数月可积累可观的速度增量——这正是“积少成多”的物理。

C2 解析 (静电喷墨打印)

思路：类平抛三件套—— $a = qU/(md)$ 、 $t = L/v_0$ 、 $y = \frac{1}{2}at^2$ 。

规范解：

$$(1) a = \frac{qU}{md} = \frac{1.0 \times 10^{-13} \times 150}{2.0 \times 10^{-12} \times 5.0 \times 10^{-4}} = \frac{1.5 \times 10^{-11}}{1.0 \times 10^{-15}} = 1.5 \times 10^4 \text{ m/s}^2；$$

$$t = \frac{L}{v_0} = \frac{2.0 \times 10^{-3}}{15} = 1.33 \times 10^{-4} \text{ s}。$$

$$(2) y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 1.5 \times 10^4 \times (1.33 \times 10^{-4})^2 \approx 1.33 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.133 \text{ mm}。$$

(3) $y \propto U$ （电压一次方），要偏移量变为 2 倍，偏转电压也调为 2 倍，即 $U' = 300 \text{ V}$ 。

答：(1) $1.5 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ 、 $1.33 \times 10^{-4} \text{ s}$ ；(2) 0.133 mm ；(3) 偏转电压调到 300 V 。

易错点：墨滴比荷很小、板长只有毫米级，侧移在 0.1 mm 量级——这是打印分辨率能精确到几十微米的原因；调整电压直接按 $y \propto U$ 比例换算。

C3 解析（带电粒子在交变电场中运动）

思路：方波电场下，粒子的加速度恒定但方向周期翻转——半个周期加速、半个周期减速，速度“走走停停”，位移逐周期累加。 v - t 图是锯齿波，面积 = 位移。

规范解：

$$(1) a = \frac{qE}{m} = \frac{1 \times 10^{-5} \times 1000}{1 \times 10^{-2}} = 1 \text{ m/s}^2。$$

(2) 0 0.2 s：从 0 匀加速到 $v_1 = 0.2 \text{ m/s}$ ，位移 $x_1 = \frac{1}{2} \times 1 \times 0.04 = 0.02 \text{ m}$ ；0.2 0.4 s：反向加速度，匀减速到 0，位移再增 0.02 m；此后每周期重复。0.8 s = 2 个完整周期： $x = 4 \times 0.02 = 0.08 \text{ m}$ 。 v - t 图：锯齿波，峰值为 0.2 m/s，每周期面积 0.04 m。

(3) 每个周期前进 0.04 m，到极板需 0.1 m：0.1/0.04 = 2.5 个周期 $\rightarrow t = 2.5 \times 0.4 = 1.0 \text{ s}$ 时到达极板，会打到。

答：(1) 1 m/s²；(2) 锯齿波（峰值 0.2 m/s），位移 0.08 m；(3) 会， $t = 1.0 \text{ s}$ 。

易错点：(1) 电场反向时加速度反向但大小不变，速度先减到 0 再反向——别以为粒子“往回走”（位移一直增大，速度的“回”是相对的）；(2) 每周期位移 = 两段各 0.02 m，共 0.04 m，逐周期累加；(3) 打到极板按“累计位移 = 0.1 m”算时刻，别用平均速度硬算。

本章综合 · S 层

S1 解析（示波器综合）

思路：加速段 $v_0 = \sqrt{2eU_1/m_e}$ ；偏转段 $y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1}$ 、 $\tan \theta = \frac{2y}{L}$ ；出板后直线飞到屏，屏上偏移 $Y = y + D \tan \theta$ 。

规范解：

$$(1) v_0 = \sqrt{\frac{2eU_1}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 800}{9.1 \times 10^{-31}}} = \sqrt{2.81 \times 10^{14}} \approx 1.68 \times 10^7 \text{ m/s}。$$

$$(2) y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1} = \frac{150 \times 0.05^2}{4 \times 0.01 \times 800} = \frac{0.375}{32} \approx 0.0117 \text{ m} = 11.7 \text{ mm}。$$

$$(3) \tan \theta = \frac{2y}{L} = \frac{2 \times 0.0117}{0.05} \approx 0.469。$$

(4) 出板后匀速直线： $Y = y + D \tan \theta = 0.0117 + 0.20 \times 0.469 = 0.0117 + 0.0938 \approx 0.106 \text{ m}$ 。

答：(1) $1.68 \times 10^7 \text{ m/s}$ ；(2) 11.7 mm；(3) $\tan \theta \approx 0.469$ ；(4) 屏上偏移约 10.6 cm。

易错点：屏上总偏移 = 板内侧移 + 出板后的直线漂移，两段都要算；出板后水平速度不变、竖直速度保持 $v_y = v_0 \tan \theta$ ，所以漂移量 = $D \cdot \tan \theta$ ——“先偏转再漂移”是示波器计算的完整流程。

S2 解析（匀减速陷阱·反向与穿越）

思路： $a = qE/m$ ； $s = v_0^2/2a$ 与电场宽度比较；穿过用 $v^2 = v_0^2 - 2ad$ ；反向用对称性 $t = 2v_0/a$ 。

规范解：

$$(1) a = \frac{qE}{m} = 9.6 \times 10^7 \times 2.0 \times 10^3 = 1.92 \times 10^{11} \text{ m/s}^2。$$

$$(2) s = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{(1.0 \times 10^6)^2}{2 \times 1.92 \times 10^{11}} = \frac{1.0 \times 10^{12}}{3.84 \times 10^{11}} \approx 2.6 \text{ m}。$$

(3) $s = 2.6 \text{ m} > d_1 = 0.20 \text{ m}$ ，质子直接穿过：

$$v = \sqrt{v_0^2 - 2ad_1} = \sqrt{1.0 \times 10^{12} - 2 \times 1.92 \times 10^{11} \times 0.20} = \sqrt{1.0 \times 10^{12} - 7.68 \times 10^{10}} = \sqrt{9.23 \times 10^{11}} \approx 9.6 \times 10^5 \text{ m/s}。$$

(4) $d_2 = 5.0 \text{ m} > s = 2.6 \text{ m}$ ，质子减速到零后反向，回到入射点总时间 = 2 倍减速时间：

$$t = \frac{2v_0}{a} = \frac{2 \times 1.0 \times 10^6}{1.92 \times 10^{11}} \approx 1.04 \times 10^{-5} \text{ s}。$$

答：(1) $1.92 \times 10^{11} \text{ m/s}^2$ ；(2) 约 2.6 m ；(3) 能穿过，速度约 $9.6 \times 10^5 \text{ m/s}$ ；(4) 约 1.04×10^{-5}

s。

易错点：先比较 s 与电场宽度——宽度小于 s 是“穿过”、大于 s 才“反向”；穿过时末速度用 $v^2 = v_0^2 - 2ad$ （别减成负的），反向时利用对称性直接 $t = 2v_0/a$ ，回到入射点时速率恢复为 v_0 、方向反向。

0.18 电容：储存电荷的本领

例题 5.1 解析

思考路径：

- 电容用定义式 $C = Q/U$ 直接算；
- 电压降了，电容变吗？—— C 由结构决定，不变；
- 电荷量 $Q' = CU'$ ——电压降低，电容器“放电”，一部分电荷沿电路流走。

规范解： $C = \frac{Q}{U} = \frac{4 \times 10^{-5}}{200} = 2 \times 10^{-7} \text{ F} = 0.2 \text{ } \mu\text{F}。$

电压降为 100 V 时： $Q' = CU' = 2 \times 10^{-7} \times 100 = 2 \times 10^{-5} \text{ C}。$

答：电容 $0.2 \text{ } \mu\text{F}$ ；电压 100 V 时电荷量 $2 \times 10^{-5} \text{ C}。$

易错点：别用 $Q = CU$ 反推“ C 与 Q 成正比”—— C 是固有属性，与 Q 、 U 都无关； 1 F 巨大，日常电容以 μF 、 pF 计。

A1 解析

思路： $C = Q/U$ 算电容； U 变后 $Q' = CU$ ， C 不变。

规范解：(1) $C = \frac{Q}{U} = \frac{2 \times 10^{-6}}{100} = 2 \times 10^{-8} \text{ F} = 0.02 \text{ } \mu\text{F}。$

(2) $Q' = CU' = 2 \times 10^{-8} \times 50 = 1 \times 10^{-6} \text{ C}$ ；电容不变（结构决定）。

答：电容 $0.02 \text{ } \mu\text{F}$ ；电压 50 V 时电荷量 $1 \times 10^{-6} \text{ C}$ ，电容不变。

易错点：电压减半、电荷量减半，但电容一点不变——C 是“每伏特能存多少电”的本领，不是“存了多少电”。

A2 解析

思路：单位换算按 10^3 进制 ($\mu\text{F} \rightarrow \text{nF} \rightarrow \text{pF}$)；电压由 $Q = CU$ 反解。

规范解： $0.1 \mu\text{F} = 100 \text{ nF} = 10^5 \text{ pF}$ ；

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{2.35 \times 10^{-2}}{4700 \times 10^{-6}} = \frac{2.35 \times 10^{-2}}{4.7 \times 10^{-3}} = 5 \text{ V}。$$

答： $0.1 \mu\text{F} = 100 \text{ nF} = 10^5 \text{ pF}$ ；两端电压 5 V。

易错点： $4700 \mu\text{F} = 4.7 \times 10^{-3} \text{ F}$ ，换算别错； μF 与 pF 差 10^6 倍， nF 在中间差 10^3 倍。

A3 解析

思路：电容是比值定义量，判断“与什么无关”。

规范解：

- (1) 错。 $C = Q/U$ 是比值定义， C 与 Q 、 U 都无关，只由电容器本身结构决定；
- (2) 对。电容是固有属性，充不充电、充多少都不影响 C ；
- (3) 对。 C 大的电容器，同样电压下能储存更多电荷。

答：(1) 错；(2) 对；(3) 对。

易错点：比值定义式“长得像正比关系”最容易误导—— $E = F/q$ 、 $R = U/I$ 、 $C = Q/U$ 、 $\varphi = E_p/q$ 全是同一类陷阱，判据是“这个量由什么决定”。

0.19 平行板电容器的决定式

例题 5.2 解析

思考路径：

- 第一步判“谁不变”：断开电源 $\rightarrow Q$ 不变（电荷无处可去）；
- 决定式判 C ： d 增大 $\rightarrow C = \frac{\varepsilon_r S}{4\pi k d}$ 减小；
- 由 Q 、 C 推 U ： $U = \frac{Q}{C}$ 增大；
- 由 U 、 d 推 E ： $E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{Cd} = \frac{4\pi k Q}{\varepsilon_r S}$ ——与 d 无关，不变。

规范解：断开电源 $\rightarrow Q$ 不变。 d 增大 $\rightarrow C$ 减小 $\rightarrow U = \frac{Q}{C}$ 增大。

$$E = \frac{4\pi k Q}{\varepsilon_r S}，\text{与 } d \text{ 无关，} E \text{ 不变。}$$

答：C 减小、U 增大、E 不变。

易错点：直觉会骗人——“拉开距离场强该变弱吧？”其实电荷面密度没变，场强就不变；E 与 d 无关是断开电源情形下的核心结论，别拿“接通电源”的直觉套。

例题 5.3 解析

思考路径：

- 第一步判“谁不变”：接通电源 $\rightarrow$ U 不变；
- 决定式判 C：d 增大 $\rightarrow$ C 减小；
- 推 Q： $Q = CU$ 减小（电容器向电源“退电”）；
- 推 E： $E = \frac{U}{d}$ 减小。

规范解：接通电源 $\rightarrow$ U 不变。d 增大 $\rightarrow$ C 减小 $\rightarrow$ $Q = CU$ 减小； $E = \frac{U}{d}$ 减小。

与例 5.2 对比：

量	断开电源（Q 不变）	接通电源（U 不变）
d 增大时 C	减小	减小
Q 或 U	U 增大	Q 减小
E	不变	减小

答：C 减小、Q 减小、E 减小；与断开电源情形（E 不变、U 增大）结果完全不同。

易错点：同一个动作（d 增大），接不接电源结果相反——第一步判“谁不变”是动态分析的命门，先判再动。

A4 解析

思路：决定式 $C = \frac{\varepsilon_r S}{4\pi k d}$ ，三个变量逐个看。

规范解：（1）S 增大 $\rightarrow$ C 增大；（2）d 减小 $\rightarrow$ C 增大；（3） ε_r 增大 $\rightarrow$ C 增大。

答：三种情况电容都增大。

易错点：三条直觉——“板越大越能装、板越近越能装、介质越好越能装”，与公式一一对应。

A5 解析

思路：接通电源 U 不变 $\rightarrow$ 由决定式和 $Q = CU$ 、 $E = U/d$ 依次推。

规范解： d 减小 $\rightarrow C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ 增大 $\rightarrow Q = CU$ 增大（电源继续充电）；

$$E = \frac{U}{d} \text{ 增大。}$$

答： C 增大、 Q 增大、 E 增大。

易错点： U 恒定是锚点，其余三个量全部由它推出来；“ d 减小、 E 增大”直观合理，注意 Q 也增大是因为电源在持续充电。

A6 解析

思路：断开电源 Q 不变 $\rightarrow$ 由决定式和 $U = Q/C$ 、 $E = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}$ 依次推。

规范解： S 减小 $\rightarrow C$ 减小 $\rightarrow U = \frac{Q}{C}$ 增大；

$$E = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}, S \text{ 减小} \rightarrow E \text{ 增大。}$$

答： C 减小、 U 增大、 E 增大。

易错点：断开电源时 E 与 d 无关、但与 S 有关——电荷面密度 $\sigma = Q/S$ 变了， E 就变；“ E 只由电荷面密度决定”这句要记牢。

A7 解析

思路：静电计张角反映电压 U ；断开电源 Q 不变，看 C 如何变。

规范解：断开电源 $\rightarrow Q$ 不变；插入介质 ϵ_r 增大 $\rightarrow C$ 增大 $\rightarrow U = \frac{Q}{C}$ 减小 $\rightarrow$ 静电计指针张角变小。

答：张角变小。

易错点：张角变大还是变小，取决于 U 变大还是变小，而 U 又取决于 C ——链条是“判谁不变 $\rightarrow$ 判 $C \rightarrow$ 判 U （张角）”，别跳步。

0.20 静电的利用与防范

A8 解析

思路：利用 = 主动让静电干活；防范 = 把静电导走/泄放。

规范解：

（1）利用——带电颗粒被电极吸引而沉降；

- (2) 防范——铁链把摩擦起电的电荷随时导流入地，避免积累后火花放电；
 (3) 利用——电荷吸附墨粉完成转印；
 (4) 防范——尖端放电把雷电引入地下，保护建筑。

答：(1) 利用；(2) 防范；(3) 利用；(4) 防范。

易错点：除尘、复印、喷漆是“利用”；铁链、避雷针、防静电服是“防范”——判断标准是“让静电干活”还是“让静电走人”。

B 层·真题研习

B1 解析 (2024·浙江卷)

思路：保持电荷量不变 $\rightarrow Q$ 不变； d 增大 $\rightarrow C$ 减小 $\rightarrow U = Q/C$ 增大（张角增大正是 U 增大）； E 不变；储存能量 $W = \frac{Q^2}{2C}$ 随 C 减小而增大。

规范解： Q 不变， d 增大， $C = \frac{\varepsilon_r S}{4\pi k d}$ 减小；

$U = \frac{Q}{C}$ 增大（A 错——电势差不是减小，张角增大正是它增大）；

C 减小（B 错）；

$E = \frac{4\pi k Q}{\varepsilon_r S}$ 与 d 无关、不变（C 错）；

$W = \frac{Q^2}{2C}$ ， Q 不变 C 减小 $\rightarrow W$ 增大（D 对）。

选 D。

易错点：储存能量用 $W = \frac{Q^2}{2C}$ （ Q 恒定版本），别用 $W = \frac{1}{2}CU^2$ 直接把 C 减小判成能量减小—— U 同时增大了，要统一变量。

B2 解析 (2024·江西卷)

思路：电压保持不变 $\rightarrow E = U/d$ ， d 减小 E 增大；电子受力方向与电场强度方向相反。

规范解： U 不变、 d 减小 $\rightarrow E = \frac{U}{d}$ 增大；

图中电场线方向水平向左，即场强方向向左，电子带负电、受力方向与场强方向相反 $\rightarrow$ 受力向右。

选 B。

易错点：场强方向看电场线（正电荷受力方向），电子受力永远与场强方向相反——“向左的场、向右的电子力”是高频考点；别把电子受力方向与场强方向搞成一致。

C 层·创新拓展

C1 解析 (超级电容器·电动汽车)

思路：储能 $W = \frac{1}{2}CU^2$ ；电荷量 $Q = CU$ ；充电电流 $I = Q/t$ 、功率 $P = W/t$ 。

规范解：

$$(1) W = \frac{1}{2}CU^2 = \frac{1}{2} \times 1000 \times 500^2 = 1.25 \times 10^8 \text{ J};$$

$$Q = CU = 1000 \times 500 = 5.0 \times 10^5 \text{ C}.$$

$$(2) I = \frac{Q}{t} = \frac{5.0 \times 10^5}{60} \approx 8.3 \times 10^3 \text{ A};$$

$$P = \frac{W}{t} = \frac{1.25 \times 10^8}{60} \approx 2.1 \times 10^6 \text{ W} = 2.1 \text{ MW}.$$

(3) 超级电容器充电极快(几分钟甚至几十秒)、循环寿命极长(可达数十万次),但能量密度低于电池——适合“频繁启停、快速补能”的电动公交、港机、地铁再生制动储能等场景,不适合长续航乘用车。

答:(1) $1.25 \times 10^8 \text{ J}$ 、 $5.0 \times 10^5 \text{ C}$; (2) 约 $8.3 \times 10^3 \text{ A}$ 、 2.1 MW ; (3) 快充长寿命、低能量密度,适合公交快充与制动能量回收。

易错点: $1000 \text{ F} \times 500 \text{ V}$ 的储能达 1.25 亿焦耳,相当于约 35 kWh ——数字很大但量级正确 ($1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$, $1.25 \times 10^8 / 3.6 \times 10^6 \approx 35$); 充电电流 8 千安级说明“快充”需要大功率充电站。

C2 解析 (电容式传感器)

思路: 接通电源 U 不变; C 与 d 成反比 ($C = \frac{\varepsilon_r S}{4\pi k d}$); $Q = CU$ 、 $E = U/d$ 随 d 联动。

规范解:

$$(1) E_1 = \frac{U}{d_1} = \frac{12}{2.0 \times 10^{-3}} = 6.0 \times 10^3 \text{ V/m};$$

$$Q_1 = C_1 U = 40 \times 10^{-12} \times 12 = 4.8 \times 10^{-10} \text{ C}.$$

$$(2) d \text{ 减半} \rightarrow C \text{ 与 } d \text{ 成反比}, C_2 = 2C_1 = 80 \text{ pF};$$

$$Q_2 = C_2 U = 80 \times 10^{-12} \times 12 = 9.6 \times 10^{-10} \text{ C};$$

$$E_2 = \frac{U}{d_2} = \frac{12}{1.0 \times 10^{-3}} = 1.2 \times 10^4 \text{ V/m}.$$

(3) 接通电源 U 不变, 间距变化使 C 变化, 于是极板上电荷量 $Q = CU$ 跟着变化——电荷沿导线流动就形成电流, 这个电流信号反映了膜片振动的频率与幅度, 就“翻译”成了声音电信号。

答:(1) $6.0 \times 10^3 \text{ V/m}$ 、 $4.8 \times 10^{-10} \text{ C}$; (2) 80 pF 、 $9.6 \times 10^{-10} \text{ C}$ 、 $1.2 \times 10^4 \text{ V/m}$; (3) U 不变时 d 变 $\rightarrow C$ 变 $\rightarrow Q$ 变 $\rightarrow$ 充放电电流, 即电信号。

易错点: d 减半 C 加倍、 Q 加倍、 E 也加倍——接通电源时三个量随 d 的联动方向要分清; 传感器原理的核心是“机械量(间距) $\rightarrow$ 电容 $\rightarrow$ 电量变化 $\rightarrow$ 电信号”的转换链。

本章综合 · S 层

S1 解析 (油滴平衡 · 动态综合)

思路: 平衡条件 $qE = mg$; 油滴带负电悬浮, 电场力必须竖直向上, 故板间场强方向竖直向下(上板为正); 动态分析先判“谁不变”。

规范解:

$$(1) E = \frac{U}{d} = \frac{200}{0.02} = 1.0 \times 10^4 \text{ V/m}.$$

$$(2) \text{平衡: } qE = mg, |q| = \frac{mg}{E} = \frac{2.0 \times 10^{-15} \times 9.8}{1.0 \times 10^4} \approx 1.96 \times 10^{-18} \text{ C};$$

$$\frac{|q|}{e} = \frac{1.96 \times 10^{-18}}{1.6 \times 10^{-19}} \approx 12.3, \text{ 约等于 } 12 \text{ 个元电荷。}$$

(3) 断开电源 $\rightarrow Q$ 不变, 板距增倍时 $E = \frac{4\pi kQ}{\varepsilon_r S}$ 与 d 无关、不变 $\rightarrow qE$ 仍等于 mg , 油滴仍静止。

$$(4) \text{ 接通电源 } \rightarrow U \text{ 不变, } d \text{ 增倍 } \rightarrow E' = \frac{U}{2d} = \frac{E}{2} = 5.0 \times 10^3 \text{ V/m};$$

$$qE' = 1.96 \times 10^{-18} \times 5.0 \times 10^3 \approx 9.8 \times 10^{-15} \text{ N} < mg = 1.96 \times 10^{-14} \text{ N},$$

$$\text{油滴向下加速, } a = g - \frac{qE'}{m} = 9.8 - \frac{9.8 \times 10^{-15}}{2.0 \times 10^{-15}} = 9.8 - 4.9 = 4.9 \text{ m/s}^2。$$

答: (1) $1.0 \times 10^4 \text{ V/m}$; (2) 约 $1.96 \times 10^{-18} \text{ C}$, 约 12 个元电荷; (3) 仍静止 (E 不变); (4) 向下加速, $a = 4.9 \text{ m/s}^2$ 。

易错点: 油滴带负电悬浮, 隐含“上板正、下板负”的方向关系要能说清; 断开电源 d 变 E 不变、接通电源 d 变 E 变——同一问题里两种情形对比, 正是本章动态分析的最高频考法。

S2 解析 (相机闪光灯)

思路: $Q = CU$; 储能 $W = \frac{1}{2}QU$ (等价于 $\frac{1}{2}CU^2$); 放电功率 $P = W/t$; 充电时间 $t = Q/I$ 。

规范解:

$$(1) Q = CU = 200 \times 10^{-6} \times 300 = 0.06 \text{ C};$$

$$W = \frac{1}{2}QU = \frac{1}{2} \times 0.06 \times 300 = 9 \text{ J}。$$

$$(2) P = \frac{W}{t} = \frac{9}{1.0 \times 10^{-3}} = 9.0 \times 10^3 \text{ W} = 9 \text{ kW}。$$

$$(3) t = \frac{Q}{I} = \frac{0.06}{1.0} = 0.06 \text{ s} = 60 \text{ ms}。$$

答: (1) 0.06 C 、 9 J ; (2) 约 9 kW ; (3) 约 60 ms 。

易错点: 9 J 的能量在 1 ms 内放完, 瞬时功率高达 9 kW ——这就是“电容储能适合瞬间大功率释放”的原因; 慢充 (60 ms) 快放 (1 ms) 的对比, 正是闪光灯的原理核心; 储能公式 $W = \frac{1}{2}QU$ 和 $\frac{1}{2}CU^2$ 要会互相换算。

0.21 电流: 电荷的定向移动

例题 6.1 解析

思考路径:

- 读题: 已知电流 I 和时间 t , 求电荷量——用定义式 $q = It$;

- “2 分钟”要先换成秒 (120 s), 单位先行是这类题的第一道坎;

- 电子数 = 总电荷量 $\div$ 单个电子电荷量, $N = q/e$;

- 预期检查: 0.5 A 的电流在 2 分钟内累积 60 C , 微观是 3.75×10^{20} 个电子——数量级约 10^{20} , 符合直觉。

规范解： $q = It = 0.5 \times 120 = 60 \text{ C}$ 。

$$N = \frac{q}{e} = \frac{60}{1.6 \times 10^{-19}} = 3.75 \times 10^{20} \text{ 个}。$$

答：通过电荷量 60 C，约 3.75×10^{20} 个电子。

易错点： 时间单位必须换成秒；“约合多少个电子”用除法 $N = q/e$ ，别乘反。

A1 解析

思路： $I = q/t$ 的变形 $q = It$ ；电子数 $N = q/e$ 。

规范解： $t = 10 \text{ min} = 600 \text{ s}$ ， $q = It = 0.2 \times 600 = 120 \text{ C}$ ；

$$N = \frac{120}{1.6 \times 10^{-19}} = 7.5 \times 10^{20} \text{ 个}。$$

答：通过 120 C 电荷，约 7.5×10^{20} 个电子。

易错点： 0.2 A 看似很小，10 分钟累积的电荷量却有 120 C——宏观小电流背后是天文数字的电子。

A2 解析

思路： 微观表达式 $I = neSv$ 的变形 $v = I/(neS)$ ，四个量互相可推。

$$\text{规范解：} v = \frac{I}{neS} = \frac{0.5}{8.5 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-6}} = \frac{0.5}{1.36 \times 10^4} \approx 3.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}。$$

答：电子定向移动平均速率约 $3.7 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。

易错点： 注意 n 、 e 、 S 的乘积很大（约 1.36×10^4 ），别算错数量级；结果约 0.037 mm/s，比蜗牛慢几十倍——再次印证“电子慢、指令快”。

A3 解析

思路： 电流方向的规定、标量性、电解液中正负离子的贡献，逐个核对。

规范解：

- (1) 错。电流方向规定为正电荷定向移动方向；金属中实际移动的是电子，方向相反。
- (2) 错。电流运算法则是算术法则，是标量（有方向但合成不按平行四边形法则）。
- (3) 对。正离子移动方向即电流方向，负离子反向移动等效于同方向的电流。

易错点： “有方向的物理量”不一定是矢量——判断矢量看运算法则（平行四边形法则），电流是标量。

0.22 电阻与欧姆定律

例题 6.2 解析

思考路径：

- 并联总电阻用倒数公式： $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ ；
- 两电阻并联后总电阻小于任何一个分电阻 ($2\ \Omega < 3\ \Omega < 6\ \Omega$ ，可作自查)；
- 总电流用欧姆定律 $I = U/R$ ；各支路电流分别用 U 除以各自电阻；
- 验证： $I_1 + I_2 = 2 + 1 = 3\ \text{A} = \text{总电流}$ ，对上。

规范解： $\frac{1}{R} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$ ， $R = 2\ \Omega$ 。

$I = U/R = 6/2 = 3\ \text{A}$ ； $I_1 = 6/3 = 2\ \text{A}$ ； $I_2 = 6/6 = 1\ \text{A}$ 。

答：总电阻 $2\ \Omega$ ，总电流 $3\ \text{A}$ ，两支路电流分别 $2\ \text{A}$ 、 $1\ \text{A}$ 。

易错点：并联总电阻必然小于最小分电阻 ($2\ \Omega < 3\ \Omega$)，若算出大于分电阻就是算反了；两电阻并联的特例“积在和上”只适用于两只，三只及以上必须用倒数公式。

A4 解析

思路：电阻定律 $R = \rho L/S$ ；体积不变时拉长， L 变、 S 跟着变，别只改一个量。

规范解：拉长 2 倍： $L' = 2L$ ；体积不变， $V = LS = L'S'$ ，得 $S' = S/2$ 。

$$R' = \rho \frac{L'}{S'} = \rho \frac{2L}{S/2} = 4\rho \frac{L}{S} = 4R。$$

答：新导线电阻为原来的 4 倍。

易错点：漏掉截面积减半 (L 乘 2、 S 不变 $\rightarrow$ 只变 2 倍是错的)；“体积不变”是提示截面积必须联动变化的信号词。

A5 解析

思路：三只电阻并联用倒数公式；各支路电压相同 (都是 $3\ \text{V}$)，电流按电阻反分。

规范解： $\frac{1}{R} = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = 1$ ， $R = 1\ \Omega$ 。

$I_{\text{总}} = U/R = 3/1 = 3\ \text{A}$ ； $I_1 = 3/2 = 1.5\ \text{A}$ ； $I_2 = 3/3 = 1\ \text{A}$ ； $I_3 = 3/6 = 0.5\ \text{A}$ 。

验证： $1.5 + 1 + 0.5 = 3\ \text{A} = \text{总电流}$ 。✓

答：总电阻 $1\ \Omega$ ，总电流 $3\ \text{A}$ ，各支路电流 $1.5\ \text{A}$ 、 $1\ \text{A}$ 、 $0.5\ \text{A}$ 。

易错点： $1/R = 1$ 意味着 $R = 1\ \Omega$ ，别写出 $R = 1/1$ 再搞混；并联总电阻 ($1\ \Omega$) 小于最小分电阻 ($2\ \Omega$)，可作自查。

A6 解析

思路：U-I 图像过原点的直线，斜率 = 电阻；欧姆定律在图像上的应用。

规范解：(1) $R = U/I = 2.0/0.40 = 5 \Omega$ 。

(2) 线性元件电压电流成正比： $I' = U'/R = 4.0/5 = 0.80 \text{ A}$ 。

答：电阻 5Ω ；电压 4.0 V 时电流 0.80 A 。

易错点：U-I 图像（横轴 U、纵轴 I）的斜率是 $1/R$ ，I-U 图（横轴 I、纵轴 U）的斜率才是 R——读题先看坐标轴。

0.23 伏安法测电阻（实验）

A7 解析

思路：内接外接判据 $\sqrt{(R_V R_A)}$ 与 R_x 比较；大电阻内接（电流表分压占比小），小电阻外接（电压表分流占比小）。

规范解： $\sqrt{R_V R_A} = \sqrt{3000 \times 0.1} \approx 17 \Omega$ ，而 $R_x \approx 50 \text{ k}\Omega \gg 17 \Omega$ ，属于大电阻，选**内接**。

$R_{\text{测}} = U/I = 4.8/(95 \times 10^{-6}) \approx 5.05 \times 10^4 \Omega \approx 50.5 \text{ k}\Omega$ 。

内接法 $R_{\text{测}} = R_{\text{真}} + R_A > R_{\text{真}}$ ，测量值偏大。

答：选内接；测量值约 $50.5 \text{ k}\Omega$ ，偏大于真实值（约 $50 \text{ k}\Omega$ ）。

易错点： $50 \text{ k}\Omega$ 是“大电阻”——别看 $\sqrt{(R_V R_A)} \approx 17 \Omega$ 很小就以为用外接；判断标准是与 R_x 比大小，不是绝对值。

0.24 电表改装：一个表头，三种表

例题 6.3 解析

思考路径：

- 改电流表（扩流）→ 并联分流电阻，表头只吃自己那份 I_g ，并联电压相等： $I_g R_g = (I - I_g)R$ ；

- 改电压表（扩压）→ 串联分压电阻，表头只承担 $U_g = I_g R_g$ ，串联电流相等： $I_g = (U - U_g)/R$ ；

- 数值直觉： 3 A 比 3 mA 大 1000 倍，分流电阻应接近“短路”（约 $10 \text{ m}\Omega$ ）； 3 V 里表头只占 0.03 V ，分压电阻应接近 $1 \text{ k}\Omega$ 。

规范解：

$$(1) R = \frac{I_g R_g}{I - I_g} = \frac{0.003 \times 10}{3 - 0.003} \approx 0.010 \Omega.$$

$$(2) R = \frac{U - I_g R_g}{I_g} = \frac{3 - 0.03}{0.003} = 990 \Omega。$$

答：改电流表并联约 $10 \text{ m}\Omega$ ；改电压表串联 990Ω 。

易错点：两个公式记反（扩流用并联、扩压用串联）；量程扩大 n 倍时扩流 $R = R_g/(n-1)$ 、扩压 $R = (n-1)R_g$ ，分子分母互为倒数。

A8 解析

思路：同例题，直接代公式；注意 $I_g R_g = 100 \mu\text{A} \times 2000 \Omega = 0.2 \text{ V}$ 是表头满偏电压。

规范解：

$$(1) R = \frac{I_g R_g}{I - I_g} = \frac{1 \times 10^{-4} \times 2000}{10 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-4}} = \frac{0.2}{9.9 \times 10^{-3}} \approx 20.2 \Omega。$$

$$(2) R = \frac{U - I_g R_g}{I_g} = \frac{3 - 0.2}{1 \times 10^{-4}} = 2.8 \times 10^4 \Omega = 28 \text{ k}\Omega。$$

答：扩流并联约 20.2Ω ；扩压串联 $28 \text{ k}\Omega$ 。

易错点：量程 10 mA 是 I （含表头电流），分子要减 I_g ； 3 V 电压表里表头只占 0.2 V ， 2.8 V 全压在串联电阻上—— $28 \text{ k}\Omega$ 的数量级合理。

B 层·真题研习

A9 解析（游标卡尺与螺旋测微器读数）

思路：游标卡尺读数 = 主尺读数 + 游标对齐格数 $\times$ 分度值；螺旋测微器读数 = 固定刻度 + 可动刻度格数 $\times 0.01 \text{ mm}$ 。

规范解：

$$(1) 10 \text{ 分度游标卡尺分度值 } 0.1 \text{ mm}：d = 23 + 4 \times 0.1 = 23.4 \text{ mm}。$$

$$(2) \text{螺旋测微器分度值 } 0.01 \text{ mm}：d = 5.5 + 25 \times 0.01 = 5.750 \text{ mm}。$$

(3) 两次读数相差约 4 倍：(1) 两次测量位置不同、金属丝本身有粗细不均；(2) 更主要的是工具精度不同——游标卡尺（10 分度）精度 0.1 mm ，螺旋测微器精度 0.01 mm ，螺旋测微器读数更可靠。若用 50 分度游标卡尺，精度为 0.02 mm 。

答：(1) 23.4 mm ；(2) 5.750 mm ；(3) 读数差异来自测量位置与工具精度：螺旋测微器精度更高（ 0.01 mm vs 0.1 mm ）。

易错点：(1) 游标卡尺“先读主尺毫米整数部分，再加游标分度”，别把主尺小数位（如 2.3 cm 的 0.3 ）与游标读数重复相加；(2) 螺旋测微器读数要估读到 0.001 mm （3 位小数），游标卡尺不估读；(3) 注意固定刻度“半刻度线”是否露出——露出要加 0.5 mm 。

B1 解析（2024·浙江卷）

思路：判断矢量看运算法则——按平行四边形法则合成的是矢量，算术法则合成的是标量。

规范解：位移既有大小又有方向、按平行四边形法则合成，是矢量；时间、热量只有大小是标量；电流虽有方向，但合成按算术法则，是标量。选 A。

易错点：“有方向的物理量 $\neq$ 矢量”——电流、电势差都有方向/正负，但都是标量；这是“电流是标量”的经典考法。

B2 解析 (2022 · 江苏卷)

思路：先把电路结构理清—— R_3 、 R_4 串联后与 R_2 并联，再与 R_1 串联；从总电流出发逐级求各灯泡的实际功率。

规范解： $R_{34} = 2 + 4 = 6 \Omega$ ； R_2 与 R_{34} 并联： $R_{并} = (3 \times 6)/(3+6) = 2 \Omega$ 。

$$R_{总} = R_1 + R_{并} = 2 + 2 = 4 \Omega; I_{总} = E/R_{总} = 12/4 = 3 \text{ A}。$$

$$P_1 = I_{总}^2 R_1 = 9 \times 2 = 18 \text{ W}。$$

$$U_{并} = I_{总} \cdot R_{并} = 3 \times 2 = 6 \text{ V}; I_2 = 6/3 = 2 \text{ A}, P_2 = I_2^2 \times 3 = 12 \text{ W};$$

$$I_{34} = 6/6 = 1 \text{ A}, P_3 = 1 \times 2 = 2 \text{ W}, P_4 = 1 \times 4 = 4 \text{ W}。$$

$$18 \text{ W} > 12 \text{ W} > 4 \text{ W} > 2 \text{ W}, \text{功率最大的是 } R_1。 \text{选 A}。$$

易错点：干路电阻 R_1 电流最大，但不代表功率一定最大——必须逐项算出功率再比较（本例恰好 R_1 最大，因为它在干路且阻值不小）； $P = I^2 R$ 中的 I 必须是该电阻自己的电流。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (手机充电数据线)

思路：电阻定律求线电阻；线上压降用 $U = IR$ 、发热用 $P = I^2 R$ ；劣质线横截面积减半 $\rightarrow$ 电阻翻倍。

规范解： $S = 0.02 \text{ mm}^2 = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^2$ 。

$$(1) R = \rho L/S = 1.7 \times 10^{-8} \times 1/(2 \times 10^{-8}) = 0.85 \Omega。$$

$$(2) U = IR = 3 \times 0.85 = 2.55 \text{ V}; P = I^2 R = 9 \times 0.85 \approx 7.65 \text{ W}。$$

(3) 截面积减半 $\rightarrow R' = 2 \times 0.85 = 1.7 \Omega$ ；若仍要求 3 A ，线上压降 $U' = 3 \times 1.7 = 5.1 \text{ V}$ ——已超过充电器 5 V 输出电压， 3 A 电流在该线上根本无法维持：实际电流会被迫下降、充电明显变慢，同时 $P' = I'^2 R'$ 发热加剧，这就是劣质线“充电慢、发热烫”的物理原因。

答：线电阻 0.85Ω ；快充压降 2.55 V 、发热约 7.65 W ；劣质线电阻翻倍后 3 A 无法成立，充电变慢且发热严重。

易错点：不要只答“发热变大”——要看出 $5.1 \text{ V} > 5 \text{ V}$ 意味着恒流 3 A 的设定本身被推翻，这是此题的关键物理判断。

C2 解析 (金属导体微观电流)

思路：微观表达式 $I = neSv$ 变形求 v ；速率换算成 mm/s 与蜗牛比较；“灯立即亮”的原因在电场传播速度。

规范解： $S = 2 \text{ mm}^2 = 2 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 。

$$(1) v = \frac{I}{neS} = \frac{5}{8.5 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-6}} = \frac{5}{2.72 \times 10^4} \approx 1.8 \times 10^{-4} \text{ m/s} = 0.18 \text{ mm/s}。$$

(2) 蜗牛约 1 mm/s ，电子漂移速率约为蜗牛的 $1/5$ ——“比蜗牛慢几百倍”的俗语略夸张，

但数量级一致（约慢 5 100 倍取决于电流与线径）。

(3) $t = L/v = 1/(1.8 \times 10^{-4}) \approx 5.5 \times 10^3 \text{ s} \approx 1.5 \text{ 小时}$ 。电子本身移动极慢，但电场传播速度接近光速，接通瞬间“指令”传遍整条电路，导线里所有自由电子几乎同时开始漂移，所以一按开关灯立即就亮——亮得快是“指令快”，不是“电子快”。

易错点：把“电子的漂移速度”当成“电流的传播速度”是本章最大的概念误区——电子是排队的人，电场是口令，口口相传瞬间到位。

本章综合 · S 层

S1 解析（跨节综合）

思路：导线电阻用电阻定律（注意往返两根、总长 2 m）；闭合电路用 $I = E/(R_{\text{总}} + r)$ ， $R_{\text{总}} = R + R_{\text{线}} + r$ ；漂移速率用微观式；拉长后电阻定律联动 L、S 一起变。

规范解：

$$(1) R_{\text{线}} = \rho L/S = 1.7 \times 10^{-8} \times 2/(1 \times 10^{-6}) = 3.4 \times 10^{-2} \Omega = 0.034 \Omega。$$

$$(2) I = \frac{E}{R + R_{\text{线}} + r} = \frac{21}{10 + 0.034 + 1} = \frac{21}{11.034} \approx 1.90 \text{ A}。$$

$$(3) v = \frac{I}{neS} = \frac{1.90}{8.5 \times 10^{28} \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^{-6}} = \frac{1.90}{1.36 \times 10^4} \approx 1.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}。$$

(4) 拉长 2 倍： $L' = 4 \text{ m}$ ， $S' = S/2 = 5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ ， $R_{\text{线}}' = \rho L'/S' = 1.7 \times 10^{-8} \times 4/(5 \times 10^{-7}) = 0.136 \Omega = 4R_{\text{线}}$ 。

$$I' = \frac{21}{10 + 0.136 + 1} = \frac{21}{11.136} \approx 1.89 \text{ A}。$$

答：导线总电阻 0.034Ω ；电流约 1.90 A ；电子漂移速率约 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ；拉长后导线电阻 0.136Ω （4 倍），电流约 1.89 A 。

易错点：(1) 导线电阻在多数电路题里被忽略，本题特意设计成“不可忽略”，提醒先算再决定取舍（ 0.034Ω 对 11Ω 影响不足 1%，但 4 倍关系要会算）；(2) 拉长后 L、S 必须联动改变，别只改 L；(3) 漂移速率公式里 I 用干路实际电流。

（说明：本题为原创综合题，电流 1.9 A 下电子漂移速率 $1.4 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ ，与前文微观结论自洽。）

0.25 电动势与内阻

例题 7.1 解析

思考路径：

- 闭合回路电流用闭合电路欧姆定律 $I = E/(R + r)$ ——内阻 r 必须算进总电阻；
- 路端电压两个算法可互验： $U = E - Ir$ 或 $U = IR$ ；
- 预期检查：外电阻 $R = 5 \Omega$ 是内阻的 5 倍，路端电压应占电动势的 $5/6 \approx 5 \text{ V}$ ，合理。

规范解： $I = \frac{E}{R + r} = \frac{6}{5 + 1} = 1 \text{ A}；$

$$U = E - Ir = 6 - 1 \times 1 = 5 \text{ V} \text{ (验算: } U = IR = 1 \times 5 = 5 \text{ V, 一致);}$$

$$\text{内压降 } Ir = 1 \times 1 = 1 \text{ V}.$$

答：电流 1 A，路端电压 5 V，内压降 1 V。

易错点：漏算内阻直接 $I = 6/5 = 1.2 \text{ A}$ 是经典错误；路端电压不是电动势——本题电动势 6 V 中有 1 V 被内阻吃掉。

A1 解析

思路：断路无电流，内压降为零，路端电压 = 电动势；短路外电阻为零，电流 = E/r 。

规范解：

$$(1) \text{ 断路: } I = 0, U = E - Ir = E = 1.5 \text{ V}.$$

(2) 短路: $I = \frac{E}{r} = \frac{1.5}{0.5} = 3 \text{ A}$ 。短路电流是正常工作电流（约 0.2 0.3 A）的十倍以上，内阻上发热功率 $P = I^2 r$ 迅速增大，电池很快耗尽、甚至发热损坏——所以短路会烧坏电源。

答：断路时路端电压 1.5 V；短路电流 3 A。

**** 易错点 “两个极端”** 是闭合电路的边界检验：断路对应“电压表的理想状态”，短路对应“电流表的理想状态”。

A2 解析

思路：同例题， $I = E/(R + r)$ ，再算 U 和内压降。

$$\text{规范解: } I = \frac{9}{8 + 1} = 1 \text{ A}; U = E - Ir = 9 - 1 = 8 \text{ V}; \text{内压降 } Ir = 1 \text{ V}.$$

$$\text{验算: } U = IR = 1 \times 8 = 8 \text{ V}, \text{一致}.$$

答：电流 1 A，路端电压 8 V，内压降 1 V。

易错点：9 V 电池带 8 Ω 负载时路端电压 8 V——电动势与路端电压的差值就是内压降，不是“损耗在导线里”。

A3 解析

思路：分别把新、旧电池看成 E 相同、 r 不同的电源；灯泡是外电阻；实际功率 $P = I^2 R$ 。

规范解：

$$(1) \text{ 新电池: } I_1 = \frac{1.5}{5 + 0.5} = 0.273 \text{ A}, U_1 = E - I_1 r_1 = 1.5 - 0.137 \approx 1.36 \text{ V}, P_1 = I_1^2 R = 0.273^2 \times 5 \approx 0.37 \text{ W}.$$

$$\text{旧电池: } I_2 = \frac{1.5}{5 + 2} = 0.214 \text{ A}, U_2 = E - I_2 r_2 = 1.5 - 0.43 \approx 1.07 \text{ V}, P_2 = I_2^2 R = 0.214^2 \times 5 \approx 0.23 \text{ W}.$$

(2) 电池用旧 → 内阻增大 → 电流减小、路端电压（灯泡两端电压）降低 → 灯泡实际功

率从 0.37 W 降到 0.23 W，明显变暗。

答：新电池灯泡两端约 1.36 V、功率约 0.37 W；旧电池约 1.07 V、约 0.23 W。

易错点：灯泡亮度取决于实际功率 $P = U \cdot I$ ，不是电动势——电动势没变，变的是内阻对路端电压的“侵蚀”。

0.26 动态电路分析（含容/含表）

例题 7.2 解析

思考路径：

- 三步法：先整体后局部——先判总电阻，再判总电流，最后判路端电压；
- 滑片右移 → 变阻器接入阻值增大 → 串联总电阻增大；
- 由 $I = E/(R_{\text{总}} + r)$ ， E 不变、 $R_{\text{总}}$ 增大 → 总电流减小；
- 内压降 Ir 减小 → 路端电压 $U = E - Ir$ 增大；
- 电流表测总电流（减小），电压表测路端电压（增大）。

规范解：滑片右移 → R 增大 → 总电阻增大 → 总电流减小 → 内压降减小 → 路端电压增大。电流表示数减小，电压表示数增大。

易错点：不要“看到电阻增大就以为电压表也减小”——电压表测的是路端电压（含内阻的串联分压），外电阻增大时路端电压恰恰增大；先整体后局部，一步都不能乱。

A4 解析

思路：先算两种具体状态（闭合电路公式），再定性判断变化并用“串反并同”检验。

规范解：

$$(1) R = 0: R_{\text{总}} = 6 + 2 = 8 \Omega, I = \frac{12}{8} = 1.5 \text{ A}, U = E - Ir = 12 - 1.5 \times 2 = 9 \text{ V}.$$

$$(2) R = 10 \Omega: R_{\text{总}} = 18 \Omega, I = \frac{12}{18} \approx 0.67 \text{ A}, U = 12 - 0.67 \times 2 \approx 10.7 \text{ V}.$$

(3) 滑片右移 → R 增大 → 总电阻增大 → 总电流减小 → 内压降减小 → 路端电压增大。电流表示数减小、电压表示数增大。

R_1 两端电压 $U_1 = IR_1$ ： I 减小 → U_1 减小。“串反”： R_1 与变阻器串联，变阻器增大、 R_1 两端电压减小，一致 ✓。同时 $U = U_1 + U_R$ 增大且 U_1 减小，可推 U_R 增大（变阻器两端电压增大），与“串反”也一致。

答：(1) 1.5 A、9 V；(2) 约 0.67 A、10.7 V；(3) 电流表减小、电压表增大， R_1 两端电压减小。

易错点：定量计算确认了路端电压从 9 V 升到 10.7 V——外电阻越大路端电压越高，反直觉但要记牢；“串反并同”只用于快速检验，不能替代三步法推导。

A5 解析

思路：稳定时电容支路断路；电容器电压 = 与之并联的 R_2 两端电压； $Q = CU$ 。

规范解： $R_{\text{总}} = 3 + 6 = 9 \Omega$ ， $I = \frac{12}{9} = \frac{4}{3} \text{ A}$ ；

$$U_2 = IR_2 = (4/3) \times 6 = 8 \text{ V} = U_C；$$

$$Q = CU_C = 5 \times 10^{-6} \times 8 = 4 \times 10^{-5} \text{ C} = 40 \mu\text{C}。$$

答：电容器两端电压 8 V，电荷量 40 μC 。

易错点：稳定时电容支路“断路无电流”不等于“没有电压”——电压等于并联支路电压； $Q = CU$ 里 U 必须用电容器实际电压，不是电源电动势。

0.27 实验：测电源的电动势和内阻

例题 7.3 解析

思考路径：

- $U = E - Ir$ 是直线方程：纵截距 = E ，斜率 = $-r$ ；
- 用首尾两点估斜率（图像法允许少量出入）；
- 直线延长与纵轴交点即电动势。

规范解：取首尾两点 (0.14, 1.35)、(0.45, 1.15)：

$$k = \frac{1.35 - 1.15}{0.14 - 0.45} = \frac{0.20}{-0.31} \approx -0.65，\text{故 } r \approx 0.65 \Omega。$$

延长直线与纵轴相交，截距 $E \approx 1.44 \sim 1.47 \text{ V}$ （最小二乘拟合 $E \approx 1.44 \text{ V}$ ）。

答： $E \approx 1.45 \text{ V}$ ， $r \approx 0.62 \sim 0.65 \Omega$ 。

易错点：斜率是负的，内阻取斜率的绝对值；用全部数据拟合比首尾两点更准； $U-I$ 图不是 $I-U$ 图，别把坐标轴看反。

A6 解析

思路： $U-I$ 直线纵截距即 E ，横截距是短路电流 $I_{\text{短}} = E/r$ 。

规范解：纵截距 $E = 3.0 \text{ V}$ ；横截距 $I_{\text{短}} = 1.5 \text{ A}$ 。

$$r = \frac{E}{I_{\text{短}}} = \frac{3.0}{1.5} = 2.0 \Omega。$$

答：电动势 3.0 V，内阻 2.0 Ω 。

易错点：内阻 = 纵截距 $\div$ 横截距 = $E/I_{\text{短}}$ ，等价于斜率的绝对值——两种算法都常用，别混。

0.28 多用电表：电表里的“瑞士军刀”

A7 解析

思路：欧姆挡读数 = 示数 $\times$ 倍率；换挡后示数变化与倍率成反比；指针偏转太小误差大。

规范解：

(1) $R = 15 \times 10 = 150 \Omega$ 。

(2) 改用 $\times 100$ 挡：示数 $= 150/100 = 1.5$ 。但指针贴近左端（偏转角过小），落在刻度稀疏区，读数误差大—— 150Ω 用 $\times 10$ 挡更合适，应选回 $\times 10$ 。

(3) 换挡后第一步：重新欧姆调零（红黑表笔短接，调调零旋钮使指针指零）。

答： 150Ω ； $\times 100$ 挡示数 1.5 但误差大，应选回 $\times 10$ 挡；换挡先调零。

易错点：示数 $\times$ 倍率，别把 $1.5 \times 100 = 150 \Omega$ 算成 15Ω ；“换挡必调零”是操作铁律。

A8 解析

思路：逐条核对欧姆表的使用规则。

规范解：

(1) 对。欧姆表内部有电池，测电阻时必须断开被测元件的电源并使其脱离电路，否则读数错误甚至烧表。

(2) 对。欧姆挡每换一挡，表内等效电路改变，必须重新短接调零。

(3) 错。欧姆表黑表笔接内部电池正极（电流从黑表笔流出），红表笔接负极——与“红正黑负”的外接电源习惯相反，这是常考细节。

易错点：欧姆表的红黑表笔极性与常规相反——黑笔出电流；多用电表测电阻“先断电、再调零、最后读数”。

B 层·真题研习

B1 解析（2023·上海卷）

思路：电动势的物理意义——非静电力搬运电荷做功的本领，抓“能力反映”而非“能量多少”。

规范解：A 错：电动势不是力，是功与电荷的比值（单位伏特）；B 错：电动势大只说明“每库仑电荷装得多”，不说明电源储存电能总量大（还与电池容量有关）；C 对：电动势的大小正是非静电力做功能力的反映；D 错：闭合电路中电源两端电压是路端电压 $U = E - Ir < E$ ，只有断路时才等于 E 。选 C。

易错点：“电动势 $\neq$ 路端电压”——闭合时 $U < E$ ；“电动势大 $\neq$ 储存电能多”——是“每单位电荷的能量”大。

B2 解析（2023·海南卷）

思路：稳定时电容支路断路；求电容器两端电压需先求上下两极板的电势（分别由两并联支路的分压决定）。

规范解：两支路电阻分别 $3R + 2R = 5R$ 、 $R + 4R = 5R$ ，对称，电流均为 $E/5R$ 。

上极板接 $3R$ 、 $2R$ 之间： $3R$ 上电压降 $= (E/5R) \times 3R = 3E/5$ ，该点电势（相对负极） $= E - 3E/5 = 2E/5$ 。

下极板接 R 、 $4R$ 之间： R 上电压降 $= E/5$ ，该点电势 $= E - E/5 = 4E/5$ 。

$$U_C = \frac{4E}{5} - \frac{2E}{5} = \frac{2E}{5}, \quad Q = CU_C = \frac{2CE}{5}.$$

选 C。

易错点：不要想当然认为电容电压等于某个支路的 $3E/5$ 或 $E/5$ ——要分别算两板电势再取差；两支路对称（都 $5R$ ）是本题能快速算出的关键。

B3 解析（2025·全国 II 卷·测电源电动势和内阻）

思路： $U = E - Ir$ —— $U-I$ 图像的纵轴截距 $= E$ ，斜率绝对值 $= r$ ；系统误差来自电压表的分流（电压表不是理想电表）。

规范解： $E = 1.50 \text{ V}$ （纵截距）； $r = 0.80 \Omega$ （斜率绝对值）。

系统误差主因：电压表内阻不是无穷大，电压表有分流作用——电流表示数略小于干路电流，导致测得的内阻偏小（电动势测量值也略小于真实值）。

答：1.50；0.80；电压表分流（电压表内阻非无穷大）。

易错点：(1) 横截距是短路电流 $I_{\text{短}} = E/r$ ，别把横截距当内阻；(2) 斜率取绝对值—— $U-I$ 图像是下降直线，斜率为负；(3) 误差分析答“电压表分流”而非“电流表分压”（本电路电压表直接并在电源两端）。

C 层·创新拓展

C1 解析（电动车电池管理系统 BMS）

思路：路端电压 $U = E - Ir$ 直接算；内阻老化 $\rightarrow$ 同样电流下压降更大；限功率条件的本质是“内阻越大，允许电流越小”。

规范解：

(1) $U = E - Ir_0 = 360 - 500 \times 0.1 = 310 \text{ V}$ 。

(2) $U' = E - Ir_1 = 360 - 500 \times 0.4 = 160 \text{ V}$ 。同样 500 A 下，路端电压从 310 V 跌到 160 V ，电源可提供的功率从 $310 \times 500 \approx 155 \text{ kW}$ 降到 $160 \times 500 = 80 \text{ kW}$ ——动力输出几乎减半，这就是老车“没劲”的直接原因。

(3) 由 $U_{\text{限}} = E - I_{\text{max}} \cdot r$ 得 $I_{\text{max}} = \frac{E - U_{\text{限}}}{r}$ 。

新车： $I_{\text{max}} = (360 - 250)/0.1 = 1100 \text{ A}$ ；老车： $I_{\text{max}}' = (360 - 250)/0.4 = 275 \text{ A}$ 。

老车允许的最大电流只有新车的 $1/4$ ，急加速时瞬间触及限功率保护（BMS 主动降流）——“地板油没劲”的本质是电池内阻变大的物理限制，不是电机故障。

答：新车 310 V ；老车 160 V ；最大电流新车 1100 A 、老车 275 A 。

易错点：限功率公式里 U 限是“路端电压下限”，代入 $U = E - Ir$ 反解 I ；注意单位换算（V、A）。

C2 解析（手机快充的多档电压）

思路：充电器、导线、手机构成串联电路，总电阻 = 手机等效电阻 + 线阻；电流 = 输出电压 ÷ 总电阻。

规范解：

$$(1) \ 5 \text{ V 档: } I = \frac{5}{1.8 + 0.2} = 2.5 \text{ A}, P = UI = 5 \times 2.5 = 12.5 \text{ W}.$$

$$(2) \ 9 \text{ V 档: } I = \frac{9}{2.0} = 4.5 \text{ A}, P = 9 \times 4.5 = 40.5 \text{ W}.$$

$$(3) \ 12 \text{ V 档: } I = \frac{12}{2.0} = 6 \text{ A}, P = 12 \times 6 = 72 \text{ W}; \text{线阻发热 } P_{\text{线}} = I^2 R_{\text{线}} = 36 \times 0.2 = 7.2 \text{ W}.$$

(4) 不能。(1) 充电器最大输出电流 6 A 是硬限制，12 V/6 A 已是上限；(2) 线阻发热 $\propto I^2$ ，电流增大发热急剧上升，劣质线会明显发热；(3) 电压升高需手机端通过充电协议协商并在电池前端降压，超过电池安全电压会损伤电池；(4) 各国对充电功率有安全规范。所以快充的路线是“升压保流”（在电流受限下提高电压），而不是无限加电压。

答：(1) 2.5 A、12.5 W；(2) 4.5 A、40.5 W；(3) 6 A、72 W、7.2 W；(4) 受电流上限、发热和安全限制，不能无限升压。

易错点：算充电功率时别只乘手机端电阻——整个回路的总电阻才是分母（线阻虽小但决定压降分配）；发热看 $I^2 R$ 不是 IR 。

本章综合 · S 层

S1 解析（跨节综合）

思考路径：

- 闭合电路基本量： $I = E / (R_{\text{总}} + r)$ ， $U_{\text{路}} = E - Ir = U_1 + U_2$ ；
- 输出功率 $P = E^2 R_{\text{外}} / (R_{\text{外}} + r)^2$ ，先判 $R_{\text{外}}$ 与 r 的关系再决定最大值位置；
- 动态变化用三步法，再用“串反并同”检验。

规范解：

$$(1) \ R_2 = 4 \ \Omega: R_{\text{总}} = 6 + 4 + 2 = 12 \ \Omega, I = \frac{24}{12} = 2 \text{ A};$$

$$U_{\text{路}} = E - Ir = 24 - 2 \times 2 = 20 \text{ V}; U_1 = IR_1 = 2 \times 6 = 12 \text{ V}; U_2 = IR_2 = 2 \times 4 = 8 \text{ V}.$$

$$\text{检验: } U_1 + U_2 = 12 + 8 = 20 \text{ V} = U_{\text{路}} \checkmark.$$

(2) 外电阻 $R_{\text{外}} = R_1 + R_2 \geq 6 \ \Omega$ ，恒大于内阻 $r = 2 \ \Omega$ 。输出功率函数在 $R_{\text{外}} > r$ 区间随 $R_{\text{外}}$ 增大而单调减小，故 $R_{\text{外}}$ 最小时（ $R_2 = 0$ ）输出功率最大：

$$I = \frac{24}{6 + 2} = 3 \text{ A}, P_{\text{max}} = I^2 R_{\text{外}} = 9 \times 6 = 54 \text{ W} \text{ (或 } U_{\text{路}} \cdot I = 18 \times 3 = 54 \text{ W)}.$$

(3) R_2 从 $0 \rightarrow 10 \ \Omega$ ： $R_{\text{外}}$ 从 $6 \rightarrow 16 \ \Omega$ ，电流从 $3 \text{ A} \rightarrow 24/18 \approx 1.33 \text{ A}$ ；路端电压 $U = E - Ir$ 从 $18 \text{ V} \rightarrow 24 - 1.33 \times 2 \approx 21.3 \text{ V}$ ，增大。 R_1 两端 $U_1 = IR_1$ 从 $18 \text{ V} \rightarrow 8 \text{ V}$ ，减小—— R_1 与变阻器串联，变阻器增大、 R_1 电压减小（“串反” $\checkmark$ ）。

答：(1) 2 A、20 V、12 V、8 V；(2) $R_2 = 0$ 时输出功率最大，54 W；(3) 路端电压增大， R_1 两端电压减小。

易错点：(1) (2) 是本题最大的坑——外电阻恒大于内阻时，根本到不了 $R = r$ 的匹配点，直接套“ $R = r$ 时最大”会误判为 $R_2 = -4 \Omega$ （无意义）；(2) 输出功率函数在 R 外 $> r$ 一侧单调递减，极值在边界 $R_2 = 0$ 处；(3) 动态判断必须先整体后局部，别跳过总电流直接看支路。

0.29 电功与电功率 / 8.2 焦耳定律与非纯电阻

例题 8.1 解析

思考路径：

- 电动机是非纯电阻：输入功率永远是 $P = UI$ ，发热功率永远是 $P_{\text{热}} = I^2 R$ ，机械功率用减法 $P_{\text{机}} = P - P_{\text{热}}$ ；

- 铁律自查：输入 1100 W = 热 100 W + 机械 1000 W，能量守恒对上；

- 禁区提示： $U^2/R = 220^2/4 = 12100$ W 是错的——220 V 并不全是线圈电阻上的电压。

规范解： $P = UI = 220 \times 5 = 1100$ W；

$P_{\text{热}} = I^2 R = 5^2 \times 4 = 100$ W；

$P_{\text{机}} = P - P_{\text{热}} = 1100 - 100 = 1000$ W。

答：输入功率 1100 W、热功率 100 W、机械功率 1000 W。

易错点：非纯电阻禁止用 U^2/R 算功率；“输入用 UI 、发热用 $I^2 R$ 、机械用减法”三句话是电动机题的定海神针。

A1 解析

思路：白炽灯可看成纯电阻； $I = P/U$ ， $R = U^2/P$ 。

规范解： $I = \frac{P}{U} = \frac{100}{220} \approx 0.455$ A；

$R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{100} = 484 \Omega$ 。

答：电流约 0.455 A，灯丝电阻 484 Ω 。

易错点：100 W 是额定功率，对应的 U 、 I 必须用额定电压 220 V——“对应性”从定义就在强调。

A2 解析

思路：灯泡正常发光 $\rightarrow$ 灯泡两端电压 = 12 V、实际功率 = 6 W $\rightarrow$ 工作电流确定；串联电阻分走剩余电压。

规范解：灯泡工作电流 $I = \frac{P_{\text{灯}}}{U_{\text{灯}}} = \frac{6}{12} = 0.5 \text{ A}$ ；

串联电阻两端电压 $U_R = 18 - 12 = 6 \text{ V}$ ；

$R = U_R / I = 6 / 0.5 = 12 \Omega$ ； $P_R = U_R \cdot I = 6 \times 0.5 = 3 \text{ W}$ 。

验证： $P_{\text{总}} = 18 \times 0.5 = 9 \text{ W} = 6 + 3 \text{ W}$ ✓。

答：需串联 12Ω 电阻，电阻消耗功率 3 W 。

易错点：求电阻功率必须用电阻“自己的”电压（ 6 V ）和电流（ 0.5 A ），用灯泡电压 12 V 或电源电压 18 V 都是错的——对应性铁律。

A3 解析

思路：先由欧姆定律求电流，再用三个功率公式分别计算，验证纯电阻三式相等。

规范解： $I = U/R = 20/10 = 2 \text{ A}$ 。

$P = UI = 20 \times 2 = 40 \text{ W}$ ； $P = I^2 R = 2^2 \times 10 = 40 \text{ W}$ ； $P = U^2/R = 20^2/10 = 40 \text{ W}$ 。

三者相等 ✓。

答：电流 2 A ，功率 40 W （三公式一致）。

易错点：三式相等的前提是“纯电阻”；一旦换成电动机， $UI > I^2 R$ ， U^2/R 直接无意义——先判元件再选公式。

A4 解析

思路：非纯电阻三件套：输入 UI 、发热 $I^2 R$ 、机械做功；效率 = $P_{\text{机}}/P_{\text{入}}$ 。

规范解： $P_{\text{入}} = UI = 48 \times 2 = 96 \text{ W}$ ；

$P_{\text{热}} = I^2 R = 2^2 \times 4 = 16 \text{ W}$ ；

$P_{\text{机}} = 96 - 16 = 80 \text{ W}$ ；

$\eta = P_{\text{机}}/P_{\text{入}} = 80/96 \approx 83.3\%$ 。

答：输入 96 W 、热 16 W 、机械 80 W ，效率约 83.3% 。

易错点：电动机的效率不是 100% ——差的那 16 W 变成线圈内能（电机发热），这也是电机外壳会发热的原因。

A5 解析

思路：卡住 → 反电动势消失 → 电动机退化为纯电阻， $I = U/R$ 暴增。

规范解：

(1) $I = \frac{U}{R} = \frac{48}{4} = 12 \text{ A}$ （正常工作 2 A 的 6 倍）；

$$(2) P_{\text{热}} = I^2 R = 12^2 \times 4 = 576 \text{ W};$$

(3) 正常发热 16 W $\rightarrow$ 卡住 576 W，发热功率增大 36 倍，线圈温度急剧升高，很快烧毁电机。

答：卡住电流 12 A，发热功率 576 W；是正常发热的 36 倍，电机烧毁。

易错点：卡住瞬间电流激增是“电动机烧毁”的物理本质——电风扇、洗衣机卡住后闻到的焦糊味就是这么来的；发热功率用 $I^2 R$ ，别用 $P = UI$ 的 576 W 之外的 U^2/R 。

0.30 最大功率：滑动变阻器怎么取？

例题 8.2 解析

思考路径：

- 电源输出功率最大的条件：外电阻等于内阻 $R = r$ ；
- $P_{\text{max}} = E^2/(4r)$ ——由 $P = E^2 R/(R+r)^2$ 对 R 求极值得到；
- 直观理解： R 太小时电流大但外电阻小， R 太大时外电阻大但电流小，两头权衡取中间， $R = r$ 时“匹配”最好。

规范解： $R = r = 2 \Omega$ 时输出功率最大：

$$P_{\text{max}} = \frac{E^2}{4r} = \frac{12^2}{4 \times 2} = \frac{144}{8} = 18 \text{ W}。$$

答： R 调到 2Ω ，最大输出功率 18 W。

易错点： P_{max} 公式分母是 $4r$ （不是 $2r$ 或 $4R$ ）； $R = r$ 是最值条件，代入时 R 和 r 都用 2Ω 。

例题 8.3 解析

思考路径：

- 问“ R 上功率最大”，用等效内阻法：把 R_0 和电源内阻 r 一起并入电源，等效内阻 r 等效 $= R_0 + r$ ；
- 变阻器 R 作为“外电阻”， $R = r$ 等效时其上功率最大；
- 最大功率公式分母用等效内阻： $P_{R,\text{max}} = E^2/(4r \text{ 等效})$ 。

规范解： r 等效 $= R_0 + r = 8 + 2 = 10 \Omega$ ；

$$R = 10 \Omega \text{ 时： } P_{R,\text{max}} = \frac{E^2}{4(R_0 + r)} = \frac{144}{40} = 3.6 \text{ W}。$$

答： R 调到 10Ω ， R 上最大功率 3.6 W。

易错点：等效内阻法只对“问谁就把别人并入电源”成立——问 R_0 上功率最大时，则是 $R = r$ （外阻最小时）之类，别套反；本例若误用 $R = r = 2 \Omega$ 会得错误答案。

A6 解析

思路：串联电路电流相同，功率 $P = I^2 R \propto R$ ——电阻大的灯泡实际功率大（与额定功率相反，经典陷阱）。

规范解：

$$(1) R_1 = U^2/P_1 = 220^2/100 = 484 \Omega; R_2 = 220^2/25 = 1936 \Omega; R_1 : R_2 = 1 : 4。$$

$$(2) I = \frac{220}{484 + 1936} = \frac{220}{2420} \approx 0.091 \text{ A}。$$

$$(3) P_1 = I^2 R_1 \approx 0.0083 \times 484 \approx 4.0 \text{ W}; P_2 = I^2 R_2 \approx 0.0083 \times 1936 \approx 16.0 \text{ W}。$$

25 W 灯泡实际功率（16 W）反而大于 100 W 灯泡（4 W），“220 V 25 W”的更亮。

验证： $4 + 16 = 20 \text{ W} = 220 \times 0.091 \text{ W} \checkmark$ 。

答：电阻比 1 : 4；电流约 0.091 A；实际功率约 4 W 与 16 W，25 W 灯泡更亮。

易错点：串联分功率 $P \propto R$ （电流同），并联分功率 $P \propto 1/R$ （电压同）——“额定功率小的串联反而更亮”是每年必见的分层陷阱。

A7 解析

思路：直接套 $R = r$ 条件与 $P_{\max} = E^2/4r$ ；最大功率时电流、路端电压一并求出。

规范解：

$$(1) R = r = 3 \Omega \text{ 时}, P_{\max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{9^2}{12} = 6.75 \text{ W}。$$

$$(2) \text{此时 } I = E/(R + r) = 9/6 = 1.5 \text{ A}; U = E - Ir = 9 - 1.5 \times 3 = 4.5 \text{ V}。$$

答： $R = 3 \Omega$ ，最大功率 6.75 W；电流 1.5 A，路端电压 4.5 V。

易错点：最大功率时路端电压等于 $E/2$ （内、外各分一半）， $4.5 \text{ V} = 9/2 \checkmark$ ——这个半压特征可用来快速自查。

A8 解析

思路：问变阻器 R 上功率最大——把 R_0 与内阻 r 并入电源，等效内阻 r 等效 = 6Ω 。

规范解： r 等效 = $R_0 + r = 5 + 1 = 6 \Omega$ ； $R = 6 \Omega$ 时：

$$P_{R,\max} = \frac{E^2}{4(R_0 + r)} = \frac{144}{24} = 6 \text{ W}。$$

答： R 调到 6Ω ， R 上最大功率 6 W。

易错点：等效内阻法分母是“别人”的总阻值（ $R_0 + r$ ），别只算 r ；问的是变阻器功率，别答成电源输出功率。

B 层·真题研习

B1 解析（2024·海南卷）

思路：电路等效为 A ($24\ \Omega$) 与 B ($24\ \Omega$) 两支路并联，接触电阻 RC 串联在 B 支路；RC 变化改变并联总电阻；B 的功率用“对应性”——B 自己的电流和电阻。

规范解：

(1) $RC = 0$ 时总电阻最小： $R_{\min} = 24 \times 24 / (24 + 24) = 12\ \Omega$ 。

$RC = 240\ \Omega$ 时，B 支路 $= 24 + 240 = 264\ \Omega$ ，与 A 支路并联：

$$R_{\max} = \frac{264 \times 24}{264 + 24} = \frac{6336}{288} = 22\ \Omega。$$

M、N 间总电阻范围： $12\ \Omega \leq R \leq 22\ \Omega$ 。

(2) $RC = 240\ \Omega$ 时，B 支路电流 $I_B = \frac{U}{R_C + R_B} = \frac{220}{264} = \frac{5}{6}\text{ A}$ ；

$$P_B = I_B^2 R_B = \left(\frac{5}{6}\right)^2 \times 24 = \frac{25}{36} \times 24 \approx 16.7\text{ W}。$$

答：(1) $12\ 22\ \Omega$ ；(2) 约 16.7 W 。

易错点：B 消耗功率用 $I_B^2 R_B$ (对应性铁律)，B 支路电流是 $220/(240+24)$ 而不是 $220/24$ ——虚接电阻吃掉了 B 支路的一部分电压；总电阻范围两端的边界分别对应 $RC = 0$ 和 $RC = 240$ 。

B2 解析 (2025 · 浙江卷)

思路：单位分析—— $W \cdot h = \text{瓦} \times \text{小时} = \text{功率} \times \text{时间}$ 。

规范解：由 $W = Pt$ ，功率 $\times$ 时间的单位“ $W \cdot h$ ”是能量(功)的单位。 $210\text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 表示每千克电池储存的能量。选 A。

易错点： $W \cdot h$ 不是电荷量单位(那是 $A \cdot h$ 或 mAh)—— $1\text{ Wh} = 3600\text{ J}$ ，是能量； mAh 才是电荷量(容量)。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (电热水壶)

思路：额定功率对应额定电压；电能 $W = Pt$ ；电压变化后功率按 $P \propto U^2$ 变化(电阻不变)。

规范解：

$$(1) I = \frac{P}{U} = \frac{2000}{220} \approx 9.1\text{ A}; R = \frac{U^2}{P} = \frac{220^2}{2000} = 24.2\ \Omega。$$

$$(2) W = Pt = 2000 \times 600 = 1.2 \times 10^6\text{ J} = 1.2\text{ MJ};$$

换算成 $\text{kW} \cdot \text{h}$ ： $1.2 \times 10^6 / 3.6 \times 10^6 \approx 0.333\text{ kW} \cdot \text{h}$ 。

$$(3) \text{电费} \approx 0.333 \times 0.6 \approx 0.2\text{ 元}。$$

(4) 电压降为 200 V ： $P' = \frac{U'^2}{R} = \frac{200^2}{24.2} \approx 1653\text{ W} \approx 1.65\text{ kW}$ ，功率降至额定值的 83% 左右；烧水所需电能不变，时间约延长为原来的 $2000/1653 \approx 1.21$ 倍(约 12 分钟)。

答：(1) 约 9.1 A 、 $24.2\ \Omega$ ；(2) $1.2 \times 10^6\text{ J} = 0.333\text{ kW} \cdot \text{h}$ ；(3) 约 0.2 元；(4) 约 1.65 kW ，烧水时间明显变长。

易错点：电热类器具(纯电阻)功率随电压平方变化——电压降 10% ($220 \rightarrow 198\text{ V}$)，功率降到 81%；这也是“电压不足时电水壶烧水慢”的物理原因。

C2 解析 (锂电池容量与能量)

思路：mAh 是电荷量，Wh 是能量 (= 电压 × 电荷量)；充电能量守恒加效率修正。

规范解：

(1) $W = UIt = 3.7 \times 4.5 = 16.65 \text{ Wh} (= 16.65 \times 3600 \approx 6.0 \times 10^4 \text{ J})$ 。

(2) 充电需补充能量 $W_{\text{需}} = 16.65/0.9 = 18.5 \text{ Wh}$ ；充电功率 $P = 5 \times 2 = 10 \text{ W}$ ；

$t = W_{\text{需}}/P = 18.5/10 = 1.85 \text{ h} \approx 1 \text{ 小时 } 51 \text{ 分钟}$ 。

(3) $m = 52.5 \text{ kW} \cdot \text{h} \div 210 \text{ W} \cdot \text{h/kg} = 52500/210 = 250 \text{ kg}$ 。

(4) $t_{\text{待机}} = 4500 \text{ mAh} \div 50 \text{ mA} = 90 \text{ h}$ (约 3.75 天)。

交叉验证：待机功率 $= 3.7 \text{ V} \times 0.05 \text{ A} = 0.185 \text{ W}$ ， $16.65 \text{ Wh} \div 0.185 \text{ W} = 90 \text{ h}$ ✓。

答：(1) 16.65 Wh；(2) 约 1.85 h；(3) 250 kg；(4) 约 90 h。

易错点：mAh × 电压才是能量 (Wh)；充电时间要除以效率 (损耗导致实际充电时间比理想值长)；(4) 用两种路径得到同一结果，是自洽性的最好检验。

本章综合 · S 层

S1 解析 (跨节综合 · 电动机与闭合电路)

思考路径：

- 电动机三件套 (输入 UI 、发热 I^2R 、机械做功) + 闭合电路 ($E = U + Ir$) 混用；
- 卡住时电动机退化为纯电阻，与电源内阻串联，电流按闭合电路欧姆定律暴增。

规范解：

(1) $P_{\text{入}} = UI = 12 \times 2 = 24 \text{ W}$ ； $P_{\text{热}} = I^2R = 4 \times 1 = 4 \text{ W}$ ； $P_{\text{机}} = 24 - 4 = 20 \text{ W}$ 。

(2) $\eta = P_{\text{机}}/P_{\text{入}} = 20/24 \approx 83.3\%$ 。

(3) 由 $E = U + Ir = 12 + 2 \times 1 = 14 \text{ V}$ 。

(4) 卡住后电动机等效纯电阻 1Ω ： $I' = \frac{E}{R+r} = \frac{14}{1+1} = 7 \text{ A}$ ；

线圈发热 $P_{\text{热}}' = I'^2R = 7^2 \times 1 = 49 \text{ W}$ ，是正常发热 (4 W) 的 12 倍以上；电源内阻也耗 49 W，总功率 98 W 全部变成热。线圈温度急剧升高，电动机很快烧毁。

答：(1) 24 W、4 W、20 W；(2) 83.3%；(3) 14 V；(4) 卡住电流 7 A、发热 49 W，烧毁。

易错点：(1) 卡住后不能再用 $I = U/R = 12/1 = 12 \text{ A}$ ——那忽略了电源内阻，卡住时整个回路是“电动机线圈 + 内阻”串联， $I = E/(R+r) = 7 \text{ A}$ ；(2) 正常时 $U = 12 \text{ V}$ 是路端电压 ($E = 14 \text{ V}$ 中 2 V 被内阻吃掉)，卡住后路端电压也变了，不能用旧电压；(3) 热功率用 I^2R ，卡住时线圈热 49 W 与内阻热 49 W 各半，共 $98 \text{ W} = EI'$ 全部发热。

0.31 磁现象与磁感线 / 9.2 电流的磁场：右手螺旋定则

例题 9.1 解析

思考路径：

- “电生磁”判方向——用右手螺旋定则（安培定则），不是左手；
- 右手握住导线，拇指指向电流方向（向上），四指弯曲方向即磁场环绕方向；
- 导线右侧：四指指向纸面内。

规范解：右手握住导线，拇指指向上（电流方向），四指弯曲——导线右侧四指指向纸面内，故右侧磁场方向垂直纸面向里。

答：导线右侧磁场垂直纸面向里。

易错点：导线左侧的磁场方向相反（垂直纸面向外）——磁场是绕导线环绕的，左右对称反向；“电生磁用右手”千万别和后面的“力用左手”混。

例题 9.3 解析

思考路径：

- 螺线管用右手螺旋定则：右手四指沿电流环绕方向弯曲，拇指所指即 N 极；
- “从右端看电流逆时针” → 右端看四指逆时针弯曲，拇指指向右端。

规范解：右手四指沿电流方向（从右端看逆时针）弯曲，拇指指向右端，故 N 极在右端，左端为 S 极。

答：N 极在右端。

易错点：记忆口诀“从某端看电流逆时针，该端为 N 极”；反过来“从左端看顺时针”同样是右端为 N 极——两端看到的环绕方向相反，别被“顺时针/逆时针”绕晕。

A1 解析

思路：磁感线的闭合性、疏密意义、方向唯一性，逐条核对。

规范解：

- (1) 对。磁感线闭合，外部 $N \rightarrow S$ ，内部 $S \rightarrow N$ ，首尾相接。
- (2) 对。切线方向即该点磁场方向（磁感应强度方向）。
- (3) 错。磁感线越密磁场越强（疏密表示强弱）。
- (4) 错。若相交，交点处磁场方向不唯一，矛盾——磁感线不相交。

易错点：磁感线“闭合”是它与电场线的最大区别（找不到磁单极子）；密强疏弱不要记反。

A2 解析

思路：关键在地磁极与地理极的对应关系 + 异名相吸。

规范解：地理北极附近恰好是地磁南极。指南针 N 极是磁体的北极，它受到地磁南极（位于地理北极附近）的吸引力——“异名相吸”，所以 N 极被拉向地理北方。即“N 指 S”：N 极指向的是地磁南极所在方向（地理北方）。

易错点：别把“地理北极”当成“地磁北极”——两者位置几乎对调（地磁北极在地理南极附近），这正是“同名相斥”会误导人的地方。

A3 解析

思路：右手螺旋定则，电流竖直向下，拇指指向下。

规范解：右手握住导线，拇指指向下（电流方向），四指弯曲——导线左侧四指指向纸面外，故左侧磁场方向垂直纸面向外。

答：导线左侧磁场垂直纸面向外。

易错点：与例题 9.1（电流向上，右侧向里）对照：电流反向，左右两侧磁场方向全部反向；判断时四指要“看着电流方向”绕。

A4 解析

思路：从右端看电流为逆时针时右端为 N 极；左端看顺时针等价于右端看逆时针。

规范解：从左端看电流顺时针 = 从右端看电流逆时针。由右手螺旋定则，右端为 N 极，左端为 S 极。

答：N 极在右端（左端为 S 极）。

易错点：顺时针/逆时针是相对的（换端观察方向相反）——判断统一从“电流逆时针的那端”入手，该端为 N 极。

0.32 磁感应强度：磁场版的“场强”

例题 9.2 解析

思考路径：

- 定义式 $B = F/IL$ ，条件是“导线垂直磁场”（ $\sin\theta = 1$ ）；
- 单位自查： $T = N/(A \cdot m)$ ，代入数值 $0.6/(3 \times 0.2)$ ；
- 预期检查：1 T 是常见中等强度磁场（永磁体附近约 0.01 T），结果合理。

规范解： $B = \frac{F}{IL} = \frac{0.6}{3 \times 0.2} = \frac{0.6}{0.6} = 1.0 \text{ T}$ 。

答：磁感应强度 1.0 T。

易错点：定义式成立的前提是导线与磁场垂直；导线平行磁场时 $F = 0$ ，不能反推 $B = 0$ ——“通电导线不受力 $\neq$ 此处无磁场”。

A5 解析

思路：同例题，直接代定义式。

规范解： $B = \frac{F}{IL} = \frac{0.5}{2.5 \times 0.4} = \frac{0.5}{1.0} = 0.5 \text{ T}$ 。

答：磁感应强度 0.5 T。

易错点：注意 I 与 L 的乘积做分母，别写成 I/L 。

A6 解析

思路：逐项核对磁感应强度的性质：矢量、方向规定、比值定义、与安培力方向的关系。

规范解：A 错：B 是矢量，有方向；B 对：B 的方向 = 磁感线切线方向 = 小磁针 N 极受力方向；C 错： $B = F/IL$ 是比值定义，B 由磁场本身决定，与 F、I、L 无关；D 错：安培力方向垂直于 B 与 I 决定的平面，与 B 方向不相同。选 B。

易错点：“比值定义”与“决定式”的区别——B 不随 F、IL 变；安培力方向一定垂直 B，所以“B 沿安培力方向”是错的。

A7 解析

思路：右手螺旋定则分别判两导线在中点产生的磁场方向，再矢量合成。

规范解：

(1) 同向电流：左导线在 O 点产生磁场垂直纸面向里，右导线在 O 点产生磁场垂直纸面向外，等大反向， $B_{\text{合}} = 0$ 。

(2) 反向电流：左导线在 O 点产生向里的磁场，右导线（电流反向）在 O 点产生同样向里的磁场，同向叠加， $B_{\text{合}} = 2B_0$ ，方向垂直纸面向里（或按图中具体方向）。

答：(1) 0；(2) $2B_0$ 。

易错点：磁场是矢量，叠加按平行四边形/同向相加反向相减——“同向电流中点磁场为零”是个重要结论，也解释了平行导线间磁场分布的特点（第 10 章平行导线相互作用要用）。

A8 解析

思路：逐条核对安培力公式的夹角依赖、B 的固有性、匀强磁场定义。

规范解：

(1) 对。 $F = BIL \sin \theta$, $\theta = 0$ (平行) 时 $F = 0$ 。

(2) 对。 B 是磁场固有属性, 定义式 $B = F/IL$ 中的 F 、 IL 只是“测量的探针”, B 与它们无关。

(3) 对。匀强磁场就是磁感应强度大小、方向处处相同 (磁感线平行等距)。

易错点: (1) 常被误解为“平行导线不受力说明磁场为零”——受力为零只能说明夹角为 0 ; 反过来, (2) 提醒 B 是描述场的量, 测不测它都在。

B 层·真题研习

B1 解析 (2023·福建卷)

思路: 把地球等效成环形电流, 用右手螺旋定则确定电流方向与地磁极的对应, 再由等效电流大小判断磁场强弱。

规范解: 地磁南极在地理北极附近, 地理北极附近磁场方向竖直向下 (磁感线进入地球)。

A 对、B 错: 要使北极附近磁场向下, 环形电流方向必须与地球自转方向相反 (从北极俯视: 自转逆时针、等效电流顺时针); 电流方向与负电荷运动方向相反, 故地表电荷为负电荷。

C 对: 电量增加 $\rightarrow$ 等效电流 $I = Q \cdot \omega / (2\pi)$ 增大 $\rightarrow$ 磁场增强。

D 错: 角速度减小 $\rightarrow$ 等效电流减小 $\rightarrow$ 磁场减弱。

选 AC。

易错点: 本题是“地磁南极在地理北极附近”+“右手螺旋定则”+“等效电流 $I = Q\omega/(2\pi)$ ”的三合一——三个环节错一步都会选错; B 项 (电流方向与自转方向相反) 是最易错选项。

B2 解析 (2022·浙江卷)

思路: B 选项直接考查本章考点 (磁感应强度方向的定义); A 考查磁场对电荷作用的条件, C、D 涉及后续章节 (交流电、变压器), 用排除法锁定 B。

规范解: A 错: 恒定磁场对静止电荷无作用, 对运动电荷也只有速度不平行于磁场时才有洛伦兹力; B 对: 磁感应强度的方向就是小磁针 N 极受力方向; C 错: 磁通量最大 (中性面) 时感应电动势为零、电流为零; D 错: 理想变压器原、副线圈的磁通量变化率相同。选 B。

易错点: B 选项是把“磁感应强度方向”记熟就能拿分的点——它定义的就是“磁场方向”; C、D 是超前知识, 遇到不必慌, 先锁定确定对的选项。

C 层·创新拓展

C1 解析 (磁悬浮列车的悬浮原理)

思路: 环形电流的磁场方向用右手螺旋定则; 磁悬浮靠同名磁极相斥。

规范解:

(1) 从正上方俯视线圈电流逆时针: 右手四指逆时针 (俯视) 弯曲, 拇指指向上方 $\rightarrow$ 电磁铁上端为 N 极。

(2) 同名相斥 $\rightarrow$ 轨道线圈正对电磁铁上端的一极应为 N 极。

(3) 电流反向 $\rightarrow$ 电磁铁上端变 S 极, 与轨道 N 极异名相吸, 列车会被吸向轨道、无法悬

浮。这说明磁悬浮的悬浮本质是“电流方向精确受控”——一旦电流方向出错，斥力变吸力，控制失效。磁悬浮技术的关键就在于对电流（磁极极性）的实时精确控制。

易错点：俯视逆时针 → 拇指指向观察者（上）→ 上端 N 极；电流反向则磁极全反——“极性由电流方向唯一决定”是判断磁悬浮行为的钥匙。

C2 解析（地磁场与通电导线）

思路： $F = BIL$ （垂直时）算大小；左手定则判方向；与重力比数量级。

规范解：

$$(1) F = BIL = 5 \times 10^{-5} \times 2 \times 1 = 1.0 \times 10^{-4} \text{ N}.$$

(2) 左手定则：磁感线（竖直向下）穿入掌心，四指指向西（电流方向），拇指指南——安培力方向水平向南。

(3) 导线每米重力约 0.1 N，安培力 1×10^{-4} N 只有重力的约千分之一——地磁场对普通电流的作用微乎其微，日常几乎感觉不到；但小磁针（罗盘）所受的磁力矩足以让指针转向，所以罗盘能在微弱地磁场中指示方向。

答：安培力 1.0×10^{-4} N，方向向南；约为重力的千分之一。

易错点：地磁场强度很小（约 10^{-5} T 量级）——对比实验室匀强磁场 0.1 T，相差 4 5 个数量级；左手定则的“穿手心”要求手心朝向磁感线来向，本题 B 向下、手心得朝上。

本章综合 · S 层

S1 解析（跨节综合）

思考路径：

- 每根导线产生的磁场大小 $B = kI/r$ ，方向用右手螺旋定则逐点判断；
- 磁感应强度是矢量，合成时先判方向再加减；
- 第（3）问用 $B = F/(IL)$ 定义式计算匀强磁场。

规范解： $kI = 2 \times 10^{-7} \times 5 = 1.0 \times 10^{-6} \text{ T} \cdot \text{m}.$

(1) O 点（距两导线各 0.2 m）：

$$B_1 = B_2 = 1.0 \times 10^{-6} / 0.2 = 5.0 \times 10^{-6} \text{ T}.$$

同向电流，两导线在 O 点产生的磁场等大反向（一向里、一向外）， $B_{\text{合}} = 0$ 。

(2) P 点距导线 1 为 $d = 0.4 \text{ m}$ 、距导线 2 为 $2d = 0.8 \text{ m}$ ：

$$B_1 = 1.0 \times 10^{-6} / 0.4 = 2.5 \times 10^{-6} \text{ T}; B_2 = 1.0 \times 10^{-6} / 0.8 = 1.25 \times 10^{-6} \text{ T}.$$

两导线电流同向向上，P 点在两导线同一侧，两磁场方向相同（均垂直纸面向外）：

$$B_{\text{合}} = 2.5 \times 10^{-6} + 1.25 \times 10^{-6} = 3.75 \times 10^{-6} \text{ T}, \text{ 方向垂直纸面向外}.$$

(3) $B = F/(IL) = 0.8 / (2 \times 0.5) = 0.8 \text{ T}.$

答：(1) 0；(2) $3.75 \times 10^{-6} \text{ T}$ ，垂直纸面向外；(3) 0.8 T。

易错点：(1) 磁感应强度叠加必须“先判方向再算大小”——同向相加、反向相减，只算大小

直接相加是错的；(2) 中点是“等大反向抵消”的典型位置，同侧点则是“同向加强”；(3) (3) 定义式要求导线垂直磁场，审题时别漏“垂直”二字。

0.33 安培力的大小与方向

例题 10.1 解析

思考路径：

- 电流水平、磁场竖直向下——两者垂直， $F = BIL$ 取最大值；
- 大小直接代公式；方向用左手定则（“力用左手”）；
- 设电流沿导轨向右：磁场竖直向下穿入掌心（掌心朝上），四指向右，拇指指向观察者——安培力垂直纸面向外（垂直于电流与磁场决定的平面）。

规范解： $F = BIL = 0.3 \times 4 \times 0.5 = 0.6 \text{ N}$ 。

方向：由左手定则，安培力垂直于电流与磁场方向（设电流向右时垂直纸面向外；电流反向则受力反向）。

答：安培力 0.6 N ，方向垂直于电流和磁场方向。

易错点：先判夹角再选公式——垂直取 $F = BIL$ ，不垂直必须用 $F = BIL \sin \theta$ ；方向判断时“磁感线穿入手心”的掌面朝向最易出错，可先用 $I \times B$ 叉乘做交叉验证。

A1 解析

思路：电流与磁场夹角 30° ，用完整公式 $F = BIL \sin \theta$ 。

规范解： $F = BIL \sin 30^\circ = 0.4 \times 2 \times 0.3 \times 0.5 = 0.12 \text{ N}$ 。

答：安培力 0.12 N 。

易错点：忘了 $\sin \theta$ 直接用 BIL 会得 0.24 N （大一倍）；审题第一眼先看夹角。

A2 解析

思路： $F = BIL \sin \theta$ ， $\theta = 0$ 时 $\sin \theta = 0$ 。

规范解：安培力为 0——平时 $\sin \theta = 0$ 。不知道夹角不能用 $F = BIL$ （那是垂直时的最大值公式）；必须先用“先判夹角，再用带 $\sin \theta$ 的完整式”。

易错点：平行不受力 $\neq$ 该处无磁场；“不能直接用 $F = BIL$ ”是本章明确强调的操作铁律。

A3 解析

思路：用左手定则，或叉乘 $F = I \times B$ 验证。

规范解：磁场水平向右，电流垂直纸面向外。左手定则：磁感线向右穿入手心（掌心朝向磁感线来向），四指指向外（电流），拇指指向下——安培力方向竖直向下。

（叉乘验证： I 向外 $\times$ B 向右 = 竖直向下 $\checkmark$ 。）

答：安培力方向竖直向下。

易错点：左手定则的“掌心朝向”要对着磁感线射来的方向——本题掌心朝左（不是朝右），四指向外、拇指朝下；做错的同学常把掌面放反。

0.34 平行导线相互作用

例题 10.3 解析

思考路径：

- 选一根导线为研究对象，另一根的磁场用右手螺旋定则判断；
- 研究对象自身的电流方向用左手定则判断受力；
- 对称地，另一根导线也受等大反向的力（牛顿第三定律）。

规范解：以右导线为研究对象：左导线电流在右导线处产生的磁场，由右手螺旋定则，方向垂直纸面向里；右导线电流向上（与左导线同向），左手定则——磁感线向里穿入掌心、四指向上、拇指指向左导线，即受安培力指向左导线。两导线互相吸引。

若右导线电流反向：其电流方向向下，左手定则拇指指向右——受安培力背离左导线，两导线互相排斥。

答：同向电流互相吸引，反向电流互相排斥。

易错点：与电荷的相互作用记混（电荷同号斥、电流同向吸）；判断时“先磁场（右手螺旋）后受力（左手定则）”两步缺一不可。

A4 解析

思路：平行导线相互作用口诀。

规范解：反向电流互相排斥。选 **B**。

易错点：与“同号电荷相斥”记混——电流同向相吸、反向相斥；这道判断是与电荷规律的经典对比。

0.35 安培力与运动学（伏笔）

例题 10.2 解析

思考路径：

- 受力分析三力：重力 mg 竖直向下、支持力垂直斜面向上、安培力沿斜面向上；
- 平衡沿斜面方向列方程： $BIL = mg \sin 30^\circ$ ；
- 重力沿斜面的分量是 $mg \sin \theta$ ，不是 $mg \cos \theta$ 。

规范解：沿斜面方向平衡： $BIL = mg \sin 30^\circ$ ，

$$I = \frac{mg \sin 30^\circ}{BL} = \frac{0.1 \times 10 \times 0.5}{1 \times 0.5} = 1 \text{ A}。$$

答：电流 1 A，方向由左手定则反推（使安培力沿斜面向上）。

易错点：重力分解用 $\sin \theta$ 还是 $\cos \theta$ ——沿斜面分量是 $mg \sin \theta$ ；若电流反向，安培力沿斜面向下，棒将沿斜面下滑（需外力维持）。

A5 解析

思路：竖直导轨上静止，安培力竖直向上平衡重力；大小 $BIL = mg$ ；方向用左手定则反推电流方向。

规范解：平衡： $BIL = mg$ ，

$$I = \frac{mg}{BL} = \frac{0.1 \times 10}{1 \times 0.2} = 5 \text{ A}。$$

方向：安培力竖直向上、磁场水平向里（垂直导轨平面），左手定则——磁感线向里穿入掌心、拇指向上，四指指向右，即电流沿水平向右。

答：电流 5 A，方向水平向右。

易错点：竖直导轨题的平衡条件是“安培力 = 重力”（不是支持力参与）；电流方向由“拇指（安培力）向上、磁感线穿掌心”反推四指。

A6 解析

思路：安培力用 $F = BIL$ （垂直）；判断能否运动看安培力与最大静摩擦力的比较；运动后由牛顿第二定律求加速度。

规范解：

(1) $F = BIL = 0.5 \times 2 \times 0.4 = 0.4 \text{ N}$ 。方向：电流沿棒方向（水平）、磁场竖直向上，用左手定则，安培力水平沿导轨方向。

(2) $f = \mu mg = 0.5 \times 0.05 \times 10 = 0.25 \text{ N}$ 。

(3) $F = 0.4 \text{ N} > f = 0.25 \text{ N}$ ，导体棒能运动；

$$a = \frac{F - f}{m} = \frac{0.4 - 0.25}{0.05} = 3 \text{ m/s}^2。$$

答：安培力 0.4 N（水平沿导轨）；最大静摩擦 0.25 N；能运动，加速度 3 m/s²。

易错点：(1) 有摩擦时先比较 F 与 f 再下结论“能否动”，别直接套 $a = F/m$ ；(2) 摩擦力 $f = \mu mg$ （正压力是重力，除非安培力有竖直分量改变正压力）。

A7 解析

思路：沿斜面方向平衡 $BIL = mg \sin \theta$ ；电流反向时安培力反向，重算合力方向。

规范解：

$$(1) BIL = mg \sin 30^\circ, I = \frac{0.1 \times 10 \times 0.5}{0.5 \times 0.5} = 2 \text{ A}。$$

(2) 电流反向 → 安培力变为沿斜面向下，与下滑分力 $mg \sin 30^\circ = 0.5 \text{ N}$ 同向，棒受合力沿斜面向下，不能静止，会沿斜面下滑。

答：电流 2 A；电流反向不能静止，会下滑。

易错点：电流反向 → 安培力反向（不是消失）；“安培力方向随电流方向反向”是斜面平衡题最常见的变式。

A8 解析

思路：垂直 → $F = BIL$ ；无摩擦， $a = F/m$ ；匀加速用运动学公式。

规范解：

$$(1) F = BIL = 1 \times 4 \times 0.5 = 2 \text{ N}, \text{ 方向沿导轨方向（水平，垂直于电流和磁场）。}$$

$$(2) a = F/m = 2/0.2 = 10 \text{ m/s}^2。$$

$$(3) v = at = 10 \times 2 = 20 \text{ m/s}; x = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 10 \times 4 = 20 \text{ m}。$$

答：安培力 2 N；加速度 10 m/s²；2 s 末速度 20 m/s，位移 20 m。

易错点：安培力方向沿导轨（垂直于电流方向），别当成沿电流方向；这是“第 14 章滑轨模型”的第一次热身——安培力改变运动状态，而运动又反过来影响感应电流（本章先不展开）。

B 层·真题研习

B1 解析（2023·江苏卷）

思考路径：逐段分析——与磁场垂直的段用 $F = BIL$ ，与磁场平行的段不受力；总安培力为各段矢量和（本题各段受力共线）。

规范解：bc 段与磁场平行， $F = 0$ ；ab 段与磁场垂直， $F_{ab} = B \cdot I \cdot 2l = 2BIl$ 。

总安培力 = $2BIl$ 。选 C。

易错点：别用勾股定理把 ab、bc 合成 $\sqrt{5}Bil$ ——bc 段根本不受力，只有 ab 段贡献 $2Bil$ ；“平行段不贡献安培力”是 L 形（以及任意折线）导线的解题关键。

B2 解析 (2022 · 江苏卷)

思考路径：b 导线的磁场在 a 导线各处方向不同（绕 b 环绕），分别判断 a 左、右半部分的受力。

规范解：由安培定则，b（电流向里）的磁场在 a 左侧部分斜向右上方、右侧部分斜向下；由左手定则（a 中电流向右）：左半部分受安培力垂直纸面向外、右半部分垂直纸面向里。选 C。

易错点：两导线“垂直”而非“平行”——a 上不同位置的磁场方向不同，必须分段判断；这正是本题与“平行导线同向吸”的区别。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (电磁炮)

思路： $F = BIL$ 求安培力； $a = F/m$ 求加速度；匀加速 $v^2 = 2ax$ 求出口速度。

规范解：

$$(1) F = BIL = 2 \times 5000 \times 0.2 = 2000 \text{ N}.$$

$$(2) a = \frac{F}{m} = \frac{2000}{0.1} = 2 \times 10^4 \text{ m/s}^2 \text{ (约 } 2000g\text{)}.$$

$$(3) v = \sqrt{2ax} = \sqrt{2 \times 2 \times 10^4 \times 2} = \sqrt{8 \times 10^4} \approx 283 \text{ m/s}.$$

(4) 电磁炮的优点：加速度极大（可达数千倍重力加速度）、出口速度高、无火药爆炸（更安全可控）、射速与功率可精确调节。

答：安培力 2000 N；加速度 $2 \times 10^4 \text{ m/s}^2$ ；出口速度约 283 m/s。

易错点：电磁炮电流极大（这里 5000 A）是它能获得巨大安培力的原因； $v^2 = 2ax$ 里 x 是导轨长度，别与 L（导轨间距）混淆。

C2 解析 (电流天平升级)

思路：天平平衡条件是“力矩平衡”；等臂天平简化为力平衡——砝码重力 + 安培力（向上为正）与线圈重力平衡。

规范解：

$$(1) F = BIL = 0.5 \times 2 \times 0.1 = 0.1 \text{ N}, \text{ 方向竖直向上}.$$

$$(2) \text{等臂平衡: } G_{\text{砝}} + F = G, G_{\text{砝}} = 0.3 - 0.1 = 0.2 \text{ N}.$$

$$(3) \text{电流反向, 安培力变为竖直向下: } G_{\text{砝}}' = G + F = 0.3 + 0.1 = 0.4 \text{ N}.$$

答：安培力 0.1 N（竖直向上）；砝码重力 0.2 N；电流反向时为 0.4 N。

易错点：(1) 安培力方向由电流方向决定，电流反向 → 安培力反向 → 砝码要“换边配平”（从减到加）；(2) 天平测安培力的本质就是“用砝码重力平衡安培力”，这正是历史上电流天平的实验思想（库仑扭秤、安培天平的传承）。

本章综合 · S 层

S1 解析 (跨节综合 · 安培力 + 闭合电路 + 运动)

思考路径：闭合电路算电流（含导体棒电阻、电源内阻）→ $F = BIL$ 算安培力 → 与摩擦力比

较 → 牛顿第二定律求加速度 → 反解匀速条件。

规范解：

$$(1) I = \frac{E}{R+r} = \frac{6}{2+1} = 2 \text{ A}。$$

$$(2) F = BIL = 1 \times 2 \times 0.5 = 1 \text{ N}, \text{ 方向沿导轨方向 (水平)}。$$

$$(3) f = \mu mg = 0.4 \times 0.2 \times 10 = 0.8 \text{ N} < F = 1 \text{ N}, \text{ 能运动}；$$

$$a = \frac{F-f}{m} = \frac{1-0.8}{0.2} = 1 \text{ m/s}^2。$$

$$(4) \text{ 匀速 (或保持静止的临界): } F = f' = \mu' mg,$$

$$\mu' = \frac{F}{mg} = \frac{1}{0.2 \times 10} = 0.5。$$

答：(1) 2 A；(2) 1 N，沿导轨水平方向；(3) 能运动，加速度 1 m/s^2 ；(4) $\mu = 0.5$ 。

易错点：(1) 闭合电路中的电流要同时计入导体棒电阻和电源内阻 ($R+r$)，漏掉内阻会得 $I=3 \text{ A}$ 的错误；(2) 安培力方向沿导轨、垂直于电流与磁场——本题棒垂直导轨，电流沿棒， F 沿导轨方向；(3) (4) 匀速条件是“安培力 = 摩擦力”， $\mu = 0.5$ 时棒恰好匀速（初静止则保持静止），这是临界状态的标准问法。

0.36 洛伦兹力

例题 11.1 解析

思考路径：

• 读题：求“洛伦兹力大小和方向”——先判夹角： v 水平向右、 B 竖直向下，二者垂直，用 $F = qvB$ 取最大值；

• 方向用左手定则：磁场穿手心（手心向上），四指指向右（正电荷运动方向），拇指所指即力的方向；

• 预期检查： $F = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^6 \times 0.5$ 的量级应为 10^{-13} N ($q \ 10^{-19}$ 、 $v \ 10^6$ 、 $B \ 10^0$ 相乘)。

规范解： $F = qvB = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^6 \times 0.5 = 1.6 \times 10^{-13} \text{ N}。$

左手定则：磁场竖直向下穿手心（手心朝上），四指指向右（质子运动方向），拇指垂直纸面向外。

答：洛伦兹力 $1.6 \times 10^{-13} \text{ N}$ ，方向垂直纸面向外。

易错点：负电荷四指要反向——若换成电子，受力方向垂直纸面向里；洛伦兹力永远垂直于速度方向，这是它“只能转弯、不能加速”的根源。

A1 解析

思路： α 粒子带 2 个正电荷， $q = 2e = 3.2 \times 10^{-19} \text{ C}$ ； $v \perp B$ ，用 $F = qvB$ 。

规范解： $F = qvB = 3.2 \times 10^{-19} \times 1 \times 10^6 \times 0.2 = 6.4 \times 10^{-14} \text{ N}$ 。

方向：左手定则，依题设具体方向判断（与 v 、 B 均垂直）。

答：洛伦兹力 $6.4 \times 10^{-14} \text{ N}$ ，方向垂直于 v 与 B 所决定的平面。

易错点： α 粒子的电荷量是 $2e$ 不是 e ——漏乘 2 会得到 $3.2 \times 10^{-14} \text{ N}$ 的错误答案。

A2 解析

思路：左手定则，注意正负电荷四指方向的差别。

规范解：电子是负电荷，四指应指向运动的反方向（向左）。设磁场穿手心（垂直纸面向里穿手心），则拇指指向下方——电子受洛伦兹力方向竖直向下（具体以 v 与 B 的相对方位为准： v 向右、 B 向里，正电荷受向上的力，负电荷受力向下）。

质子是正电荷，四指直接指运动方向（向右），受力方向与电子相反，竖直向上。

答：电子受力竖直向下，质子受力竖直向上（两者方向相反）。

易错点：负电荷用左手定则时四指要反向——“正电用左手、负电四指反着指”是最高频的失分点。

A3 解析

思路：洛伦兹力永不做功 $\rightarrow$ 动能不变；但不做功 $\neq$ 不受力（力恒垂直于速度）。

规范解：

（1）正确。 F 恒垂直于 v ，瞬时功率为零，洛伦兹力不做功，动能不变。

（2）错误。速率不变只说明没有切向力（沿速度方向的力），但洛伦兹力提供向心力、不断改变速度方向——有力的作用（法向力）。

（3）错误。洛伦兹力永不做功，只能改变速度方向，不能增大速度大小；加速必须靠电场力做功。

易错点：“不做功”常被误读为“没有作用”——向心力也不做功，但物体明明受到了力。方向改变就是力的作用的证据。

0.37 洛伦兹力永不做功

例题 11.2 解析

思考路径：

- 读题：电子垂直进入磁场 $\rightarrow$ 匀速圆周运动，直接用黄金公式；
- 半径 $r = mv/qB$ ，周期 $T = 2\pi m/qB$ ——注意电子质量是 m_e 、电荷量 e ；

• 预期检查: $v \ 10^6 \text{ m/s}$ 、 $B \ 10^{-4} \text{ T}$, $r = 9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^6 / (1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-4}) \approx 8.5 \times 10^{-2} \text{ m}$ (厘米量级合理); $T \approx 1.8 \times 10^{-7} \text{ s}$ (一秒钟约转 550 万圈)。

规范解:

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-4}} \approx 8.5 \times 10^{-2} \text{ m} = 8.5 \text{ cm};$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \times 9.1 \times 10^{-31}}{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-4}} \approx 1.8 \times 10^{-7} \text{ s}。$$

答: 半径 8.5 cm, 周期约 $1.8 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。

易错点: B 加倍 $\rightarrow$ 半径、周期都减半; 速度加倍 $\rightarrow$ 半径加倍、周期不变。选择题最爱考这种“谁变谁不变”。

A4 解析

思路: 质子垂直进入磁场做匀速圆周运动, 直接套 $r = mv/qB$ 与 $T = 2\pi m/qB$ 。

规范解:

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 2 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5} \approx 4.2 \times 10^{-2} \text{ m} = 4.2 \text{ cm};$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \times 1.67 \times 10^{-27}}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5} \approx 1.3 \times 10^{-7} \text{ s}。$$

答: 半径约 4.2 cm, 周期约 $1.3 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。

易错点: 质子质量用 $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ (不是电子的 $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$); 数量级要当心: $10^{-27}/10^{-19} = 10^{-8}$, 再乘 v/B 的量级得到厘米级半径。

A5 解析

思路: $r = mv/qB$ 中, 相同速度进入同一磁场, 质量大者半径大; $T = 2\pi m/qB$ 与速度无关。

规范解: 质子的半径大 (质量约为电子的 1836 倍, r 与 m 成正比)。

电子速度加倍 $\rightarrow$ 半径加倍、周期不变 (T 与 v 无关);

磁感应强度加倍 $\rightarrow$ 半径减半、周期减半 (r 、 T 都与 B 成反比)。

答: 质子半径大; 速度加倍 r 加倍 T 不变, B 加倍 r 和 T 都减半。

易错点: 把“速度变半径、磁场变周期”记反了——速度只在 r 里, 磁场同时在 r 和 T 里。

0.38 圆周运动

例题 11.3 解析

思考路径:

- 读题： $qE = mg \rightarrow$ 重力与电场力等大反向，恰好抵消；
- 剩余合力只有洛伦兹力（大小不变、方向恒垂直速度） $\rightarrow$ 匀速圆周运动；
- v 水平向右、 B 垂直纸面向里 $\rightarrow v \perp B$ ，洛伦兹力恰为向心力。

规范解：

(1) 重力 mg 与电场力 qE 等大反向、相互抵消，粒子只受洛伦兹力，做匀速圆周运动。

(2) 由 $qvB = mv^2/r$ 得 $r = \frac{mv}{qB}$ ， $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 。

答：匀速圆周运动；半径 mv/qB 、周期 $2\pi m/qB$ 。

易错点：叠加场中“能消则消”——先找能抵消的力（本题 $qE = mg$ ），消掉后问题立即变回纯磁场圆周运动。若 $qE > mg$ ，等效重力不为零，轨迹将变成复杂的摆线，只能靠能量分析。

A9 解析

思路： $qE = mg \rightarrow$ 重力电场力抵消，粒子只受洛伦兹力做匀速圆周运动， $r = mv/qB$ 。

规范解： $r = \frac{mv}{qB} = \frac{v}{(q/m)B} = \frac{5 \times 10^5}{1 \times 10^7 \times 0.2} = 0.25 \text{ m}$ 。

答：轨迹半径 0.25 m 。

易错点：直接用 m 值而 m 未知时，用比荷 q/m 整体代入—— $r = v/[(q/m) \cdot B]$ 一步到位，别去“算 m ”。

A10 解析

思路：速度选择器二力平衡： $qE = qvB \rightarrow v = E/B$ ；速度偏大时洛伦兹力占优。

规范解： $v = \frac{E}{B} = \frac{2 \times 10^4}{0.1} = 2 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。

粒子速度大于该值时，洛伦兹力 $qvB > qE$ ，合力向上（洛伦兹力向上），粒子向上偏转。

答： $2 \times 10^5 \text{ m/s}$ ；速度更大时向上偏转。

易错点：速度选择器“挑的是速度不是质量”—— $v = E/B$ 与 q 、 m 无关；而偏转方向取决于 qvB 与 qE 谁大。

0.39 质谱仪

A6 解析

思路：质谱仪三连：加速（ $\frac{1}{2}mv^2 = qU$ ） $\rightarrow$ 偏转（ $r = mv/qB$ ） $\rightarrow$ 反推质量： $m = qB^2r^2/2U$ 。

规范解： $m = \frac{qB^2r^2}{2U} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.2^2 \times 0.05^2}{2 \times 800} = 1 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。

答：离子质量约 $1 \times 10^{-26} \text{ kg}$ 。

易错点：反推时平方别漏—— r^2 和 B^2 都要平方，漏一处答案差 10^2 倍；一价离子 $q=e$ 不必再乘 2。

0.40 回旋加速器

A7 解析

思路：最大速度由最外圈半径决定 $v_{\max} = qBR/m$ ；交变电场频率必须等于回旋频率 $f = qB/2\pi m$ 。

规范解：

$$(1) v_{\max} = \frac{qBR}{m} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5 \times 0.4}{2 \times 1.67 \times 10^{-27}} \approx 9.6 \times 10^6 \text{ m/s}.$$

$$(2) f = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5}{2\pi \times 2 \times 1.67 \times 10^{-27}} \approx 3.8 \times 10^6 \text{ Hz} = 3.8 \text{ MHz}.$$

答：最大速度约 $9.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ ；交变电场频率约 3.8 MHz 。

易错点：氦核质量是质子 2 倍 ($m \approx 3.34 \times 10^{-27} \text{ kg}$) ——用质子质量会得到 2 倍的错误结果；最大动能公式 $E_{k,\max} = q^2 B^2 R^2 / 2m$ 中 q/m 要对应粒子种类。

0.41 有界磁场

A8 解析

思路：有界磁场三步走——找圆心、定半径、列几何。入射、出射对称，弦高（宽度） d 与半径 r 、入射角 θ 的关系是 $d = 2r \sin\theta$ 。

规范解：由几何关系（入射、出射对称，偏转角为 2θ 的圆弧弦高）：

$$d = 2r \sin 30^\circ = 2r \times \frac{1}{2} = r, \text{ 即 } r = d.$$

答：粒子轨迹半径等于磁场宽度 d 。

易错点： $d = 2r \sin\theta$ 中的 θ 是“速度与边界的夹角”，别把 30° 当 60° 代；本题恰好 $r = d$ ，换成 $\theta = 45^\circ$ 则 $d = \sqrt{2} \cdot r$ ，几何关系随 θ 变。

B 层·真题研习

B1 解析（2023·广东卷）

思路：回旋加速器最大动能对应最外圈半径，用 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ 求 v ；再与 qBR/m 交叉验证。

规范解： $E_k = 1.5 \times 10^7 \times 1.6 \times 10^{-19} = 2.4 \times 10^{-12} \text{ J}.$

$$v = \sqrt{\frac{2E_k}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 2.4 \times 10^{-12}}{1.67 \times 10^{-27}}} = \sqrt{2.87 \times 10^{15}} \approx 5.4 \times 10^7 \text{ m/s}.$$

交叉验证： $v = qBR/m = (1.6 \times 10^{-19} \times 1.12 \times 0.5) / (1.67 \times 10^{-27}) \approx 5.37 \times 10^7 \text{ m/s}$ ，吻合。

选 C。

易错点：eV 换算焦耳 ($\times 1.6 \times 10^{-19}$)；最大动能公式 $E_{k,\max} = q^2 B^2 R^2 / 2m$ 与加速电压 U 无关——考场上看到 U 都是干扰信息。

B2 解析 (2023 · 海南卷)

思路：小球受重力与洛伦兹力；洛伦兹力永不做功；合力非恒力 $\rightarrow$ 速度、加速度都在变。

规范解：A 对：小球竖直向下运动、磁场垂直纸面向里，由左手定则（正电荷四指竖直向下，磁场穿手心）知洛伦兹力水平向右。

B 错：速度方向时刻改变（洛伦兹力改变方向）。

C 错：洛伦兹力大小不变但方向在变，与重力合成后合力方向变化，加速度方向变化。

D 错：洛伦兹力恒垂直于速度，永不做功。

选 A。

易错点：受洛伦兹力作用后粒子不做匀速圆周运动（还有重力），但“洛伦兹力不做功”的结论在任何情形下都成立——D 选项是送分陷阱。

B3 解析 (2022 · 重庆卷)

思路：把速度分解为平行磁场分量 v_1 与垂直磁场分量 v_2 ——洛伦兹力只由垂直分量 v_2 决定；电场力方向与磁场方向相同（水平向右），做功功率 $P = qE \cdot v_1$ （只用速度在电场方向的分量）。

规范解：

A 错：电场力沿水平向右，功率 $P = F \cdot v = qE \cdot v_1$ （速度在电场方向的分量），不是 $qE\sqrt{(v_1^2 + v_2^2)}$ ——A 项把 v_2 也算进去了。

B 错：洛伦兹力 $F = qv_2B$ （只用垂直磁场分量 v_2 ），不是 qv_1B 。

C 错：垂直磁场方向做匀速圆周运动（ v_2 不变），平行方向被电场加速（ v_1 增大）， v_2/v_1 不断变小。

D 对：洛伦兹力大小 qv_2B 恒定（ v_2 不变），电场力 qE 恒定，合力大小恒定 $\rightarrow$ 加速度大小不变。

选 D。

（注：原题 A 选项为图像公式无法完整还原，此处按官方解析给出的正确功率 $P = qEv_1$ ，将其表述为错误式 $qE\sqrt{(v_1^2 + v_2^2)}$ ，答案仍为官方答案 D。）

易错点：洛伦兹力公式里的速度是“垂直于磁场的分量” v_2 ，不是总速度也不是 v_1 ——这是本题的灵魂；叠加场里“分解 + 圆周 + 直线加速”的叠加视图是压轴题的通用框架。

B4 解析 (2026 · 云南卷 · 带电粒子在圆形边界磁场中运动)

思路：几何定圆心：电子做匀速圆周运动，圆心在 S 点正上方（速度水平向左，向心力竖直向上）；S、P 关于圆心对称 $\rightarrow$ 弦 SP 为竖直直径，半径由“ $CP = CS$ ”解出；方向用左手定则（电子带负电）。

规范解：

(1) 设圆心 C、半径 r 。C 在 S 正上方： $CS = r$ ， $CP = r$ ，而 P 在 O 上方 R 处、S 在 O

下方 $0.8R$ 处:

$$CP = |R - (-0.8R + r)| = |1.8R - r| = r \rightarrow r = 0.9R。$$

$$\text{由 } evB = \frac{mv^2}{r}: B = \frac{mv}{er} = \frac{mv}{0.9eR} = \frac{10mv}{9eR}。$$

方向: 电子(负电荷)从 S 向左射出后向上偏转, 由左手定则, 磁场方向垂直纸面向里。

$$(2) \text{ S、C、P 共线, 圆弧为半圆 (圆心角 } \pi): t = \frac{\pi r}{v} = \frac{0.9\pi R}{v}。$$

$$\text{答: (1) } \frac{10mv}{9eR}, \text{ 垂直纸面向里; (2) } \frac{0.9\pi R}{v}。$$

易错点: (1) 几何核心是 $|1.8R - r| = r$, 半径不是 $0.8R$ 也不是 R ; (2) 电子带负电, 洛伦兹力方向用左手定则要“反着看”(四指指向运动反方向)——本题直接由“向上偏”反推 B 方向更稳; (3) 半圆时间用 $\pi r/v$, 别写成 $2\pi r/v$ 。

C 层·创新拓展

C1 解析 (质子治疗)

思路: 质子垂直进入磁场做匀速圆周运动, $r = mv/qB$; 偏转 90° 对应四分之一周期; 磁场半径至少能容纳 90° 圆弧。

规范解:

$$(1) r = \frac{mv}{qB} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 6.0 \times 10^7}{1.6 \times 10^{-19} \times 1.0} \approx 0.63 \text{ m}。$$

$$(2) T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \times 1.67 \times 10^{-27}}{1.6 \times 10^{-19} \times 1.0} \approx 6.6 \times 10^{-8} \text{ s}; \text{ 偏转 } 90^\circ \text{ 用时 } t = T/4 \approx 1.6 \times 10^{-8} \text{ s}。$$

(3) 90° 圆弧是轨迹圆的一部分, 轨迹圆半径 $r \approx 0.63 \text{ m}$ ——磁场圆形区域与轨迹圆同圆心时, 半径不小于 r 即可完整容纳该圆弧, 故磁场半径至少约 0.63 m 。

答: 半径约 0.63 m ; 周期约 $6.6 \times 10^{-8} \text{ s}$, 偏转 90° 约 $1.6 \times 10^{-8} \text{ s}$; 磁场半径至少约 0.63 m 。

易错点: 偏转 90° 的时间是 $T/4$ 不是 $T/2$; 容纳圆弧的磁场最小半径等于轨迹圆半径 r (同圆心放置), 不是弦长 $\sqrt{2} \cdot r$ ——圆弧本身在半径 r 的圆上。

C2 解析 (极光与磁约束)

思路: 速度不垂直磁场时, 把速度分解为垂直分量 (产生圆周运动) 与平行分量 (不受洛伦兹力、匀速), 叠加成螺旋线。

规范解:

(1) 粒子速度可分解为垂直磁场的分量 $v_\perp$ 与平行磁场的分量 $v_\parallel$ 。 $v_\perp$ 受洛伦兹力作用做圆周运动, $v_\parallel$ 方向不受力做匀速直线运动——两者叠加为螺旋线运动。

(2) 平行磁场方向的分量不产生洛伦兹力 ($F = qvB \sin\theta$, $\theta = 0$ 时 $F = 0$), 所以沿磁场方向仍做匀速直线运动, 不会被“转”弯——只是整体轨迹呈螺旋形。

(3) 洛伦兹力永不做功, 磁场只改变粒子速度方向、不改变动能——约束等离子体时磁场不必向粒子“输送”能量, 只需提供指向轴心的向心力让粒子绕磁感线回旋而不跑出真空室; 真正需要外界供能的是加热等离子体 (增加动能), 那是另一回事。

易错点: 螺旋线是“圆周 + 匀速直线”的叠加, 不是单纯的圆; 洛伦兹力不做功意味着磁场

“约束”是零能耗的——把“约束”误解为“要用力推住”就错了。

C3 解析 (动态圆·放缩圆临界)

思路：速度大小变化 $\rightarrow$ 半径变化，轨迹圆“放缩”。垂直边界射入时轨迹为半圆（圆心在边界法线上），“恰好穿出”对应半径 $R = d/2$ （半圆直径 = 边界间距）。磁场中运动时间 = 圆心角 $/2\pi \times$ 周期，与速度大小无关（同一磁场同种粒子周期相同）。

规范解：

$$(1) R = \frac{mv}{qB}.$$

$$(2) \text{恰好相切：轨迹直径恰为 } d, R_0 = \frac{d}{2} = 0.2 \text{ m};$$

$$v_0 = \frac{qBR_0}{m} = \frac{1 \times 10^{-6} \times 1 \times 0.2}{4 \times 10^{-10}} = 500 \text{ m/s}.$$

$$(3) v = 2v_0: R = 0.4 \text{ m} > 0.2 \text{ m}, \text{能穿出右边界, 轨迹为半圆, } t_1 = \frac{T}{2} = \frac{\pi m}{qB};$$

$$v = \frac{v_0}{2}: R = 0.1 \text{ m}, \text{直径 } 0.2 \text{ m} < 0.4 \text{ m}, \text{不能穿出, 从左边返回, 轨迹仍为半圆, } t_2 = \frac{\pi m}{qB} \text{——两段时间相同 (周期与速度无关)}.$$

答：(1) $R = mv/qB$; (2) 500 m/s; (3) 均为 $\pi m/qB$ 。

易错点：(1) 放缩圆的临界条件： $R = d/2$ （半圆直径 = 间距），不是 $R = d$ ；(2) 粒子在匀强磁场中运动的周期 $T = 2\pi m/qB$ 与速度、半径无关——速度变了时间不变；(3) 垂直边界射入 = 圆心在法线上，轨迹半圆，圆心角恒为 π 。

本章综合·S 层

S1 解析 (电场加速 + 磁场圆周综合)

思路：动能定理求加速速度 $\rightarrow r = mv/qB$ 求半径 $\rightarrow T = 2\pi m/qB$ 求周期 $\rightarrow$ 用半径与区域宽度比较判断能否穿出。

规范解：

$$(1) \frac{1}{2}mv^2 = qU:$$

$$v = \sqrt{\frac{2qU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 2000}{6.64 \times 10^{-27}}} \approx 4.4 \times 10^5 \text{ m/s}.$$

$$(2) r = \frac{mv}{qB} = \frac{6.64 \times 10^{-27} \times 4.4 \times 10^5}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.05} \approx 0.18 \text{ m}.$$

$$(3) T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \times 6.64 \times 10^{-27}}{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 0.05} \approx 2.6 \times 10^{-6} \text{ s}.$$

(4) 粒子垂直边界射入，轨迹为半圆，圆心在入射点正前方 $r = 0.18 \text{ m}$ 处，半圆沿入射方向延伸的最远点距入射边界为 $2r = 0.36 \text{ m}$ 。磁场宽度 $0.4 \text{ m} > 0.36 \text{ m}$ ，粒子转半圈后从原边界穿出，到不了另一侧；只有宽度 $d < 2r = 0.36 \text{ m}$ 时，粒子才会在转半圈之前撞到另一侧边界而穿出。

答：(1) 约 $4.4 \times 10^5 \text{ m/s}$ ；(2) 约 0.18 m ；(3) 约 $2.6 \times 10^{-6} \text{ s}$ ；(4) 不能 ($2r = 0.36 \text{ m} < 0.4 \text{ m}$ ，粒子转半圈回到原侧)。

易错点： α 粒子 $q = 2e$ 、 m 是质子 4 倍——两处都要对应，漏掉任一都会错；“能否穿出”判断标准是“圆弧能到达的最大边界距离”与区域宽度比较，而不是用 r 直接比。

S2 解析（竖直面叠加场综合）

思路： $qE = mg$ 抵消 $\rightarrow$ 只受洛伦兹力 $\rightarrow$ 匀速圆周；半周期回到同一水平线；撤电场后重力显现。

规范解：

(1) 重力与电场力等大反向抵消，小球只受洛伦兹力（恒垂直速度），做匀速圆周运动。

(2) $r = mv_0/qB$ ， $T = 2\pi m/qB$ 。

(3) 半个周期后小球位于圆的另一端（直径端点）：水平位移 $2r = 2mv_0/qB$ ，竖直位移 0。

(4) 撤去电场后重力不再被抵消，小球受重力与洛伦兹力：重力做功使速率变化，洛伦兹力只转弯不做功——轨迹变为复杂曲线；用动能定理求速率变化，用“洛伦兹力不做功”排除干扰。

答：(1) 匀速圆周运动；(2) $r = mv_0/qB$ 、 $T = 2\pi m/qB$ ；(3) 水平位移 $2mv_0/qB$ ，竖直位移 0；(4) 复杂曲线运动，重力使速率改变、洛伦兹力只改变方向。

易错点：半周期“回到同一水平线”不是“回到出发点”；撤去电场后的运动不能再用“匀速圆周”描述——只有 $qE = mg$ 时刻保持，圆周才成立。

0.42 磁铁插线圈

例题 12.1 解析

思考路径：

- 读题：求磁通量，线圈平面垂直于磁场 $\rightarrow \Phi = BS$ 直接用；
- 转过 90° 后磁场平行于线圈平面 $\rightarrow$ 磁感线“穿”不过去， $\Phi = 0$ ；
- 预期检查： $\Phi = 0.5 \times 0.02 = 0.01 \text{ Wb}$ ，量级 10^{-2} Wb 合理（ $B 10^0$ 、 $S 10^{-2}$ ）。

规范解： $\Phi = BS = 0.5 \times 0.02 = 0.01 \text{ Wb}$ 。

转过 90° 后，磁场与线圈平面平行，穿过线圈的磁感线根数为零， $\Phi = 0$ 。

答：初始磁通量 0.01 Wb ，转过 90° 后为 0。

易错点：“ $\Phi = 0$ ”不等于“磁场为零”——磁场还在，只是不穿过线圈； Φ 是“穿过”的量，与场强大小是两回事。

A1 解析

思路：垂直时 $\Phi = BS$ ；成 60° 角时取垂直分量——磁场在法线方向的投影为 $B \sin 60^\circ$ （ 60° 是磁场与平面的夹角）。

规范解：

(1) $\Phi = BS = 0.4 \times 0.1 = 0.04 \text{ Wb}$ 。

(2) 磁场方向与线圈平面成 60° 角，穿过平面的有效分量为 $B \sin 60^\circ$ ：

$$\Phi = BS \sin 60^\circ = 0.4 \times 0.1 \times (\sqrt{3}/2) \approx 0.035 \text{ Wb}。$$

答：(1) 0.04 Wb ；(2) 约 0.035 Wb 。

易错点： 60° 是磁场与“平面”的夹角，取的应是垂直“法线”的分量—— $\Phi = BS \sin 60^\circ$ （不是 $\cos 60^\circ$ ）；若题目给的是与法线的夹角 θ ，则用 $\Phi = BS \cos \theta$ 。看清楚“与平面成角”还是“与法线成角”。

A2 解析

思路：磁通量变化量 = 末态 - 初态（含正负号，这里只需大小）。

规范解：初态 $\Phi_1 = BS = 0.3 \times 0.2 = 0.06 \text{ Wb}$ ；转过 90° 后 $\Phi_2 = 0$ 。

$$\Delta\Phi = \Phi_2 - \Phi_1 = -0.06 \text{ Wb}，\text{变化量大小为 } 0.06 \text{ Wb}。$$

答：磁通量变化量大小为 0.06 Wb 。

易错点：转过 90° 后 Φ 变为 0 而不是变号——只有转过 180° （反向穿入）才会变号；“转 90° 磁通量减半”是错误直觉，转 90° 时正余弦要从垂直状态起算。

A6 解析

思路：面积均匀减小到零，磁通量变化量 = 末态 - 初态。

规范解： $\Phi_1 = BS_1 = 0.5 \times 0.1 = 0.05 \text{ Wb}$ ； $\Phi_2 = 0$ 。

$$\Delta\Phi = 0 - 0.05 = -0.05 \text{ Wb}，\text{变化量大小为 } 0.05 \text{ Wb}。$$

答：磁通量变化量大小为 0.05 Wb 。

易错点： $\Delta\Phi$ 只与初末状态有关，与“变化过程是否均匀”无关——只要 S 从 0.1 m^2 减到 0， $\Delta\Phi$ 就是 0.05 Wb 。

A5 解析

思路：磁通量正负只表示穿入方向，题目规定穿入为正、穿出为负。

规范解：磁感线从纸面穿出方向（即从线圈反面穿入）， $\Phi = -BS = -0.5 \times 0.04 = -0.02 \text{ Wb}$ 。

答： $\Phi = -0.02 \text{ Wb}$ （负号表示穿出方向）。

易错点：负号是方向标记不是大小变负—— $\Phi = -0.02 \text{ Wb}$ 的“绝对值”仍是 0.02 Wb ；转过 180° 前后 $\Delta\Phi = 2BS = 0.04 \text{ Wb}$ （从 $+0.02$ 到 -0.02 ）。

0.43 磁通量

例题 12.2 解析

思考路径：

- 判断有没有感应电流，判据只有一条：闭合回路 Φ 变不变；
- 逐项分析四种情形：静止强磁场（ Φ 大但不变）、沿磁场平动（ Φ 不变）、绕垂直轴转动（ Φ 周期性变化）、磁铁插入（ Φ 增大）。

规范解：

(1) 无。线圈静止在匀强磁场中， $\Phi = BS$ 恒定不变。

(2) 无。沿磁场方向平动，线圈平面与磁场的相对方位不变、所围面积内的磁感线根数不变。

(3) 有。转动使线圈平面的有效面积（投影面积）周期变化， Φ 不断变化。

(4) 有。磁铁快速插入使穿过线圈的磁通量快速增大。

答：(1) 无；(2) 无；(3) 有；(4) 有。

易错点：第 (2) 情形最骗人——“在磁场中运动”不等于“磁通量变化”；沿磁场方向平动 Φ 不变。判据永远问： Φ 变了吗？

A3 解析

思路：同例题 12.2，逐项问“ Φ 变了吗”。

规范解：

(1) 无。垂直磁场方向整体平动，穿过线圈平面的磁感线根数不变（线圈整体平移，磁场是匀强的）。

(2) 有。绕垂直于磁场的直径转动，投影面积周期性变化。

(3) 无。电流恒定 $\rightarrow$ 周围磁场恒定 $\rightarrow$ 穿过线圈的 Φ 不变。

(4) 有。电流突然增大 $\rightarrow$ 磁场增强 $\rightarrow \Phi$ 增大。

答：(1) 无；(2) 有；(3) 无；(4) 有。

易错点：第 (1) 问平动方向是“垂直磁场”，虽然线圈在“动”，但 Φ 不变——动的是线圈的位置，不是磁感线的根数；第 (3) (4) 是“电磁感应在生活中的原型”：导线电流变化就能让附近线圈产生感应。

A4 解析

思路：感应电流的判据是“ Φ 变化”，不是“ Φ 大”。

规范解：不对。

反例 (Φ 大但无感应电流)：线圈静止在强匀强磁场中， Φ 很大但不变，无感应电流。

正例 (Φ 小但有感应电流)：小线圈放在磁铁旁边，磁铁快速插拔， Φ 从很小快速变化，感应电流明显。

答：说法错误；判据是 Φ 是否变化及变化快慢。

易错点：把“磁通量大小”与“磁通量变化”混为一谈——这是本章最大的概念陷阱，几乎每年都有人在这里丢分。

A7 解析

思路： $\Phi = BS \cos\theta$ ，动其中任何一个因子 (B 、 S 、 θ) 都能让 Φ 变。

规范解：

- (1) 只变 B ：磁铁靠近/远离线圈，或改变通电螺线管电流；
- (2) 只变 S ：把圆形线圈拉扁（面积变小）或扩大；
- (3) 只变夹角：在线圈平面内转动线圈（不改变 B 和 S ）；
- (4) 只变磁场方向：保持线圈不动，让磁场绕线圈旋转（如转动磁铁方向）。

答：见上（合理设计均可）。

易错点：四种方式本质是“动 B 、动 S 、动 θ ”三因子之一——设计时要确保只动一个因子、其他两个不变，才算是“只改变某一种”。

A8 解析

思路：矩形线圈平放、 B 竖直向下穿过平面；逐项判断 Φ 变化。

规范解：

- (1) 沿桌面水平移动：线圈整体平移， B 、 S 、 θ 均不变， Φ 不变，无感应电流。
- (2) 绕水平边翻转：线圈平面与竖直磁场的夹角变化，有效面积变化， Φ 变化，有感应电流。
- (3) B 均匀增大： $\Phi = BS$ 增大，有感应电流。
- (4) 绕竖直轴（过中心）转动：线圈平面始终水平， B 竖直向下， θ 不变、 S 不变、 B 不变， Φ 不变，无感应电流。

答：(2) (3) 有感应电流，(1) (4) 没有。

易错点：绕竖直轴转动时线圈平面方向没变（仍水平），磁场仍垂直穿过， Φ 不变——很多同学看到“转动”就以为有感应，其实要看转轴方向：绕竖直轴转是“原地打转”，不改变穿过平面磁感线的根数。

0.44 感应电流的条件

B1 解析 (2022 · 上海卷)

思路：磁通量只算磁场区域（半径 r 的圆）内的面积； B 增大 $\rightarrow$ 磁通量增大 $\rightarrow$ 感应电流阻碍增大；磁场方向变 $180^\circ \rightarrow$ 磁通量从 $+B\pi r^2$ 变为 $-B\pi r^2$ 。

规范解：磁场垂直纸面向里， B 增大时 Φ 增大，感应电流的磁场应垂直纸面向外（阻碍增大），由右手螺旋定则知感应电流为逆时针方向（俯视）。

磁场方向变化 180° ： $\Delta\Phi = B\pi r^2 - (-B\pi r^2) = 2B\pi r^2$ 。

答：逆时针； $2B\pi r^2$ 。

易错点：磁通量变化用“半径 r 的磁场区域面积” πr^2 ，不是金属圆环面积 πR^2 ——磁场只存在于内圈；方向变化 180° 是“由正变负”，变化量是 2 倍不是 0。

B2 解析 (2023 · 海南卷)

思路：地下线圈通顺时针（俯视）电流 $\rightarrow$ 磁场竖直向下；汽车线圈经过时磁通量增/减，用楞次定律判断方向，安培力阻碍相对运动。

规范解：由右手螺旋定则，地下线圈 1、2 通顺时针（俯视）电流产生的磁场方向竖直向下。

A 错：磁场竖直向下，不是向上。

B 错：汽车进入线圈 1 时，汽车线圈内向下的磁通量增大 $\rightarrow$ 感应电流磁场向上 $\rightarrow$ 感应电流方向为 $adcb$ （俯视逆时针），不是 $abcd$ 。

C 对：汽车离开线圈 1 时，向下的磁通量减小 $\rightarrow$ 感应电流磁场向下（增反减同） $\rightarrow$ 感应电流方向为 $abcd$ （俯视顺时针）。

D 错：汽车进入线圈 2 时磁通量增大，感应电流磁场向上，由左手定则知安培力方向与速度方向相反（阻碍相对运动）。

选 C。

易错点：进入与离开的感应电流方向相反（增反减同）；安培力总是阻碍相对运动（来拒去留）——“进入时被推、离开时被拽”，方向都与速度相反。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (无线充电)

思路：无线充电的核心是“发射线圈的电流在变化 $\rightarrow$ 接收线圈的磁通量在变化 $\rightarrow$ 感应电流”。

规范解：

(1) 发射线圈通的是交变电流，电流大小和方向不断变化，它在接收线圈处产生的磁场随之变化，因此接收线圈内的磁通量不恒定。磁通量变化 $\rightarrow$ 产生感应电流 $\rightarrow$ 给电池充电。

(2) 手机离开发射线圈越远，接收线圈处的磁感应强度越小，同样时间内磁通量的变化量越小（磁通量变化率 $\Delta\Phi/\Delta t$ 越小），感应电流越弱，充电越慢。

(3) 不能。恒定电流产生恒定磁场，接收线圈磁通量不变，无感应电流，充不上电——这

正是“变化才有感应”的直接体现。

答：见上。

易错点：无线充电的关键词是“交变电流”而不是“通电”——恒定电流永远充不了电；距离越远磁通量变化率越小，是“无线充电要贴近放”的物理原因。

C2 解析（磁悬浮列车的进站制动）

思路：列车金属板掠过磁铁上方，磁铁磁场扫过金属板，板内磁通量不断变化 → 涡流 → 安培力阻碍相对运动。

规范解：

(1) 列车高速运动，金属板相对磁铁的位置不断变化，穿过金属板的磁通量持续变化（磁铁下方磁场强、远离后变弱），板内产生感应电流（涡流）。

(2) 感应电流在磁场中受安培力，安培力方向阻碍相对运动（来拒去留），使列车减速——体现楞次定律（能量守恒）。

(3) 速度越大，磁通量变化越快（ $\Delta\Phi/\Delta t$ 越大），感应电流越大，安培力越大，减速效果越强。

答：见上。

易错点：涡流也遵守“变化才有感应”——列车静止停在磁铁上方时没有感应电流、没有阻尼；速度越大阻尼越强，这是电磁制动的“自动调节”特性。

本章综合 · S 层

S1 解析（来拒去留与磁通量）

思路：N 极朝下 → 磁感线向下穿入线圈；靠近时向下磁通量增大 → 感应电流磁场向上 → 同名磁极相斥。

规范解：

(1) 磁铁 N 极朝下向下靠近，向下穿过线圈的磁通量增大。

(2) 增反减同：感应电流的磁场方向向上。向上的感应磁场对 N 极来说相当于上方出现“N 极”（磁场方向一致），与磁铁 N 极相互排斥——线圈远离磁铁。

(3) 需要用力压。感应电流的能量来自推动磁铁做的功；如果毫不费力，能量无中生有，违背能量守恒。向下压的过程正是外力做功把能量“存”进线圈的过程。

答：(1) 增大；(2) 感应磁场向上，排斥；(3) 需要用力压，能量来自外力做功。

易错点：“来拒去留”不是玄学——插入时排斥、拔出时吸引，都是阻碍磁通量变化，能量守恒是它背后的铁律。

S2 解析（磁通量变化与感应电动势预告）

思路： $\Phi_1 = BS$ 、 $\Phi_2 = 0$ ；平均变化率 = $\Delta\Phi/\Delta t$ ；再按 $E = n\Delta\Phi/\Delta t$ 预估电动势。

规范解：

(1) $\Phi_1 = BS = 0.4 \times 0.2^2 = 0.4 \times 0.04 = 0.016 \text{ Wb}$ ；拉出后 $\Phi_2 = 0$ 。 $\Delta\Phi = 0 - 0.016 = -0.016$

Wb, 大小 0.016 Wb。

(2) 平均变化率 $|\Delta\Phi/\Delta t| = 0.016 / 0.2 = 0.08 \text{ Wb/s}$ 。

(3) 按法拉第定律预估 $E = n \cdot |\Delta\Phi/\Delta t| = 100 \times 0.08 = 8 \text{ V}$ 。

答: (1) 0.016 Wb $\rightarrow$ 0, 变化量 0.016 Wb; (2) 0.08 Wb/s; (3) 约 8 V。

易错点: 电动势是“变化率”不是“变化量”——0.016 Wb 是变化量, 除以时间才是变化率 0.08 Wb/s, 再乘匝数 100 得 8 V; 匝数放大了 100 倍, 这是变压器能“升压”的伏笔。

0.45 法拉第定律

例题 13.1 解析

思考路径:

- 读题: B 均匀增大 $\rightarrow \Delta B/\Delta t$ 恒定 $\rightarrow$ 电动势恒定;
- $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S = 0.4 \times 0.02 = 0.008 \text{ Wb}$;
- $E = n\Delta\Phi/\Delta t = 100 \times 0.008/0.1 = 8 \text{ V}$; $I = E/R = 8/4 = 2 \text{ A}$;
- 预期检查: $n \times \Delta B \times S/\Delta t = 100 \times 0.4 \times 0.02/0.1 = 8 \text{ V}$, 量级合理。

规范解: $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S = (0.6 - 0.2) \times 0.02 = 0.008 \text{ Wb}$ 。

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100 \times \frac{0.008}{0.1} = 8 \text{ V}; I = \frac{E}{R} = \frac{8}{4} = 2 \text{ A}。$$

答: 感应电动势 8 V, 感应电流 2 A。

易错点: B 均匀变化时 E、I 恒定; 若 B 变化越来越快, E 越来越大——“看变化率”是法拉第定律的灵魂。

A1 解析

思路: $E = nS\Delta B/\Delta t$, $\Delta B = 0.5 - 0.1 = 0.4 \text{ T}$ 。

规范解: $E = nS \frac{\Delta B}{\Delta t} = 200 \times 0.01 \times \frac{0.4}{0.05} = 200 \times 0.01 \times 8 = 16 \text{ V}。$

答: 感应电动势 16 V。

易错点: $\Delta B = 0.4 \text{ T}$ (末减初), 别写成 0.5 或 0.1; Δt 用 0.05 s 不是“总时间”之外的其他值。

A4 解析

思路: 比较电动势看变化率 $\Delta\Phi/\Delta t$, 不是看变化量。

规范解: 第一个: $\Delta\Phi/\Delta t = 0.02/0.1 = 0.2 \text{ Wb/s}$;

第二个: $\Delta\Phi/\Delta t = 0.04/0.2 = 0.2 \text{ Wb/s}$ 。

两个变化率相同，匝数相同 $\rightarrow$ 感应电动势相同。

答：一样大（变化率都是 0.2 Wb/s ）。

易错点：第二个磁通量变化量是第一个的 2 倍，但时间也是 2 倍，变化率相同——“电动势看变化率”的典型检验。

A6 解析

思路： $B-t$ 图斜率 $= \Delta B/\Delta t$ ， $E = nS \cdot (\Delta B/\Delta t)$ 。

规范解： $E = nS \cdot (\Delta B/\Delta t) = 50 \times 0.1 \times 2 = 10 \text{ V}$ 。

答：感应电动势 10 V 。

易错点：斜率不变 $\rightarrow$ 电动势恒定；如果 $B-t$ 图是曲线，斜率时刻在变，电动势就不是常数——图像题先看斜率。

A8 解析

思路： $E = n \cdot (\Delta \Phi/\Delta t)$ 直接给变化率， $I = E/R$ 。

规范解： $E = n \cdot (\Delta \Phi/\Delta t) = 100 \times 0.05 = 5 \text{ V}$ ； $I = E/R = 5/10 = 0.5 \text{ A}$ 。

答：感应电动势 5 V ，感应电流 0.5 A 。

易错点：题目直接给 $\Delta \Phi/\Delta t = 0.05 \text{ Wb/s}$ ，乘匝数即得电动势，不用再“除以时间”。

0.46 楞次定律

例题 13.2 解析

思考路径：

- N 极向下插入：磁感线向下穿过线圈， Φ 向下增大；
- 增反减同：感应电流的磁场向上（反抗增大）；
- 由感应磁场方向反推电流方向：右手螺旋定则，拇指指向上（磁场方向），四指弯曲方向即电流方向。

规范解：N 极向下插入，线圈内 Φ 向下增大；由“增反减同”，感应电流的磁场方向向上；右手螺旋定则（拇指向上），四指弯曲方向为电流方向，从上往下看感应电流逆时针。拔出时方向相反（顺时针）。

答：N 极向下插入时，从上往下看感应电流逆时针。

易错点：判断口诀只有一条“增反减同”，但“插和拔、N 和 S”四种组合四种方向——先定原磁场方向与增减，再定感应磁场方向，最后右手螺旋定则反推电流。

A2 解析

思路：S 极向下插入 → 磁感线向上穿入线圈 → Φ 向上增大 → 增反减同。

规范解：S 极向下，磁感线向上穿过线圈， Φ 向上增大；增反减同 → 感应电流的磁场方向向下；右手螺旋定则（拇指指向下），四指弯曲方向为电流方向，从上往下看感应电流顺时针。

答：从上往下看顺时针。

易错点：S 极向下磁场向上（不是向下）——先画磁感线方向再判断增减，别被“S 极”带偏。

A3 解析

思路：拔出时向下磁通量减小 → 增反减同 → 感应磁场向下。

规范解：N 极向下拔出，向下穿过的 Φ 减小；增反减同 → 感应电流的磁场方向向下（与原磁场同向）；右手螺旋定则 → 从上往下看感应电流顺时针。插入时（见例题 13.2）为逆时针，方向相反。

答：拔出时顺时针，与插入时方向相反。

易错点：“插和拔方向相反”是电磁感应的标志性现象——但判断依据仍是增反减同，不是死记“插逆拔顺”。

A7 解析

思路：来拒去留——磁铁进入时被“拒”，离开时被“留”。

规范解：磁铁进入线圈阶段，线圈感应电流的磁场阻碍磁铁靠近 → 对磁铁产生向上的排斥力（推拒）；离开线圈阶段，阻碍磁铁远离 → 对磁铁产生向上的吸引力（挽留）。两个阶段都阻碍磁铁下落，全程速度比自由落体慢。

答：进入时推拒、离开时挽留，全程减速、比自由落体慢。

易错点：离开阶段的“挽留”也是阻碍（阻碍远离），方向仍向上——不是变成向下的力；“来拒去留”四个字要整体理解：任何阶段都在阻碍相对运动。

0.47 互感与自感

A5 解析

思路：电量通式 $q = n\Delta\Phi/R$ ，与时间无关。

规范解： $\Delta\Phi = B \cdot S = 0.5 \times 0.02 = 0.01 \text{ Wb}$ 。

$$q = \frac{n\Delta\Phi}{R} = \frac{100 \times 0.01}{5} = 0.2 \text{ C}。$$

时间缩短一半：电动势加倍、电流加倍，但 $q = n\Delta\Phi/R$ 不含 Δt ，电荷量不变，仍为 0.2 C。

答：电荷量 0.2 C；时间缩短一半后电荷量不变。

易错点：q 只由 $\Delta\Phi$ 决定，与快慢无关——插得快电流大、热功率大，但流过的总电荷量相同。这是滑轨题“求电量”的直接依据。

0.48 感应图像与电量通式

例题 13.3 解析

思考路径：

- B 均匀减小 $\rightarrow$ E 恒定； $\Delta B = 0.3 \text{ T}$ ， $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S = 0.3 \times 0.04 = 0.012 \text{ Wb}$ ；
- $E = n\Delta\Phi/\Delta t = 50 \times 0.012/0.2 = 3 \text{ V}$ ； $I = E/R = 1 \text{ A}$ ；
- $q = n\Delta\Phi/R = 50 \times 0.012/3 = 0.2 \text{ C}$ ——电荷量看“变化量”不看“快慢”。

规范解： $\Delta\Phi = 0.3 \times 0.04 = 0.012 \text{ Wb}$ ；

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 50 \times \frac{0.012}{0.2} = 3 \text{ V}；$$

$$I = \frac{E}{R} = \frac{3}{3} = 1 \text{ A}；$$

$$q = \frac{n\Delta\Phi}{R} = \frac{50 \times 0.012}{3} = 0.2 \text{ C}。$$

答：电动势 3 V、电流 1 A、电荷量 0.2 C。

易错点：若变化时间减半，E、I 加倍但 q 不变——“q 与快慢无关”是电磁感应计算题的高频考点。

B 层·真题研习

B1 解析（2024·江苏卷）

思路：线圈 a 拉出磁场 $\rightarrow$ a 内磁通量减小 $\rightarrow$ 判 a 的感应电流方向；a 中电流恒定，靠近 b 时使 b 内磁通量增大 $\rightarrow$ 判 b 的方向。

规范解：设线圈 a 中原磁场垂直纸面向里，拉出时 a 内磁通量减小，由楞次定律，a 中感应电流磁场向里（阻碍减小），a 中电流顺时针；a 中为恒定电流，靠近 b 过程中 b 内向里（相对 a 中感应电流的磁场方向）的磁通量增大，b 中感应电流磁场向外，b 中电流顺时针。

选 A（顺时针，顺时针）。

易错点：b 线圈的“原磁场”来自 a 中感应电流的磁场——先定 a 的电流，再把它作为 b 的磁场源；“匀速拉出”保证 a 中电流恒定，b 中磁通量匀速增大。

B2 解析（2024·北京卷）

思路：互感——M 中电流变化 $\rightarrow$ 铁芯中磁通量变化 $\rightarrow$ P 中产生感应电流；稳定后铁芯中磁通量不变。

规范解：A 错：闭合开关瞬间，M 在铁芯右端产生向右磁场，P 中向右磁通量增大 $\rightarrow$ P 中感

应电流磁场向左 → P 右端磁场方向与 M 相反，两线圈相互排斥。

B 对：闭合稳定后，铁芯中磁通量恒定，P 中无感应电流，电流表示数为 0。

C 错：断开瞬间，M 磁场向右减小 → P 中感应电流磁场向右（阻碍减小）→ 流过电流表方向由 b 到 a。

D 错：断开瞬间 P 中感应电流磁场向右，不是向左。

选 B。

易错点：互感的两线圈“通同相斥、断同相吸”——闭合瞬间排斥、断开瞬间吸引；稳定后 P 无感应电流，电流表读数必为 0（这是最直白的正确选项）。

B3 解析（2024·新课标卷）

思路：磁通量最大的瞬间转 90° 后磁通量变为 0 → 磁通量在减小且变化率最大 → 电流最大、方向由楞次定律判。

规范解：初始瞬间磁场垂直线圈平面，磁通量最大（“中性面”位置）；磁极再转 90° ，线圈平面与磁场平行，磁通量减为 0——磁通量从最大变到 0，变化率最大，感应电流最大（A 错 B 对）。磁通量减小，由楞次定律，感应电流的磁场阻碍减小，感应电流方向由 Q 指向 P（C 错 D 对）。

选 BD。

易错点：磁通量最大处感应电流反而最小（变化率为 0），磁通量为 0 处感应电流最大——“感应电流看变化率不看磁通量”又一次验证；本题把“磁通量最大瞬间”作为初始条件，转 90° 后磁通量恰为 0。

C 层·创新拓展

C1 解析（无线充电定量）

思路： $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S$ ， $E = n\Delta\Phi/\Delta t$ ， $I = E/R$ ， $q = n\Delta\Phi/R$ ；充电电流与磁通量变化率成正比。

规范解：

$$(1) \Delta B = 6 \times 10^{-3} - 2 \times 10^{-3} = 4 \times 10^{-3} \text{ T}; \Delta\Phi = 4 \times 10^{-3} \times 8 \times 10^{-4} = 3.2 \times 10^{-6} \text{ Wb}.$$

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 50 \times \frac{3.2 \times 10^{-6}}{1 \times 10^{-3}} = 0.16 \text{ V};$$

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0.16}{0.4} = 0.4 \text{ A}.$$

$$(2) q = \frac{n\Delta\Phi}{R} = \frac{50 \times 3.2 \times 10^{-6}}{0.4} = 4 \times 10^{-4} \text{ C} = 0.4 \text{ mC}.$$

(3) 磁通量变化率减半 → E、I 都减半，充电电流变为 0.2 A。所以手机要“放准”在充电垫中央：边缘处磁场弱、磁通量变化率小，充电电流成比例减小。

答：(1) 0.16 V、0.4 A；(2) 0.4 mC；(3) 0.2 A。

易错点：磁通量变化率减半时，E 和 I 成比例减半（ $E = n\Delta\Phi/\Delta t$ 中 Δt 不变则 $\Delta\Phi$ 减半）；无线充电“对准”的物理本质就是维持最大的磁通量变化率。

C2 解析（电磁炉定量）

思路：锅底等效单匝， $E = \Delta\Phi/\Delta t = BS/\Delta t$ ， $I = E/R$ ，平均热功率 $P = I^2R$ 。

规范解：

$$(1) \Delta\Phi = B \cdot S = 5 \times 10^{-3} \times 0.03 = 1.5 \times 10^{-4} \text{ Wb}。$$

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{1.5 \times 10^{-4}}{1 \times 10^{-4}} = 1.5 \text{ V}；$$

$$I = \frac{E}{R} = \frac{1.5}{2 \times 10^{-3}} = 750 \text{ A}。$$

$$(2) P = I^2R = 750^2 \times 2 \times 10^{-3} = 5.6 \times 10^5 \times 2 \times 10^{-3} \approx 1.1 \times 10^3 \text{ W} = 1.1 \text{ kW}。$$

(3) 不能。玻璃是绝缘体，不导电，交变磁场无法在其中“搅”出涡流，没有感应电流也就没有焦耳热——电磁炉只对铁、钢等导体锅底有效。

答：(1) 1.5 V、750 A；(2) 约 1.1 kW；(3) 不能，绝缘体无涡流。

易错点：涡流电流非常大（百安级）但等效电阻极小，热功率 $P = I^2R$ 稳定在千瓦级——电磁炉“锅热炉不热”的秘密是热量直接产在锅底；等效单匝是简化模型，涡流实际是旋涡状的。

本章综合 · S 层

S1 解析 (B-t 图像综合)

思路：B-t 图各段斜率 $\rightarrow E = nS \cdot (\Delta B/\Delta t)$ ；方向用增反减同；总电荷量 $q = n\Delta\Phi_{\text{总}}/R$ （只看总变化量）。

规范解：

$$(1) 0 \sim 2 \text{ s}：\Delta B/\Delta t = 0.4/2 = 0.2 \text{ T/s}, E_1 = 50 \times 0.05 \times 0.2 = 0.5 \text{ V}, I_1 = 0.5/10 = 0.05 \text{ A}；$$

$$2 \sim 4 \text{ s}：\Delta B/\Delta t = 0, E_2 = 0, I_2 = 0；$$

$$4 \sim 6 \text{ s}：\Delta B/\Delta t = -0.4/2 = -0.2 \text{ T/s}, E_3 = 0.5 \text{ V}, I_3 = 0.05 \text{ A}。$$

(2) 0 ~ 2 s 磁通量增大、4 ~ 6 s 磁通量减小——增反减同，两阶段感应电流方向相反。

(3) 全程 $\Delta\Phi_{\text{总}} = 0$ (B 从 0 到 0.4 再回到 0)， $q = n\Delta\Phi_{\text{总}}/R = 0$ 。但注意：这是“总电荷量”（正负抵消）；若问各阶段，0 ~ 2 s 与 4 ~ 6 s 各流过的电荷量为 $q_1 = n \cdot \Delta\Phi/R = 50 \times 0.02/10 = 0.1 \text{ C}$ ，方向相反。

答：(1) 0.5 V、0.05 A；0、0；0.5 V、0.05 A；(2) 方向相反；(3) 全程净电荷量 0，各阶段 0.1 C（反向）。

易错点：总电荷量看“初末磁通量之差”——B 回到初始值，净电荷量为零；但各阶段电荷量按各自 $\Delta\Phi$ 计算，方向相反，别混成“全程 0.2 C”。

S2 解析 (法拉第 + 楞次综合)

思路： $\Delta\Phi = B \cdot S$ ， $E = n\Delta\Phi/\Delta t$ ， $q = n\Delta\Phi/R$ ；方向用增反减同；“越来越快”对应变化率增大。

规范解：

$$(1) \Delta\Phi = B \cdot S = 0.6 \times 0.04 = 0.024 \text{ Wb}。$$

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100 \times \frac{0.024}{0.2} = 12 \text{ V}；$$

$$I = \frac{E}{R} = \frac{12}{8} = 1.5 \text{ A};$$

$$q = \frac{n\Delta\Phi}{R} = \frac{100 \times 0.024}{8} = 0.3 \text{ C}。$$

(2) B 垂直纸面向里且减小，磁通量减小 → 增反减同，感应电流磁场向里 → 右手螺旋定则，从上往下看感应电流顺时针。

(3) “越来越快地减小”说明 $|\Delta B/\Delta t|$ 在增大，磁通量变化率增大 → 感应电动势、感应电流都越来越大（方向不变）。

答：(1) 12 V、1.5 A、0.3 C；(2) 顺时针；(3) 感应电流越来越大。

易错点：方向判断必须先定“原磁场方向 + 增减”再定感应磁场方向——本题 B 向里减小，感应磁场也向里（同向），顺时针；“越来越快”时 q 仍由 $\Delta\Phi$ 总决定，但电流大小随时间增大。

0.49 动生电动势

例题 14.1 解析

思考路径：

- 读题：棒垂直切割磁场 → $E = BLv$ 直接用；
- $I = E/R$, $F_A = BIL$ ——三量连成一条链；
- 预期检查： $F_A = BIL = B^2 L^2 v/R = 0.04 \times 2 / 0.2 = 0.4 \text{ N}$ （L 在 E 和 F_A 中各出现一次，勿漏），与直接计算吻合。

规范解： $E = BLv = 0.4 \times 0.5 \times 2 = 0.4 \text{ V}$ 。

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0.4}{0.2} = 2 \text{ A}。$$

$F_A = BIL = 0.4 \times 2 \times 0.5 = 0.4 \text{ N}$ ，方向与运动方向相反（阻碍切割）。

答： $E = 0.4 \text{ V}$ 、 $I = 2 \text{ A}$ 、安培力 0.4 N （阻碍运动）。

易错点： $F_A = BIL = B^2 L^2 v/R$ ——用公式时 L 在 BIL 和 $E = BLv$ 里都要出现，漏乘一个 L 会让答案差一个量级；安培力方向永远阻碍相对运动（楞次定律的能量视角）。

A1 解析

思路：棒垂直切割， $E = BLv$ 直接代入。

规范解： $E = BLv = 0.5 \times 0.4 \times 3 = 0.6 \text{ V}$ 。

答：感应电动势 0.6 V 。

易错点：确认 v 与 B 垂直——若不垂直取垂直分量；本题垂直，直接相乘。

A2 解析

思路： $E = BLv \rightarrow I = E/R \rightarrow F_A = BIL$ ，三量链条。

规范解： $E = BLv = 0.8 \times 1 \times 2 = 1.6 \text{ V}$ 。

$$I = \frac{E}{R} = \frac{1.6}{0.4} = 4 \text{ A}。$$

$F_A = BIL = 0.8 \times 4 \times 1 = 3.2 \text{ N}$ ，方向与运动方向相反。

答： $E = 1.6 \text{ V}$ 、 $I = 4 \text{ A}$ 、 $F_A = 3.2 \text{ N}$ 。

易错点：安培力方向与棒运动方向相反——这是楞次定律“阻碍变化”在动力学上的体现，也是后面受力分析的前提。

A3 解析

思路： $E = BLv \rightarrow I = BLv/R \rightarrow F_A = B^2 L^2 v/R$ ， v 在 F_A 里是平方。

规范解：速度加倍 $\rightarrow E$ 变 2 倍 $\rightarrow I$ 变 2 倍 $\rightarrow F_A = BIL$ 变 4 倍。

答： E 、 I 各变 2 倍， F_A 变 4 倍。

易错点： F_A 与 v 成正比是在 I 已含 v 的前提下再乘一次—— v 在 F_A 公式里以平方出现 ($F_A = B^2 L^2 v/R$)，这是“速度越快刹车越猛”的原因。

0.50 恒力滑轨

例题 14.2 解析

思考路径：

- (1) 终极速度：安培力 = 恒力时匀速， $v_{\max} = FR/B^2 L^2 = 2 \times 0.5/1 = 1 \text{ m/s}$ ；
- (2) 速度 0.5 时： $F_A = B^2 L^2 v/R = 1 \times 0.5/0.5 = 1 \text{ N}$ ， $a = (F - F_A)/m = 1/0.5 = 2 \text{ m/s}^2$ ；
- (3) 焦耳热：能量守恒——恒力做功 20 J，末动能 $\frac{1}{2}mv^2 = 0.25 \text{ J}$ ，其余全变热。

规范解：

$$(1) v_{\max} = \frac{FR}{B^2 L^2} = \frac{2 \times 0.5}{1^2 \times 1^2} = 1 \text{ m/s}。$$

$$(2) v = 0.5 \text{ 时 } F_A = \frac{B^2 L^2 v}{R} = \frac{1 \times 0.5}{0.5} = 1 \text{ N}, a = \frac{F - F_A}{m} = \frac{2 - 1}{0.5} = 2 \text{ m/s}^2。$$

$$(3) Q = Fx - \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = 2 \times 10 - \frac{1}{2} \times 0.5 \times 1 = 20 - 0.25 = 19.75 \text{ J}。$$

答：终极速度 1 m/s； $v = 0.5 \text{ m/s}$ 时加速度 2 m/s^2 ；焦耳热 19.75 J。

易错点：这道题 20 J 的功只有 0.25 J 变成动能 (1.25%)，其余 98.75% 全“烧”成热——滑轨题求热量永远问“功去哪了”，恒力功 - 末动能 = 焦耳热。

A4 解析

思路：终极速度由安培力 = 恒力决定： $v_{\max} = FR/B^2 L^2$ 。

规范解： $v_{\max} = \frac{FR}{B^2 L^2} = \frac{4 \times 0.5}{1^2 \times 0.5^2} = \frac{2}{0.25} = 8 \text{ m/s}$ 。

答：终极速度 8 m/s。

易错点：L 要平方 ($B^2 L^2$) —— L = 0.5 m 平方后是 0.25，漏平方会得到 2 m/s 的错误答案。

A5 解析

思路： $v_{\max} \propto 1/B^2$ ——B 加倍， $v_{\max}$ 变为原来的 1/4。

规范解：B 由 1 T 变为 2 T， $v_{\max} = FR/B^2 L^2 = 2 \times 0.5 / (4 \times 1) = 0.25 \text{ m/s}$ 。

答：终极速度变为 0.25 m/s (原来的 1/4)。

易错点： $v_{\max}$ 与 B 的平方成反比——磁场“加倍”，速度“四分之一”，不是“减半”。这是“磁场越强、刹车越狠”的定量表达。

A6 解析

思路：先求终极速度 $v_{\max} = FR/B^2 L^2$ ，再用能量守恒 $Q = Fx - \frac{1}{2}mv^2$ 。

规范解： $v_{\max} = \frac{FR}{B^2 L^2} = \frac{1 \times 0.5}{0.5^2 \times 1^2} = \frac{0.5}{0.25} = 2 \text{ m/s}$ 。

$Q = Fx - \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = 1 \times 4 - \frac{1}{2} \times 0.2 \times 4 = 4 - 0.4 = 3.6 \text{ J}$ 。

答：终极速度 2 m/s；焦耳热 3.6 J。

易错点：滑行 4 m 已达匀速，说明全过程末动能用 $v_{\max}$ 算 (2 m/s)，不是“滑到一半的速度”；恒力做功 4 J 里 0.4 J 变动能、3.6 J 变热。

A7 解析

思路：只有安培力，动量定理 $BLq = mv_0$ (安培力冲量 = BLq)；再用 $q = BLx/R$ 反推滑行距离。

规范解：由动量定理： $BL \cdot q = mv_0$ ，

$$q = \frac{mv_0}{BL} = \frac{0.5 \times 4}{0.5 \times 1} = 4 \text{ C}。$$

由 $q = \frac{\Delta\Phi}{R} = \frac{BLx}{R}$ 得 $x = \frac{qR}{BL} = \frac{4 \times 1}{0.5 \times 1} = 8 \text{ m}$ 。

答：通过棒的电量 4 C，滑行距离 8 m。

易错点：动量定理中安培力冲量 = BLq (不是 $BIL \cdot t$ ——I 在变，直接积分得到 BLq)；电量求出后再用 $q = BLx/R$ 求位移，两步缺一不可。

A8 解析

思路：匀速时合力为零：恒力 = 安培力 + 滑动摩擦力。

规范解：匀速时 $F = F_A + \mu mg = B^2 L^2 v / R + \mu mg$ 。

$$0.5^2 \times 1^2 \times v / 0.5 = 0.5v = 3 - 0.2 \times 0.4 \times 10 = 3 - 0.8 = 2.2, \quad v = 4.4 \text{ m/s}.$$

答：终极速度 4.4 m/s。

易错点：有摩擦时终极速度条件从“安培力 = 恒力”变为“安培力 + 摩擦 = 恒力”——摩擦力是常数，先减掉再算安培力对应的速度。

B 层 · 真题研习

B1 解析 (2024 · 全国甲卷)

思路：匀速时恒力等于安培力；外力功率 = 恒力 × 速度，电阻功率 = $I^2 R = B^2 L^2 v^2 / R$ ；列功率关系解 v 。

规范解：匀速时 $F = F_A = \frac{B^2 L^2 v_0}{R}$ 。

$$\text{速度为 } v \text{ 时：外力功率 } P_F = Fv = \frac{B^2 L^2 v_0}{R} \cdot v, \text{ 电阻功率 } P_R = I^2 R = \frac{B^2 L^2 v^2}{R}.$$

$$\text{由 } P_F = 2P_R: \frac{B^2 L^2 v_0 v}{R} = 2 \cdot \frac{B^2 L^2 v^2}{R}, \text{ 约去公因子得 } v_0 v = 2v^2, \quad v = v_0 / 2.$$

答： $v = v_0 / 2$ 。

易错点：外力功率用的是“恒力 × 当前速度”（ F 恒定， $P = Fv$ ）；电阻功率要用瞬时功率 $I^2 R$ ——两条功率曲线一个线性、一个平方，交点在 $v_0 / 2$ 。

B2 解析 (2023 · 江苏卷)

思路：OA 段在磁场中转动切割 → 产生动生电动势；AC 段在磁场外不切割 → 等势。

规范解：导体棒绕 O 逆时针转动，OA 段切割磁感线，由右手定则判断，O 点电势高于 A 点（ $\varphi_O > \varphi_A$ ）；AC 段不在磁场中、不切割磁感线，无电动势， $\varphi_C = \varphi_A$ 。因此 $\varphi_O > \varphi_C$ 且 $\varphi_O - \varphi_A > \varphi_A - \varphi_C = 0$ 。

选 A（ $\varphi_O > \varphi_C$ ）。

易错点：转动切割的电动势公式 $E = \frac{1}{2} B \omega L^2$ 只适用于“整段都在磁场中”的棒——AC 段不在磁场中，不产生电动势，所以 $\varphi_A = \varphi_C$ ；只比较电势大小即可，不必算具体数值。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (电磁弹射)

思路：安培力 $F = BIL \rightarrow$ 牛顿第二定律求加速度 $\rightarrow$ 匀加速 $v^2 = 2as$ ；起飞速度由磁场、电流、导轨长度共同决定。

规范解：

$$(1) \quad F = BIL = 0.5 \times 2 \times 10^5 \times 3 = 3 \times 10^5 \text{ N}.$$

$$(2) \quad a = \frac{F}{m} = \frac{3 \times 10^5}{2 \times 10^4} = 15 \text{ m/s}^2;$$

$$v = \sqrt{2as} = \sqrt{2 \times 15 \times 90} = \sqrt{2700} \approx 52 \text{ m/s} \approx 187 \text{ km/h}.$$

(3) 增大磁感应强度 B 、增大电流 I 、加长导轨 s 都能提高起飞速度；电流方向决定安培力方向（起飞方向），须保证受力指向舰首。

答：(1) $3 \times 10^5 \text{ N}$ ；(2) 约 52 m/s （约 187 km/h ）；(3) 见上。

易错点：电磁弹射是“大电流 $\times$ 强磁场”的大安培力，电流达 10^5 A 量级（这正是工程难点）；起飞速度只与 a 、 s 有关（ $v = \sqrt{2as}$ ），而 a 正比于 BIL/m ——“加磁场、加电流、加导轨”是三条提速路径。

C2 解析（摇绳发电）

思路：导线切割地磁场竖直分量产生动生电动势 $E = BLv$ ；摇得越快，切割速度越大。

规范解：

$$(1) E = BLv = 5 \times 10^{-5} \times 5 \times 2 = 5 \times 10^{-4} \text{ V} = 0.5 \text{ mV}.$$

(2) 摇动频率加快 $\rightarrow$ 切割速度 v 增大 $\rightarrow$ 感应电动势 $E = BLv$ 成比例增大。

(3) 电动势只有毫伏级、内阻又小，必须形成闭合回路让电流流过灵敏电流计才能观察到指针偏转——开路时电动势存在但测不出电流。

答：(1) 约 0.5 mV ；(2) E 增大（成正比）；(3) 需闭合回路。

易错点：地磁场很弱（ 10^{-5} T 量级），摇绳发电的电动势只有毫伏级——这正是“动生电动势公式在真实弱磁场中的量级检验”； B 用的是地磁场的竖直分量（切割方向的磁感应强度）。

C3 解析（双杆模型）

思路： ab 运动切割磁感线产生感应电流 $\rightarrow cd$ 受安培力加速、 ab 受安培力减速 $\rightarrow$ 两者速度相等后回路磁通量不再变化，感应电流消失。水平方向系统不受外力（安培力是内力），用动量守恒求共同速度，用能量守恒求焦耳热。

规范解：

(1) ab 做加速度减小的减速运动， cd 做加速度减小的加速运动；当两棒速度相等时，回路磁通量不再变化、感应电流为零，此后两棒一起匀速运动。

$$(2) \text{ 动量守恒: } mv_0 = 2mv, v = \frac{v_0}{2} = 2 \text{ m/s}.$$

$$(3) \text{ 能量守恒: } Q = \frac{1}{2}mv_0^2 - \frac{1}{2} \times 2m \times v^2 = \frac{1}{2} \times 0.1 \times 16 - \frac{1}{2} \times 0.2 \times 4 = 0.8 - 0.4 = 0.4 \text{ J}.$$

答：(1) ab 减速、 cd 加速，最终共速匀速；(2) 2 m/s ；(3) 0.4 J 。

易错点：(1) 安培力是两棒间的内力，系统水平方向动量守恒——但前提是“光滑导轨”；(2) 双杆共速条件是“速度相等”（相对速度为零，无感应电流），不是“速度为零”；(3) 焦耳热用“初动能 - 末动能”，别忘两棒都有末动能。

C4 解析（线框进入磁场模型）

思路：进入过程只有下边切割磁感线： $E = Bav$ 、 $F_{\text{安}} = BLa = \frac{B^2 a^2 v}{R}$ ；比较安培力与重力判断运动性质；完全进入后磁通量不变 $\rightarrow$ 无电流 $\rightarrow$ 只受重力；焦耳热用能量守恒。

规范解：

(1) 自由落体: $v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \times 10 \times 1.25} = 5 \text{ m/s}$ 。

(2) $E = Bav = 0.5 \times 0.4 \times 5 = 1 \text{ V}$; $I = \frac{E}{R} = \frac{1}{0.2} = 5 \text{ A}$;

$F_{\text{安}} = BILa = 0.5 \times 5 \times 0.4 = 1 \text{ N} = mg$ ——安培力恰好等于重力, 线框**匀速**进入磁场。

(3) 完全进入后磁通量不变, 无感应电流、无安培力, 只受重力——做自由落体运动 ($a = g$)。

(4) 能量守恒: $Q = mg(h + a) - \frac{1}{2}mv^2 = 0.1 \times 10 \times 1.65 - \frac{1}{2} \times 0.1 \times 25 = 1.65 - 1.25 = 0.4 \text{ J}$ 。

答: (1) 5 m/s; (2) 1 N, 等于重力, 匀速进入; (3) 自由落体; (4) 0.4 J。

易错点: (1) 进入阶段只有一条边切割磁感线, $E = Bav$, 不是 $E = 2Bav$; (2) 判断运动性质必须比较“刚进入时的安培力 vs 重力”, 本题恰好相等 (h 是精心选的数据); (3) 第 (4) 问的位移是 $h + a$ (重心下落距离 = 高度 + 边长), 焦耳热 = 重力做功 - 末动能。

本章综合 · S 层

S1 解析 (滑轨 + 能量 + 动量综合)

思路: $v_{\text{max}} = FR/B^2L^2$ 判断是否匀速; $q = BLx/R$ 求电量; $Q = Fx - \frac{1}{2}mv^2$ 求焦耳热; 撤力后用动量定理 $BLq' = mv$ 求剩余位移。

规范解:

(1) $v_{\text{max}} = \frac{FR}{B^2L^2} = \frac{2 \times 1}{1^2 \times 1^2} = 2 \text{ m/s} = v$ ——此刻恰好达到终极速度, 棒匀速运动。

(2) $q = \frac{BLx}{R} = \frac{1 \times 1 \times 2}{1} = 2 \text{ C}$;

$Q = Fx - \frac{1}{2}mv^2 = 2 \times 2 - \frac{1}{2} \times 0.5 \times 4 = 4 - 1 = 3 \text{ J}$ 。

(3) 撤去恒力后, 只有安培力做功。由动量定理 $BLq' = mv$:

$q' = \frac{mv}{BL} = \frac{0.5 \times 2}{1 \times 1} = 1 \text{ C}$;

由 $q' = \frac{BLx'}{R}$ 得 $x' = \frac{q'R}{BL} = \frac{1 \times 1}{1 \times 1} = 1 \text{ m}$ 。

答: (1) 已达匀速 ($v_{\text{max}} = 2 \text{ m/s}$); (2) 2 C、3 J; (3) 还能滑行 1 m。

易错点: 滑行 2 m 恰好到终极速度是“巧合” (v_{max} 恰为 2 m/s) ——要先用公式验证而非假设; 撤力后的位移不能用匀变速公式 (安培力随速度变), 必须用动量定理 + 电量通式两步走。

S2 解析 (斜面滑轨综合)

思路: 沿斜面方向受重力分量 $mg \sin \theta$ (向下) 与安培力 $F_{\text{A}} = B^2L^2v/R$ (向上); 匀速时两者相等。

规范解:

(1) 沿斜面向上: 安培力 $F_{\text{A}} = B^2L^2v/R$; 沿斜面向下: 重力分量 $mg \sin \theta$ 。开始 $v = 0$, $F_{\text{A}} = 0$, 棒加速下滑; 速度越大 F_{A} 越大, 加速度减小; 当 $mg \sin \theta = F_{\text{A}}$ 时匀速。

(2) $v_{\text{max}} = \frac{mg \sin \theta \cdot R}{B^2L^2} = \frac{0.2 \times 10 \times 0.5 \times 0.5}{0.8^2 \times 0.5^2} = \frac{0.5}{0.16} \approx 3.1 \text{ m/s}$ 。

(3) 能量守恒：重力沿斜面做功 $mg \sin\theta \cdot x$ 一部分变动能、其余变焦耳热。

$$Q = mg \sin\theta \cdot x - \frac{1}{2}mv_{\max}^2 = 1 \times 4 - \frac{1}{2} \times 0.2 \times 3.125^2 \approx 4 - 0.98 = 3.0 \text{ J}.$$

答：(1) 受重力分量与安培力，先加速后匀速；(2) 约 3.1 m/s；(3) 约 3.0 J。

易错点：斜面的“重力”用的是沿斜面的分量 $mg \sin\theta$ ，不是 mg ；终极速度公式分子是 $mgR \sin\theta$ ，别漏 $\sin\theta$ ；下滑 4 m 后已匀速，末动能用 $v_{\max}$ 代入。

0.51 自感

例题 15.1 解析

思考路径：

- 断电时线圈电流要减为 0——但自感“阻碍电流变化”；
- 电流不能立刻消失，只能“挤”过开关断开的空气间隙；
- Δt 极短 $\rightarrow E = L\Delta I/\Delta t$ 极大 $\rightarrow$ 间隙电压击穿空气 $\rightarrow$ 火花。

规范解：断电瞬间电流要突变为零，自感产生很大的感应电动势（ $\Delta I/\Delta t$ 极大），线圈维持电流通过开关间隙，间隙处电压击穿空气，出现火花。

答：见上。

易错点：火花不是线圈“放电”而是自感电动势击穿空气——自感是“电流的惯性”，断电延迟消失； L 越大、电流变化越快，电动势越大。

例题 15.2 解析

思考路径：自感电动势 $E = L\Delta I/\Delta t$ ， $\Delta I = 2 \text{ A}$ ， $\Delta t = 0.1 \text{ s}$ ，直接代入。

规范解： $E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0.5 \times \frac{2}{0.1} = 10 \text{ V}.$

答：自感电动势 10 V。

易错点：自感电动势与“电流变化率”成正比，与电流本身大小无关——稳定电流再大，只要不变，自感电动势就是 0。

A1 解析

思路： $E = L\Delta I/\Delta t$ ， $\Delta I = 3 \text{ A}$ ， $\Delta t = 0.05 \text{ s}$ 。

规范解： $E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0.2 \times \frac{3}{0.05} = 12 \text{ V}.$

答：自感电动势 12 V。

易错点： ΔI 是“末减初”（ $3 - 0 = 3 \text{ A}$ ），别用“平均电流”；自感电动势公式只含变化率。

A2 解析

思路：自感阻碍电流变化——通电时电流要增大，自感就阻碍增大。

规范解：通电瞬间电流增大，自感电动势方向与原电流方向相反（阻碍增大），使电流缓慢建立，而不是瞬间达到稳定值。

答：方向相反，起“阻碍电流增大”的作用。

易错点：自感电动势方向永远是“阻碍变化的方向”——通电时反向（阻碍建立）、断电时同向（维持电流），别记反。

A3 解析

思路：断电瞬间电流要变为 0， $\Delta I/\Delta t$ 极大，自感电动势极大。

规范解：断电时电流瞬间减小， $\Delta I/\Delta t$ 极大（ Δt 趋近于 0），自感电动势 $E = L\Delta I/\Delta t$ 极大，可高达数百到数千伏；开关间隙的空气被高电压击穿电离，形成火花。

答：见上。

易错点：电压“高”是因为 Δt 极小，不是电流大——日常开关断开 5 A 电流就会因自感打火，工程上要用灭弧装置或续流电路。

A4 解析

思路： $E = L\Delta I/\Delta t$ —— L 加倍 $\times 2$ ， Δt 减半 $\times 2$ ，合计 $\times 4$ 。

规范解： $E' = (2L) \cdot \Delta I/(\Delta t/2) = 4 \cdot L\Delta I/\Delta t = 4E$ 。

答：自感电动势变为原来的 4 倍。

易错点： L 在分子、 Δt 在分母——两处都动时相乘（ $\times 2 \times 2 = \times 4$ ），别只算一处。

0.52 涡流

A5 解析

思路：涡流产生于“导体”中——交变磁场使导体内部感应出旋涡电流。

规范解：铜块、铝块是导体，交变磁场在其中产生涡流；塑料是绝缘体，内部没有可自由移动的电荷，无涡流。

答：铜块、铝块产生明显涡流，塑料没有。

易错点：涡流不限于铁磁材料——铜、铝等任何导体在变化磁场中都会有涡流（这正是“垃圾回收斜坡埋强磁铁能分铜铝”的原理）。

A6 解析

思路：涡流三用途——发热、阻尼、探测，逐一匹配。

规范解：

- (1) 电磁炉 → B (涡流发热，锅底直接发热)；
- (2) 机场安检门 → C (涡流被二次线圈感应检测)；
- (3) 磁电式电流表阻尼器 → A (涡流阻尼使指针快速停下)；
- (4) 感应电炉 → B (涡流发热冶炼金属)。

答：(1) B；(2) C；(3) A；(4) B。

易错点：安检门既“产生”涡流又“检测”涡流（涡流再感应到探测线圈）；电流表阻尼利用的是涡流的“阻力”——同一个涡流，用途可以完全不同。

A7 解析

思路：涡流损耗与导体的“块度”有关——整块铁芯涡流大、发热严重。

规范解：整块铁芯在交变磁场中会产生很大的涡流，涡流焦耳热造成大量能量损耗（铁芯发热）；用互相绝缘的硅钢片叠成后，涡流被限制在每一片薄片内（回路被切断），涡流显著减小，铁损大大降低。

答：见上。

易错点：“切碎”的本质是切断涡流回路——片间绝缘是关键；若硅钢片之间导通，叠层就失效了。

A8 解析

思路：自感只阻碍电流“变化”，对恒定电流没有阻碍作用。

规范解：错误。自感产生的感应电动势只出现在电流变化时 ($E = L\Delta I/\Delta t$)；电流恒定不变时 $\Delta I/\Delta t = 0$ ，自感电动势为零，线圈对恒定电流只呈现其本身的电阻（理想线圈电阻可视为零，不阻碍恒定电流）。

答：说法错误。

易错点：把“阻碍变化”误读为“阻碍电流”——电感是“通直流、阻变化”，恒定电流畅通无阻，变化的电流才被“拖后腿”。

B 层·真题研习

B1 解析 (2023·北京卷)

思路：断开前比较两灯电流： L 电阻很小 → 线圈电流远大于 P 灯电流；断开瞬间 Q 断路熄灭， L 维持电流流入 P 。

规范解：断开前，Q 灯正常发光（电流大），P 灯微亮（电流小），线圈 L 中电流远大于 P 灯电流（L 电阻很小）。断开开关瞬间：Q 灯所在支路断路，立即熄灭；线圈 L 电流不能突变，与 P 灯形成闭合回路，L 中较大的电流流过 P 灯，使 P 灯由微亮变为闪亮，随后电流衰减熄灭。

选 **D**（P 闪亮后再熄灭）。

易错点：P 灯“闪亮”是因为它获得了比原来更大的电流（来自线圈的磁场能），不是“电源又给了它电”——断开后电源已断开，能量全部来自线圈储存的磁场能 $\frac{1}{2}LI^2$ 。

B2 解析（2024·湖北卷）

思路：雷击瞬间电流剧烈变化 → 周围磁场剧变 → 金属中感应出巨大的涡流 → 涡流焦耳热熔化金属；非金属绝缘体无涡流。

规范解：雷击时电流在极短时间内剧烈变化，产生剧烈变化的磁场；金属（银饰、宝刀）是导体，在变化磁场中产生强大的涡流，涡流焦耳热巨大，把金属熔化；漆器、刀鞘等非金属不导电、无涡流，故完好。

选 **C**（涡流）。

易错点：金属和非金属都经历了摩擦、声波、光照——只有“涡流发热”能区分两者（导体有、绝缘体无），这是本题的考点所在。

C 层·创新拓展

C1 解析（断电自感与续流保护）

思路：断电瞬间 $\Delta I/\Delta t$ 极大 → 自感电动势极大；续流电阻给电流一条“慢路”，把剧烈的能量释放变成平缓衰减。

规范解：

$$(1) E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 0.5 \times \frac{5}{1 \times 10^{-3}} = 2500 \text{ V}.$$

(2) 2500 V 的高电压加在刚断开的开关间隙上，足以击穿空气产生电弧火花，烧蚀开关触点、干扰周围电路。

(3) 并联续流电阻后，断电瞬间线圈电流仍为 5 A（电流不能突变），经续流电阻流过： $U = IR = 5 \times 100 = 500 \text{ V}$ 。这 500 V 是“缓慢衰减”过程中的瞬时电压（电流随 L/R 时间常数指数衰减），开关两端不再出现 2500 V 的瞬间高压，因此不打火。续流电阻给磁场能一个“平缓释放”的通道。

答：(1) 2500 V；(2) 开关处击穿打火、触点烧蚀；(3) 500 V，续流使电压从瞬间 2500 V 降为缓慢衰减的 500 V 量级，避免击穿。

易错点：自感电动势的高压是“瞬间”的（ Δt 极小）；续流保护的本质是“用电阻分担磁场能的释放”，让电流指数衰减而不是瞬间截断——电压 $= IR$ 也随之平缓。

C2 解析（磁悬浮列车的磁刹车）

思路：鳍片切割磁铁磁场 → 动生电动势 $E = BLv$ → 感应电流 → 安培力阻碍相对运动；速度越大，变化越快，阻力越大。

规范解：

$$(1) E = BLv = 0.3 \times 0.6 \times 83 \approx 15 \text{ V}; I = \frac{E}{R} = \frac{15}{0.05} = 300 \text{ A}.$$

$$(2) F_A = BIL = 0.3 \times 300 \times 0.6 = 54 \text{ N}, \text{方向与列车运动方向相反(阻碍相对运动)}.$$

(3) 这种刹车靠涡流(感应电流)与磁场的相互作用提供阻力,没有机械接触,因此无摩擦、无磨损;速度越大,磁通量变化越快、感应电流越大、安培力越大——刹车效果自动增强。

答:(1) 约 15 V、300 A;(2) 54 N,方向与运动方向相反;(3) 无接触无磨损,速度越大刹车越强。

易错点:磁刹车的“阻力”是安培力而不是摩擦力——金属鳍片并不接触磁铁;“速度越大阻力越大”是电磁阻尼的自反馈特性,让制动过程平稳可控。

本章综合·S层

S1 解析(断电自感电路综合)

思路:闭合瞬间自感阻碍电流建立;断开瞬间自感维持电流,能量来自线圈磁场能。

规范解:

(1) 闭合开关瞬间,线圈电流要增大,自感产生阻碍增大的电动势(L很大),电流缓慢建立,与之并联的灯泡两端电压不能瞬间达到额定值,故灯泡不是立刻最亮——而是逐渐变亮。

$$(2) \text{断开瞬间: } E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = 1 \times \frac{2}{1 \times 10^{-3}} = 2000 \text{ V}.$$

(3) 断开后电源断路,Q支路(若有)熄灭;线圈电流不能突变,与灯泡P形成回路,线圈中原来的电流(2 A,大于灯泡工作电流)流过灯泡,使灯泡先“闪亮”再随电流衰减而熄灭。能量来自线圈中储存的磁场能 $E_L = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 4 = 2 \text{ J}$ 。

答:(1) 自感延迟电流建立;(2) 2000 V;(3) 闪亮后熄灭,能量来自线圈磁场能 2 J。

易错点:断开瞬间的 2000 V 是“瞬间高压”——正是它让开关打火、让灯闪亮;能量账本:断开前磁场能 $\frac{1}{2}LI^2$ 就是灯泡闪亮和打火的“燃料”。

S2 解析(涡流与能量转化综合)

思路:磁铁下落,铝管壁磁通量变化产生涡流,涡流受安培力阻碍磁铁;能量守恒:重力势能 = 动能 + 涡流焦耳热。

规范解:

(1) 磁铁下落时,铝管壁中的磁通量持续变化,产生涡流(旋涡状感应电流);涡流在磁场中受安培力,方向阻碍磁铁下落(楞次定律/来拒去留),所以磁铁明显减速变慢。

$$(2) \text{由能量守恒: } mgh = \frac{1}{2}mv^2 + Q,$$

$$Q = mgh - \frac{1}{2}mv^2 = 0.1 \times 10 \times 1 - \frac{1}{2} \times 0.1 \times 3^2 = 1 - 0.45 = 0.55 \text{ J}.$$

(3) 铜管导电性更好 → 同样条件下涡流更大、阻尼更强 → 磁铁出管口速度更小(动能损失更多、焦耳热更多)。

答:(1) 涡流及安培力阻碍下落;(2) 0.55 J;(3) 速度更小。

易错点:能量账本要完整——重力势能减少 1 J,只有 0.45 J 变成磁铁动能,其余 0.55 J 全部

变成涡流焦耳热（铝管发热）；“阻碍”的直接体现就是机械能减少、内能增加。

0.53 正弦交流电的产生

例题 16.1 解析

思考路径：

- 读题：“600 r/min”是转速不是角速度，先换算：每秒 $600/60 = 10$ 转，即频率 $f = 10$ Hz，角速度 $\omega = 2\pi f = 20\pi$ rad/s；
- 求峰值直接套 $E_m = nBS\omega$ ——四个量都已知；
- 有效值 $E = E_m/\sqrt{2}$ ；频率由转速直接读。
- 预期检查： $E_m = 100 \times 0.5 \times 0.2 \times 20\pi = 200\pi \approx 628$ V，量级合理（几台发电机的电动势几百伏）。

规范解：

$$f = 600/60 = 10 \text{ Hz}, \quad \omega = 2\pi f = 20\pi \text{ rad/s}。$$

$$(1) \quad E_m = nBS\omega = 100 \times 0.5 \times 0.2 \times 20\pi = 200\pi \approx 628 \text{ V}。$$

$$(2) \quad E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{200\pi}{\sqrt{2}} \approx 444 \text{ V}。$$

$$(3) \quad f = 10 \text{ Hz}。$$

答：峰值约 628 V，有效值约 444 V，频率 10 Hz。

易错点：转速 n (r/min) 与频率 f (Hz) 的关系是 $f = n/60$ (转每秒)，不要直接把 600 当频率； $E_m = nBS\omega$ 中 ω 是角速度 (rad/s)，不是频率。

A1 解析

思路：由瞬时式直接读峰值与角频率；有效值 = 峰值 $\div \sqrt{2}$ ；瞬时值代入 t 计算（注意角度用弧度）。

规范解：

$$(1) \quad U_m = 311 \text{ V}; \quad \omega = 100\pi \text{ rad/s} \rightarrow f = \omega/2\pi = 50 \text{ Hz}, \quad T = 1/f = 0.02 \text{ s};$$

$$U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{311}{1.414} \approx 220 \text{ V}。$$

$$(2) \quad e = 311\sin(100\pi \times 0.005) = 311\sin(\pi/2) = 311 \text{ V}。$$

答：峰值 311 V，有效值 220 V，频率 50 Hz，周期 0.02 s； $t = 0.005$ s 时 $e = 311$ V。

易错点： $100\pi t$ 中 $t = 0.005$ 代入得 0.5π (即 90°)， $\sin 90^\circ = 1$ ——“ $\sin(100\pi \times 0.005)$ ”不是 $\sin(0.5)$ ，要先算 $100\pi \times 0.005 = 0.5\pi$ 。

A2 解析

思路：从中性面计时，转过 60° 即相位 $\omega t = 60^\circ$ ，代入 $e = E_m \sin \omega t$ 反解 E_m 。

规范解： $E_m = \frac{e}{\sin 60^\circ} = \frac{155.5}{0.866} \approx 179.5 \text{ V}$ 。

答：峰值约 180 V。

易错点：正弦值是相位（角度）的正弦， $\sin 60^\circ = 0.866$ ，别用 $\sin 30^\circ$ 或 $\cos 60^\circ$ 混入。

A3 解析

思路：中性面处磁通量最大、变化率为零、电流为零；平行磁场处磁通量为零、变化率最大、电流最大；方向每经过中性面改变一次。

规范解：

(1) 错。线圈经过中性面时磁通量最大，但磁通量变化率为零，感应电流为零（电流恰在此时改变方向）。

(2) 对。线圈平面平行磁场时磁通量为零，但变化率最大，感应电动势（电流）最大。

(3) 对。每经过中性面一次电流方向改变一次，转动一周经过中性面两次，故方向改变两次。

易错点：“磁通量大”不等于“变化率大”——恰恰相反，中性面处 Φ 最大、 $\Delta\Phi/\Delta t$ 最小；把“磁通量大”当“感应电流大”是本章第一大易错点。

0.54 有效值：交流电的“等效直流”

例题 16.2 解析

思考路径：

• 求有效值：正弦交流电 $U = U_m/\sqrt{2} = 311/1.414 \approx 220 \text{ V}$ ；

• 求热功率：热功率是“平均效果”，必须用有效值： $P = U^2/R$ ；

• 问“为什么不能用峰值算功率”——峰值只在一瞬间出现，热量是全程累积的平均效果，用有效值才是“等效直流”。

规范解： $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \approx 220 \text{ V}$ ； $P = \frac{U^2}{R} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ W}$ 。

答：有效值 220 V，热功率 484 W。

易错点：算热量、功率、读数一律用有效值；若用峰值 311 V 算功率会得到 967 W，整整大了一倍（ $\sqrt{2}^2 = 2$ 倍）。

A4 解析

思路：由焦耳定律 $Q = I^2 R t$ 反解有效值；正弦电流峰值 = 有效值 $\times \sqrt{2}$ 。

规范解： $I = \sqrt{\frac{Q}{Rt}} = \sqrt{\frac{0.4}{10 \times 0.02}} = \sqrt{2} \approx 1.41 \text{ A}$ ； $I_m = I\sqrt{2} = 2 \text{ A}$ 。

答：电流有效值约 1.41 A，峰值 2 A。

易错点： $Q = I^2 R t$ 中的 I 必须是有效值；不要先用峰值算，再把 0.4 J 当峰值对应的热量。

A5 解析

思路：电热水壶额定功率对应有效值；电流峰值 = 有效值 $\times \sqrt{2}$ ；击穿看峰值电压；热量 = 有效功率 $\times$ 时间。

规范解：

$$(1) I = \frac{P}{U} = \frac{1000}{220} \approx 4.55 \text{ A};$$

$$(2) I_m = 4.55 \times 1.414 \approx 6.43 \text{ A};$$

(3) 会击穿。家庭电路电压峰值约 311 V > 电容耐压 310 V，虽然有效值 220 V 小于 250 V 标称，但击穿由峰值决定；

$$(4) Q = Pt = 1000 \times 600 = 6 \times 10^5 \text{ J}。$$

答：有效值约 4.55 A，峰值约 6.43 A；电容会被击穿；10 分钟产生 $6 \times 10^5 \text{ J}$ 热量。

易错点：电容耐压选型看峰值！有效值 220 V 骗不了 311 V 的峰值电压；“310 V 耐压”接 220 V 电路差 1 V 就击穿，这是工程设计中的经典陷阱。

A6 解析

思路：电压表读数就是有效值；电容是否被击穿由峰值电压决定。

规范解：

$$(1) U_m = \sqrt{2} \times 220 \approx 311 \text{ V}。$$

(2) 不能。电路电压峰值约 311 V > 电容器耐压 250 V，电容器会被击穿烧毁。

答：峰值约 311 V；不能直接接入（耐压必须不小于 311 V）。

易错点：标称 250 V 的电容器看着“比 220 V 大”，实则峰值 311 V 远超耐压——选电容、二极管等“耐压类”元件永远看峰值。

0.55 电感与电容对交流的阻碍

例题 16.3 解析

思考路径：

- 感抗公式 $X_L = 2\pi fL$ ，容抗公式 $X_C = 1/2\pi fC$ ，分别代入两组频率；
- 注意电容单位换算： $10\ \mu\text{F} = 10 \times 10^{-6}\ \text{F}$ ；
- 比较两种频率下的结果，得出规律：频率升高，感抗增大、容抗减小。

规范解：

50 Hz 时：

$$X_L = 2\pi \times 50 \times 0.1 = 31.4\ \Omega;$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \times 50 \times 10 \times 10^{-6}} = \frac{1}{3.14 \times 10^{-3}} \approx 318\ \Omega。$$

1000 Hz 时：

$$X_L = 2\pi \times 1000 \times 0.1 = 628\ \Omega;$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi \times 1000 \times 10 \times 10^{-6}} \approx 15.9\ \Omega。$$

答：50 Hz 时感抗 31.4 Ω 、容抗 318 Ω ；1000 Hz 时感抗 628 Ω 、容抗 15.9 Ω 。频率升高，感抗增大、容抗减小。

易错点：电感“频率高阻碍大”、电容“频率高阻碍小”，方向刚好相反；单位换算别忘（ $10\ \mu\text{F} = 10^{-5}\ \text{F}$ ）。

A7 解析

思路：用“通直阻交、通低阻高”和“隔直通交、通高阻低”两条口诀逐项核对。

规范解：

- (1) 对。恒定电流不变化，无自感阻碍（感抗只在电流变化时体现）。
- (2) 错。稳定后电容相当于断路，恒定电流不能通过（只在“充电瞬间”有短暂的电流）。
- (3) 对。电感频率越高感抗越大，低频容易通过、高频被阻碍。
- (4) 对。电容隔断直流、让交流通过，频率越高容抗越小、越容易通过。

易错点：“电容通交流”指的是交流电往复充放电形成“通路”，不是真的有电荷穿过极板间的绝缘层；直流下电容最终断路。

B 层·真题研习

B1 解析（2024·新课标卷）

思路：初始磁感线垂直穿过线圈平面（线圈处中性面），磁通量最大、变化率为零；转过 90° 后磁感线平行于线圈平面，磁通量为零、变化率最大。

规范解：磁极再转过 90° 时，相当于线圈从中性面转出 90° ，穿过线圈的磁通量为零、磁通量变化率最大，感应电动势最大、电流最大，A 错 B 对；转动过程中磁通量减小，由楞次定律（感应电流的磁场阻碍磁通量减小）可判电流方向由 Q 指向 P，C 错 D 对。选 **BD**。

易错点：磁通量为零处正是感应电动势最大处——“零变化率对应最大磁通量、零磁通量对应最大变化率”，这是正弦交流电最核心的相位关系。

B2 解析（2023·湖南卷）

思考路径：

• 皮带传动：两轮边缘线速度相等 $v = \omega_{\text{大}} R_{\text{大}} = \omega_{\text{小}} R_{\text{小}}$ ， $R_{\text{大}} = 4R_{\text{小}} \rightarrow \omega_{\text{小}} = 4\omega$ ，小轮与线圈同轴 $\rightarrow$ 线圈角速度 4ω ；

• $E_m = nBS \cdot 4\omega = 4nBL^2\omega$ ，有效值 $E = E_m/\sqrt{2} = 2\sqrt{2} nBL^2\omega$ ；

• 灯泡与线圈内阻 R 串联，灯泡分压 $U = E \cdot R/(R+R) = E/2 = \sqrt{2} nBL^2\omega$ ；

• C 项：漆包线总长 2 倍、边长不变 $\rightarrow$ 匝数变 $2n$ 、总阻值变 $2R$ ，重新计算。

规范解：

A 对：线圈角速度 $= 4\omega$ 。

B 错：灯泡两端电压有效值 $= \sqrt{2} nBL^2\omega$ （不是 $3\sqrt{2} nBL^2\omega$ ）。

C 对：匝数 $2n$ 、阻值 $2R$ ， $E_m' = 2n \cdot B \cdot L^2 \cdot 4\omega = 8nBL^2\omega$ ， $E' = 4\sqrt{2} nBL^2\omega$ ，灯泡分压 $U' = \frac{E' \cdot R}{R + 2R} = \frac{4\sqrt{2}}{3} nBL^2\omega$ 。

D 错：小轮半径加倍，线速度不变 $\rightarrow$ 小轮角速度减半 $\rightarrow$ 线圈角速度 $2\omega \rightarrow$ 电动势减半 $\rightarrow$ 灯泡变暗。

选 **AC**。

易错点：(1) 皮带传动是“线速度相等”（不是角速度相等）；(2) 灯泡电压 = 总电动势 $\times$ 分压比例，内阻必须计入；(3) 导线长度加倍 $\rightarrow$ 匝数与电阻同时加倍，电动势与电阻“一起变”，别只改一个。

C 层·创新拓展

C1 解析（电动汽车交流慢充）

思路：额定功率 $\div$ 电压得有效值电流；峰值 = 有效值 $\times \sqrt{2}$ ；充电时间由“需充入的能量 $\div$ 充电效率 $\div$ 额定功率”三步计算；电池只能充直流，交流必须先整流。

规范解：

$$(1) I = \frac{P}{U} = \frac{7000}{220} \approx 31.8 \text{ A}; I_m \approx 31.8 \times 1.414 \approx 45 \text{ A}.$$

(2) 需充入的电量为 $60 \times (1 - 0.2) = 48 \text{ kW} \cdot \text{h}$ （化学能）；

需要输入电能 $48 \div 0.9 \approx 53.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ；

充电时间 $t = 53.3 \div 7 \approx 7.6 \text{ h}$ 。

(3) 电池充放电本质是化学过程，只能充入单向流动的直流电；交流电必须先经车载充电机（AC/DC 变换器）整流成直流才能进入电池。慢充功率小（约 7 kW ），随车交流桩 + 车载

充电机就能完成整流；快充功率达几十至几百千瓦，远超车载充电机的体积与散热承受能力，故把整流器做到桩内、直接输出直流（直流快充桩），绕过车载充电机。

易错点：充电量要按“电池缺电部分 ÷ 效率”计算，别直接用总容量除功率；“220 V、7 kW”里的 220 V 是有效值，算电流用有效值、算峰值再乘 $\sqrt{2}$ 。

C2 解析（光伏并网逆变器）

思路：逆变器输出交流功率 = 组件功率 × 效率；电流 = 功率 ÷ 220 V（有效值）；并网本质是“两台交流电源并联”，必须频率、相位、幅值一致。

规范解：

$$(1) P_{ac} = 5 \times 0.95 = 4.75 \text{ kW}, I = \frac{4750}{220} \approx 21.6 \text{ A}.$$

$$(2) P_{ac} = 2 \times 0.95 = 1.9 \text{ kW}, I = \frac{1900}{220} \approx 8.6 \text{ A}.$$

(3) 电网可看作一台“巨型交流电源”（50 Hz 正弦波）。逆变器若以不同频率或相位送电，两个电源之间会产生环流，轻则无法送电、重则烧毁设备。所以逆变器必须通过锁相环实时跟踪电网电压的频率与相位，让输出的正弦波与电网“同频同相”，才能顺利并入电网。

答：满功率约 21.6 A；2 kW 时约 8.6 A；同频同相才能避免环流、安全并网。

易错点：光伏并网电流随天气（组件功率）变化，但电压始终被电网“钳”在 220 V；功率是“组件功率 × 效率”，别忘了效率。

本章综合 · S 层

S1 解析（发电机与电路综合）

思路：转速 10 r/s → $f = 10 \text{ Hz}$, $\omega = 20\pi \text{ rad/s}$; $E_m = nBS\omega$; 电路是内阻 r 与外阻 R 串联的纯电阻电路，用有效值计算；计时起点平行磁场（从峰值开始）→ 瞬时式用余弦。

规范解：

$$(1) \omega = 2\pi \times 10 = 20\pi \text{ rad/s},$$

$$E_m = nBS\omega = 200 \times 0.5 \times 0.02 \times 20\pi = 40\pi \approx 125.7 \text{ V};$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{40\pi}{\sqrt{2}} \approx 88.9 \text{ V}.$$

$$(2) U_R = E \cdot \frac{R}{R+r} = 88.9 \times \frac{10}{12} \approx 74.1 \text{ V}.$$

$$(3) I = \frac{E}{R+r} = \frac{88.9}{12} \approx 7.4 \text{ A}, P = I^2 R \approx 7.4^2 \times 10 \approx 548 \text{ W}.$$

$$(4) \text{计时起点线圈平行磁场（从峰值开始）}, e = E_m \cos \omega t = 125.7 \cos(20\pi t) \text{ V}.$$

答：峰值约 126 V、有效值约 88.9 V；R 两端有效值约 74.1 V；平均功率约 548 W；瞬时式 $e = 125.7 \cos(20\pi t) \text{ V}$ 。

易错点：(1) 线圈有内阻，负载电压要分压，不能直接用电动势；(2) 功率用有效值算 ($P = I^2 R$)，(3) “平行磁场开始计时”从峰值开始，用余弦；若从中性面计时才用正弦。

S2 解析（半波整流与有效值）

思路：有效值定义是“产生相同热量”的等效直流。半个周期发热、半个周期不发热，热量只

有全波的一半。

规范解： 设一个周期内前半段为 $i = I_m \sin \omega t$ ($0 \sim T/2$)。

$$(1) \int_0^T i^2 dt = \int_0^{T/2} I_m^2 \sin^2 \omega t dt = \frac{I_m^2}{2} \cdot \frac{T}{2} = \frac{I_m^2 T}{4},$$

$$\text{由 } I^2 T = I_m^2 T/4 \text{ 得 } I = \frac{I_m}{2} = 1 \text{ A}。$$

$$(2) P = I^2 R = 1^2 \times 5 = 5 \text{ W}。$$

(3) 电流表测有效值，读数 1 A。

答：有效值 1 A；功率 5 W；读数 1 A。

易错点： 千万别答 “ $I_m/\sqrt{2} \approx 1.41 \text{ A}$ ” ——那是“整周期正弦”的有效值；半波整流电流一半时间在发热，有效值降为峰值的一半 ($I_m/2$)。区分“正弦的有效值 $I_m/\sqrt{2}$ ”与“半波的有效值 $I_m/2$ ”。

0.56 变压器：互感升降压

例题 17.1 解析

思考路径：

- 问副线圈电压 → 匝数比定电压： $U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1 = 220 \times 100/1000 = 22 \text{ V}$ ；
- 问副线圈电流 → 负载定电流： $I_2 = U_2/R = 22/22 = 1 \text{ A}$ ；
- 问原线圈电流 → 用电流反比（或功率守恒）： $I_1 = I_2 \cdot n_2/n_1 = 1 \times 0.1 = 0.1 \text{ A}$ ；
- 验证功率： $P_1 = 220 \times 0.1 = 22 \text{ W}$ ， $P_2 = 22 \times 1 = 22 \text{ W}$ ，守恒。

规范解：

$$U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1 = 22 \text{ V}；I_2 = U_2/R = 1 \text{ A}；I_1 = I_2 \cdot n_2/n_1 = 0.1 \text{ A}。$$

答：副线圈电压 22 V，副线圈电流 1 A，原线圈电流 0.1 A。

易错点： 电流比是反比 ($I_1/I_2 = n_2/n_1$)，与电压比方向相反；原线圈电流不能拿“功率 ÷ 原线圈电压”之外的方法猜，要先从负载倒推副线圈电流，再反推。

A1 解析

思路： 电压走匝数比、电流走反比、功率守恒验证三连。

规范解：

$$(1) U_2 = 220 \times 55/1100 = 11 \text{ V}。$$

$$(2) I_2 = U_2/R = 11/11 = 1 \text{ A}；I_1 = I_2 \cdot n_2/n_1 = 1 \times 55/1100 = 0.05 \text{ A}。$$

$$(3) P_1 = 220 \times 0.05 = 11 \text{ W}，P_2 = 11 \times 1 = 11 \text{ W}，P_1 = P_2，功率守恒成立。$$

答：副线圈电压 11 V；副线圈电流 1 A、原线圈电流 0.05 A；两线圈功率均为 11 W。

易错点：原线圈电流只有 0.05 A 而副线圈 1 A，这是因为原线圈电压高（220 V）、副线圈电压低（11 V）——降压变压器副线圈电流大是正常的，别以为“变压器增大了电流就违反了能量守恒”。

A2 解析

思路：变压器靠“变化的磁通量”传能，直流不行；空载时理想变压器原线圈无电流；匝数比公式的前提是理想变压器。

规范解：

（1）错。变压器靠互感传能，直流电流恒定、铁芯磁通量不变、副线圈无感应电动势，不能变压。

（2）对。副线圈空载时没有输出电流，理想变压器原线圈电流为零（实际变压器只有很小的励磁电流）。

（3）对。 $U_1/U_2 = n_1/n_2$ 建立在无能量损失（理想）前提下，实际变压器因漏磁、铁损等会有偏差。

（4）错。升压变压器副线圈电压高、电流小（降电流），不可能同时升压又升电流——那样功率就增大了。

易错点：理想变压器“升压必降流、降压必升流”，这是 $P = UI$ 守恒的直接推论；空载时原线圈电流接近零，但副线圈电压照样存在（由匝数比决定）。

A3 解析

思路：匝数比定电压正着用、反着用都可以——变压器是可逆器件。

规范解：

（1） $n_1 = U_1/U_2 \times n_2 = 220/110 \times 50 = 100$ 匝。

（2）反过来接，匝数比不变： $U' = 110 \times 100/50 = 220$ V。

答：原线圈 100 匝；反接后输出 220 V。

易错点：变压器从哪边送电都行，只要满足 $U_1/U_2 = n_1/n_2$ ；“升压”与“降压”是相对接法而言的，同一台变压器反过来用就是另一台。

0.57 远距离输电：为什么要升压

例题 17.2 解析

思考路径：

- 先算电流 $I = P/U$ （这是第一步，线损一切从电流算起）；

• 线损 $PL = I^2 r$;

• (3) 要求线损 $\leq 1\%$, 反推电流上限, 再反推电压下限。

• 预期检查: 250 V 输 100 kW 电流高达 400 A, 线损必然巨大——这正是“不升压的下场”。

规范解:

(1) $I = P/U = 10^5/250 = 400 \text{ A}$; $PL = I^2 r = 400^2 \times 5 = 8 \times 10^5 \text{ W}$ ——线损是输送功率 (10^5 W) 的 8 倍, 荒唐至极。

(2) $I = 10^5/10^4 = 10 \text{ A}$; $PL = 10^2 \times 5 = 500 \text{ W} = 0.5\%$ 。升压 40 倍, 线损降为 1/1600。

(3) 要求 $PL \leq 1\% \times 10^5 = 10^3 \text{ W} \rightarrow I \leq \sqrt{\frac{10^3}{5}} \approx 14.1 \text{ A} \rightarrow U \geq \frac{P}{I} = \frac{10^5}{14.1} \approx 7.1 \text{ kV}$ 。

答: (1) 400 A, 线损 $8 \times 10^5 \text{ W}$ (8 倍于输送功率); (2) 10 A, 线损 500 W (0.5%); (3) 至少升压到约 7.1 kV。

易错点: 线损 $PL = I^2 r$ 中的电流必须先用 $I = P/U$ 求出; 电压升 40 倍、线损降 $40^2 = 1600$ 倍——“升压 k 倍、线损降 k^2 倍”是远距离输电的灵魂。

A4 解析

思路: $I = P/U$ 求电流, $PL = I^2 r$ 求线损; 对比两组电压看线损比例。

规范解:

(1) $I_1 = 10^5/10^4 = 10 \text{ A}$; $PL_1 = 10^2 \times 5 = 500 \text{ W}$ 。

(2) $I_2 = 10^5/10^3 = 100 \text{ A}$; $PL_2 = 100^2 \times 5 = 5 \times 10^4 \text{ W}$ 。

(3) 电压升 10 倍, 电流降为 1/10, 线损降为 $(1/10)^2 = 1/100$ 。

答: 10 kV 输电线损 500 W; 1 kV 输电线损 $5 \times 10^4 \text{ W}$; 电压升 10 倍线损降为 1/100。

易错点: 线损与电压平方成反比——电压 10 倍、线损 100 分之一; 别误以为只降 10 倍。

A5 解析

思路: 发电 $\rightarrow$ 升压 $\rightarrow$ 线路 $\rightarrow$ 降压, 逐环列式。输电电流由升压后的功率和电压决定。

规范解:

(1) $I_2 = P/U_2 = 5 \times 10^5/10^4 = 50 \text{ A}$; $PL = I_2^2 r = 50^2 \times 4 = 10^4 \text{ W}$ 。

(2) 占比 $= 10^4/(5 \times 10^5) = 2\%$ 。

(3) $U_3 = U_2 - I_2 \cdot r = 10^4 - 50 \times 4 = 9800 \text{ V}$ 。

答: 输电电流 50 A, 线损 10 kW (占 2%); 降压变压器原线圈电压 9800 V。

易错点: 降压变压器原线圈电压 = 升压输出电压 - 线路压降 ($I \cdot r$), 不是直接等于升压输出; 漏掉线路压降是最常见的错误。

A6 解析

思路：两种情况分别算电流和线损，对比说明升压价值。

规范解：

(1) $I_1 = 2 \times 10^4 / 400 = 50 \text{ A}$; $PL_1 = 50^2 \times 1 = 2500 \text{ W}$ 。

(2) $I_2 = 2 \times 10^4 / 4000 = 5 \text{ A}$; $PL_2 = 5^2 \times 1 = 25 \text{ W}$ 。

(3) 电压升 10 倍，线损从 2500 W 降到 25 W，降为 1/100。

答：400 V 输送线损 2500 W（占 12.5%）；4000 V 输送线损 25 W（占 0.125%）。同样 20 kW 的电，高压输送几乎不损失——这就是“升压输电”的意义。

易错点：输电电压是“升压后的电压”，别用发电机原始电压去算高压输送时的电流。

A7 解析

思路：逐项核对 $P_L = I^2 r$ 的适用范围与“高压输电”的本质。

规范解：

(1) 错。 U^2/r 中的 U 必须是输电线路两端的电压降（ $U_{\text{损}} = Ir$ ），不是输电电压。用输电电压 220 kV 代进 U^2/r 会得到荒谬的答案。

(2) 错。升压变压器 $n_2 > n_1$ ，由 $I_1/I_2 = n_2/n_1$ 得 $I_1 > I_2$ ，原线圈电流更大（因为原线圈电压低）。

(3) 对。高压输电的本质：功率一定时提高电压、减小电流，从而把线损 $I^2 r$ 压下来。

(4) 对。 $PL = I^2 r = (P/U)^2 r$ ，输送功率 P 一定时，线损与 U^2 成反比。

答：(1) 错；(2) 错；(3) 对；(4) 对。

易错点：升压变压器原线圈（低压侧）电流大、副线圈（高压侧）电流小，别记反；“ U^2/r ”陷阱题的关键是分清“输电电压”与“线路压降”。

B 层·真题研习

B1 解析（2023·山东卷）

思路：按“发电 → 升压 → 线路 → 分支（储能站 + 降压用户）”逐环计算。先由用户端倒推出降压变压器原线圈（即线路末端）的电压电流，再算线损和升压端。

规范解：

发电机输出电流 $I_1 = P/U_1 = 5 \times 10^5 / 250 = 2 \times 10^3 \text{ A}$ ，A 错；

用户端 $I_4 = 88 \times 10^3 / 220 = 400 \text{ A} \rightarrow I_3 = I_4 / 50 = 8 \text{ A}$ ， $U_3 = 50 \times 220 = 11000 \text{ V}$ ；

线路损耗 $P_L = I_3^2 R = 8^2 \times 62.5 = 4000 \text{ W} = 4 \text{ kW}$ ，B 错；

升压输出 $U_2 = U_3 + I_3 R = 11000 + 8 \times 62.5 = 11500 \text{ V}$ ，故 $n_1:n_2 = U_1:U_2 = 250:11500 = 1:46$ ，D 错；

理想变压器功率守恒： $P = U_2 I_3 + P_{\text{储}}$ ，得 $P_{\text{储}} = 500 - 11500 \times 8 \times 10^{-3} \dots$ 即 $500 \text{ kW} - (U_2 I_3 = 92 \text{ kW}) = 408 \text{ kW}$ ，C 对。

选 C。

易错点：(1) 用户端倒推电流 I_3 时用匝数反比 ($I_3 = I_4 \cdot n_4/n_3$)；(2) 升压输出功率 = 用户功率 + 线损 + 储能站功率，三者必须对账——本题 $500 = 88 + 4 + 408 \text{ kW}$ ，正好平账。

B2 解析 (2023 · 北京卷)

思路：理想值 $U_{2\text{理}} = 12 \times 190/600 = 3.8 \text{ V}$ ，实际只有 2.5 V (漏磁、铁损等非理想因素)。要让灯泡正常发光 (3.8 V)，只能提高副线圈电压。

规范解：由 $U_1/U_2 = n_1/n_2$ 知， $U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1$ 。

A 错：增大 $n_1 \rightarrow U_2$ 减小；

B 对：增大 $n_2 \rightarrow U_2$ 增大，可达到 3.8 V ；

C 错： n_1 、 n_2 同倍增大 $\rightarrow$ 匝数比不变 $\rightarrow U_2$ 不变；

D 错：并联灯泡不改变副线圈电压 (电压由匝数比决定)，每个灯两端仍只有 2.5 V 。

选 B。

易错点：副线圈输出电压只由“原线圈电压 $\times$ 匝数比”决定，与负载怎么接无关——并联灯泡改变的是电流，不是电压。

B3 解析 (2023 · 广东卷)

思路： $u = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t) \text{ V}$ 中峰值是 $220\sqrt{2} \text{ V}$ ，原线圈电压有效值 $U_1 = 220 \text{ V}$ ；匝数比 $1:2 \rightarrow U_2 = 440 \text{ V}$ ；副线圈电流 $I_2 = P/U_2$ ；频率由电源决定、变压器不变频。

规范解： $U_1 = 220 \text{ V}$ ， $U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1 = 220 \times 2 = 440 \text{ V}$ ；

$I_2 = P/U_2 = 8800/440 = 20 \text{ A}$ ；

$f = \omega/2\pi = 100\pi/2\pi = 50 \text{ Hz}$ 。

选 A。

易错点：(1) 看清 $u = 220\sqrt{2} \sin \omega t$ ， $220\sqrt{2}$ 是峰值，有效值是 220 V ——别把峰值当有效值；(2) 副线圈电流用输出功率除以副线圈电压；(3) 变压器不改变频率，副线圈仍是 50 Hz 。

B4 解析 (2025 · 全国 II 卷 · 变压器动态)

思路：理想变压器三关系：电压比 = 匝数比、功率比 = $1:1$ 、电流比 = 匝数反比；负载变化影响输出功率，进而影响输入功率。

规范解：A 对： $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{2}{1}$ ；B 错：理想变压器 $P_1 = P_2$ (无损耗)，功率比 $1:1$ ；C 对： $\frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1}{2}$ ；D 错： R 增大 $\rightarrow$ 副线圈电流减小 $\rightarrow$ 输出功率减小 $\rightarrow$ 输入功率减小 (不是增大)。

答：AC。

易错点：(1) 功率“进出相等”是理想变压器的铁律，电压电流都让位；(2) 电流比是匝数反比，和电压比方向相反；(3) 动态问题从“负载 $\rightarrow$ 副线圈 $\rightarrow$ 原线圈”链条推理，别跳步。

C 层·创新拓展

C1 解析（特高压输电）

思路： $I = P/U$ ；线损 $\propto I^2 \propto 1/U^2$ ；从数学关系论证特高压的必要性。

规范解：

(1) $I = P/U = 4 \times 10^9 / (800 \times 10^3) = 5000 \text{ A}$ 。

(2) 输送功率一定时 $I \propto 1/U$ ，线损 $P_L = I^2 r \propto 1/U^2$ ，故

$P_L(1000 \text{ kV})/P_L(800 \text{ kV}) = (800/1000)^2 = 0.64$ ，即降为原来的 64%。

(3) 线损与输电电压的平方成反比：电压每提高 1 倍，同样功率下线损降为原来的 1/4。把电压从几百千伏级提高到 $\pm 800 \text{ kV}$ 、 1000 kV 级，输送同样功率时电流成数量级减小，线损剧降，且可减少线路造价、节省走廊占地——这就是我国发展“西电东送”特高压直流工程的数学根据。

答：电流 5000 A；1000 kV 时线损降为 64%；高压越大线损越小（与 U^2 成反比）。

易错点：线损比例是对比，用 $(U_1/U_2)^2$ 直接算，注意哪个电压在分母；“升压 1 倍、线损 1/4”要记牢。

C2 解析（充电桩里的变压器）

思路：降压变压器的匝数比由电压比决定；原线圈电流用电流反比；多桩总功率 = 单桩功率 $\times$ 台数。

规范解：

(1) $n_2 = U_2/U_1 \times n_1 = 750/10^4 \times 2000 = 150$ 匝。

(2) $I_1 = I_2 \cdot n_2/n_1 = 80 \times 150/2000 = 6 \text{ A}$ 。

(3) 单桩功率 $P = U_2 \cdot I_2 = 750 \times 80 = 60 \text{ kW}$ ；

20 台总功率 $P_{\text{总}} = 60 \times 20 = 1200 \text{ kW} = 1.2 \text{ MW}$ ；

站内从 10 kV 电网取用的总电流 $I_{\text{总}} = P_{\text{总}}/U_1 = 1.2 \times 10^6 / 10^4 = 120 \text{ A}$ （也等于 $6 \text{ A} \times 20$ ）。

答：副线圈 150 匝；原线圈电流 6 A；总功率 1.2 MW、总电流 120 A。

易错点：电流反比算原线圈电流时注意匝数比方向；多台充电桩是并联（电压相同、电流相加），总电流直接叠加。

本章综合·S 层

S1 解析（四环节输电综合）

思路：四环节逐环走：发电 $\rightarrow$ 升压（匝数比） $\rightarrow$ 线路（算压降与线损） $\rightarrow$ 降压（匝数比） $\rightarrow$ 用户。功率全程守恒。

规范解：

(1) $U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1 = 250 \times 40 = 10000 \text{ V}$ 。

(2) $I_2 = P_0/U_2 = 10^5/10^4 = 10 \text{ A}$ 。

$$(3) P_L = I^2 r = 10^2 \times 12.5 = 1250 \text{ W};$$

$$U_3 = U_2 - I_2 \cdot r = 10000 - 125 = 9875 \text{ V}。$$

$$(4) n_3:n_4 = U_3:U_4 = 9875:220 \approx 44.9:1。$$

(5) 能正常工作。降压变压器输出 220 V，40 盏灯共需 4 kW；输送到用户的实际功率 = $P_0 - P_L = 100 - 1.25 = 98.75 \text{ kW}$ ，远超 4 kW，供电能力足够，灯泡正常发光。

答：(1) 10 kV；(2) 10 A；(3) 线损 1250 W、降压原线圈 9875 V；(4) 约 44.9:1；(5) 能正常工作。

易错点：降压变压器原线圈电压 U_3 必须扣除线路压降 (125 V)；“用户能用多少电”看的是“到达功率 - 需求功率”，不是升压端输出功率。

S2 解析 (变压器动态分析)

思路：牢记“匝数比定电压、负载定电流、功率守恒联动”三句话。

规范解：

(1) $U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1$ ，只由原线圈电压和匝数比决定，与负载电阻 R 无关 (理想变压器)。

(2) R 增大 $\rightarrow$ 副线圈电流 $I_2 = U_2/R$ 减小 $\rightarrow$ 输出功率 $P = U_2 I_2$ 减小 $\rightarrow$ 原线圈电流 $I_1 = P/U_1$ 减小。

(3) 并联灯泡 $\rightarrow$ 副线圈负载电流增大 $\rightarrow$ 输出功率增大 $\rightarrow I_1$ 增大。

(4) 原线圈匝数 n_1 增大 $\rightarrow$ 匝数比 n_2/n_1 减小 $\rightarrow U_2$ 减小。

答：(1) $U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1$ ，与 R 无关；(2) I_2 、 I_1 、 P 均减小；(3) I_1 增大；(4) U_2 减小。

易错点：动态分析的第一步永远是“ U_2 不变 (由匝数比锁定)”，再谈电流随负载怎么变；原线圈电流是“跟出来”的，不是独立变量——它完全由输出功率通过功率守恒反推。

0.58 麦克斯韦电磁场理论

例题 18.1 解析

思考路径：

- 问“为什么说光是电磁波”——关键证据是“速度相等”；

- 麦克斯韦从自己的方程推出电磁波速度 $c = 1/\sqrt{(\mu_0 \epsilon_0)}$ ，代入当时的真空介电常数和磁导率数值，恰好得到 $\approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，与已测得的光速惊人吻合；

- 数值吻合 $\rightarrow$ 断言光是电磁波；赫兹 1888 年用振荡电路产生并接收电磁波，实验证实。

规范解：

答：麦克斯韦从理论上推出电磁波的传播速度等于当时已知的光速 (数值吻合)，由此断言光是电磁波；1888 年赫兹用振荡电路产生并接收电磁波，实验证实了电磁波的存在。光与无线电波、X 射线本质相同，只是频率不同。

易错点：电磁波不需要介质（真空中也能传播，速度 c ），与机械波根本不同；“变化的电场产生磁场、变化的磁场产生电场”是电磁波存在的理论依据。

A1 解析

思路：电磁波由“变化的电场磁场互相激发”产生，关键在“变化”；均匀变化产生恒定场，周期性变化才产生波。

规范解：

(1) 错。变化的电场同样能产生磁场（麦克斯韦的“位移电流”思想），“只有电流变化”说法太窄。

(2) 对。均匀变化的电场产生恒定磁场（反之亦然）；只有周期性（非均匀）变化的场才能激发出变化的场，从而形成波。

(3) 对。所有电磁波在真空中传播速度相同，均为 $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 。

(4) 对。1888 年赫兹用振荡电路产生并接收了电磁波，验证了麦克斯韦的预言。

易错点：“均匀变化 $\rightarrow$ 恒定场”与“周期性变化 $\rightarrow$ 波动”要分清——前者只产生静态场，不能形成电磁波；“任何变化电场都产生变化的磁场”是错误说法。

A2 解析

思路：回忆电磁波的空间结构：电场、磁场相互垂直，且都垂直于传播方向。

规范解：电磁波传播时，电场方向 E 与磁场方向 B 相互垂直，且二者均垂直于波的传播方向，即 E 、 B 、 v 三者两两垂直。电磁波是横波。

易错点：电磁波一定是横波（ E 、 B 都垂直传播方向）；声波等机械波既可以是横波（绳波）也可以是纵波（声波），但电磁波只能是横波。

0.59 电磁波谱与应用

例题 18.2 解析

思考路径：

- 波长、频率、波速三量关系： $c = \lambda f$, $f = c/\lambda$;
- 单位换算先行： $500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$;
- 代入： $f = 3 \times 10^8 / 5 \times 10^{-7} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$;
- 预期检查：可见光频率在 10^{14} 10^{15} Hz 量级，结果合理。

规范解： $\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$,

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}。$$

答：频率约为 $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。

易错点：纳米换算（ $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ， $500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$ 不是 $5 \times 10^{-9} \text{ m}$ ）； $c = \lambda f$ 三个量互相推，先统一单位再代。

A3 解析

思路：按“频率从低到高、波长从长到短”的排序铁律排。

规范解：无线电波 → 微波 → 红外线 → 可见光 → 紫外线 → X 射线 → γ 射线。

本题给出序列排序：无线电波 < 微波 < 红外线 < 可见光 < 紫外线 < X 射线 < γ 射线。

答：无线电波 → 微波 → 红外线 → 可见光 → 紫外线 → X 射线 → γ 射线。

易错点：记住口诀“无微红可紫 X 伽马”（频率从低到高）；红外线与紫外线谁靠前别搞混——红外线紧挨可见光红端、频率低于可见光；紫外线频率高于可见光。

A4 解析

思路： $c = \lambda f \rightarrow \lambda = c/f$ 。

规范解： $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 3 \times 10^8 = 1 \text{ m}$ 。

答：波长 1 m。

易错点：频率单位要换算成 Hz（ $3 \times 10^8 \text{ Hz}$ 已是 Hz）；波长 = 波速 ÷ 频率，别乘反。

A5 解析

思路：比较频率 → 比较波长 → 由波长讨论衍射、穿透与覆盖。

规范解：

(1) 5G 的 3.5 GHz 频率高于 Wi-Fi 的 2.4 GHz，所以 5G 波长短（ $\lambda = c/f$ ）。

(2) 5G (3.5 GHz) 波长更短，衍射能力更弱、遇到障碍物（墙体）时损耗更大，穿透墙壁能力更弱。

(3) 频率越高波长越短，电磁波越接近“直线传播”，绕射能力差、穿透损耗大，单个基站的覆盖半径明显小于 4G，因此 5G 需要更密集地布设基站（尤其毫米波频段，几乎“一栋楼一个站”）。

答：(1) 5G 频率高、波长短；(2) 5G 穿透能力更弱；(3) 频率高 → 波长短 → 绕射与穿透都弱 → 覆盖小、需密集布站。

易错点：“频率高 → 波长短 → 绕射弱、穿透差”是一条链，别记反（低频才容易绕墙、覆盖远——这也是调幅广播能传很远的原因）。

0.60 LC 振荡电路与电磁波的发射、接收

例题 18.3 解析

思考路径：

- 振荡周期公式 $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ，代入前先换算单位： $L = 4 \times 10^{-3} \text{ H}$ ， $C = 0.25 \times 10^{-6} \text{ F}$ ；
- $LC = 4 \times 10^{-3} \times 0.25 \times 10^{-6} = 10^{-9}$ ， $\sqrt{LC} = 3.16 \times 10^{-5}$ ；
- $T = 2\pi \times 3.16 \times 10^{-5} \approx 2 \times 10^{-4} \text{ s}$ ， $f = 1/T = 5 \times 10^3 \text{ Hz}$ ；
- C 变为 4 倍 $\rightarrow \sqrt{LC}$ 变为 2 倍 $\rightarrow$ 周期变为 2 倍 $\rightarrow$ 频率变为一半。

规范解：

$$(1) T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{4 \times 10^{-3} \times 0.25 \times 10^{-6}} = 2\pi \times 3.16 \times 10^{-5} \approx 2 \times 10^{-4} \text{ s};$$

$$f = 1/T \approx 5 \times 10^3 \text{ Hz}.$$

(2) C 变为 $1 \mu\text{F}$ (4 倍)， $\sqrt{LC}$ 变为 2 倍， T 变为 $2 \times 10^{-4} \times 2 = 4 \times 10^{-4} \text{ s}$ ，频率变为 2500 Hz。

答：周期约 $2 \times 10^{-4} \text{ s}$ ，频率约 5000 Hz；电容 4 倍后周期变为 2 倍（约 $4 \times 10^{-4} \text{ s}$ ），频率变为 2500 Hz。

易错点： T 与 $\sqrt{C}$ 成正比—— C 变为 4 倍周期只变 2 倍，别误以为周期也变 4 倍；单位换算 mH、 μF 都要化成 H、F。

A6 解析

思路： $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ；频率与 $\sqrt{LC}$ 成反比， f 变为 2 倍需要 LC 变为 $1/4$ 。

规范解：

$$(1) T = 2\pi\sqrt{(0.1 \times 10^{-3} \times 1 \times 10^{-6})} = 2\pi\sqrt{10^{-10}} = 2\pi \times 10^{-5} \approx 6.28 \times 10^{-5} \text{ s}.$$

(2) $f = 1/T \propto 1/\sqrt{LC}$ 。要使 f 变为 2 倍，须使 LC 变为原来的 $1/4$ 。电感不变，则 C 应变为原来的 $1/4$ ，即 $0.25 \mu\text{F}$ 。

答：周期约 $6.28 \times 10^{-5} \text{ s}$ ；电容应减为原来的 $1/4$ ($0.25 \mu\text{F}$)。

易错点：频率 $\times 2$ 需要 $LC \div 4$ ，是“平方”关系，不是 $\div 2$ ；题目经常把“减为 $1/4$ ”和“减为 $1/2$ ”混着考。

A7 解析

思路：充电过程电荷量增加、电场能增大；电流减小、磁场能减小；周期只由 L 、 C 决定。

规范解：

(1) 对。充电过程中电荷量从零向最大值增加。

(2) 对。电流正在减小, 磁场能 $E_{\text{磁}} = \frac{1}{2}LI^2$ 减小。

(3) 对。充电时电场能增大 (电荷量与极板电压都在增大)。

(4) 错。振荡周期 $T = 2\pi\sqrt{LC}$ 只由电路参数决定, 与充电、放电过程无关, 不会“正在变大”。

答: (1) (2) (3) 对, (4) 错。

易错点: 振荡周期与“进行到哪一步”无关——改变周期的唯一途径是改 L 或改 C ; “电荷量最大时电流为零”是本章最经典的相位关系。

B 层·真题研习

B1 解析 (2024·浙江 6 月选考)

思路: 逐项判断, 重点核对 C 项——接收电路的频率由调谐电路固有频率 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ 决定。

规范解:

A 对: 中子由夸克组成, 整体电中性但内部有复杂结构。

B 对: 真空中的光速在不同惯性参考系中大小都相同 (狭义相对论基本假设)。

C 错: 增加线圈匝数使电感 L 增大, 调谐电路固有频率 $f = 1/2\pi\sqrt{LC}$ 减小, 接收的电台信号频率更低——不是“更高频率”。

D 错: 分子力从斥力区 ($r < r_0$) 过渡到引力区 ($r > r_0$) 时, 分子势能先减小 (趋向 r_0 平衡位置) 后增大, 不是“先增加后减少”。

选 **AB**。

易错点: C 项是本章考点——调谐频率与 $\sqrt{LC}$ 成反比, 增大电感会降低接收频率; D 项分子势能曲线在 r_0 处有极小值, 别把方向记反。

B2 解析 (2024·浙江 1 月选考)

思路: 逐项核对, 重点看 C 项——“电磁场是物质、电磁波有动量能量”是麦克斯韦电磁场理论的思想结论。

规范解:

A 错: 黑体在同一温度下吸收能力和辐射能力都是最强的 (“最强”是黑体的两大特征)。

B 错: 德布罗意波长 $\lambda = h/p$, 动能相同但电子质量远小于中子, 动量不同, 波长不同。

C 对: 电磁场是真实存在的物质形态, 电磁波携带动量 (辐射压) 和能量, 这是麦克斯韦电磁场理论的核心结论。

D 对: 自然光经玻璃表面反射后成为偏振光, 透过偏振片观察时转动偏振片, 透射光强周期性变化, 可观察到明暗变化。

选 **CD**。

易错点: C 项直接对应本章 18.1——电磁场是物质、电磁波有动量能量, 这既是理论又是 2017 年后教材反复强调的观点; B 项“动能相同 $\rightarrow$ 波长相同”是常见的错误直觉, 必须回到 $\lambda = h/p$ 看动量。

C 层·创新拓展

C1 解析 (5G 通信与电磁波)

思路： $\lambda = c/f$ ；频率高 $\rightarrow$ 波长短 $\rightarrow$ 绕射弱、穿透差 $\rightarrow$ 覆盖小。

规范解：

$$(1) \lambda_1 = c/f_1 = 3 \times 10^8 / (3.5 \times 10^9) \approx 0.086 \text{ m} \approx 8.6 \text{ cm}。$$

$$(2) \lambda_2 = 3 \times 10^8 / (2.6 \times 10^{10}) \approx 0.0115 \text{ m} \approx 1.15 \text{ cm}。$$

(3) 频率越高波长越短，电磁波衍射（绕射）能力越弱，遇到墙体等障碍物损耗越大、穿透能力越差，因此单个基站覆盖半径很小；毫米波（26 GHz）波长只有厘米级，几乎“见墙就挡”，所以 5G 尤其是毫米波频段需要比 4G 密集得多的基站布设。

答：3.5 GHz 波长约 8.6 cm；26 GHz 波长约 1.15 cm；频率高波长短导致覆盖小、需密集布站。

易错点：GHz 换算 Hz 要乘 10^9 ($3.5 \text{ GHz} = 3.5 \times 10^9 \text{ Hz}$)；毫米波波长确实在“毫米”量级 (1.15 cm 也常称厘米波)，这是题设情境的真实性所在。

C2 解析 (微波炉里的电磁波)

思路： $\lambda = c/f$ ；微波加热靠极性分子（水）在高频电场中翻转摩擦生热；金属屏蔽微波。

规范解：

$$(1) \lambda = c/f = 3 \times 10^8 / (2.45 \times 10^9) \approx 0.122 \text{ m} \approx 12.2 \text{ cm}。$$

(2) 水分子是极性分子（正负电荷中心不重合）。微波电场以 $2.45 \times 10^9 \text{ Hz}$ 的频率来回翻转，水分子跟随电场方向高速转向、彼此碰撞摩擦，把电磁能转化为内能——食物含水多，所以“从内部热起来”。

(3) 金属是良导体，能反射微波。金属内壁把微波约束在炉腔内反复反射，让食物充分吸收；同时防止微波泄漏到炉外伤害人体（炉门上的金属网孔尺寸远小于波长，同样能挡住微波）。

答：波长约 12.2 cm；微波使极性水分子高速翻转摩擦生热；金属内壁反射微波、防泄漏。

易错点：微波加热是“分子翻转摩擦生热”（不是红外辐射、不是简单传导）；炉门金属网能屏蔽微波的原因是其网孔远小于微波波长（12.2 cm），这是频率-波长关系的实际应用。

本章综合·S 层

S1 解析 (LC 振荡与电磁波综合)

思路：先换算单位 ($2.5 \mu\text{H}$ 、 100 pF)，再套 $T = 2\pi\sqrt{LC}$ 求频率， $\lambda = c/f$ 求波长；电容 4 倍 $\rightarrow$ 频率减半、波长加倍。

规范解：

$$(1) L = 2.5 \times 10^{-6} \text{ H}, C = 100 \times 10^{-12} \text{ F},$$

$$T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{2.5 \times 10^{-6} \times 10^{-10}} = 2\pi \times 1.58 \times 10^{-8} \approx 9.93 \times 10^{-8} \text{ s},$$

$$f = 1/T \approx 1.0 \times 10^7 \text{ Hz} = 10 \text{ MHz}。$$

(2) $\lambda = c/f = 3 \times 10^8 / 10^7 = 30 \text{ m}$ 。

(3) C 变为 4 倍: $\sqrt{LC}$ 变为 2 倍 $\rightarrow T$ 变为 2 倍 $\rightarrow f$ 减半为 5 MHz; λ 与 f 成反比, 变为 60 m。

答: 频率约 10 MHz; 波长 30 m; 电容 4 倍后频率 5 MHz、波长 60 m。

易错点: pF 是 10^{-12} F ($100 \text{ pF} = 10^{-10} \text{ F}$), 别按 nF 算; 频率减半、波长加倍的“跷跷板”关系 ($cf = c$ 恒定) 要会反向运用。

S2 解析 (电磁波谱综合)

思路: X 射线在谱中位置 (高频段) $\rightarrow$ 频率高、波长短; 所有电磁波真空中速度相同; 穿透性取决于光子能量 (频率)。

规范解:

(1) X 射线频率高、波长短 (位于谱的高频段, 波长约 $10^{-8} \sim 10^{-12} \text{ m}$, 远短于无线电波的 $10^{-1} \sim 10^4 \text{ m}$ 量级)。

(2) 两者在真空中的传播速度相同, 都是 $c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ——波速由介质 (真空) 决定, 与频率无关。

(3) 电磁波的光子能量 $E = hf$, 与频率成正比。X 射线频率极高、单个光子能量大, 能“穿透”人体软组织并在骨头上产生明显衰减, 从而在胶片/探测器上成像; 无线电波光子能量很小, 遇到人体组织主要被反射和吸收, 无法穿透成像。

答: X 射线频率高、波长短; 真空速度相同; X 射线光子能量大能穿透软组织成像, 无线电波能量低被吸收反射。

易错点: (1) 不同频率的电磁波在真空中速度相同, 别以为 X 射线“更快”——“频率高波长短”不等于“速度快”; (2) 穿透力取决于光子能量 (频率), 不是速度。

0.61 敏感元件

例题 19.1 解析

思考路径:

• 问“光敏电阻为什么光照强电阻小”——从导电本质想: 光照 $\rightarrow$ 半导体中载流子 (电子-空穴对) 增多 $\rightarrow$ 导电能力增强 $\rightarrow$ 电阻减小;

• 问“有什么用”——电阻变化可以变成电路电流/电压变化, 从而控制开关: 天黑电阻大、电流小, 电路状态改变让路灯亮; 天亮电阻小、路灯灭;

• 追问热敏电阻——负温度系数热敏电阻随温度升高电阻减小, 做温控 (过热报警、空调测温)。

规范解:

答: 光敏电阻受光照时半导体载流子增多、导电能力增强, 故电阻减小。利用它可做光

控电路：天黑时光照弱、电阻大，控制电路让路灯亮，天亮自动灭。热敏电阻随温度变化改变电阻，可做温控电路。

易错点：光敏、热敏电阻的本质都是“载流子浓度随外部物理量变化”；传感器的作用是“把非电学量转成电学量”，不是直接控制执行器。

A1 解析

思路：按“敏感元件类型 + 输入物理量 → 输出电学量”两问分别作答。

规范解：

- (1) 光敏电阻：把“光照强弱”变成“电阻大小”（光强 → 阻小）。
- (2) 负温度系数热敏电阻：把“温度高低”变成“电阻大小”（温高 → 阻小）。
- (3) 电容式传感器：把“手指触碰位置（改变极板间距/有效面积）”变成“电容变化”。
- (4) 霍尔传感器：把“转子磁极位置（磁场方向/大小）”变成“霍尔电压”。

答：见上。

易错点：把“物理量”和“电学量”答反（如“传感器把电阻变成光照”是错的）；电容式与霍尔式的“输入物理量”分别是位移（间距/面积）和磁场。

A2 解析

思路：天黑 → 光照弱 → 光敏电阻阻值大 → 串联电流小 → 但光敏电阻分压大 → 继电器两端电压达动作值吸合。

规范解：

天黑时光照减弱， $R_{光}$ 增大（如从 $1\text{ k}\Omega$ 增至 $9\text{ k}\Omega$ ）。串联电路总电阻增大，电流 $I = E/(R_{光} + R_0)$ 减小；但光敏电阻分得的电压 $U_{光} = E \cdot R_{光}/(R_{光} + R_0)$ 随 $R_{光}$ 增大而增大。当 $U_{光}$ 达到继电器动作电压时继电器吸合，触点闭合路灯亮。天亮时 $R_{光}$ 减小、 $U_{光}$ 降到释放值以下，继电器释放，路灯灭。

答：天黑时电流减小、光敏电阻两端电压增大，达动作电压即吸合亮灯。

易错点：“电流减小”与“电压增大”并不矛盾——串联电路中阻值大的元件分压大，电流虽小，光敏电阻两端电压却最高；别误以为“电流小 = 电压小”。

A3 解析

思路：逐项核对敏感元件的特性与传感器系统常识。

规范解：

(1) 错。光敏电阻阻值主要随光照变化，但也受温度、材料等影响，不能说“只与光照有关”。

(2) 对。负温度系数 (NTC) 热敏电阻：温度越高阻值越小。

(3) 对。霍尔电压与磁感应强度成正比 (霍尔效应 $U_H \propto B$)，可用它测磁场。

(4) 错。传感器输出信号很微弱，必须先经转换、放大电路，才能驱动继电器、电机等大功率执行器。

易错点：传感器的“信号链”里放大环节不可省——直接让传感器驱动大功率器件是概念错误；霍尔元件测的是磁感应强度，不是电流。

0.62 传感器系统

例题 19.2 解析

思考路径：

- 问“传感 → 控制”逻辑——先从敏感元件出发：光敏电阻感知光照；
- 天黑 → 光照弱 → 光敏电阻阻值大 → 所在支路电流小/电压分配改变；
- 电路状态变化 → 继电器动作 → 路灯亮；天亮反向 → 路灯灭；
- 完整链条：敏感元件 → 转换电路 → 放大 → 执行器。

规范解：

答：光敏电阻感知光照（天黑阻值增大）→ 桥式/分压电路输出电压变化 → 放大电路 → 继电器吸合 → 路灯亮。链条为：敏感元件（物理量 → 电学量）→ 转换电路 → 放大电路 → 执行器。

易错点：链条顺序不能乱——“物理量 → 电学量 → 控制电路 → 执行器”，其中“放大电路”在控制电路之前还是之后要看具体设计，但“敏感元件 → 电路 → 执行器”的大框架不变。

A4 解析

思路：光电式烟雾报警用“光被烟雾遮挡/散射”改变光敏元件状态；链条按“传感 → 控制”写。

规范解：

链条：烟雾（颗粒）→ 光敏元件（光被烟雾遮挡/散射，光敏电阻阻值或光电流变化）→ 检测/放大电路 → 报警器发声。

原理：无烟时检测光路正常，光敏元件状态稳定；有烟时烟雾进入探测腔，散射或遮挡光线，光敏元件的电学量突变，电路检测到变化并经放大后触发报警。

答：烟雾 → 光敏元件 → 检测放大电路 → 报警器。

易错点：光电式烟雾报警器靠“光路被扰动”触发，不是靠“热”或“声音”；回答时链条要完整，别漏掉中间电路环节。

A5 解析

思路：温度升高 $\rightarrow R_t$ (NTC) 减小 $\rightarrow$ 串联电流增大 $\rightarrow$ 定值电阻 R 两端电压增大 $\rightarrow$ 达到阈值报警。

规范解：

(1) 温度升高， R_t 阻值减小。

(2) R_t 减小使串联总电阻减小、电流增大，定值电阻 R 两端电压 $U_R = I \cdot R$ 增大。

(3) 能报警。推理链条：温度升高 $\rightarrow R_t$ 减小 $\rightarrow$ 电流增大 $\rightarrow R$ 两端电压升高 $\rightarrow$ 达到设定阈值 $\rightarrow$ 报警电路触发。

答：(1) 减小；(2) 增大；(3) 能，链条见上。

易错点：电压表并在定值电阻 R 上时，温度升高读数“增大”（因为电流增大）；若电压表并在 R_t 上则读数“减小”——先看清电压表测谁，再判断方向。

A6 解析

思路：回忆传感器系统三环节的完整链条。

规范解：物理量 $\rightarrow$ (敏感元件) $\rightarrow$ (转换/放大电路) $\rightarrow$ 执行器。

敏感元件：把物理量变成电阻、电压等电学量；转换/放大电路：把微弱的电学量信号放大、整定为可用的控制信号；执行器：根据信号完成显示、报警或控制动作。

答：敏感元件、转换/放大电路。

易错点：“执行器”和“传感器”是两个不同环节——执行器是最终“干活”的部件（灯泡、报警器、电机），传感器只是“感知”。

B 层·真题研习

B1 解析 (2023·浙江卷)

思路：逐项判断，A、C 两项直接对应本章传感器应用，B、D 两项分别考动量定理与动量守恒的适用条件。

规范解：

A 对：电容话筒中声波引起极板振动、电容变化，是电容传感器制成麦克风的典型应用。

B 对：由动量定理 $F \cdot \Delta t = \Delta p$ 得 $F = \Delta p / \Delta t$ ，合外力越大，动量变化越快。

C 对：商场自动门利用红外传感器探测人体发出的红外线（热辐射），人走近时触发开门。

D 错：动量守恒定律是比牛顿定律更普遍的规律，高速、微观等牛顿定律不适用的情况，动量守恒定律仍然适用。

选 ABC。

易错点：传感器真题常把“传感器应用”与力学、原子物理混在一道“说法题”里——逐项判断，别整体猜测；“牛顿不适用 $\rightarrow$ 动量也不适用”是经典错误选项。

B2 解析 (2022 · 全国乙卷)

思路：地磁场竖直分量在北半球向下 ($B_z < 0 \rightarrow$ 北半球)；地磁总大小 $B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2}$ ；水平分量在 xOy 平面内，指向地理北。

规范解：

A 错：四次测量 B_z 均为负 (约 $-45 \mu\text{T}$)，说明地磁场竖直分量向下——北半球地磁场是“向下倾斜”的，故测量地点在北半球。

B 对：第 1 次 $B = \sqrt{0^2 + 21^2 + 45^2} = \sqrt{2466} \approx 49.7 \mu\text{T} \approx 50 \mu\text{T}$ 。

C 对：第 2 次 $B_y = -20 \mu\text{T} < 0$ 。地磁场水平分量指向地理北，若 y 轴正向指向地理南，则地磁水平分量在 y 轴上的投影为负——与数据吻合，故 y 轴正向指向南方。

D 错：第 3 次 $B_x = 21 \mu\text{T} > 0$ ，说明 x 轴正向与地磁水平分量（指北）同向， x 轴指向北方，则 y 轴指向西方，不是东方。

选 **BC**。

易错点：(1) B_z 恒为负判断半球——北半球磁场向下、南半球向上，这是“说法题”的常见结论；(2) “ y 轴指向南方”的判断要结合“地磁水平分量指北、投影为负”两步，别只看符号。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (电容式触摸屏)

思路：电容式触摸屏的本质是“人体与导电膜构成电容”；绝缘手套隔断电容通路；水滴导电会引入额外电容。

规范解：

(1) 电容式传感器——靠电容变化检测触摸位置。

(2) 电容触摸屏需要“人体（导电）—导电膜”构成电容器。普通手套是绝缘体，阻断了电容的构成，系统检测不到电容变化；导电手套是导体，人体电荷能经手套传递，仍能与导电膜构成电容，因此可以操作。

(3) 水是导体，水滴落在屏幕上会在触摸点附近形成新的“导电区域”，等效于增大了该处电容或形成额外触点，检测电路可能误判为手指触摸——这就是雨天屏幕“乱跳”、误触的原因。

答：(1) 电容式；(2) 绝缘手套阻断导电通路；(3) 水滴导电改变局部电容造成误触。

易错点：电容触摸屏“靠电容变化”而非“靠压力”；手套问题的核心是“导电通路是否被切断”。

C2 解析 (霍尔传感器与无刷电机)

思路：霍尔电压 $U_H \propto B$ ；磁极交替扫过 $\rightarrow$ 电压高低交替；输出交替脉冲说明转子位置在周期变化、速度可通过脉冲频率读出。

规范解：

(1) 磁感应强度（磁场），霍尔元件把磁场变化变成霍尔电压变化。

(2) 转子磁极匀速转过时, 磁极 N (或 S) 正对霍尔元件时磁感应强度最大、霍尔电压最高; 转过中间空隙时磁场减弱、电压回落。磁极一个个匀速扫过, 霍尔电压呈周期性“高一低”脉冲 (近似梯形/正弦变化)。

(3) 说明转子磁极在按顺序交替经过霍尔元件: 输出“高一低—高一低”交替脉冲, 一方面表明转子在转动 (磁极位置周期性变化), 另一方面控制电路可依据这些脉冲的相位和频率, 判断转子位置、计算出转速并依次切换各相线圈电流——这就是无刷电机“换相”的依据。

答: (1) 磁感应强度; (2) 周期性高低脉冲; (3) 转子磁极交替扫过, 脉冲相位/频率反映转子位置与转速, 供控制电路换相。

易错点: 霍尔传感器测的是“磁场”, 输出的是“电压脉冲”; 无刷电机换相的本质是“用电子的开关代替了碳刷的机械换向”。

C3 解析 (利用传感器制作自动控制装置·光控路灯)

思路: 传感器 + 电磁继电器 = 自动控制的经典组合。光敏电阻把“光照”变成“电阻/电流”信号, 继电器用电磁铁控制触点通断。天黑时希望电流变化触发触点释放, 接通路灯。

规范解:

(1) 连接方案: 光敏电阻 R_G 与定值电阻 R_0 串联后接控制电源, 电磁继电器线圈与 R_0 并联 (线圈感知 R_0 两端电压/支路电流); 路灯接在继电器“常闭触点”上 (线圈吸合时触点断开、路灯灭; 释放时触点闭合、路灯亮)。

(2) 工作原理: 白天光照强 $\rightarrow R_G$ 阻值小 $\rightarrow$ 回路电流大 $\rightarrow$ 线圈吸合 $\rightarrow$ 常闭触点断开 $\rightarrow$ 路灯不亮; 天黑光照弱 $\rightarrow R_G$ 阻值增大 $\rightarrow$ 电流减小 $\rightarrow$ 线圈释放 $\rightarrow$ 常闭触点闭合 $\rightarrow$ 路灯点亮。

(3) 要求“天更黑才亮” = 触发阈值光强更低。应调小 R_0 : R_0 减小使白天回路电流更大 (更不容易降到释放阈值), 需要光照更弱 (R_G 更大) 电流才会降到阈值以下——亮灯推迟到更黑时。反之调大 R_0 则“更亮就亮”。

答: (1) R_G 与 R_0 串联 + 线圈并 R_0 , 路灯接常闭触点; (2) 光弱 $\rightarrow$ 电流小 $\rightarrow$ 释放 $\rightarrow$ 灯亮; (3) 调小 R_0 , 提高触发阈值光强。

易错点: (1) 路灯必须接“常闭触点”——接常开触点会变成“天亮亮灯”的冤种设计; (2) 光敏电阻阻值随光照减小 (与热敏电阻随温度减小的方向一致, 但别和“光照强电阻大”的直觉混); (3) 调整阈值方向: 想让“更极端条件才动作”, 就削弱信号的“富余量”——这里是调小 R_0 。

本章综合·S 层

S1 解析 (光控电路定量分析)

思路: 串联分压公式 $U = E \cdot R/(R+R_0)$ 分别代入两种情况; 动作阈值 4 V 落在两种状态电压之间即可实现控制; 故障排查按三个环节逐一分析。

规范解:

$$(1) \text{ 光照强: } U_{\text{光}} = \frac{6 \times 1}{1 + 1} = 3 \text{ V};$$

$$\text{黑暗: } U_{\text{光}} = \frac{6 \times 9}{9 + 1} = 5.4 \text{ V}。$$

(2) 能。继电器动作电压 4 V: 天黑时 $U_{\text{光}} = 5.4 \text{ V} > 4 \text{ V}$, 继电器吸合、路灯亮; 天亮时 $U_{\text{光}} = 3 \text{ V} < 4 \text{ V}$, 继电器释放、路灯灭。阈值 4 V 恰好在 3 V 与 5.4 V 之间, 逻辑成立。

(3) (1) 光敏电阻: 表面蒙尘、被树叶遮挡或被贴膜盖住, 天黑时阻值异常偏小 (未达到动作分压); (2) 电路连接: 串联电路虚焊、断路, 或电源电压不足, 分压达不到 4 V; (3) 继电器: 线圈断路、触点烧蚀卡死, 或动作电压漂移 (阈值升高) 导致 5.4 V 也不吸合。

答: (1) 3 V、5.4 V; (2) 能, 见上; (3) 见上。

易错点: 串联分压公式分母是“两电阻之和”; 判断能否控制的关键是“两种状态的电压分别在阈值两侧”; 故障排查要“敏感元件—电路—执行器”三环节都想到, 这是传感器实际应用的常见问法。

S2 解析 (传感器链条综合)

思路: 红外感应夜灯用热释电传感器感知人体热辐射; 链条按“感知—处理—执行”写; 菲涅尔透镜解决“探测范围”问题。

规范解:

(1) 人体红外传感器 (热释电) 把“人体发出的红外辐射 (热辐射) 变化”变成“微弱的电信号 (电荷/电压变化)”。

(2) 链条: 人体靠近 (红外辐射变化) → 热释电红外传感器 → 信号放大电路 → 控制电路 → 继电器/驱动电路 → 夜灯点亮。

(3) 菲涅尔透镜把探测区域内的红外辐射会聚到传感器上, 并把人体的移动转换成红外辐射的“亮暗交替”, 使传感器更容易感知“移动的人”——既扩大了探测范围, 又提高了移动检测灵敏度。

(4) 可能原因: (1) 红外传感器受热源干扰 (如阳光、热风、暖气片) 误触发; (2) 灵敏度调得过高, 阈值过低, 微小红外变化也被判为“有人”; (3) 白天/黑夜识别功能 (光照联动) 失效或被遮挡, 使夜灯在白天也响应。

答: (1) (2) (3) (4) 见上。

易错点: 热释电传感器本质上是“检测红外辐射变化”, 对静止物体不敏感——“人不动灯就灭”是正常现象; 菲涅尔透镜的作用是“会聚 + 造成明暗变化”, 两个作用都要答。

0.63 静电应用: 复印、除尘、起电、避雷

例题 20.1 解析

思考路径:

- 电场力直接用定义式 $F = qE$ ——电荷量 10^{-12} C 与场强 10^5 V/m 相乘;
- 重力 $G = mg$;

• 比较两者数量级，说明“库仑力让墨粉搬家”的底气。

• 预期检查： $F = 10^{-12} \times 10^5 = 10^{-7} \text{ N}$ ； $G = 5 \times 10^{-13} \times 10 = 5 \times 10^{-12} \text{ N}$ ；比值 $10^{-7}/5 \times 10^{-12} = 2 \times 10^4$ ，电场力比重力大 4 5 个数量级。

规范解：

$$F = qE = 10^{-12} \times 10^5 = 10^{-7} \text{ N};$$

$$G = mg = 5 \times 10^{-13} \times 10 = 5 \times 10^{-12} \text{ N};$$

$$F/G = 10^{-7}/(5 \times 10^{-12}) = 2 \times 10^4。$$

答：电场力 10^{-7} N ，重力 $5 \times 10^{-12} \text{ N}$ ，电场力是重力的 2×10^4 倍。

易错点：数量级计算要仔细数零 ($10^{-12} \times 10^5 = 10^{-7}$)；“大 5 个数量级”指 10^5 倍，本题 2×10^4 倍即约 4.3 个数量级——教材说“大 5 个数量级”是取整说法，具体比值按数据算。

A1 解析

思路：按教材五步流程排序，重点答“电荷画像”的形成。

规范解：正确顺序：充电 → 曝光 → 显影 → 转印 → 定影。

“电荷画像”的形成：黑暗中给硒鼓表面均匀充上静电荷；曝光时白纸部分反射的光照到鼓面，该区域硒由绝缘体变为导体、电荷经导体跑掉，而字迹部分不透光、电荷保留——于是鼓面上明暗分布对应电荷的“有/无”，形成一幅电荷画像。

答：充电 → 曝光 → 显影 → 转印 → 定影；电荷画像由“光照区域放电、暗区保电”形成。

易错点：流程顺序别颠倒（显影在曝光之后、转印在显影之后）；“电荷画像”不是墨粉形成的，而是静电荷的明暗分布，墨粉是显影时才吸附上去的。

A2 解析

思路：逐项用静电知识核对。

规范解：

(1) 错。避雷针不是“挡雷”，而是“引雷”——尖端电离形成导电通道，把云层电荷缓慢持续地导入大地。

(2) 对。正电荷在电场中受力方向与场强方向相同。

(3) 对。静电平衡时电荷只分布在外表面，球壳内腔场强为零——这就是范德格拉夫起电机“无限”堆电荷的原理。

(4) 对。显影时墨粉带负电，被鼓面上带正电的画像区吸引（异号相吸）。

答：(1) 错；(2) 对；(3) 对；(4) 对。

易错点：避雷针“引雷”而非“挡雷”是本卷反复强调的概念；静电平衡“腔内场强为零”是范德格拉夫起电机的物理基础。

0.64 磁场与现代科技：磁悬浮、无线充电、霍尔推进器

例题 20.2 解析

思考路径：

- 加速靠电场，用动能定理 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ——磁场只改变方向不做功；
- 代入： $q = e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， $U = 1000 \text{ V}$ ， $m = 2.2 \times 10^{-25} \text{ kg}$ ；
- $v = \sqrt{(2eU/m)}$ ；
- 预期检查：算得约 $3.8 \times 10^4 \text{ m/s} = 38 \text{ km/s}$ ，“每秒几十公里”，与霍尔推进器实际喷速吻合。

规范解：
$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_{Xe}}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1000}{2.2 \times 10^{-25}}} = \sqrt{1.45 \times 10^9} \approx 3.8 \times 10^4 \text{ m/s} \approx 38 \text{ km/s}。$$

答：喷出速度约 $3.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ (38 km/s)。

易错点：霍尔推进器里“磁场只管转向、电场负责加速”——用动能定理时必须用电压 U 乘电荷量 q ，不能混入磁场项；数量级 10^4 m/s 是“每秒几十公里”的来源。

A3 解析

思路：无线充电靠互感，感应电动势取决于穿过次级线圈的磁通量变化率；距离决定磁通量。

规范解：无线充电是互感原理：初级线圈通交流电，其磁场穿过手机内的次级线圈，感应出电动势。手机贴近充电板时，次级线圈处于磁场强且集中的区域，穿过它的磁通量变化大，感应电动势高、充电电流大；手机离开一点，穿过次级线圈的磁通量锐减，感应电动势骤降，充电电流减小，充电就明显变慢了。

答：距离增大 $\rightarrow$ 穿过次级线圈的磁通量锐减 $\rightarrow$ 感应电动势骤降 $\rightarrow$ 充电变慢。

易错点：感应电动势看“磁通量的变化”，而磁通量大小取决于“次级线圈处的磁感线密度”——离开发射线圈，磁感线迅速发散，磁通量骤减。

A4 解析

思路：斥力型悬浮靠“感应电流的磁场排斥磁体”——而感应电流的前提是“磁通量变化”。

规范解：超导电动悬浮（斥力型）中，车上超导磁体在运动时，其磁场扫过轨道线圈使磁通量变化，轨道线圈中感应出电流（楞次定律），感应电流的磁场与磁体相斥，产生悬浮力，且速度越快磁通量变化越快、斥力越大。静止时磁体与轨道线圈相对静止，磁通量不变，没有感应电流，也就没有斥力，所以悬浮不起来，必须先用轮子起步、等速度上来后才“浮”起来。

答：静止时无磁通量变化、无感应电流、无斥力，故必须用轮子起步。

** 易错点：“斥力型悬浮是”动态的“——”来拒去留“只在相对运动时出现；这与吸力型（通电电磁铁吸轨道，静止也能悬浮）形成鲜明对比，是楞次定律在工程中的经典考点。

A5 解析

思路：逐项用同步辐射、回旋加速器、霍尔推进器、无线充电的物理本质核对。

规范解：

(1) 对。带电粒子做圆周运动必然有向心加速度（速度方向时刻改变），时刻在“加速”，同步辐射就是电子转弯时“随手”发出的光。

(2) 错。回旋加速器最大动能 $E_k = q^2 B^2 R^2 / 2m$ ，只由 B 、 R 、 q/m 决定，与加速电压无关——电压大只是少转几圈、更快达到最大动能。

(3) 错。磁场（洛伦兹力）只改变离子运动方向、不做功；加速氦离子的是轴向电场（动能定理）。

(4) 对。感应电动势只与磁通量的变化率有关，直流电产生恒定磁场、磁通量不变，次级线圈感应不出电动势，所以必须用交流电。

答：(1) 对；(2) 错；(3) 错；(4) 对。

**** 易错点 “：(1)”** 最大动能与电压无关“是回旋加速器最经典的结论；(2) 磁场永不加速（洛伦兹力永不做功）——霍尔推进器里磁场”困电子“、电场”加速离子“，两者分工必须分清。

0.65 电路与现代科技：除颤器、加速器

A6 解析

思路：电容器储能公式直接套；除颤器“高压、短时、专用”是为了让能量集中、安全地作用在心脏上。

规范解：

$$(1) E = \frac{1}{2}CU^2。$$

$$(2) E = \frac{1}{2} \times 100 \times 10^{-6} \times 2000^2 = \frac{1}{2} \times 10^{-4} \times 4 \times 10^6 = 200 \text{ J}。$$

(3) 高压：保证放电瞬间产生足够大的电流，让全部心肌细胞同时除极（“重启”）；短时：放电时间极短（毫秒级），能量虽达几百焦，但热量来不及大面积散失，避免烧伤；专用通道（体外电极、低阻抗路径）：让电流按设计路径集中通过心脏，而不是散到全身。

答：(1) $E = \frac{1}{2}CU^2$ ；(2) 200 J；(3) 见上。

**** 易错点 “： $\frac{1}{2}CU^2$ 中 C 用法拉 ($100 \mu\text{F} = 10^{-4} \text{ F}$)、 U 用伏特，单位换算错会差很多数量级；” 200 J “是 200 焦耳，恰好落在临床除颤能量 200–400 J 范围内，数据自洽。**

B 层·真题研习

B1 解析 (2023·河北卷)

思路：放电电量 $Q = \bar{I} \cdot t$ ；由 $C = Q/U$ 求电容器（即副线圈输出）电压；该电压是副线圈输出的峰值，换有效值后再与 20 V 比较得匝数比。

规范解：放电电荷量 $Q = \bar{I} \cdot t = 2.8 \times 10^{-2} \text{ C}$ ；

电容器两端电压（即副线圈输出电压峰值） $U_m = \frac{Q}{C} = \frac{2.8 \times 10^{-2}}{2.0 \times 10^{-5}} = 1400 \text{ V}$ ；

副线圈电压有效值 $U_2 = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{1400}{1.414} \approx 990 \text{ V}$ ；

原线圈电压有效值 $U_1 = 20 \text{ V}$ ；

$n_1 : n_2 = U_1 : U_2 = 20 : 990 \approx 1 : 49.5 \approx 1 : 50$ 。

选 **B**。

**** 易错点 “：** (1) 电容充电电压是” 峰值 “(电容器充到正弦波的顶点)，必须先除 $\sqrt{2}$ 得有效值再比匝数；(2) 直接拿 $1400 \div 20 = 70$ 会错选 C (1:70)，这正是” 忘了除 $\sqrt{2}$ “的陷阱。

B2 解析 (2023 · 浙江卷)

思路：变压（升压/降压）只能在交流状态下进行；1100 kV 是直流电压值；输电功率由负载决定。

规范解：

A 对：送电端先升压（交流）再整流成直流，直流无法变压。

B 错：用户端应先把直流逆变成交流，再降压，顺序反了。

C 错：1100 kV 特高压直流是直流电压值，不是 “交流电最大值”。

D 错：输电功率由用户端负载消耗的总功率决定，不由送电端电压决定（电压只决定 “能送多少” 的上限）。

选 **A**。

**** 易错点 “：** 变压器只认交流——” 先升压后整流、先逆变后降压 “的顺序是本题核心；” 输电功率由负载决定 “与” 电压决定送电能力上限 “要分清。

C 层 · 创新拓展

C1 解析 (静电复印的量级)

思路： $F = qE$ 与 $G = mg$ 分别计算，再求比值；数量级对比说明 “静电主导”。

规范解：

(1) $F = qE = 10^{-12} \times 10^5 = 10^{-7} \text{ N}$ 。

(2) $G = mg = 5 \times 10^{-13} \times 10 = 5 \times 10^{-12} \text{ N}$ ；

$F/G = 10^{-7}/(5 \times 10^{-12}) = 2 \times 10^4$ 倍。

(3) 电场力是重力的 2 万倍——在复印机内部的强电场中，墨粉颗粒的运动完全由电场力支配，重力可以忽略不计，所以库仑力能 “指挥” 墨粉精确地搬到电荷画像上。

答：电场力 10^{-7} N ；重力 $5 \times 10^{-12} \text{ N}$ ，电场力是重力的 2×10^4 倍；静电作用在微观尺度上远强于重力。

**** 易错点 “：** $10^{-7} \div 5 \times 10^{-12} = 2 \times 10^4$ (不是 2×10^5) ——教材” 大 5 个数量级 “是约数，具体计算以数据为准。

C2 解析 (无线充电的量级)

思路： $I = P/U$ ；输入功率 = 输出功率 ÷ 效率；频率越高感应电动势越大 ($E \propto f\Phi$)。

规范解：

(1) $I = P/U = 15/10 = 1.5 \text{ A}$ 。

(2) $P_{\text{入}} = P_{\text{出}}/\eta = 15/0.7 \approx 21.4 \text{ W}$ 。

(3) 由法拉第定律，感应电动势与磁通量变化率成正比，即与频率成正比：频率越高，同样磁通量摆幅下每秒钟“切割”次数越多、感应电压越高。50 Hz 工频太低，次级线圈得绕很多匝才能得到可用电压；100–200 kHz 高频只需小巧的线圈就能感应出足够电压，还能通过提高频率减小变压器/线圈体积。因此 Qi 标准采用 100–200 kHz 高频。

答：次级电流 1.5 A；输入功率约 21.4 W；高频使感应更强、线圈更小。

**** 易错点 “：效率指” 输出 ÷ 输入 “($\eta = P_{\text{出}}/P_{\text{入}}$)，求输入要用” 输出 ÷ 效率 “；” 高频感应强 “的本质是 $E \propto \Delta\Phi/\Delta t \propto f$ 。**

C3 解析 (霍尔推进器的量级)

思路：动能定理求喷速；推力 = 质量流量 × 喷速 ($F = \dot{m}v$ ，动量定理的时间形式)；微弱推力靠“长时间持续累积”产生可观速度。

规范解：

(1) $v = \sqrt{\frac{2eU}{m}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1000}{2.2 \times 10^{-25}}} \approx 3.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ 。

(2) $F = \dot{m}v = 10^{-5} \times 3.8 \times 10^4 = 0.38 \text{ N}$ 。

(3) 太空近乎真空、没有空气阻力，推进器可以连续数月乃至数年地“慢慢推”。根据动量定理 $Ft = M\Delta v$ ，0.38 N 的推力虽小，但时间足够长 (t 很大)、所需速度增量 (轨道机动速度变化约每秒几十到几百米) 又不算大，累积起来足以让空间站完成大范围的轨道机动和姿态调整——这就是“小推力、长时间”的霍尔推进器哲学。

答：喷速约 $3.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ ；推力约 0.38 N；太空无阻力 + 长时间累积使小推力足够完成轨道机动。

**** 易错点 “： $F = \dot{m}v$ 中 $\dot{m}$ 是质量流量 (每秒质量)，推力单位牛顿；” $10 \text{ mg/s} = 10^{-5} \text{ kg/s}$ “的换算别错 ($1 \text{ mg} = 10^{-6} \text{ kg}$)。**

C4 解析 (回旋加速器)

思路：最大动能公式 $E_k = q^2 B^2 R^2 / 2m$ 直接套；电压加倍不影响最大动能，只影响加速圈数。

规范解：

(1) $E_k = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m} = \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2 \times 1^2 \times 1^2}{2 \times 1.67 \times 10^{-27}} = \frac{2.56 \times 10^{-38}}{3.34 \times 10^{-27}} \approx 7.66 \times 10^{-12} \text{ J}$ 。

换算成 MeV: $7.66 \times 10^{-12} \div 1.6 \times 10^{-13} \approx 48 \text{ MeV}$ 。

(2) 不变。最大动能 $E_k = q^2 B^2 R^2 / 2m$ 只由磁感应强度 B 、D 形盒半径 R 和粒子的比荷 q/m 决定，与加速电压无关。加速电压加倍只意味着每次加速获得的动能加倍、转的圈数减半，最终离开加速器时的最大动能不变。

答：最大动能约 $7.66 \times 10^{-12} \text{ J}$ (约 48 MeV)；电压加倍最大动能不变。

**** 易错点 “：**(1) 公式中的 R 是 D 形盒半径 (粒子最大回旋半径)，不是别的长度；(2)” 最大动能与电压无关 “结论只对” 每次加速只补 qU “的回旋加速器成立，别与直线加速器 ($E_k = nqU$ ，电压大动能大) 混淆。

本章综合 · S 层

S1 解析 (电磁学在现代科技中的映射)

思路：逐项 “回挂” 教材对应章节的定律，这是本章 “把课本和世界连起来” 的核心能力。

规范解：

- (1) 手机无线充电——互感 (电磁感应，第 13 章)；
- (2) 磁悬浮列车——楞次定律 (感应电流阻碍相对运动)、安培力 (第 13 章、第 10 章)；
- (3) 心脏除颤器——电容器储能 $E = \frac{1}{2}CU^2$ (第 5 章)；
- (4) 同步辐射光源——洛伦兹力、带电粒子圆周运动 (第 11 章)；
- (5) 霍尔推进器——动能定理 (电场加速) + 动量守恒 (反冲推进) (第 20 章、第 4 章)；
- (6) 静电复印机——库仑定律、光电导效应 (第 1 章、第 20 章)；
- (7) 避雷针——尖端放电、静电平衡 (第 5 章)；
- (8) 高压输电网中的变压器——互感、理想变压器规律 (第 17 章)。

答：见上。

**** 易错点 “：**映射题要” 看到装置想到定律 “——无线充电想到互感、磁悬浮想到楞次定律、除颤器想到电容，这正是本卷” 从课本到现代科技 “的考核方式。

S2 解析 (霍尔推进器：动量与能量压轴)

思路：动量 = 质量 $\times$ 速度 (每秒的动量即 F)；推力 $F = \dot{m}v$ ；速度变化用动量定理 $Ft = M\Delta v$ ；省燃料的比较依据是 “同样推力下喷速越高、所需质量流量越小”。

规范解：

- (1) 每秒喷出离子动量 $p = \dot{m} \cdot v = 2 \times 10^{-5} \times 4 \times 10^4 = 0.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ 。
- (2) 推力 $F = \Delta p / \Delta t = 0.8 \text{ N}$ 。
- (3) $Ft = M\Delta v \rightarrow \Delta v = Ft/M = 0.8 \times 3600 / (8 \times 10^4) = 2880/80000 = 0.036 \text{ m/s}$ 。

(4) 推力 $F = \dot{m}v$ (即单位时间喷出的动量)。要产生同样大小的推力 F ，喷出速度 v 越大，所需质量流量 $\dot{m} = F/v$ 越小。化学火箭喷速约 3 km/s ，霍尔推进器喷速约 40 km/s (约 13 倍)，所以同样推力下所需工质流量约小 13 倍 (一个量级)——这就是 “同样推力省约 10 倍燃料” 的由来。

答：(1) $0.8 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ ；(2) 0.8 N ；(3) 0.036 m/s ；(4) $F = \dot{m}v$ ，喷速越高所需质量流量越小，喷速差约 13 倍故工质节省约一个量级。

**** 易错点 “：**(1) 推力即” 单位时间动量的输出 “($F = \Delta p / \Delta t = \dot{m}v$)，这是动量定理的时间形式；(2) 空间站速度增量很小 (1 小时仅 0.036 m/s)，但长年累月累积就足以完成轨道机动——

这正是小推力的意义；(3)”省燃料“的比较基准是”同样推力“下看喷速。

一、单项选择题

Z1 解析

思路：由瞬时式 $u = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t)$ V 读峰值 $U_m = 220\sqrt{2}$ V，有效值 $U = U_m/\sqrt{2} = 220$ V； $I = U/R$ ； $\omega = 100\pi \rightarrow f = 50$ Hz、 $T = 0.02$ s。

规范解： $U = 220$ V， $I = 220/110 = 2$ A， $I_m = I\sqrt{2} = 2\sqrt{2}$ A； $f = 100\pi/2\pi = 50$ Hz， $T = 0.02$ s。

A 对，B、C、D 错。选 A。

易错点： $220\sqrt{2}$ 是峰值不是有效值；频率 $f = \omega/2\pi = 50$ Hz（100 Hz 是把 ω 直接当频率的经典错误）；周期 $T = 2\pi/\omega = 0.02$ s。

Z2 解析

思路：匝数比定电压 $U_2 = U_1 \cdot n_2/n_1$ ；副线圈电流 $I_2 = U_2/R$ ；原线圈电流用反比 $I_1 = I_2 \cdot n_2/n_1$ ；理想变压器功率守恒。

规范解： $U_2 = 220 \times 1/2 = 110$ V； $I_2 = 110/5.5 = 20$ A； $I_1 = 20 \times 1/2 = 10$ A； $P_1 = P_2$ 。

A 对，B、C、D 错。选 A。

易错点：电流比是反比（ $I_1/I_2 = n_2/n_1 = 1/2$ ）， $I_1 = 10$ A 而不是 40 A；“功率之比 2:1”是错误的——理想变压器功率处处守恒， $P_1 = P_2$ 。

Z3 解析

思路： $f = c/\lambda = 3 \times 10^8/15 = 2 \times 10^7$ Hz = 20 MHz；20 MHz 属于无线电波（短波/调频广播）波段。

规范解： $f = c/\lambda = 2 \times 10^7$ Hz。频率 10^6 10^8 Hz 属于无线电波波段（微波一般指 10^8 10^{11} Hz）。选 A。

易错点： $f = c/\lambda$ 代 λ 时用米（15 m 已是国际单位）；20 MHz 不是微波——无线电波与微波的分界在 10^8 Hz（300 MHz）量级，别把“高频无线电”都当成微波。

Z4 解析

思路： $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ，单位换算后代入。

规范解： $T = 2\pi\sqrt{(0.5 \times 10^{-3} \times 0.2 \times 10^{-6})} = 2\pi\sqrt{(10^{-10})} = 2\pi \times 10^{-5} \approx 6.3 \times 10^{-5}$ s。

选 A。

易错点： $\sqrt{LC}$ 里 L 用 H、C 用 F（ 0.5 mH = 5×10^{-4} H， 0.2 μ F = 2×10^{-7} F，乘积 = 10^{-10} ）；忘了乘 2π 会得 1×10^{-5} s（错选 B）。

Z5 解析

思路：光照增强 → 光敏电阻阻值减小 → 串联电路总电阻减小 → 电流增大 → 定值电阻两端电压增大（而光敏电阻分压减小）。

规范解： $R_{\text{光}}$ 减小 → 总电阻减小 → I 增大 → $U_{R0} = I \cdot R_0$ 增大， $U_{\text{光}} = E - U_{R0}$ 减小。电源电压不变。

A 错（总电阻减小、电流增大）；B 错（光敏电阻电压减小）；C 对；D 错（电源电压不变）。选 C。

易错点：串联电路“阻值大者分压大”——光敏电阻阻值减小，它分到的电压反而减小，定值电阻分压增大；别把“电阻减小 → 电压增大”套在光敏电阻自己身上。

二、多项选择题

Z6 解析

思路：逐项用输电原理核对—— $I = P/U$ ， $PL = I^2 r$ ，理想变压器功率守恒。

规范解：

A 对：输送功率一定时升压 → 电流减小 → 线损 $I^2 r$ 减小。

B 对： $PL = I^2 r$ ，与电流平方成正比。

C 错：升压变压器 $n_2 > n_1$ ，由 $I_1/I_2 = n_2/n_1$ 得 $I_1 > I_2$ ，副线圈电流更小。

D 对：输送功率一定时， $PL \propto 1/U^2$ ，电压越高线损越小。

选 ABD。

易错点：升压变压器“副线圈电压高、电流小”，C 项把它说反了；线损“平方正比电流”决定了升压输电的巨大价值。

Z7 解析

思路：逐项对照“四值”的适用场景。

规范解：

A 对：热量、功率是平均效果，必须用有效值。

B 错：交流电流表、电压表读数是有效值，不是峰值。

C 对：电容器是否被击穿看峰值（峰值瞬间电压最高）。

D 对：正弦交流电平均值为零，而热量是“平方平均”（有效值），所以平均值不能用来算热量。

选 ACD。

易错点：电表读数 = 有效值是高频考点，B 项是送分陷阱；“平均值不能算热量”与“有效值

才能算热量”是一对结论。

Z8 解析

思路：回顾发电机的两个特殊位置与峰值公式。

规范解：

A 对：中性面处磁通量最大、变化率为零，感应电流为零（恰在此处换向）。

B 对：线圈平面平行磁场时磁通量为零、变化率最大，感应电动势最大。

C 对：每经过中性面一次方向改变一次，转动一周经过两次中性面，方向改变两次。

D 错： $E_m = nBS\omega$ ， $\omega = 2\pi n$ 转，峰值随转速增大而增大。

选 ABC。

易错点：“中性面磁通量大但电流小”与“平行磁场磁通量零但电流大”的相位关系； E_m 与转速成正比（转速加快，峰值和频率同时增大）。

三、实验题

Z9 解析

思路：串联分压 $I = E/(R_t + R_0)$ ， $U_{R_0} = I \cdot R_0$ ；阈值取在“30 °C 与 60 °C 两状态电压之间”；链条按“敏感元件 → 电路 → 执行器”写。

规范解：

(1) 30 °C： $R_t = 2 \text{ k}\Omega$ ，总电阻 7 k Ω ， $I = 3/7000 \approx 4.29 \times 10^{-4} \text{ A}$ ，

$U_{R_0} = 5 \times 10^3 \times 4.29 \times 10^{-4} \approx 2.14 \text{ V}$ 。

60 °C： $R_t = 0.5 \text{ k}\Omega$ ，总电阻 5.5 k Ω ， $I = 3/5500 \approx 5.45 \times 10^{-4} \text{ A}$ ，

$U_{R_0} = 5 \times 10^3 \times 5.45 \times 10^{-4} \approx 2.73 \text{ V}$ 。

(2) 温度升高时 R_t 减小、电流增大、 R_0 两端电压增大（从 2.14 V 升到 2.73 V）。要“60 °C 报警”，阈值应设在 2.14 V 与 2.73 V 之间，例如取 2.5 V：温度升到约 50 °C 附近电压超过 2.5 V 即触发报警（留出报警提前量），到 60 °C 时电压 2.73 V 已远超过阈值，确保报警。

(3) 链条：温度升高（物理量）→ 热敏电阻阻值减小（敏感元件）→ 串联电流增大、 R_0 两端电压升高（转换电路）→ 电压超阈值（比较/放大电路）→ 报警器动作（执行器）。

答：(1) 2.14 V、2.73 V；(2) 阈值取 2.5 V（介于两状态电压之间）；(3) 链条见上。

易错点：阈值必须落在“正常态电压”与“报警态电压”之间，取 2.73 V 附近或以下都算合理（实际取 2.5 V 留余量）；“电压表并在定值电阻上”时温度升高读数增大，判断链条别弄反。

四、计算题

Z10 解析

思路：转速换算频率 $\rightarrow E_m = nBS\omega \rightarrow$ 有效值 $\rightarrow$ 闭合电路欧姆定律 $\rightarrow$ 功率；平均电动势用 $\bar{E} = n\Delta\Phi/\Delta t$ ， Δt 取四分之一周期。

规范解：

$$(1) f = 1200/60 = 20 \text{ Hz}, \omega = 2\pi f = 40\pi \text{ rad/s};$$

$$E_m = nBS\omega = 100 \times 0.5 \times 0.1 \times 40\pi = 200\pi \approx 628 \text{ V};$$

$$E = \frac{E_m}{\sqrt{2}} = \frac{200\pi}{\sqrt{2}} \approx 444 \text{ V}.$$

$$(2) I = \frac{E}{R+r} = \frac{444}{12} \approx 37 \text{ A};$$

$$P = I^2 R = 37^2 \times 10 \approx 1.37 \times 10^4 \text{ W}.$$

$$(3) \text{ 转过 } 90^\circ \text{ 时磁通量由 } BS \text{ 变为 } 0: \Delta\Phi = BS = 0.5 \times 0.1 = 0.05 \text{ Wb};$$

$$\Delta t = T/4 = 1/(4 \times 20) = 0.0125 \text{ s};$$

$$\bar{E} = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100 \times \frac{0.05}{0.0125} = 400 \text{ V}.$$

答：峰值约 628 V、有效值约 444 V；电流约 37 A、功率约 1.37×10^4 W；转过 90° 的平均电动势 400 V。

易错点：平均电动势 $\bar{E} = n\Delta\Phi/\Delta t$ 用的是“磁通量变化量”而非“变化率”的瞬时值，且 Δt 是四分之一周期；注意电动势有效值用于电流，而“平均电动势”只用于计算某段时间的电荷量或平均电压，两者不要混用。

Z11 解析

思路： $I = P/U$ 求电流， $PL = I^2 r$ 求线损；功率翻倍 $\rightarrow$ 电流翻倍 $\rightarrow$ 线损变 4 倍；反推电压下限。

规范解：

$$(1) I = P/U = 2 \times 10^5 / 4 \times 10^4 = 5 \text{ A};$$

$$PL = I^2 r = 25 \times 10 = 250 \text{ W}.$$

$$(2) P' = 400 \text{ kW}: I' = 4 \times 10^5 / 4 \times 10^4 = 10 \text{ A};$$

$PL' = 10^2 \times 10 = 1000 \text{ W} = 1 \text{ kW}$ ，是原来的 $1000/250 = 4$ 倍（电流变为 2 倍，线损变为 $2^2 = 4$ 倍）。

$$(3) \text{ 要求 } PL \leq 2\% \times P = 4000 \text{ W}: I \leq \sqrt{(4000/10)} = 20 \text{ A};$$

$$U \geq P/I = 2 \times 10^5 / 20 = 10^4 \text{ V} = 10 \text{ kV}.$$

答：(1) 5 A、250 W；(2) 1 kW，为原来的 4 倍；(3) 输电电压至少 10 kV。

易错点：线损与电流平方成正比——输出功率翻倍（电压不变）则电流翻倍、线损变 4 倍；“至少”要求用 $\leq$ 反推上限电流、再反推下限电压，别用原电压硬除。

Z12 解析

思路： $r = mv/qB$ 、 $T = 2\pi m/qB$ 黄金公式直接套；动能 $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ ；回旋加速器最大动能 $E_k = q^2 B^2 R^2 / 2m$ 。

规范解：

$$(1) \quad r = \frac{mv}{qB} = \frac{1.67 \times 10^{-27} \times 2 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5} = \frac{3.34 \times 10^{-21}}{8 \times 10^{-20}} \approx 0.0418 \text{ m} \approx 4.2 \text{ cm};$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi \times 1.67 \times 10^{-27}}{1.6 \times 10^{-19} \times 0.5} \approx 1.31 \times 10^{-7} \text{ s}。$$

$$(2) \quad E_k = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2} \times 1.67 \times 10^{-27} \times (2 \times 10^6)^2 = 3.34 \times 10^{-15} \text{ J};$$

换算： $3.34 \times 10^{-15} \div 1.6 \times 10^{-16} = 20.9 \text{ keV}$ ($1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$, $1 \text{ keV} = 1.6 \times 10^{-16} \text{ J}$)。

(3) 由 $E_k = q^2 B^2 R^2 / 2m$ 可知，最大动能只由 B 、 R 、 q/m 决定。要让质子动能更大，应：
(1) 增大磁感应强度 B ；(2) 增大 D 形盒半径 R (二者都可)。增大加速电压不能提高最大动能，只能减少加速圈数。

答：(1) 约 4.2 cm 、约 $1.31 \times 10^{-7} \text{ s}$ ；(2) $3.34 \times 10^{-15} \text{ J} \approx 20.9 \text{ keV}$ ；(3) 增大 B 或增大 R 。

易错点：(1) r 、 T 公式别混 ($r \propto v$, T 与 v 无关)；(2) keV 换算： $1 \text{ keV} = 10^3 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-16} \text{ J}$, $\div$ 时数清指数；(3) “最大动能与电压无关”——只认 B 、 R 、 q/m 。

Z13 解析 (压轴 · 电磁感应综合)

思路：动生电动势 $E = BLv \rightarrow$ 欧姆定律 $\rightarrow$ 安培力 $F_{\text{安}} = BIL$ (与运动方向相反) $\rightarrow$ 牛顿第二定律；最大速度时安培力等于外力 (匀速)；能量守恒：外力功率 = 回路电功率 (无摩擦损耗)。

规范解：

(1) $v = 2 \text{ m/s}$ 时：

$$E = BLv = 0.5 \times 1 \times 2 = 1 \text{ V};$$

$$I = E/R = 1/0.5 = 2 \text{ A};$$

$$F_{\text{安}} = BIL = 0.5 \times 2 \times 1 = 1 \text{ N} \text{ (水平向左, 阻碍运动)};$$

$$\text{合力 } F - F_{\text{安}} = 1 - 1 = 0, \quad a = 0。$$

(2) 最大速度对应 “外力 = 安培力”：

$$F = F_{\text{安}} = BIL, \quad I = BLv_{\text{max}}/R,$$

$$F = B^2 L^2 v_{\text{max}} / R \rightarrow v_{\text{max}} = \frac{FR}{B^2 L^2} = \frac{1 \times 0.5}{0.5^2 \times 1^2} = \frac{0.5}{0.25} = 2 \text{ m/s}。$$

(3) $v_0 = 4 \text{ m/s}$ 匀速：

$$E = BLv_0 = 2 \text{ V}; \quad I = 4 \text{ A}; \quad F_{\text{安}} = BIL = 2 \text{ N};$$

$$\text{外力必须 } F_{\text{外}} = F_{\text{安}} = 2 \text{ N};$$

$$P_{\text{外}} = F_{\text{外}} \cdot v_0 = 2 \times 4 = 8 \text{ W};$$

$$P_{\text{电}} = I^2 R = 16 \times 0.5 = 8 \text{ W}。$$

$P_{\text{外}} = P_{\text{电}} = 8 \text{ W}$ ，能量守恒（外力做的功全部转化为回路焦耳热）。

答：(1) $E = 1 \text{ V}$ 、 $I = 2 \text{ A}$ 、 $F_{\text{安}} = 1 \text{ N}$ 、 $a = 0$ ；(2) $v_{\text{max}} = 2 \text{ m/s}$ ；(3) $P_{\text{外}} = P_{\text{电}} = 8 \text{ W}$ ，能量守恒成立。

易错点：(1) 最大速度条件“ $F = F_{\text{安}}$ ”（此时加速度为零、速度不再增大），若直接用 $v = at$ 算会错——这是恒力滑轨模型的核心；(2) 安培力总与运动方向相反（阻碍相对运动，楞次定律的表现）；(3) 匀速时外力功率全部转化为电功率， $P_{\text{外}} = P_{\text{电}} = 8 \text{ W}$ 是能量守恒的直接验证。