

GRADUS

物理 II

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？	3
0.4 场的思想：法拉第的力线	4
0.5 电场强度：场的“强度读数”	5
0.6 点电荷的场强与叠加	5
0.7 匀强电场	6
0.8 电荷组的场：等量同号与等量异号	6
0.9 电场力做功与电势能	9
0.10 电势：电势能的“强度读数”	9
0.11 电势差与场强的关系： $U = Ed$	10
0.12 场强与电势的关系辨析（高频易错）	10
0.13 图像分析法：电势图、场强图、势能图	11
0.14 匀加与匀减：电场力做功，能量说了算	13
0.15 偏转：类平抛的标准动作	14
0.16 组合：先加速后偏转（示波器模型）	14
0.17 技法小结：电场运动题的三板斧	15
0.18 电容：储存电荷的本领	17
0.19 平行板电容器的决定式	18
0.20 静电的利用与防范	19
0.21 电流：电荷的定向移动	21
0.22 电阻与欧姆定律	22
0.23 伏安法测电阻（实验）	23
0.24 电表改装：一个表头，三种表	23
0.25 电动势与内阻	25

0.26 闭合电路欧姆定律	25
0.27 动态电路分析 (含容/含表)	26
0.28 实验: 测电源的电动势和内阻	27
0.29 多用电表: 电表里的“瑞士军刀”	28
0.30 电功与电功率	29
0.31 焦耳定律与非纯电阻	30
0.32 最大功率: 滑动变阻器怎么取?	31
0.33 磁现象与磁感线	33
0.34 电流的磁场: 右手螺旋定则 (安培定则)	33
0.35 磁感应强度: 磁场版的“场强”	34
0.36 安培力的大小与方向	37
0.37 平行导线相互作用	37
0.38 安培力与运动学 (伏笔)	38
0.39 洛伦兹力: 磁场给运动电荷的“横刀”	40
0.40 最重要的性质: 洛伦兹力永不做功	41
0.41 圆周运动: r 和 T 的黄金公式	41
0.42 质谱仪: 用半径分辨质量	42
0.43 回旋加速器: 电加速、磁回旋	42
0.44 有界磁场: 找圆心, 定半径, 算轨迹	43
0.45 叠加场: 重力、电场、磁场同场竞技	43
0.46 磁铁插线圈: 先看现象	46
0.47 磁通量: 数一数穿过线圈的磁感线	47
0.48 感应电流的条件: Φ 要变, 不是 Φ 大	47
0.49 法拉第定律: 电动势是变化率, 不是变化量	50
0.50 楞次定律: 电流为什么总“阻碍”变化	50
0.51 互感与自感 (变压器与电感的前置)	50
0.52 感应图像的“四件套”与电量通式	51
0.53 动生电动势: 导体棒切磁感线	53
0.54 恒力滑轨: 终极速度	54
0.55 自感: 电路的“惯性”	57
0.56 涡流: 变化的磁场在金属里“搅出”电流	58
0.57 正弦交流电的产生	60

0.58 有效值：交流电的“等效直流”	61
0.59 电感与电容对交流的阻碍	62
0.60 变压器：互感升降压	64
0.61 远距离输电：为什么要升压	66
0.62 麦克斯韦电磁场理论	69
0.63 电磁波谱与应用	70
0.64 LC 振荡电路与电磁波的发射、接收	70
0.65 敏感元件	72
0.66 传感器系统	73
0.67 静电应用：复印、除尘、起电、避雷	76
0.68 磁场与现代科技：磁悬浮、无线充电、霍尔推进器	77
0.69 电路与现代科技：除颤器、加速器	78

0.1 摩擦起电与电荷守恒

考点精要

- Q1 摩擦起电的实质是什么？

A 不是“创造电荷”，而是电子从一个物体转移到另一个物体——得到电子带负电、失去电子带正电，口诀四个字：得负失正。

- Q2 摩擦起电遵守什么守恒定律？

A 电荷守恒定律：电荷既不能创生也不能消灭，只能转移；摩擦前后两个物体的总电荷量不变。

- Q3 两个完全相同的带电金属小球接触后再分开，电荷如何分配？

A 先“中和”再“均分”——把两球总电荷量相加再除以 2，每球各带一半。

- Q4 电荷“均分”的前提是什么？

A 两球必须完全相同（大小、形状、材料相同）；接触顺序会影响每一步的结果，按顺序一步步算。

例题 1.1

三个完全相同的金属小球 A、B、C，A 带电荷量 $+4q$ ，B 带电荷量 $-2q$ ，C 不带电。先用 C 接触 A，再接触 B，求最终三球的电荷量。

A 层 · 基础过关

A1. 用丝绸摩擦玻璃棒，玻璃棒带_____电，丝绸带_____电；用毛皮摩擦橡胶棒，橡胶棒带_____电。摩擦起电的实质是_____（填“创造了电荷”或“电子转移”）；谁得到电子，谁就带_____电。

A2. 一个不带电的金属小球与另一个带 $+3q$ 的完全相同金属小球接触后分开，两球各带多少电荷？接触前后两球的总电荷量分别是多少？

A3. 三个完全相同的金属小球 A（带 $+6q$ ）、B（带 $-4q$ ）、C（不带电）。先将 C 与 A 接触，再将 C 与 B 接触，求最终三球的电荷量，并验算总电荷量是否守恒。

0.2 库仑定律

考点精要

- Q5 库仑定律的表达式与适用条件是什么？

A $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$, $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$; 适用于真空中静止点电荷 (带电体大小远小于间距)。

- Q6 计算库仑力时, 正负号怎么处理？

A 公式只代绝对值算大小; 方向靠“同号相斥、异号相吸”判断——正负号决定方向, 不决定大小。

- Q7 距离变为 n 倍、电荷量变为 m 倍, 库仑力怎么变？

A 距离变 n 倍, 力变为 $1/n^2$ (平方反比); 电荷量变 m 倍, 力变 m 倍。

- Q8 库仑定律与万有引力有什么相同与不同？

A 相同: 都是平方反比、都“隔空”作用、都与两物体有关; 不同: 电荷有正负 (力可斥可吸), 质量只有正 (只有引力), 常量和适用对象不同。

例题 1.2

两个点电荷 $q_1 = +2 \times 10^{-8} \text{ C}$ 、 $q_2 = -1 \times 10^{-8} \text{ C}$ 相距 $r = 0.3 \text{ m}$, 求它们之间的静电力 (大小与方向)。

例题 1.3

氢原子中电子与质子相距 $r = 5.3 \times 10^{-11} \text{ m}$ 。已知电子电荷量 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 质子质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。求电子与质子间的库仑力 F_E 与万有引力 F_G , 并比较二者大小 (取 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$)。

A 层 · 基础过关

A4. 两个点电荷 $q_1 = +3 \times 10^{-8} \text{ C}$ 、 $q_2 = -6 \times 10^{-8} \text{ C}$ 相距 $r = 0.3 \text{ m}$, 求它们之间的静电力 (大小与方向)。

A5. 两个点电荷间的距离变为原来的 3 倍, 静电力变为原来的几分之几? 若同时把其中一个电荷量增大为原来的 4 倍, 力又变为原来的多少?

A6. 两个点电荷 $+Q$ 与 $-Q$ 分别位于 x 轴上 $x = -a$ 与 $x = +a$ 处 (相距 $2a$)。把电荷量为 $+q$ 的点电荷放在原点 O , 求它所受的合力。

A7. 判断下列说法是否正确, 并说明理由:

- (1) 当两个带电体间的距离 $r \rightarrow 0$ 时, 库仑力 $F \rightarrow$ 无穷大;
- (2) 库仑定律适用于任意两个带电体之间的作用力;
- (3) 摩擦起电“创造”了正负电荷。

0.3 一个悬而未决的问题: 电荷凭什么“隔空”施力?

考点精要

• Q9 电荷凭什么能“隔空”施力?

A 电荷在周围空间激发电场, 另一电荷感受到“自己所在处”的电场而受力——力经由“场”一步步传递, 不是超距作用。

A 层·基础过关

A8. 两个电子相距 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m}$ 。已知电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, 电子电荷量 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, 求两个电子间的库仑力与万有引力之比, 并据此说明微观世界里为什么引力可以忽略 ($k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$, $G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{kg}^2$)。

B 层·真题研习

B1. (2023·上海学业水平等级考) 三个大小相同的导体小球 x 、 y 、 z 分别带电 $+4 \mu\text{C}$ 、 $0 \mu\text{C}$ 和 $-10 \mu\text{C}$ 。小球 x 先与小球 y 接触, 分开后小球 y 再与小球 z 接触, 最后小球 y 的带电量为 ()

A. $-4 \mu\text{C}$ B. $-3 \mu\text{C}$ C. $-2 \mu\text{C}$ D. $-1 \mu\text{C}$

B2. (2022·上海物理学业水平测试) 水平面上有一带电量为 Q 的均匀带电圆环, 圆心为 O , 其中央轴线上距离 O 点为 d 的位置处也有带电量为 q 的点电荷。若点电荷受到的电场力为 F , 则 F _____ $k \frac{Qq}{d^2}$ (选填“>”、“<”或“=”); 静电力常量 k 的单位为 _____ (用 SI 单位制中的基本单位表示)。

C 层·创新拓展

C1. (静电喷漆·同号相斥) 静电喷漆时, 喷枪使漆雾颗粒带上同种电荷, 颗粒之间相互排斥, 漆雾才能均匀地覆盖到工件表面。设两个相邻漆雾颗粒均可视为点电荷, 各带电荷量 $q = 1.0 \times 10^{-12} \text{ C}$, 相距 $r = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$, 颗粒质量 $m = 5.0 \times 10^{-13} \text{ kg}$ (约为半径 $5 \mu\text{m}$ 的小液滴)。

- (1) 求两颗粒间的库仑斥力大小;
- (2) 求该斥力与颗粒所受重力的比值, 说明为什么“静电雾化”能让漆雾散开而不粘连;

(3) 若每个颗粒的带电量增大为原来的 2 倍, 斥力变为原来的几倍?

C2. (静电复印·墨粉吸附) 静电复印机中, 感光鼓表面先带上正电荷, 形成“静电潜像”; 墨粉颗粒带负电, 被潜像的库仑引力吸到鼓面上, 再转印到纸上。设鼓面潜像处的等效电荷可视为点电荷 $Q = +2.0 \times 10^{-9} \text{ C}$, 一颗墨粉颗粒带电荷 $q = -3.0 \times 10^{-14} \text{ C}$ 、质量 $m = 8.0 \times 10^{-15} \text{ kg}$, 初始时颗粒距鼓面 $d = 1.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。

(1) 求初始时刻墨粉颗粒所受的库仑引力;

(2) 求颗粒在鼓面吸引力作用下获得的加速度, 以及被吸到鼓面所需的时间 (近似匀加速);

(3) 该引力约为颗粒重力的多少倍? 这说明什么问题?

本章综合·S 层

S1. (接触均分·库仑定律·平方反比) 三个完全相同的金属小球 A、B、C, A 带电荷量 $+8q$, B 带电荷量 $-2q$, C 不带电。

(1) 先将 C 与 A 接触、再与 B 接触, 求最终三球的电荷量;

(2) 之后将 A、B 两球相距 r 放置, 求它们之间的库仑力 (大小与方向, 用 q 、 r 、 k 表示);

(3) 若把 A、B 间距增大为 $2r$, 库仑力变为原来的多少?

(4) 为什么完全相同的小球接触后电荷会“平均分”? 用电荷守恒和对称性说明。

S2. (三点电荷平衡) 相距 L 的两点 A、B 上分别固定电荷量 $+Q$ 和 $+4Q$ 的点电荷, 在 A、B 连线上再放一个电荷量为 q 的第三个点电荷, 使它在静电力作用下保持静止。

(1) 第三个电荷应放在什么位置?

(2) 第三个电荷带正电还是负电?

(3) 该平衡位置是稳定平衡还是不稳定平衡? 简要说明理由。

0.4 场的思想：法拉第的力线

考点精要

• Q1 电场线有什么性质 (三条读图规则)?

A (1) 每点的切线方向就是该点场强方向 (正电荷受力方向); (2) 电场线越密场强越大; (3) 从正电荷出发, 终止于负电荷或无穷远。

• Q2 电场线能相交、能闭合吗?

A 不能相交——同一点场强方向唯一; 也不能闭合——闭合的是磁感线, 不是电场线。

A 层 · 基础过关

A1. 关于电场线，下列说法正确的是（ ）

- A. 电场线是带电粒子在电场中的运动轨迹
- B. 两条电场线可以在某点相交
- C. 电场线从正电荷出发，终止于负电荷或无穷远
- D. 匀强电场的电场线是疏密不均匀的直线

0.5 电场强度：场的“强度读数”

考点精要

- Q3 什么是电场强度？

$E = \frac{F}{q}$ ，单位 N/C（也等于 V/m），矢量，方向与正电荷在该点的受力方向相同。

- Q4 $E = F/q$ 是比值定义式，说明什么？

E 只由电场本身（电荷分布）决定，与试探电荷的 F 、 q 无关——改变试探电荷不改变 E ，拿走探针场强照旧。

例题 2.1

电场中某点放 $q = +2 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的试探电荷，受力 $F = 6 \times 10^{-6} \text{ N}$ 向右。求该点场强的大小与方向；若拿走试探电荷，该点场强如何变化？

A 层 · 基础过关

A2. 电场中某点放 $q = +2 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的试探电荷，受力 $F = 6 \times 10^{-6} \text{ N}$ 向右。

(1) 求该点场强的大小与方向；

(2) 若换用 $q' = -1 \times 10^{-8} \text{ C}$ 的试探电荷放在同一点，该点场强是否变化？试探电荷受力的大小和方向如何？

A3. 点电荷 $Q = +4 \times 10^{-9} \text{ C}$ ，求距它 0.2 m 处 P 点的场强大小与方向；若把该电荷改为 $-4 \times 10^{-9} \text{ C}$ ， P 点场强大小和方向如何变化？

0.6 点电荷的场强与叠加

考点精要

- Q5 点电荷 Q 在距它 r 处的场强多大、方向如何？

$E = k \frac{Q}{r^2}$; $Q > 0$ 时背离 Q , $Q < 0$ 时指向 Q 。

- Q6 多个电荷产生的场强怎么叠加？

A 矢量叠加——每个电荷单独产生的场强分别算出来，再按平行四边形法则合成；先分开算，再合成。

例题 2.2

x 轴上 O 点有 $+Q$, $x = 3 \text{ m}$ 处有 $+4Q$, 求场强为零的位置。

A 层 · 基础过关

A4. 两个完全相同的点电荷 $+Q$ 、 $+Q$ 相距 $2a$ 。求它们连线中点处的合场强（大小与方向），并说明为什么该点场强为零。

A5. 等量异号点电荷 $+Q$ 、 $-Q$ 相距 $2a$, 其中 $Q = 2 \times 10^{-8} \text{ C}$, $a = 0.1 \text{ m}$ 。

- (1) 求连线中点的合场强大小；
- (2) 指出该点合场强的方向。

0.7 匀强电场

考点精要

- Q7 匀强电场有什么特征？

A 区域内各点场强大小、方向都相同，电场线是平行等距的直线；两平行金属板之间（忽略边缘）就是匀强电场， $E = \frac{U}{d}$ 。

A 层 · 基础过关

A6. 两平行金属板间距 $d = 0.02 \text{ m}$, 板间电压 $U = 200 \text{ V}$, 板间为匀强电场。求板间场强 E 的大小，并说明板间电场线的方向（从____板指向____板）。

0.8 电荷组的场：等量同号与等量异号

考点精要

• Q8 等量同号电荷连线中点的场强与电势有何特点？

A 两电荷在该点场强等大反向，合场强为零；但该点电势不为零——这是“ $E=0$ 处 φ 不一定为 0”的经典案例（详第 3 章）。

• Q9 等量异号电荷连线中点的场强多大？中垂线有何特点？

A 中点两场强同向叠加， $E = \frac{2kQ}{a^2}$ （两电荷相距 $2a$ ），是连线上最小处但不为零；中垂线是等势线（取无穷远为零时电势为零），中垂线上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）。

例题 2.3

等量异号点电荷 $+Q$ 、 $-Q$ 分别位于 x 轴上 $x = -a$ 与 $x = +a$ 处（相距 $2a$ ），取 $Q = 3 \times 10^{-9} \text{ C}$ ， $a = 0.2 \text{ m}$ 。

- (1) 求连线中点 O 的场强；
- (2) 求中垂线上距 O 点 0.2 m 处 P 点的场强大小与方向。

A 层 · 基础过关

A7. 判断下列说法是否正确：

- (1) 匀强电场中电场线是平行等距的直线；
- (2) 等量同号电荷连线中点的场强为零，该点的电势也为零；
- (3) 电场线越密的地方场强越大。

A8. 等量同号电荷连线的中垂线上，场强随距离如何变化？中点处场强为多少？等量异号电荷连线的中垂线（取无穷远为零势）有什么特点？

B 层 · 真题研习

B1. （2023 · 重庆卷）真空中固定有两个点电荷，负电荷 Q_1 位于坐标原点处，正电荷 Q_2 位于 x 轴上， Q_2 的电荷量大小为 Q_1 的 8 倍。若这两点电荷在 x 轴正半轴的 $x = x_0$ 处产生的合电场强度为 0，则 Q_1 、 Q_2 相距（ ）

A. x_0 B. $(2\sqrt{2} - 1)x_0$ C. $2x_0$ D. $(2\sqrt{2} + 1)x_0$

B2. （2024 · 海南卷）（多选）真空中有两个点电荷，电荷量均为 $-q$ ($q > 0$)，固定于相距为 $2r$ 的 P_1 、 P_2 两点，O 是 P_1P_2 连线的中点，M 点在 P_1P_2 连线的中垂线上，距离 O 点为 r ，N 点在 P_1P_2 连线上，距离 O 点为 x ($x \ll r$)。已知静电力常量为 k ，则下列说法正确的是（ ）

A. P_1P_2 中垂线上电场强度最大的点到 O 点的距离为 r

B. P_1P_2 中垂线上电场强度的最大值为 $\frac{4kq}{3\sqrt{3}r^2}$

C. 在 M 点放入一电子，从静止释放，电子的加速度一直减小

D. 在 N 点放入一电子，从静止释放，电子的运动可视为简谐运动

B3. (2026 · 河北卷) 河北雄安新区融合静电探测技术构建起“天空之网”，实现了对低空飞行器的全天候实时监测。当飞行器靠近时，固定在地面上的静电探测器探头感应出了正电荷。在感应电荷产生的静电场中，电场线 ()

- A. 是闭合曲线
- B. 从感应正电荷出发
- C. 在无电荷区域相交
- D. 终止于感应正电荷

C 层 · 创新拓展

C1. (高压静电除尘 · 电晕放电) 静电除尘器中，一根细金属放电针与集尘筒之间加上高压。放电针尖端附近场强极大，超过空气的击穿场强 $E_0 = 3.0 \times 10^6 \text{ V/m}$ 时，尖端附近空气被电离，产生的离子使粉尘荷电，带电粉尘再被电场吸附到集尘筒上。设针尖积累的电荷可近似看作点电荷 $Q = 5.0 \times 10^{-8} \text{ C}$ ($k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$)。

- (1) 求距针尖 $r = 0.5 \text{ cm}$ 处场强的大小，并判断该处是否会发生电离放电；
- (2) 求能使空气电离 ($E \geq E_0$) 的“击穿半径”，即距针尖多远的范围内会发生电晕放电；
- (3) 解释为什么除尘器要用细针尖而不直接用粗电极。

C2. (空气净化器 · 集尘板吸附) 某静电空气净化器的集尘板由两平行金属板构成，板间电压 $U = 4.0 \times 10^3 \text{ V}$ ，板间距 $d = 4.0 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。空气中带电微粒在板间受电场力而被吸附到集尘板上。设某微粒带电荷量 $q = 2.0 \times 10^{-14} \text{ C}$ ，质量 $m = 1.0 \times 10^{-12} \text{ kg}$ ，进入电场时速度可忽略。

- (1) 求板间电场强度 E ；
- (2) 求微粒所受电场力 F 及加速度 a ；
- (3) 若微粒从两板正中进入，求它被吸附到集尘板所需的时间。

本章综合 · S 层

S1. (正方形电荷组 · 对称与叠加) 边长为 a 的正方形四个顶点上各固定一个电荷量为 $+q$ 的点电荷。

- (1) 求正方形中心 O 点的合场强；
- (2) 若把其中一个顶点 A 的电荷改为 $-q$ ，其余不变，求中心 O 点的合场强 (大小与方向)；
- (3) 在 (2) 情形下，若在 O 点放一个电荷量为 $+q_0$ 的试探电荷，求它所受的电场力。

S2. (匀强电场与点电荷叠加) 水平方向存在匀强电场 $E_0 = 2000 \text{ N/C}$ ，方向水平向右。在 O 点放一个点电荷 $Q = +1.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ ，取 P 点在 O 点正右方 0.3 m 处。

- (1) 求 P 点的合场强 (大小与方向)；
- (2) 若把 Q 改为 $-1.0 \times 10^{-9} \text{ C}$ ，P 点的合场强变为多少？
- (3) 在 (2) 情形下，匀强电场的场强能否被点电荷的场强完全抵消？若可以，求抵消点相对 O 的位置。

0.9 电场力做功与电势能

考点精要

- Q1 电场力做功有什么特点？

A 与路径无关，只与初末位置有关（和重力做功一样）——所以电场也有“势”，可以定义电势能。

- Q2 电场力做正功，电势能怎么变？

A 做正功，电势能减少；做负功，电势能增加。即 $W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$ 。

例题 3.1

匀强电场 $E = 1000 \text{ V/m}$ ，方向向右。A、B 两点沿电场线方向相距 $d = 0.05 \text{ m}$ （A 在左、B 在右）。求电势差 U_{AB} ，并判断哪点电势高。

A 层 · 基础过关

A1. 匀强电场 $E = 500 \text{ V/m}$ ，方向向右。A、B 两点沿电场方向相距 $L = 0.1 \text{ m}$ （A 在左）。求 U_{AB} ，并判断 A、B 哪点电势高。

A2. 正电荷 $q = +2 \times 10^{-8} \text{ C}$ 从 A 移到 B，电场力做正功 $W = 4 \times 10^{-6} \text{ J}$ 。求电势差 U_{AB} ，以及电荷电势能的变化量。

A3. 负电荷 $q = -3 \times 10^{-9} \text{ C}$ 从电势 $\varphi_1 = +100 \text{ V}$ 处移动到电势 $\varphi_2 = -50 \text{ V}$ 处。求电势能的变化量，并说明电势能是增加还是减少。

0.10 电势：电势能的“强度读数”

考点精要

- Q3 什么是电势？

A $\varphi = \frac{E_p}{q}$ ，单位伏特（V），标量；某点电势等于“把单位正电荷从该点移到参考点电场力做的功”。

- Q4 电势高低怎么判断（三条）？

A (1) 沿电场线方向电势降低；(2) 正电荷在电势高处电势能大；(3) 负电荷在电势低处电势能大（正负电荷对电势的“喜好”相反）；等势面与电场线垂直，沿等势面移动电荷不做功。

例题 3.2

两平行金属板间距 $d = 0.02 \text{ m}$ ，板间电压 $U = 200 \text{ V}$ （匀强电场）。求板间场强；一个电子（ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ， $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ）从负极板静止出发，到达正极板时速度多大？

A 层 · 基础过关

A4. 判断下列说法是否正确：

- (1) 等势面与电场线处处垂直；
- (2) 沿等势面移动电荷，电场力不做功；
- (3) 电场线的方向指向电势升高最快的方向。

A5. 两块倾斜放置的平行金属板，两板间的垂直距离 $d = 0.04 \text{ m}$ ，板间电压 $U = 400 \text{ V}$ 。

- (1) 求板间场强 E ；
- (2) 若沿板面方向有相距 0.1 m 的两点，求这两点间的电势差，并说明为什么。

A6. 两个等量同号点电荷 $+Q$ 、 $+Q$ 相距 $2a$ ， $Q = 1 \times 10^{-9} \text{ C}$ ， $a = 0.1 \text{ m}$ ，取无穷远电势为零。

- (1) 求连线中点处的场强；
- (2) 求连线中点处的电势。

A7. 电子经电压 $U = 100 \text{ V}$ 从静止加速，求电子获得的动能（分别用焦耳和电子伏特表示），以及电子到达时的速度大小（ $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ， $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）。

0.11 电势差与场强的关系： $U = Ed$

考点精要

- Q5 匀强电场中 $U = Ed$ 里的 d 是什么距离？

A 必须是沿电场方向的距离（投影）——两板倾斜时取垂直于板面的距离，不是任意两点的距离。

A 层 · 基础过关

（A5 已在本节前综合考查，此处不再重复设题，见 3.2 节 A5。）

0.12 场强与电势的关系辨析（高频易错）

考点精要

- Q6 $E = 0$ 处电势一定为零吗？电势为零处场强一定为零吗？

A 都不一定。等量同号电荷连线中点 $E = 0$ 但 $\varphi \neq 0$ ；无穷远 $\varphi = 0$ 而场强可不为 0。

- Q7 场强与电势的“坡度—海拔”类比是什么？

A 场强是电势的“坡度”（电势沿场强方向下降最快）， E 大只说明电势变化陡，与电势本身大小无关。

A 层 · 基础过关

A8. 用一句话说明：为什么等量同号电荷连线的中点处“场强为零但电势不为零”？（参考第 3.2 节 A6 的数值结果作答）

0.13 图像分析法：电势图、场强图、势能图

考点精要

- Q8 三张图的读法是什么？

A φ - x 图看斜率得场强 ($E = -\frac{d\varphi}{dx}$)； E - x 图看面积得电势差 ($U = \int E dx$)； E_p - x 图看斜率得力 ($F = -\frac{dE_p}{dx}$)。

- Q9 φ - x 图是直线说明什么？

A 说明是匀强电场——电势均匀变化，场强处处相同；斜率为负场强沿 $+x$ ，斜率为正场强沿 $-x$ 。

例题 3.3

某区域 φ - x 图像是斜率为 $-2 \times 10^3 \text{ V/m}$ 的直线 (x 向右为正)。求场强的大小和方向，并判断该电场是否为匀强电场。

A 层 · 基础过关

A9. 某区域 φ - x 图像是斜率为 $+500 \text{ V/m}$ 的直线 (x 向右为正)。

- (1) 求场强的大小与方向；
- (2) 该电场是匀强电场吗？为什么？

B 层·真题研习

B1. (2022·天津卷) 一正点电荷固定在圆心 O, M、N 是圆上的两点。下列说法正确的是 ()

- A. M 点和 N 点电势相同
- B. M 点和 N 点电场强度相同
- C. 负电荷由 M 点到 N 点, 电势能始终增大
- D. 负电荷由 M 点到 N 点, 电场力始终做正功

B2. (2023·全国乙卷) (多选) 在 O 点处固定一个正点电荷, P 点在 O 点右上方。从 P 点由静止释放一个带负电的小球, 小球仅在重力和该点电荷电场力作用下在竖直面内运动, 其一段轨迹如图所示 (图略, 轨迹上取两点 M、N, 满足 $OP > OM$, $OM = ON$)。则小球 ()

- A. 在运动过程中, 电势能先增加后减少
- B. 在 P 点的电势能大于在 N 点的电势能
- C. 在 M 点的机械能等于在 N 点的机械能
- D. 从 M 点运动到 N 点的过程中, 电场力始终不做功

C 层·创新拓展

C1. (质子刀·电子伏特) 质子治疗中, 质子从静止经加速电压 $U = 1.0 \times 10^4 \text{ V}$ 加速后射入肿瘤。已知质子质量 $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, 元电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ 。

- (1) 求质子获得的动能 (用焦耳和电子伏特两种单位表示);
- (2) 求质子被加速后的速度大小;
- (3) 若改用 α 粒子 (电荷量 $+2e$ 、质量约 $4m_p$) 经同一电压加速, 末速度是质子的多少倍?

C2. (闪电与避雷针) 一次云层与地面之间的放电, 云地间电势差约 $U = 1.0 \times 10^8 \text{ V}$, 云层距地面约 $d = 1.0 \text{ km}$ 。

- (1) 求云地间电场的平均场强大小;
- (2) 若一次闪电向地面输送电荷 $Q = 20 \text{ C}$, 求这次闪电释放的电能 (提示: $W = QU$); 一个三口之家月用电约 200 kWh ($1 \text{ kWh} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$), 一次闪电的能量约相当于该家庭几个月用电?
- (3) 避雷针为什么能把雷电 “引入地下”? 它利用了什麼静电现象?

本章综合·S 层

S1. (平行板·能量视角) 两平行金属板间电压 $U = 500 \text{ V}$, 板间距 $d = 1.0 \text{ cm}$, 板间为匀强电场。一个电子从负极板由静止释放, 仅在电场力作用下向正极板运动 ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)。

- (1) 求板间场强 E ;
- (2) 求电子到达正极板时的速度大小;
- (3) 求电子运动过程中电势能的减少量;

(4) 若电子从两板正中 (距正极板 $d/2$ 处) 由静止释放, 到达正极板时的速度是 (2) 中答案的多少倍?

S2. (φ - x 图像 · 功与能量) 某区域沿 x 轴的电势分布为: $0 \leq x \leq 2 \text{ m}$ 内, φ 从 2000 V 均匀降到 0 ; $2 \text{ m} \leq x \leq 4 \text{ m}$ 内, φ 从 0 均匀升到 1000 V (x 向右为正)。

(1) 求两段区域的场强大小与方向;

(2) 正电荷 $q = +1 \times 10^{-8} \text{ C}$ 从 $x = 0$ 移到 $x = 4 \text{ m}$, 电场力做多少功? 电势能如何变化?

(3) 分段说明: 哪一段电场力做正功、哪一段做负功, 各做多少功?

0.14 匀加与匀减: 电场力做功, 能量说了算

考点精要

- **Q1** 带电粒子从静止经电压 U 加速, 末速度由什么决定?

A $qU = \frac{1}{2}mv^2$, $v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$ ——只与电压和比荷 q/m 有关, 与加速距离无关 ($W = qU$ 与路径无关)。

- **Q2** 逆着电场射入的粒子会怎样?

A 电场力与速度反向, 做匀减速直线运动; 若电场足够长, 先减速到零再反向加速, 减速段与反向加速段时间、位移完全对称。

- **Q3** 判断“能否反向”的关键一步是什么?

A 先算减速距离 $s = \frac{v_0^2}{2a}$, 再与电场长度比较—— s 大于电场长度则穿出, 小于则反向。

例题 4.1

质子 ($q = e$, $m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) 从静止经电压 $U = 5000 \text{ V}$ 加速, 求末速度。

A 层 · 基础过关

A1. 电子 ($m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$) 从静止经电压 $U = 100 \text{ V}$ 加速, 求末速度。

A2. 质子和电子经相同的加速电压从静止加速 ($m_p \approx 1836 m_e$)。谁的末速度大? 它们的末速度之比是多少?

A3. 电子以 $v_0 = 4.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 逆着场强 $E = 3.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ 的匀强电场射入 (电子比荷 $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$)。

- (1) 求电子的加速度大小与方向；
- (2) 求电子减速到零前进的距离 s 与所需时间 t_1 。

A4. 接上题，若匀强电场的宽度为 $L = 1.0 \text{ cm}$ ，判断电子能否穿过该电场；若能，求穿出时的速度大小。

0.15 偏转：类平抛的标准动作

考点精要

- **Q4** 带电粒子垂直射入匀强电场做什么运动？

A 类平抛——水平方向匀速 ($x = v_0 t$ ，穿过板时间 $t = \frac{L}{v_0}$)，竖直方向匀加速 ($a = \frac{qU}{md}$)。

- **Q5** 侧移量和速度偏角的公式是什么？

A $y = \frac{qUL^2}{2mdv_0^2}$ ； $\tan \theta = \frac{qUL}{mdv_0^2} = \frac{2y}{L}$ ——出射速度反向延长线过板的中点。

- **Q6** 侧移量与哪些量成正比、反比？

A 与 q 、 U 成正比，与 m 、 v_0^2 成反比；板长加倍， y 变为 4 倍 ($y \propto L^2$)。

例题 4.2

电子以 $v_0 = 2 \times 10^7 \text{ m/s}$ 水平射入长 $L = 0.06 \text{ m}$ 、间距 $d = 0.02 \text{ m}$ 、电压 $U = 200 \text{ V}$ 的偏转电场。求电子出电场时的侧移量 y 。

A 层 · 基础过关

A5. 电子以 $v_0 = 1.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 水平射入长 $L = 0.02 \text{ m}$ 、间距 $d = 0.01 \text{ m}$ 、电压 $U = 100 \text{ V}$ 的偏转电场。求电子出电场时的侧移量 y 。

A6. 接上题，求电子出电场时速度的偏角正切值 $\tan \theta$ ，并指出出射速度的反向延长线过哪个特殊点。

A7. 偏转电场中，其余条件不变，仅把板长加倍，侧移量变为原来的几倍？仅把偏转电压加倍呢？（用公式说明，不必代入具体数值）

0.16 组合：先加速后偏转（示波器模型）

考点精要

- Q7 先加速后偏转，侧移量与粒子种类有关吗？

A 无关！ $y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1}$ ，把 $v_0 = \sqrt{\frac{2qU_1}{m}}$ 代入后 q 、 m 全部消掉，只由电压比决定——示波器“一视同仁”原理。

例题 4.3

示波器中 $U_1 = 1000 \text{ V}$ ， $U_2 = 200 \text{ V}$ ，偏转板长 $L = 0.04 \text{ m}$ 、间距 $d = 0.01 \text{ m}$ 。求电子在偏转板边缘处的偏转量 y 。

A 层 · 基础过关

A8. 电子、质子、 α 粒子（比荷各不相同）经同一加速电场 $U_1 = 2000 \text{ V}$ 加速后，射入同一偏转电场（ $L = 0.04 \text{ m}$ ， $d = 0.01 \text{ m}$ ， $U_2 = 200 \text{ V}$ ）。求各粒子的侧移量，并说明为什么它们相同。

0.17 技法小结：电场运动题的三板斧

考点精要

- Q8 电场运动题的“三板斧”是什么？

A (1) 判方向：初速度与电场平行（加速/减速，用动能定理）还是垂直（偏转，类平抛）；(2) 平行方向用动能定理、垂直方向拆解（水平匀速、竖直匀加速）；(3) 组合场按段切，段间用速度衔接。

B 层 · 真题研习

B1.（2022 · 北京卷）真空中平行金属板 M、N 之间距离为 d ，两板所加的电压为 U 。一质量为 m 、电荷量为 q 的带正电粒子从 M 板由静止释放。不计带电粒子的重力。

(1) 求带电粒子所受的静电力的大小 F ；

(2) 求带电粒子到达 N 板时的速度大小 v ；

(3) 若在带电粒子运动距离 $\frac{d}{2}$ 时撤去所加电压，求该粒子从 M 板运动到 N 板经历的时间 t 。

B2.（2022 · 湖北卷）密立根油滴实验装置中，两块水平放置的金属板分别与电源的正、负极相接，板间产生匀强电场。用喷雾器把密度相同的许多油滴从上板中间的小孔喷入电场，油滴从喷口喷出时由于摩擦而带电。金属板间电势差为 U 时，电荷量为 q 、半径为 r 的球状油滴在板间保持静止。若仅将金属板间电势差调整为 $2U$ ，则在板间能保持静止的球状油滴所带电荷量和半径可以为（ ）

A. q 、 r B. $2q$ 、 r C. $2q$ 、 $2r$ D. $4q$ 、 $2r$

B3. (2026 · 云南卷) 在大小、方向均未知的匀强电场中, O、M、N 三点处于同一竖直面内。将一质量为 0.1 kg 、电荷量为 $1.0 \times 10^{-6}\text{ C}$ 的带正电小球 (视为质点) 从 O 点抛出, 小球 1 s 后到达 O 点正上方 3 m 处的 M 点, 再经 1 s 到达 N 点, O、N 两点在同一水平线上且相距 3 m 。不计空气阻力, g 取 10 m/s^2 , 设电场强度大小为 E , O、N 两点的电势分别为 φ_O 、 φ_N , 则 ()

- A. $E = 6.7 \times 10^5\text{ V/m}$, $\varphi_O > \varphi_N$
- B. $E = 6.7 \times 10^5\text{ V/m}$, $\varphi_O < \varphi_N$
- C. $E = 5.0 \times 10^5\text{ V/m}$, $\varphi_O > \varphi_N$
- D. $E = 5.0 \times 10^5\text{ V/m}$, $\varphi_O < \varphi_N$

B4. (2025 · 全国卷) 匀强电场中, 一带正电的点电荷仅在电场力的作用下以某一初速度开始运动, 则运动过程中 ()

- A. 所处位置的电势一定不断降低
- B. 所处位置的电势一定不断升高
- C. 轨迹可能是与电场线平行的直线
- D. 轨迹可能是与电场线垂直的直线

C 层 · 创新拓展

C1. (离子推进器) 航天器用的离子推进器中, 氙原子被电离成氙离子 Xe^+ 后, 经加速电场加速并从喷口高速喷出, 靠反冲力给航天器持续提供微小推力。已知氙离子质量 $m = 2.18 \times 10^{-25}\text{ kg}$, 电荷量 $q = e = 1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$, 加速电压 $U = 1000\text{ V}$ 。

(1) 求氙离子被加速后的喷出速度大小;

(2) 若每秒有 $n = 1.0 \times 10^{18}$ 个氙离子喷出, 求推进器产生的推力大小 (提示: 动量定理, 离子初速度为零);

(3) 与化学火箭“大推力、短时间”相比, 离子推进器的特点是什么? 适合什么任务?

C2. (静电喷墨打印) 喷墨打印机中, 墨滴从喷嘴喷出后先带上正电荷, 再飞过一对偏转板, 通过改变偏转电压控制墨滴落点。已知墨滴质量 $m = 2.0 \times 10^{-12}\text{ kg}$, 电荷量 $q = 1.0 \times 10^{-13}\text{ C}$, 进入偏转板时速度 $v_0 = 15\text{ m/s}$, 偏转板长 $L = 2.0 \times 10^{-3}\text{ m}$ 、间距 $d = 5.0 \times 10^{-4}\text{ m}$ 、电压 $U = 150\text{ V}$ 。

(1) 求墨滴在板间运动的加速度与穿过板的时间;

(2) 求墨滴出偏转板时的侧移量 y ;

(3) 若需把落点偏移量增大到原来的 2 倍, 偏转电压应如何调整?

C3. (带电粒子在交变电场中运动) 两平行金属板间电场方向周期性变化 (方波, 图略): $0 \sim 0.2\text{ s}$ 场强向右、 $0.2 \sim 0.4\text{ s}$ 场强向左, 大小恒为 $E = 1000\text{ N/C}$, 周期 $T = 0.4\text{ s}$ 。一带正电微粒质量 $m = 1 \times 10^{-2}\text{ kg}$ 、电荷量 $q = 1 \times 10^{-5}\text{ C}$, $t = 0$ 时刻在极板正中间由静止释放, 重力不计。

(1) 求微粒的加速度大小 a ;

(2) 画出 $0 \sim 0.8 \text{ s}$ 内微粒的 $v-t$ 图像 (定性), 并求 0.8 s 内的位移;

(3) 若两板间距 $d = 0.2 \text{ m}$ (微粒到极板距离 0.1 m), 微粒会不会打到极板? 若会, 求打到极板的时刻。

本章综合 · S 层

S1. (示波器综合) 示波管中, 电子从静止经加速电压 $U_1 = 800 \text{ V}$ 加速后水平进入一对偏转板。偏转板长 $L = 0.05 \text{ m}$ 、间距 $d = 0.01 \text{ m}$ 、偏转电压 $U_2 = 150 \text{ V}$ 。电子出偏转板后再沿直线飞行 $D = 0.20 \text{ m}$ 到达荧光屏。

(1) 求电子进入偏转板时的速度 v_0 ;

(2) 求电子在偏转板内的侧移量 y ;

(3) 求电子出偏转板时速度的偏角正切 $\tan\theta$;

(4) 求电子打在荧光屏上相对入射方向的偏移量 Y 。

S2. (匀减速陷阱 · 反向与穿越) 质子以 $v_0 = 1.0 \times 10^6 \text{ m/s}$ 逆着场强 $E = 2.0 \times 10^3 \text{ N/C}$ 的匀强电场射入 (质子比荷 $q/m = 9.6 \times 10^7 \text{ C/kg}$)。

(1) 求质子的加速度大小;

(2) 求质子减速到零前进的距离 s ;

(3) 若电场的宽度 $d_1 = 0.20 \text{ m}$, 质子能否穿过? 穿出时速度多大?

(4) 若电场的宽度改为 $d_2 = 5.0 \text{ m}$ (远大于 s), 质子先减速到零再反向, 求它从射入到回到入射点所用的总时间。

0.18 电容: 储存电荷的本领

考点精要

• Q1 什么是电容?

$C = \frac{Q}{U}$, 单位法拉 (F), 表示电容器储存电荷的本领; 这是比值定义, C 只由电容器本身结构决定, 与是否充电、充多少无关。

• Q2 电容单位怎么换算?

$1 \text{ F} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF}$; $1 \mu\text{F} = 10^3 \text{ nF} = 10^6 \text{ pF}$ 。1 F 巨大, 日常多用 μF 、 pF 。

例题 5.1

电容器带电荷量 $Q = 4 \times 10^{-5} \text{ C}$ 时两端电压 $U = 200 \text{ V}$ 。求电容 C ; 若电压降到 100 V , 电荷量变为多少?

A 层 · 基础过关

A1. 电容器带电荷量 $Q = 2 \times 10^{-6} \text{ C}$ 时两端电压 $U = 100 \text{ V}$ 。

(1) 求电容 C ；

(2) 若电压降为 50 V ，电荷量变为多少？电容变了吗？

A2. 单位换算： $0.1 \mu\text{F} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ nF} = \underline{\hspace{1cm}} \text{ pF}$ 。一个电容为 $4700 \mu\text{F}$ 的电容器带电荷量 $2.35 \times 10^{-2} \text{ C}$ ，求它两端电压。

A3. 判断下列说法是否正确：

(1) 由 $C = Q/U$ 可知， C 与 Q 成正比、与 U 成反比；

(2) 电容是电容器本身的属性，与是否充电无关；

(3) 电容越大的电容器，储存电荷的本领越强。

0.19 平行板电容器的决定式

考点精要

• Q3 平行板电容器的决定式是什么？

$A \ C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ ——直觉三条：板越大越能装（ S 大）、板越近越能装（ d 小）、介质越好越能装（ ϵ_r 大）。

• Q4 电容动态分析的第一步是什么？

A 先判“谁不变”：接通电源， U 不变；断开电源， Q 不变。这是最关键的一步。

• Q5 接通电源时 d 增大， C 、 Q 、 E 如何变？

A C 减小、 $Q = CU$ 减小、 $E = U/d$ 减小。

• Q6 断开电源时 d 增大， C 、 U 、 E 如何变？

A C 减小、 $U = Q/C$ 增大、 $E = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}$ （与 d 无关）不变——电荷面密度不变，场强就不变。

• Q7 静电计指针张角反映什么？

A 反映电容器两极板间的电压 U —— U 大张角大；断开电源时 $U = Q/C$ ，看 C 如何变即可判断张角。

例题 5.2

平行板电容器充电后断开电源，将两板间距增大。问： C 、 U 、 E 如何变化？

例题 5.3

平行板电容器接通电源（ U 不变），将两板间距增大。问： C 、 Q 、 E 如何变化？与例 5.2（断开电源）的结果有什么不同？

A 层 · 基础过关

A4. 平行板电容器，只改变一个条件，判断 C 如何变化：

(1) 正对面积 S 增大；(2) 板间距 d 减小；(3) 插入电介质板（ ϵ_r 增大）。

A5. 平行板电容器接通电源（ U 不变），将两板间距 d 减小。判断 C 、 Q 、 E 如何变化。

A6. 平行板电容器充电后断开电源（ Q 不变），将两板正对面积 S 减小。判断 C 、 U 、 E 如何变化。

A7. 静电计实验：平行板电容器充电后断开电源，在两板间插入一块电介质板（不接触），静电计指针张角如何变化？为什么？

0.20 静电的利用与防范

考点精要

• Q8 静电有哪些利用与防范？

A 利用：静电除尘（带电颗粒被电极吸引）、静电复印（电荷吸附墨粉）、静电喷漆；防范：油罐车拖铁链导走静电、避雷针尖端放电引雷入地。

A 层 · 基础过关

A8. 判断下列做法是利用了静电还是防范了静电：

- (1) 静电除尘器除去烟囱废气中的粉尘；
- (2) 油罐车后面拖一条铁链，使车身随时接地；
- (3) 静电复印机把墨粉吸附到感光鼓上；
- (4) 高楼顶部安装避雷针。

B 层 · 真题研习

B1. (2024·浙江卷) 在“研究电容器两极板间距对电容大小的影响”实验中, 保持电荷量不变, 当极板间距增大时, 静电计指针张角增大, 则 ()

- A. 极板间电势差减小
- B. 电容器的电容增大
- C. 极板间电场强度增大
- D. 电容器储存的能量增大

B2. (2024·江西卷) 极板间一蜡烛火焰带有正离子、电子以及其他带电粒子, 两极板电压保持不变。当电极板距离减小时 (图中极板间电场线方向水平向左), 则电场强度如何变? 电子受力方向如何? ()

- A. 电场强度增大, 方向向左
- B. 电场强度增大, 方向向右
- C. 电场强度减小, 方向向左
- D. 电场强度减小, 方向向右

C 层·创新拓展

C1. (超级电容器·电动汽车) 超级电容器可用于电动公交车的快速充电。某超级电容模组电容 $C = 1000 \text{ F}$, 最高充电电压 $U = 500 \text{ V}$ 。

(1) 求该电容模组充满电储存的能量 ($W = \frac{1}{2}CU^2$) 及储存的电荷量;

(2) 若公交车进站后用 60 s 完成充电, 求充电的平均电流与平均功率;

(3) 与锂离子电池相比, 超级电容器在“快充快放、循环寿命”上有什么特点? 这决定了它适合什么场景?

C2. (电容式传感器) 电容式麦克风的原理: 一片可振动的金属膜片与固定的金属板构成平行板电容器, 接入恒压电源 $U = 12 \text{ V}$ 。声音使膜片振动, 极板间距随之变化, 电容与电荷量跟着变化, 形成电信号。初始极板间距 $d_1 = 2.0 \text{ mm}$ 时电容 $C_1 = 40 \text{ pF}$ 。

(1) 求初始时板间场强 E_1 与极板带电荷量 Q_1 ;

(2) 若膜片振动使间距减小到 $d_2 = 1.0 \text{ mm}$, 求此时电容 C_2 、电荷量 Q_2 及板间场强 E_2 ;

(3) 说明为什么“间距变化”就能产生变化的电信号 (提示: 接通电源时 U 不变)。

本章综合·S 层

S1. (油滴平衡·动态综合) 平行板电容器接通电源, 板间电压 $U = 200 \text{ V}$, 板间距 $d = 2.0 \text{ cm}$ 。一带负电的油滴恰好静止悬浮在板间。已知油滴质量 $m = 2.0 \times 10^{-15} \text{ kg}$ ($g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)。

(1) 求板间场强 E ;

(2) 求油滴带电荷量的大小, 并说明它约等于几个元电荷;

(3) 若断开电源并把板间距增大一倍 ($d' = 4.0 \text{ cm}$), 油滴将怎样运动? 为什么?

(4) 若保持接通电源并把板间距增大一倍, 油滴将怎样运动? 加速度多大?

S2. (相机闪光灯) 相机闪光灯的核心是一个大电容: 电容 $C = 200 \mu\text{F}$, 充电电压 $U = 300 \text{ V}$, 通过闪光灯管瞬间放电发出强光。

- (1) 求闪光灯电容充满电后储存的电荷量 Q 与能量 W ($W = \frac{1}{2}QU$);
- (2) 若放电持续时间约 1.0 ms , 求放电的平均功率;
- (3) 若用 1.0 A 的恒定电流为它充电, 充满需要多长时间? 这说明电容器的“快放”与“慢充”各适合什么场景?

0.21 电流: 电荷的定向移动

考点精要

• Q1 电流的大小怎么定义?

I 电流是电荷的定向移动, 大小 $I = q/t$ (单位时间通过导体横截面的电荷量), 单位安培 (A)。电流是标量, 但有方向 (规定为正电荷定向移动方向, 与电子移动方向相反)。

• Q2 一按开关灯就亮, 是电子跑得快吗?

A 不是。电子的定向漂移速度只有毫米/秒级, 是“指令”(电场)以接近光速传到整条导线, 电子几乎同时起步——排队的人一起迈步, 不是第一个人冲刺到队尾。

• Q3 电流的微观表达式是什么?

$I = neSv$ (n 为单位体积自由电荷数, S 为横截面积, v 为电荷定向移动平均速率)。它把宏观电流和微观运动接上了。

例题 6.1

某导线中电流 $I = 0.5 \text{ A}$, 求 2 分钟内通过横截面的电荷量; 若导线是铜线, 约合多少个电子? ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

A 层 · 基础过关

A1. 一铜导线中通有电流 $I = 0.2 \text{ A}$, 求 10 分钟内通过横截面的电荷量; 约合多少个电子? ($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

A2. 铜导线横截面积 $S = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 单位体积内自由电子数 $n = 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$, 通有电流 $I = 0.5 \text{ A}$ 。求自由电子定向移动的平均速率。($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

A3. 判断下列说法是否正确, 并说明理由:

- (1) 电流方向与自由电子定向移动方向相同；
- (2) 电流既有大小又有方向，是矢量；
- (3) 在电解液中，正离子和负离子同时向相反方向定向移动，电流方向与正离子移动方向相同。

0.22 电阻与欧姆定律

考点精要

- Q1 电阻的定义与决定因素是什么？

A $R = U/I$ 是比值定义（衡量阻碍电流的本领）； $R = \rho L/S$ 是决定式（材料、长度、截面积决定）， ρ 是电阻率，随温度升高一般增大。

- Q2 串联和并联的总电阻怎么算？

A 串联 $R = R_1 + R_2$ （电流相同，电压按电阻分）；并联 $1/R = 1/R_1 + 1/R_2$ （电压相同，电流按电阻反分），并联总电阻小于任意一个分电阻。

- Q3 欧姆定律的适用范围？

A $I = U/R$ 适用于金属导体、电解液等线性元件；气态导体、半导体等非线性元件不满足。

- Q4 一根导线均匀拉长为原来的 2 倍（体积不变），电阻变几倍？

A 4 倍——长度翻倍、截面积减半， $R = \rho L/S$ 中 L 乘 2、 S 除 2，共 4 倍。

例题 6.2

$R_1 = 3\ \Omega$ 、 $R_2 = 6\ \Omega$ 并联后接 $U = 6\ \text{V}$ 电源。求总电阻、总电流和各支路电流。

A 层 · 基础过关

A4. 一根长 L 、横截面积 S 、电阻为 R 的金属导线，将其均匀拉长为原来的 2 倍（体积不变），求新导线的电阻。

A5. $R_1 = 2\ \Omega$ 、 $R_2 = 3\ \Omega$ 、 $R_3 = 6\ \Omega$ 三个电阻并联，求总电阻；若并联接入 $U = 3\ \text{V}$ 电压，求总电流和各支路电流。

A6. 某金属导体的 U - I 图像是过原点的直线：电压 $U = 2.0\ \text{V}$ 时电流 $I = 0.40\ \text{A}$ 。

- (1) 求导体的电阻；
- (2) 若电压升高到 $4.0\ \text{V}$ ，通过导体的电流为多大？

0.23 伏安法测电阻（实验）

考点精要

- Q1 电流表内接还是外接？

A 经验判据“小外大内”：待测电阻较小时用外接，较大时用内接；精确判据： $R_x < \sqrt{(R_V R_A)}$ 用外接， $R_x > \sqrt{(R_V R_A)}$ 用内接。

- Q2 内接、外接的误差方向？

A 外接法电压表分流使 I 偏大， $R_{\text{测}} < R_{\text{真}}$ （测小）；内接法电流表分压使 U 偏大， $R_{\text{测}} > R_{\text{真}}$ （测大）。铁律：“外接测小、内接测大”。

A 层 · 基础过关

A7. 用伏安法测一个待测电阻，其阻值约为 $50\text{ k}\Omega$ ，电压表内阻约 $3\text{ k}\Omega$ ，电流表内阻约 $0.1\text{ }\Omega$ 。

(1) 应选电流表内接还是外接？

(2) 若用内接法测得电压 $U = 4.8\text{ V}$ 、电流 $I = 95\text{ }\mu\text{A}$ ，求测量值，并说明测量值与真实值的大小关系。

0.24 电表改装：一个表头，三种表

考点精要

- Q1 表头怎么改成大量程电流表？

A 并联一个分流电阻（扩流并联）： $R = I_g R_g / (I - I_g)$ ，量程扩大 n 倍时 $R = R_g / (n - 1)$ ，让大部分电流从电阻流过。

- Q2 表头怎么改成电压表？

A 串联一个分压电阻（扩压串联）： $R = (U - I_g R_g) / I_g$ ，量程扩大 n 倍时 $R = (n - 1) R_g$ ，让大部分电压落在电阻上。

- Q3 两个公式的“倒数关系”怎么记？

A 扩流并联越扩越小（ n 在分母）、扩压串联越扩越大（ n 在分子）——记反是改装题第一大失分点。

例题 6.3

表头 $I_g = 3 \text{ mA}$ 、 $R_g = 10 \Omega$ 。(1) 改装成量程 3 A 的电流表, 需并联多大电阻?(2) 改装成量程 3 V 的电压表, 需串联多大电阻?

A 层 · 基础过关

A8. 表头 $I_g = 100 \mu\text{A}$ 、 $R_g = 2000 \Omega$ 。

(1) 改装成量程 10 mA 的电流表, 需并联多大电阻?

(2) 改装成量程 3 V 的电压表, 需串联多大电阻?

A9. (游标卡尺与螺旋测微器读数) 测量金属丝的直径:

(1) 用 10 分度游标卡尺测量: 主尺读数为 2.3 cm , 游标尺第 4 条刻度线与主尺某刻度线对齐, 求金属丝直径 (用 mm 表示);

(2) 用螺旋测微器测量同一金属丝: 固定刻度读数为 5.5 mm , 可动刻度第 25 格与固定刻度基准线对齐, 求读数 (用 mm 表示, 保留 3 位小数);

(3) 两次测量结果为什么不同? 比较两种测量工具的精度, 说明各自的分度值。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 浙江卷) 下列物理量中, 属于矢量的是 ()

A. 位移 B. 时间 C. 电流 D. 热量

B2. (2022 · 江苏卷) 如图, 电路中灯泡均正常发光, 阻值分别为 $R_1 = 2 \Omega$ 、 $R_2 = 3 \Omega$ 、 $R_3 = 2 \Omega$ 、 $R_4 = 4 \Omega$, 电源电动势 $E = 12 \text{ V}$, 内阻不计。四个灯泡中消耗功率最大的是 ()

A. R_1 B. R_2 C. R_3 D. R_4

C 层 · 创新拓展

C1. (手机充电数据线) 某手机数据线的铜芯横截面积 $S = 0.02 \text{ mm}^2$, 长 1 m , 铜的电阻率 $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。

(1) 求数据线的电阻;

(2) 快充时电流 $I = 3 \text{ A}$, 求线上电压降和发热功率;

(3) 如果换上同长度但横截面积减半的劣质线, 同样通 3 A 电流, 线上电压降变为多少? 这解释了什么?

C2. (金属导体微观电流) 家庭电路某导线横截面积 $S = 2 \text{ mm}^2$, 通有电流 $I = 5 \text{ A}$, 铜中自由电子数密度 $n = 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ 。

(1) 求电子定向移动的平均速率 (单位 mm/s);

(2) 若蜗牛爬行速度约 1 mm/s , 比较电子漂移速度与蜗牛速度;

(3) 按此速率, 电子走完 1 m 导线需要多长时间? 既然电子这么慢, 为什么一按开关灯立

即就亮？

本章综合 · S 层

S1. (跨节综合) 某实验电路用铜导线 (横截面积 $S = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2$ 、电阻率 $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 、自由电子数密度 $n = 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$) 连接一个阻值 $R = 10 \Omega$ 的定值电阻, 导线总长 $L = 2 \text{ m}$, 电源电动势 $E = 21 \text{ V}$ 、内阻 $r = 1 \Omega$ 。

- (1) 求两根导线 (往返各一根) 的总电阻 $R_{\text{线}}$;
- (2) 求闭合电路中的电流 I ;
- (3) 求自由电子定向移动的平均速率 v ;
- (4) 若将全部导线均匀拉长为原来的 2 倍 (体积不变) 后重新接入, 导线总电阻变为多大? 此时电路电流变为多大? (其余不变)

0.25 电动势与内阻

考点精要

• Q1 电动势是什么？

A 电动势 E 是电源把单位正电荷从负极搬到正极时非静电力做的功, 是电源“搬运电荷”本领的量度, 由电源本身决定 (如干电池 1.5 V 、电瓶 12 V), 与是否接入电路无关。

• Q2 电动势等于路端电压吗？

A 不等于。只有断路 (无电流、无内压降) 时路端电压才等于电动势; 正常工作时路端电压 $U = E - Ir < E$ 。

• Q3 为什么电池用旧了灯泡会变暗？

A 电池内阻随使用增大, 内压降 Ir 增大, 路端电压被内阻“吃掉”更多, 灯泡两端电压不足就变暗。

0.26 闭合电路欧姆定律

考点精要

• Q1 闭合电路欧姆定律怎么写？

A $I = E / (R + r)$: 电流由电动势和内、外电阻之和决定, 内阻也算进“总电阻”。

- Q2 外电阻增大，路端电压怎么变？

A 外电阻 R 增大 $\rightarrow$ 电流 I 减小 $\rightarrow$ 内压降 Ir 减小 $\rightarrow$ 路端电压 $U = E - Ir$ 反而增大（反直觉，但这是闭合电路的核心规律）。

- Q3 断路和短路两个极端？

A 断路 ($R \rightarrow \infty$): $I = 0$, $U = E$; 短路 ($R \rightarrow 0$): $I = E/r$ 巨大，会烧电源。

例题 7.1

电池 $E = 6\text{ V}$ 、内阻 $r = 1\ \Omega$ ，外接 $R = 5\ \Omega$ 。求电路电流、路端电压、内压降。

A 层 · 基础过关

A1. 一节干电池电动势 $E = 1.5\text{ V}$ 、内阻 $r = 0.5\ \Omega$ 。

(1) 外电路断路时，路端电压是多少？

(2) 外电路短路时，短路电流是多少？为什么短路会烧坏电源？

A2. 电源 $E = 9\text{ V}$ 、内阻 $r = 1\ \Omega$ ，外接电阻 $R = 8\ \Omega$ 。求电路电流、路端电压、内压降。

A3. 某灯泡正常工作时电阻约为 $5\ \Omega$ 。一节新电池 ($E = 1.5\text{ V}$ 、 $r_1 = 0.5\ \Omega$) 和同一型号旧电池 ($E = 1.5\text{ V}$ 、 $r_2 = 2\ \Omega$) 分别接该灯泡：

(1) 求两种情况下灯泡两端的电压和实际功率；

(2) 解释“电池用旧了灯泡变暗”的原因。

0.27 动态电路分析（含容/含表）

考点精要

- Q1 动态电路三步法是什么？

A (1) 判总电阻变化（串并联规律）；(2) 由 $I = E/(R_{\text{总}} + r)$ 判总电流；(3) 由 $U = E - Ir$ 判路端电压，再逐支路分析。先整体后局部。

- Q2 含电容器的支路怎么处理？

A 电路稳定时电容器支路断路（无电流），电容器两极板电压等于与之并联支路两端的电压。

- Q3 “串反并同”是什么意思？

A 某个电阻变化时,与它串联的元件电流、电压变化相反(串反),与它并联的元件电流、电压变化相同(并同)——可用来快速检验动态分析结果。

例题 7.2

电路:电源 E 、内阻 r ,定值电阻与滑动变阻器 R 串联。滑片向右移 (R 增大),电流表、电压表读数如何变化?

A 层·基础过关

A4. 电路:电源 $E = 12\text{ V}$ 、内阻 $r = 2\ \Omega$,定值电阻 $R_1 = 6\ \Omega$ 与滑动变阻器 R 串联。

(1) $R = 0$ 时,求电流 I 和路端电压 U ;

(2) $R = 10\ \Omega$ 时,求电流 I 和路端电压 U ;

(3) 滑片右移使 R 增大时,电流表、电压表读数如何变化?用“串反并同”验证 R_1 两端电压的变化方向。

A5. 电路:电源 $E = 12\text{ V}$ 、内阻不计,定值电阻 $R_1 = 3\ \Omega$ 与 $R_2 = 6\ \Omega$ 串联,电容器 $C = 5\ \mu\text{F}$ 并联在 R_2 两端。电路稳定后:

(1) 求电容器两端电压;

(2) 求电容器所带电荷量。

0.28 实验:测电源的电动势和内阻

考点精要

• Q1 怎么“挖”出藏在电池里的 E 和 r ?

A 测多组路端电压 U 和电流 I ,画 U - I 图像: $U = E - Ir$ 是直线方程,纵截距 $= E$,斜率 $= -r$ 。

• Q2 实验的误差方向?

A 电压表分流 $\rightarrow E_{\text{测}} < E_{\text{真}}$ 、 $r_{\text{测}} < r_{\text{真}}$; 电流表内接 $\rightarrow r_{\text{测}} = r_{\text{真}} + R_A$ (偏大)。

例题 7.3

某同学测一节干电池,得 5 组数据: $(I/\text{A}, U/\text{V}) = (0.14, 1.35)$ 、 $(0.22, 1.30)$ 、 $(0.30, 1.25)$ 、 $(0.37, 1.20)$ 、 $(0.45, 1.15)$ 。作 U - I 图像求 E 和 r 。

A 层 · 基础过关

A6. 某电源的 U - I 图像为一条直线，与纵轴（ U 轴）交于 3.0 V ，与横轴（ I 轴）交于 1.5 A 。求该电源的电动势和内阻。

0.29 多用电表：电表里的“瑞士军刀”

考点精要

- **Q1 欧姆挡怎么读数？**

A 示数 $\times$ 倍率，如 “ $\times 10$ ” 挡指针指 15，读 $15 \times 10 = 150\ \Omega$ 。

- **Q2 欧姆挡使用四步？**

A 选挡（估测选倍率） $\rightarrow$ 欧姆调零（红黑表笔短接，换挡必须重新调零） $\rightarrow$ 测量读数 $\rightarrow$ 用完拨 OFF 或交流电压最高挡。

- **Q3 欧姆挡刻度的特点？**

A “右零左大”、不均匀（越往左越密）——待测电阻越大电流越小、指针偏转越小。

A 层 · 基础过关

A7. 多用电表欧姆挡选 “ $\times 10$ ”，指针指在刻度 15 处。

- (1) 被测电阻多大？
- (2) 若改用 “ $\times 100$ ” 挡测同一电阻，指针会指在哪？这样读合适吗？
- (3) 换挡后第一步要做什么？

A8. 关于多用电表的使用，判断下列说法是否正确并说明理由：

- (1) 测电阻时必须把被测电阻从电路中断开、并断开电源；
- (2) 每次换欧姆挡后都要重新欧姆调零；
- (3) 欧姆表黑表笔接的是表内电池的负极。

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 上海卷) 电源电动势反映了电源把其他形式的能量转化为电能的能力，因此 ()

- A. 电动势是一种非静电力
- B. 电动势越大，说明电源储存的电能越多
- C. 电动势的大小是非静电力做功能力的反映

D. 电动势就是闭合电路中电源两端的电压

B2. (2023 · 海南卷) 如图所示电路, 电源电动势为 E 、内阻不计, 图中电阻为 $3R$ 、 $2R$ 、 R 、 $4R$ 组成的两个并联支路, 电容器电容为 C 。闭合开关, 待电路稳定后, 电容器上的电荷量为 ()

A. CE B. $3CE/5$ C. $2CE/5$ D. $CE/2$

B3. (2025 · 全国 II 卷) 某同学测定一节干电池的电动势和内阻, 实验器材: 待测干电池、电流表、电压表、滑动变阻器、开关、导线若干。根据实验测得的多组数据绘制 $U-I$ 图像, 图像纵轴截距为 1.50 V , 斜率绝对值为 0.80 , 则电池的电动势 $E = \underline{\hspace{1cm}}\text{ V}$, 内阻 $r = \underline{\hspace{1cm}}\Omega$ 。本实验产生系统误差的主要原因是_____。

C 层 · 创新拓展

C1. (电动车电池管理系统 BMS) 某电动车电池组电动势 $E = 360\text{ V}$, 新车时内阻 $r_0 = 0.1\Omega$ 。某次急加速时电流 $I = 500\text{ A}$ 。

(1) 求新车时路端电压;

(2) 电池使用老化后内阻增大到 $r_1 = 0.4\Omega$, 同样 500 A 电流下路端电压变为多少? 与新车相比发生了什么? 这对动力输出意味着什么?

(3) BMS 设定: 当路端电压低于 $U_{\text{限}} = 250\text{ V}$ 时, 强制降低最大输出电流。求新车和老车各自允许的最大输出电流, 并解释为什么老车会被“限功率”。

C2. (手机快充的多档电压) 某快充充电器支持 5 V 、 9 V 、 12 V 三档输出电压, 手机充电时等效电阻约 $R = 1.8\Omega$, 数据线及接口总电阻 $R_{\text{线}} = 0.2\Omega$ 。

(1) 用 5 V 档充电, 求电流和充电功率;

(2) 用 9 V 档充电, 求电流和充电功率;

(3) 用 12 V 档充电, 求电流、充电功率和线路上发热功率;

(4) 充电器标注最大输出电流 6 A , 分析“能不能靠继续升高电压无限提高充电功率”。

本章综合 · S 层

S1. (跨节综合) 电源 $E = 24\text{ V}$ 、内阻 $r = 2\Omega$, 外电路为定值电阻 $R_1 = 6\Omega$ 与滑动变阻器 R_2 串联, 电压表测路端电压。

(1) $R_2 = 4\Omega$ 时, 求电路电流、路端电压、 R_1 和 R_2 两端电压;

(2) 调节 R_2 , 电源输出功率何时最大? 最大输出功率多大? 此时 R_2 的阻值是多少?

(3) R_2 从 0 均匀调到 10Ω 的过程中, 路端电压如何变化? R_1 两端电压如何变化 (用“串反并同”检验)?

0.30 电功与电功率

考点精要

- **Q1 电功和电功率怎么算？**

A 电流做功 $W = UIt$ （电能转化为其他形式能），电功率 $P = UI$ （能量流的快慢）。对纯电阻（电能全转内能）， $P = I^2R = U^2/R$ 也成立。

- **Q2 算功率的“对应性铁律”是什么？**

A U 和 I 必须是同一个元件的——算灯泡用灯泡两端的电压和流过灯泡的电流，算整个电路用电源电压和总电流。混用两个不同元件的 U 、 I ，数字毫无意义。

- **Q3 纯电阻电路的三个功率公式关系？**

A 纯电阻中 $UI = I^2R = U^2/R$ 三者相等；非纯电阻（电动机）中 $UI = P_{\text{机}} + I^2R > I^2R$ ， U^2/R 无意义。

0.31 焦耳定律与非纯电阻

考点精要

- **Q1 焦耳定律是什么？**

A 电流热效应 $Q = I^2Rt$ （与电压 U 无直接关系，由电流和电阻决定）。

- **Q2 电动机（非纯电阻）的能量分配？**

A 电能 = 机械能 + 内能，即 $UI = P_{\text{机}} + I^2R$ 。此时 $UI \neq I^2R$ ，绝不能用品 U^2/R 算功率—— U 不全是线圈电阻上的电压。

- **Q3 电动机卡住不转会发生什么？**

A $P_{\text{机}} = 0$ ， $UI = I^2R$ ，电流 $I = U/R$ 暴增（正常电流的几倍到十几倍），发热功率 I^2R 急剧上升，线圈过热烧毁。

例题 8.1

电动机额定电压 $U = 220 \text{ V}$ 、电流 $I = 5 \text{ A}$ 、线圈电阻 $R = 4 \Omega$ 。求输入功率、热功率、机械功率。

A 层 · 基础过关

- A1.** 白炽灯铭牌“220 V 100 W”，正常工作时的电流多大？灯丝电阻多大？
- A2.** 一只“12 V 6 W”的灯泡要接在 18 V 的电源（内阻不计）上正常发光，需串联一个多大的电阻？该电阻消耗的功率是多少？（提示：用灯泡自己的电压电流算出工作电流，再用“对应性”算电阻）
- A3.** 一只电阻 $R = 10\ \Omega$ 接在 $U = 20\text{ V}$ 的电源上。
- (1) 求通过电阻的电流；
 - (2) 分别用 $P = UI$ 、 $P = I^2R$ 、 $P = U^2/R$ 求电阻消耗的功率，验证三者相等。
- A4.** 某直流电动机额定电压 $U = 48\text{ V}$ ，正常工作时电流 $I = 2\text{ A}$ ，线圈电阻 $R = 4\ \Omega$ 。
- (1) 求输入功率、热功率、机械功率；
 - (2) 求电动机的效率（机械功率 ÷ 输入功率）。
- A5.** 上题中的电动机若被卡住不转（ $P_{\text{机}} = 0$ ），线圈电阻仍为 $R = 4\ \Omega$ 、电压仍为 48 V：
- (1) 求此时通过电动机的电流；
 - (2) 求此时线圈的发热功率；
 - (3) 与正常工作的发热功率（A4 中热功率）比较，说明卡住的后果。

0.32 最大功率：滑动变阻器怎么取？

考点精要

• Q1 电源输出功率何时最大？

A 外电阻等于内阻（ $R = r$ ）时电源输出功率最大， $P_{\text{max}} = E^2/(4r)$ 。

• Q2 对同一个小于最大值的 P ，有几个 R 满足？

A 两个，且两电阻乘积 $R_1 R_2 = r^2$ （图像关于 $R = r$ 不对称但函数对称）。 $R \rightarrow 0$ 或 $R \rightarrow \infty$ 时 $P \rightarrow 0$ 。

• Q3 问“某个电阻上功率最大”怎么做？

A 等效内阻法：问谁功率最大，就把“别人”都并进电源。如定值电阻 R_0 与变阻器 R 串联， R 上功率最大时 $R = R_0 + r$ （等效内阻）。

例题 8.2

电源 $E = 12\text{ V}$ 、内阻 $r = 2\ \Omega$ ，外接滑动变阻器 R 。问 R 调到多少时电源输出功率最大？最大功率多大？

例题 8.3

（变式）上题中若外电路改为定值电阻 $R_0 = 8\ \Omega$ 与滑动变阻器 R 串联，问 R 调到多少时 R 上的功率最大？最大功率多大？

A 层 · 基础过关

A6. 两只白炽灯“220 V 100 W”和“220 V 25 W”串联后接入 220 V 电源（灯丝电阻不随温度变化）。

- （1）求两灯灯丝电阻之比；
- （2）求串联时通过两灯的电流；
- （3）求两灯的实际功率，并判断哪只更亮。

A7. 电源 $E = 9\text{ V}$ 、内阻 $r = 3\ \Omega$ ，外接电阻 R 。求：

- （1） R 调到多少时电源输出功率最大？最大功率多大？
- （2）此时电路电流和路端电压是多少？

A8. 电源 $E = 12\text{ V}$ 、内阻 $r = 1\ \Omega$ ，外电路为定值电阻 $R_0 = 5\ \Omega$ 与滑动变阻器 R 串联。问 R 调到多少时 R 上的功率最大？最大功率多大？

B 层 · 真题研习

B1.（2024 · 海南卷）虚接是常见的电路故障。电热器 A 与电热器 B 并联接在 M、N 两端，电压 $U = 220\text{ V}$ ；电热器 A、B 的电阻均为 $24\ \Omega$ 。B 电热器所在支路由于某种原因形成了“虚接”，该处接触电阻在 $0\sim 240\ \Omega$ 之间不稳定变化，可等效为一个串联在 B 支路的电阻 R_C 。

- （1）求 M、N 间总电阻 R 的变化范围；
- （2）当 $R_C = 240\ \Omega$ 时，求电热器 B 消耗的功率。（保留 3 位有效数字）

B2.（2025 · 浙江卷）我国新一代车用电池能够提供更长的续航里程，其参数之一为 $210\text{ W} \cdot \text{h/kg}$ 。其中单位“ $\text{W} \cdot \text{h}$ ”（瓦时）对应的物理量是（ ）

A. 能量 B. 位移 C. 电流 D. 电荷量

C 层 · 创新拓展

C1.（电热水壶）某电热水壶铭牌标“220 V 2000 W”。

- （1）求正常工作时通过加热丝的电流和加热丝电阻；
- （2）烧一壶水需要加热 10 分钟，求消耗的电能（用 J 和 $\text{kW} \cdot \text{h}$ 两种单位表示）；
- （3）若居民电价 0.6 元/（ $\text{kW} \cdot \text{h}$ ），烧这一壶水电费约多少？
- （4）若实际电压降为 200 V，加热丝电阻不变，此时水壶的实际功率是多少？烧水时间会

怎样变化？

C2.（锂电池容量与能量）某手机电池标称容量 4500 mAh、标称电压 3.7 V。

（1）求电池储存的电能（单位 Wh）；

（2）用 5 V/2 A 的充电器充电，若充电效率为 90%，理论上充满需要多长时间？

（3）某电动车电池组总能量为 52.5 kW · h，采用比能量 210 W · h/kg 的动力电池，求电池组的总质量；

（4）若手机待机时平均电流 50 mA，充满电可待机多久？用（1）的结果交叉验证。

本章综合 · S 层

S1.（跨节综合 · 电动机与闭合电路）某电动玩具车的直流电动机，额定电压 $U = 12\text{ V}$ 、正常工作时电流 $I = 2\text{ A}$ 、线圈电阻 $R = 1\ \Omega$ ，由内阻 $r = 1\ \Omega$ 的电池组供电。

（1）求电动机正常工作时的输入功率、热功率和机械功率；

（2）求电动机的效率；

（3）求电池组的电动势 E （提示：正常工作时路端电压 $U = 12\text{ V}$ ，利用闭合电路欧姆定律）；

（4）若电动机被卡住不转，求此时电路电流和线圈发热功率，并说明后果。

0.33 磁现象与磁感线

考点精要

• Q1 磁感线与电场线的根本区别？

A 磁感线是闭合曲线（外部 $N \rightarrow S$ ，内部 $S \rightarrow N$ ），因为自然界找不到孤立的“磁荷”；电场线不闭合（正电荷出发、负电荷终止）。

• Q2 指南针的 N 极为什么指向地理北极？

A 地理北极附近恰好是地磁南极，N 极被地磁南极吸引所以指向北方——“N 指 S”（N 极指向地磁南极）。

• Q3 磁感线的物理意义？

A 疏密表示强弱（密 = 强），切线方向表示该点磁场方向；匀强磁场中磁感线平行等距。

0.34 电流的磁场：右手螺旋定则（安培定则）

考点精要

• **Q1 通电直导线的磁场方向怎么判断？**

A 右手握住导线，拇指指向电流方向，四指弯曲方向即磁场环绕方向。

• **Q2 通电螺线管的 N 极怎么判断？**

A 右手四指沿电流环绕方向弯曲，拇指所指即 N 极（磁场方向）。

• **Q3 “左力右电”记忆锚？**

A 凡是“电生磁”（电流产生磁场）用右手（安培定则）；“力”（安培力、洛伦兹力）用左手——两条别搞混。

例题 9.1

通电直导线中电流竖直向上，导线右侧的磁场方向是什么？

例题 9.3

一通电螺线管，从螺线管右端观察，线圈中的电流沿逆时针方向。判断螺线管的 N 极在哪一端。

A 层 · 基础过关

A1. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

- (1) 磁感线是闭合曲线，在磁体外部从 N 极指向 S 极、内部从 S 极指向 N 极；
- (2) 磁感线上某点的切线方向表示该点的磁场方向；
- (3) 磁感线越密的地方磁场越弱；
- (4) 两条磁感线可以在磁场中相交。

A2. 请用“地磁南极/北极”和“同名相斥、异名相吸”解释：指南针的 N 极为什么指向地理北方？

A3. 通电直导线中电流竖直向下，求导线左侧的磁场方向。

A4. 通电螺线管，从螺线管左端观察，线圈中的电流沿顺时针方向。判断螺线管的 N 极在哪一端。

0.35 磁感应强度：磁场版的“场强”

考点精要

• Q1 磁感应强度怎么定义？

A 垂直放入磁场的通电导线，受力 F 与电流 I 、长度 L 成正比，比值 $B = F/IL$ 与 I 、 L 无关，只由磁场决定——比值定义，单位特斯拉 (T)。

• Q2 B 是矢量吗？方向如何规定？

A 是矢量，方向即该点磁场方向（磁感线切线方向、小磁针 N 极受力方向）。

• Q3 通电导线与磁场平行时受力吗？

A 不受力—— $F = BIL \sin \theta$ ， $\theta = 0$ 时 $F = 0$ ；求 B 时导线必须垂直磁场放置。

例题 9.2

一段长 $L = 0.2 \text{ m}$ 的通电直导线，通有电流 $I = 3 \text{ A}$ ，垂直放入匀强磁场中，测得导线受到的安培力 $F = 0.6 \text{ N}$ 。求该磁场的磁感应强度 B 。

A 层 · 基础过关

A5. 一段长 $L = 0.4 \text{ m}$ 的通电直导线，通有电流 $I = 2.5 \text{ A}$ ，垂直放入匀强磁场中，测得安培力 $F = 0.5 \text{ N}$ 。求磁感应强度 B 。

A6. 下列关于磁感应强度的说法，正确的是 ()

- A. 磁感应强度是标量，只有大小没有方向
- B. 磁感应强度的方向就是该处小磁针 N 极的受力方向
- C. 磁感应强度 $B = F/IL$ ， B 与 F 成正比、与 IL 成反比
- D. 磁场中某点的磁感应强度方向与通电导线的受力方向相同

A7. 两条平行长直导线相距 $2d$ ，通有同向电流。已知每根导线在距离 d 处产生的磁感应强度大小为 B_0 （方向用右手螺旋定则判断）。

- (1) 求两导线连线中点处的磁感应强度；
- (2) 若其中一根导线的电流反向，求中点处的磁感应强度。

A8. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

- (1) 通电导线与磁场方向平行时，不受磁场力作用；
- (2) 磁场中某点的磁感应强度大小，与是否放入通电导线无关；
- (3) 匀强磁场中各点的磁感应强度大小和方向都相同。

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 福建卷, 多选) 地球本身是一个大磁体, 其磁场分布如示意图。学术界对于地磁场的形成机制尚无共识, 一种理论认为地磁场主要源于地表电荷随地球自转产生的环形电流。基于此理论, 下列判断正确的是 ()

- A. 地表电荷为负电荷
- B. 环形电流方向与地球自转方向相同
- C. 若地表电荷的电量增加, 则地磁场强度增大
- D. 若地球自转角速度减小, 则地磁场强度增大

B2. (2022 · 浙江卷) 下列说法正确的是 ()

- A. 恒定磁场对静置于其中的电荷有力的作用
- B. 小磁针 N 极在磁场中的受力方向是该点磁感应强度的方向
- C. 正弦交流发电机工作时, 穿过线圈平面的磁通量最大时, 电流最大
- D. 升压变压器中, 副线圈的磁通量变化率大于原线圈的磁通量变化率

C 层 · 创新拓展

C1. (磁悬浮列车的悬浮原理) 某磁悬浮列车的悬浮电磁铁由超导线圈构成, 通电后从正上方俯视, 线圈中的电流沿逆时针方向。

(1) 用右手螺旋定则判断: 电磁铁上端是 N 极还是 S 极?

(2) 轨道上的线圈若要与悬浮电磁铁“同性相斥”实现悬浮, 轨道线圈正对电磁铁上端的一极应是什么磁极?

(3) 如果电磁铁电流方向突然反向, 悬浮会变成什么? 这说明了磁悬浮控制的关键是什么?

C2. (地磁场与通电导线) 地磁场在地表某处的竖直分量大小约为 $B = 5 \times 10^{-5} \text{ T}$ (北半球大致竖直向下)。一条长 $L = 1 \text{ m}$ 的导线水平放置, 通有电流 $I = 2 \text{ A}$, 电流方向自东向西。

(1) 求导线受到的安培力大小;

(2) 用左手定则判断安培力的方向;

(3) 这个力与导线重力 (约 0.1 N/m) 相比如何? 这说明了什么?

本章综合 · S 层

S1. (跨节综合) 两条平行长直导线相距 $d = 0.4 \text{ m}$, 通有同向电流 $I = 5 \text{ A}$ 。设每根导线在距离 r 处产生的磁感应强度大小 $B = kI/r$, 其中 $k = 2 \times 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ 。

(1) 求两导线连线中点 O 处的磁感应强度;

(2) 在导线 1 另一侧、距导线 1 为 d 处取一点 P (P 在导线 2 的延长线上), 求 P 点处磁感应强度的大小和方向;

(3) 另有一匀强磁场, 用一段长 $L = 0.5 \text{ m}$ 、电流 $I' = 2 \text{ A}$ 的导线垂直放入其中, 测得安培力 $F = 0.8 \text{ N}$, 求该匀强磁场的磁感应强度。

0.36 安培力的大小与方向

考点精要

- Q1 安培力的大小怎么算？

A $F = BIL \sin \theta$, θ 是电流方向与磁场方向的夹角；垂直 ($\theta = 90^\circ$) 时 $F = BIL$ 最大，平行 ($\theta = 0$) 时 $F = 0$ 。

- Q2 安培力的方向用哪个定则？

A 左手定则：伸开左手，让磁感线垂直穿入手心，四指指向电流方向，拇指即安培力方向。记忆锚“左力右电”——力用左手。

- Q3 F 、 B 、 I 三者的方向关系？

A 安培力 F 一定同时垂直于 B 和 I (垂直于 B 与 I 决定的平面)； B 与 I 不要求垂直 ($F = BIL \sin \theta$)，但已知 B 、 I 两方向， F 方向唯一确定。

例题 10.1

水平导轨上导体棒长 $L = 0.5 \text{ m}$ ，电流 $I = 4 \text{ A}$ ，磁场 $B = 0.3 \text{ T}$ 竖直向下。求安培力大小和方向。

A 层 · 基础过关

A1. 一段长 $L = 0.3 \text{ m}$ 的直导线通有电流 $I = 2 \text{ A}$ ，放在磁感应强度 $B = 0.4 \text{ T}$ 的匀强磁场中，电流方向与磁场方向夹角 $\theta = 30^\circ$ 。求安培力大小。

A2. 通电导线与磁场方向平行时，安培力是多少？为什么？如果不知道夹角，能不能直接用 $F = BIL$ ？

A3. 磁场方向水平向右，电流方向垂直纸面向外，求安培力的方向。

0.37 平行导线相互作用

考点精要

- Q1 两根平行通电导线的相互作用？

A 通同向电流互相吸引，反向电流互相排斥——别和电荷记混（电荷同号斥、电流同向吸）。

• Q2 为什么同向相吸？

A 以右导线为研究对象：左导线的电流用右手螺旋定则判断，在右导线处产生向里的磁场；右导线电流向上，用左手定则，拇指指向左导线——受力向左，相吸。逐根分析可推。

例题 10.3

（平行导线）两根水平平行长直导线通有同向电流。以其中一根为研究对象，说明两导线为什么互相吸引；若电流反向，结果如何？

A 层 · 基础过关

A4. 两根水平平行长直导线分别通有方向相反的电流，则它们（ ）

A. 相互吸引 B. 相互排斥 C. 无相互作用 D. 是否相吸取决于电流大小关系

0.38 安培力与运动学（伏笔）

考点精要

• Q1 安培力能改变导体的运动状态吗？

A 能。把安培力计入 $F_{\text{合}} = ma$ 即可——这是第 14 章“滑轨模型”的雏形（导体棒受安培力减速，渐近终极速度）。

• Q2 电动机为什么能转？

A 通电线圈在磁场中受安培力矩而转动，把电能转化为机械能；磁电式电流计指针偏转也是安培力的“量角器”。

例题 10.2

（安培力 + 斜面平衡）光滑斜面上水平放置导体棒，斜面倾角 $\theta = 30^\circ$ ，棒长 $L = 0.5 \text{ m}$ 、质量 $m = 0.1 \text{ kg}$ ，磁感应强度 $B = 1 \text{ T}$ 垂直斜面向上。求导体棒静止时电流大小。（ $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）

A 层 · 基础过关

A5. 一根导体棒在竖直导轨上，长 $L = 0.2 \text{ m}$ 、质量 $m = 0.1 \text{ kg}$ ，放在水平方向的匀强磁场 $B = 1 \text{ T}$ 中（磁场垂直导轨平面向里），通电流后导体棒静止。求电流大小和方向。（ $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）

A6. 水平导轨上导体棒质量 $m = 0.05 \text{ kg}$ 、长 $L = 0.4 \text{ m}$ （垂直放在导轨上），与导轨间动摩擦因数 $\mu = 0.5$ ，磁场 $B = 0.5 \text{ T}$ 竖直向上，电流 $I = 2 \text{ A}$ 沿棒方向（垂直于导轨、水平）。

- (1) 求安培力大小和方向；
- (2) 求最大静摩擦力（近似等于滑动摩擦力）；
- (3) 判断导体棒能否运动，若能求加速度。（ $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）

A7.（斜面平衡变式）光滑斜面倾角 $\theta = 30^\circ$ ，导体棒长 $L = 0.5 \text{ m}$ 、质量 $m = 0.1 \text{ kg}$ ，磁感应强度 $B = 0.5 \text{ T}$ 垂直斜面向上，安培力沿斜面向上恰好使棒静止。

- (1) 求通过导体棒的电流大小；
- (2) 若电流反向，棒还能静止吗？为什么？

A8.（安培力与运动）光滑水平导轨上导体棒质量 $m = 0.2 \text{ kg}$ 、长 $L = 0.5 \text{ m}$ （垂直放在导轨上），匀强磁场 $B = 1 \text{ T}$ 竖直向下，通电流 $I = 4 \text{ A}$ 沿棒方向（垂直于导轨、水平）。

- (1) 求安培力大小和方向；
- (2) 求导体棒的加速度；
- (3) 从静止开始 2 s 末的速度和位移。

B 层·真题研习

B1.（2023·江苏卷）匀强磁场的磁感应强度为 B 。L 形导线通以恒定电流 I ，放置在磁场中。已知 ab 边长为 $2l$ ，与磁场方向垂直； bc 边长为 l ，与磁场方向平行。该导线受到的安培力为（ ）

- A. 0 B. BIl C. $2BIl$ D. $\sqrt{5}BIl$

B2.（2022·江苏卷）两根固定的通电长直导线 a 、 b 相互垂直， a 平行于纸面、电流方向向右， b 垂直于纸面、电流方向向里，则导线 a 所受安培力方向（ ）

- A. 平行于纸面向上
B. 平行于纸面向下
C. 左半部分垂直纸面向外，右半部分垂直纸面向里
D. 左半部分垂直纸面向里，右半部分垂直纸面向外

C 层·创新拓展

C1.（电磁炮）电磁炮利用通电导体在磁场中受安培力加速：导轨间磁感应强度 $B = 2 \text{ T}$ ，导轨间距 $L = 0.2 \text{ m}$ ，炮弹（含电枢）质量 $m = 0.1 \text{ kg}$ ，通电电流 $I = 5000 \text{ A}$ 。

- (1) 求炮弹所受安培力大小；
- (2) 求炮弹的加速度；
- (3) 若导轨长 $x = 2 \text{ m}$ ，炮弹从静止出发，求出口速度；
- (4) 与传统火药炮相比，电磁炮的显著优点是什么？

C2.（电流天平升级）电流天平可用来测量安培力：横梁为等臂杠杆，左端挂砝码，右端挂一

矩形线圈。线圈底边水平、长 $L = 0.1 \text{ m}$ ，置于水平方向的匀强磁场 $B = 0.5 \text{ T}$ 中，底边通有电流 $I = 2 \text{ A}$ ，电流方向与磁场方向垂直且使安培力竖直向上。线圈（含底边）所受重力 $G = 0.3 \text{ N}$ 。

- (1) 求安培力的大小和方向；
- (2) 天平平衡时，求左端砝码的重力；
- (3) 若电流方向反向，安培力方向变为向下，天平重新平衡时砝码重力变为多少？

本章综合 · S 层

S1.（跨节综合 · 安培力 + 闭合电路 + 运动）光滑水平导轨间距 $L = 0.5 \text{ m}$ ，导体棒垂直放在导轨上，两导轨间接电源 $E = 6 \text{ V}$ 、内阻 $r = 1 \Omega$ ，导体棒电阻 $R = 2 \Omega$ （导轨电阻不计），整个装置处于竖直向下的匀强磁场 $B = 1 \text{ T}$ 中。导体棒质量 $m = 0.2 \text{ kg}$ ，与导轨间动摩擦因数 $\mu = 0.4$ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)。

- (1) 闭合开关，求电路电流；
- (2) 求导体棒所受安培力的大小和方向；
- (3) 判断导体棒能否运动，若能，求加速度；
- (4) 若想使导体棒恰好匀速运动（或保持静止），动摩擦因数应为多少？

0.39 洛伦兹力：磁场给运动电荷的“横刀”

考点精要

• Q1 洛伦兹力的大小怎么算？

$A F = qvB \sin\theta$ ， θ 是 v 与 B 的夹角。 $v \perp B$ 时最大 (qvB)， $v \parallel B$ 时为零。

• Q2 洛伦兹力的方向怎么判？

A 左手定则：让磁场穿手心，四指指向正电荷运动方向（负电荷反向），拇指所指即受力方向。

• Q3 洛伦兹力与安培力是什么关系？

A 安培力是导线内大量运动电荷所受洛伦兹力的宏观总和——同一个力，一个看宏观、一个看微观。

• Q4 速度选择器为什么能“挑速度”？

A 电场力 qE 与洛伦兹力 qvB 平衡时粒子匀速直线穿过，此时 $v = E/B$ ，与电荷种类、质量无关。

例题 11.1

质子 ($q = +e$) 以 $v = 2 \times 10^6 \text{ m/s}$ 水平向右进入竖直向下的匀强磁场 $B = 0.5 \text{ T}$ 。求洛伦兹力的大小和方向。

0.40 最重要的性质：洛伦兹力永不做功

考点精要

- Q1 为什么洛伦兹力永不做功？

A F 恒垂直于 v ，瞬时功率 $P = Fv \cos 90^\circ = 0$ ，任何时刻都不做功。

- Q2 洛伦兹力对粒子的速度和动能各有什么影响？

A 只改变速度方向，不改变速度大小——动能不变，“只能转弯，不能加速”。

- Q3 磁场能把粒子加速到高速吗？

A 不能，加速必须靠电场（洛伦兹力永不做功，是电场和磁场最本质的分工）。

例题 11.2

电子以 $v = 3 \times 10^6 \text{ m/s}$ 垂直进入 $B = 2 \times 10^{-4} \text{ T}$ 的匀强磁场。求轨迹半径和周期。（ $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ， $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）

0.41 圆周运动：r 和 T 的黄金公式

考点精要

- Q1 半径公式是什么？

A $r = mv/qB$ ，与速度成正比——跑得越快，转的圈越大。

- Q2 周期公式是什么？

A $T = 2\pi m/qB$ ，与速度无关，只由 m 、 q 、 B 决定。

- Q3 速度加倍、磁场加倍时 r 和 T 各怎么变？

A 速度加倍 $\rightarrow r$ 加倍、 T 不变；磁场加倍 $\rightarrow r$ 减半、 T 减半（“速度变半径，磁场变周期”）。

- **Q4 为什么垂直进入匀强磁场的粒子做匀速圆周运动？**

A 大小不变的洛伦兹力提供向心力，方向始终指向圆心。

例题 11.3

质量为 m 、电荷量为 $+q$ 的粒子在竖直平面内，受竖直向下的匀强电场 E （满足 $qE = mg$ ）和垂直纸面向里的匀强磁场 B 。粒子以速度 v 水平向右射出。

(1) 判断粒子的运动轨迹；(2) 求轨迹半径与周期。

0.42 质谱仪：用半径分辨质量

考点精要

- **Q1 质谱仪怎么测质量？**

A 粒子经电压 U 加速 ($\frac{1}{2}mv^2 = qU$)，进入磁场偏转，半径 $r = (1/B)\sqrt{(2mU/q)}$ —— r 与质量 m 的平方根成正比，测出 r 就测出 m 。

- **Q2 同位素为什么能被分开？**

A 质量不同 $\rightarrow$ 半径不同 $\rightarrow$ 落在感光板不同位置。

0.43 回旋加速器：电加速、磁回旋

考点精要

- **Q1 为什么交变电场频率必须等于回旋频率？**

A $f = qB/2\pi m$ ，粒子每次到两盒间隙时电场恰好处于加速方向（谐振）。

- **Q2 最大动能由什么决定？**

A $E_{k,max} = q^2 B^2 R^2 / 2m$ ，由 B 、 R 、 q/m 决定，与加速电压 U 无关—— U 只决定加速次数（ U 越大，次数越少）。

- **Q3 加速次数和总时间怎么算？**

A $n = E_{k,max} / qU$ ；总时间约 $(n/2) \cdot T$ （每圈加速 2 次）。

0.44 有界磁场：找圆心，定半径，算轨迹

考点精要

- Q1 有界磁场破题三步是什么？

A 找圆心（过入射、出射点作速度的垂线，交点即圆心）→ 定半径（ $r = mv/qB$ + 几何）→ 算轨迹（ $s = r\theta$, $t = \theta T/2\pi$ ）。

- Q2 运动时间与什么有关？

A 只由圆心角 θ 决定，与速度大小无关—— θ 越大时间越长。

- Q3 单边界进出有什么对称性？

A 进、出磁场方向关于“入射点与圆心连线”对称；同一边界进出轨迹是半圆。

0.45 叠加场：重力、电场、磁场同场竞技

考点精要

- Q1 叠加场破题第一问是什么？

A 合力能不能“叠”成熟悉的形状：匀速直线（三力平衡）、匀速圆周（重力电场力抵消）、复杂曲线（能量分析）。

- Q2 等效重力场法怎么用？

A 把重力与电场力合成等效重力 $G' = \sqrt{(mg)^2 + (qE)^2}$ ，叠加场问题就变成“等效重力场 + 磁场”这个熟悉的单一场景。

- Q3 复杂曲线运动靠什么求解？

A 洛伦兹力永不做功——动能定理与能量守恒是叠加场问题唯一的“救命稻草”。

A 层·基础过关

A1. α 粒子（ $q = +2e$ ）以 $v = 1 \times 10^6$ m/s 垂直进入 $B = 0.2$ T 的匀强磁场。求洛伦兹力的大小和方向。

A2. 电子沿水平方向向右运动，进入垂直纸面向里的匀强磁场。判断电子所受洛伦兹力的方向；若换成质子以相同速度进入，受力方向如何？

A3. 判断下列说法是否正确，并说明理由：

- (1) 洛伦兹力永不做功，所以带电粒子在磁场中运动时动能一定不变；
- (2) 带电粒子在磁场中运动时速率不变，说明它没有受到力的作用；
- (3) 磁场可以加速带电粒子。

A4. 质子 ($m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$, $q = +e$) 以 $v = 2 \times 10^6 \text{ m/s}$ 垂直进入 $B = 0.5 \text{ T}$ 的匀强磁场。求轨迹半径和周期。

A5. (定性) 电子与质子以相同的速度进入同一匀强磁场做匀速圆周运动，谁的半径大？若电子的速度加倍，它的轨迹半径和周期各如何变化？若磁感应强度加倍呢？

A6. 质谱仪中，一价离子经加速电压 $U = 800 \text{ V}$ 加速后进入磁感应强度 $B = 0.2 \text{ T}$ 的偏转磁场，测得偏转半径 $r = 0.05 \text{ m}$ 。求该离子的质量。($e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)

A7. 氦核 (电荷量 $+e$ ，质量约 $2 \times 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$) 在回旋加速器中加速，D 形盒最大半径 $R = 0.4 \text{ m}$ ，磁感应强度 $B = 0.5 \text{ T}$ 。求：

- (1) 氦核能获得的最大速度；
- (2) 交变电场应采用的频率。

A8. 带电粒子以速度 v 、与边界成 30° 角射入宽度为 d 的匀强磁场，恰好从另一边界射出。求粒子轨迹半径 r 与 d 的关系。

A9. 一带正电粒子在竖直平面内受竖直向下的电场 E 和垂直纸面向里的磁场 B 作用，且 $qE = mg$ 。粒子以 $v = 5 \times 10^5 \text{ m/s}$ 水平向右射出。已知该粒子的比荷 $q/m = 1 \times 10^7 \text{ C/kg}$ ， $B = 0.2 \text{ T}$ 。求轨迹半径。

A10. 速度选择器中匀强电场 $E = 2 \times 10^4 \text{ V/m}$ (方向向下)，匀强磁场 $B = 0.1 \text{ T}$ (垂直纸面向里)。求恰好能匀速直线穿过的粒子速度大小；若粒子速度大于该值，它将向哪个方向偏转？

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 广东卷) 某小型医用回旋加速器，最大回旋半径为 0.5 m ，磁感应强度大小为 1.12 T ，质子加速后获得的最大动能为 $1.5 \times 10^7 \text{ eV}$ 。根据给出的数据，可计算质子经该回旋加速器加速后的最大速率约为 (忽略相对论效应， $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$) ()

- A. $3.6 \times 10^6 \text{ m/s}$
- B. $1.2 \times 10^7 \text{ m/s}$
- C. $5.4 \times 10^7 \text{ m/s}$
- D. $2.4 \times 10^8 \text{ m/s}$

B2. (2023 · 海南卷) 如图所示，带正电的小球竖直向下射入垂直纸面向里的匀强磁场中，关于小球运动和受力说法正确的是 ()

- A. 小球刚进入磁场时受到的洛伦兹力水平向右
- B. 小球运动过程中的速度不变
- C. 小球运动过程的加速度保持不变

D. 小球受到的洛伦兹力对小球做正功

B3. (2022 · 重庆卷) 2021 年中国全超导托卡马克核聚变实验装置创造了新的纪录。为粗略了解等离子体在托卡马克环形真空室内的运动状况, 某同学将一小段真空室内的电场和磁场理想化为方向均水平向右的匀强电场和匀强磁场, 电场强度大小为 E , 磁感应强度大小为 B 。若某电荷量为 q 的正离子在此电场和磁场中运动, 其速度平行于磁场方向的分量大小为 v_1 , 垂直于磁场方向的分量大小为 v_2 , 不计离子重力, 则 ()

A. 电场力的瞬时功率为 $qE\sqrt{v_1^2 + v_2^2}$

B. 该离子受到的洛伦兹力大小为 qv_1B

C. v_2 与 v_1 的比值不断变大

D. 该离子的加速度大小不变

B4. (2026 · 云南卷) 洛伦兹力演示仪中, 玻璃泡内有一直径竖直、圆心为 O 、半径为 R 的圆面, 最高点为 P , 区域内磁场视为匀强磁场。电子枪将电子从 O 点正下方 $0.8R$ 处的 S 点以速度 v 水平向左射出, 电子在圆面内运动一段时间后到达 P 点。已知电子质量为 m 、电荷量为 e , 不计重力。求:

(1) 匀强磁场的磁感应强度大小和方向;

(2) 电子从 S 点第一次到达 P 点所用的时间。

C 层 · 创新拓展

C1. (质子治疗) 肿瘤质子治疗中, 质子被加速到 $v = 6.0 \times 10^7 \text{ m/s}$ 后垂直射入磁感应强度 $B = 1.0 \text{ T}$ 的偏转磁场, 使其偏转 90° 后准确轰击肿瘤 ($m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)。

(1) 求质子轨迹半径;

(2) 求质子做圆周运动的周期及偏转 90° 所需时间;

(3) 若磁场区域需容纳这段 90° 圆弧, 磁场的半径至少多大?

C2. (极光与磁约束) 北极上空的极光, 本质是太阳风中的带电粒子被地球磁场“引”向两极后撞击大气发光。

(1) 粒子进入地球磁场后, 轨迹为什么不是直线而是螺旋线?

(2) 若粒子速度方向与磁场方向有小夹角 (不垂直), 它沿磁场方向的运动还会被磁场“转”弯吗? 为什么?

(3) 托卡马克装置用强磁场把高温等离子体约束在环形真空室内, 正是利用磁场“只转弯、不做功”的特性——试从“洛伦兹力永不做功”说明: 为什么磁场约束等离子体时不需要直接消耗能量去“推”它们?

C3. (动态圆 · 放缩圆临界) 磁感应强度 $B = 1 \text{ T}$ 的匀强磁场垂直纸面向里, 两平行边界间距 $d = 0.4 \text{ m}$ 。一带正电粒子 (电荷量 $q = 1 \times 10^{-6} \text{ C}$ 、质量 $m = 4 \times 10^{-10} \text{ kg}$) 从左边界的 A 点以速度 v 垂直于边界射入磁场 (指向右)。

(1) 写出粒子在磁场中做圆周运动的半径 R 与速度 v 的关系式;

- (2) 若粒子恰好不能从右边界穿出（轨迹与右边界相切），求速度 v_0 ；
- (3) 分别求 $v = 2v_0$ 和 $v = \frac{v_0}{2}$ 时粒子在磁场中的运动时间（用 $\pi m/qB$ 表示）。

本章综合 · S 层

S1.（电场加速 + 磁场圆周综合） α 粒子（ $q = +2e$, $m = 6.64 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ）从静止开始经加速电压 $U = 2000 \text{ V}$ 加速后，垂直进入磁感应强度 $B = 0.05 \text{ T}$ 的匀强磁场做匀速圆周运动。

- (1) 求 α 粒子加速后的速度大小；
- (2) 求粒子在磁场中的轨迹半径；
- (3) 求粒子做圆周运动的周期；

(4) 若磁场区域是一个以入射点为边界、宽度为 0.4 m 的长条形区域，粒子能否从另一侧边界穿出？请通过半径判断。

S2.（竖直面叠加场综合）质量为 m 、电荷量为 $+q$ 的小球，在竖直面内有竖直向下的匀强电场 E （满足 $mg = qE$ ）和垂直纸面向里的匀强磁场 B 。小球以速度 v_0 从 O 点水平向右射出。

- (1) 判断小球的运动性质，并说明理由；
- (2) 求小球轨迹半径 r 与周期 T ；
- (3) 经过半个周期后，求小球相对 O 点的水平位移和竖直位移；
- (4) 若某时刻突然撤去电场，描述小球接下来的运动情况（定性）。

0.46 磁铁插线圈：先看现象

考点精要

- **Q1** 磁铁插拔线圈有哪四个现象、三个结论？

A 慢慢插轻偏、飞快插猛跳、不动归零、拔出反向。结论：动才有电流（变化是关键）；动得越快电流越大（变化快慢是度量）；插拔方向相反（方向有规律）。

- **Q2** 为什么信用卡必须“刷”而不能静止放上去？

A 划动瞬间磁条相对线圈运动、磁通量变化，才产生感应电流；静止时磁通量不变，读不出来。

- **Q3** 为什么磁铁插入时感觉线圈在“推拒”、拔出时在“挽留”？

A 线圈感应电流的磁场阻碍磁通量变化（第 13 章楞次定律），本质是能量守恒。

0.47 磁通量：数一数穿过线圈的磁感线

考点精要

- Q1 磁通量怎么定义？

A 线圈平面垂直于磁场时 $\Phi = BS$ ，一般情形 $\Phi = BS \cos\theta$ （取垂直分量），单位韦伯（Wb）。
直觉： Φ 是“穿过线圈的磁感线总根数”。

- Q2 磁通量是标量还是矢量？正负号怎么理解？

A 标量。正负只表示穿入方向（穿入/穿出），不表示大小。

- Q3 Φ 变化的四种方式？

A 磁铁靠近（B 增大）、远离（B 减小）、线圈转动（投影面积减小）、线圈变形（面积减小）。

例题 12.1

线圈面积 $S = 0.02 \text{ m}^2$ ，磁场 $B = 0.5 \text{ T}$ 垂直穿入。求磁通量；若线圈转过 90° （磁场平行于线圈平面），磁通量变为多少？

0.48 感应电流的条件： Φ 要变，不是 Φ 大

考点精要

- Q1 感应电流产生的条件是什么？

A 闭合回路中磁通量发生变化。

- Q2 Φ 大就有感应电流吗？

A 不一定。 Φ 很大但不变，没有感应电流； Φ 很小但变化快，感应电流反而大。判据永远是： Φ 变不变，而不是 Φ 大不大。

- Q3 线圈在匀强磁场中平动和转动，哪个有感应电流？

A 平动时穿过线圈的磁感线根数不变，无感应电流；转动时投影面积变化，有感应电流。

例题 12.2

判断下列情形中，闭合线圈内是否产生感应电流，并说明理由：

- (1) 线圈静止在匀强磁场中，磁场很强；
- (2) 线圈在匀强磁场中沿磁场方向匀速平动；
- (3) 线圈在匀强磁场中绕垂直于磁场的轴匀速转动；
- (4) 条形磁铁从远处快速插入静止的线圈。

A 层·基础过关

A1. 线圈面积 $S = 0.1 \text{ m}^2$ ，磁感应强度 $B = 0.4 \text{ T}$ 。

- (1) 磁场垂直穿过线圈平面，求磁通量；
- (2) 磁场方向与线圈平面成 60° 夹角，求磁通量。

A2. 匀强磁场 $B = 0.3 \text{ T}$ ，线圈面积 $S = 0.2 \text{ m}^2$ ，线圈平面垂直于磁场。现将线圈绕其一边转过 90° （线圈平面平行于磁场），求磁通量的变化量。

A3. 判断下列情况中闭合线圈是否产生感应电流：

- (1) 线圈在匀强磁场中沿垂直磁场方向整体平动；
- (2) 线圈在匀强磁场中绕垂直于磁场的直径匀速转动；
- (3) 线圈静止在通电直导线旁边，导线中电流恒定；
- (4) 线圈静止在通电直导线旁边，导线中电流突然增大。

A4.（辨析）“磁通量很大的线圈一定产生感应电流”这种说法对吗？请举出反例；再举一个“磁通量很小但产生明显感应电流”的例子。

A5. 规定垂直纸面向里穿过线圈为正方向。匀强磁场 $B = 0.5 \text{ T}$ ，线圈面积 $S = 0.04 \text{ m}^2$ 。若磁感线从纸面穿出方向（即从线圈反面穿入），求磁通量（含符号）。

A6. 匀强磁场 $B = 0.5 \text{ T}$ ，线圈面积从 0.1 m^2 均匀减小到零。求磁通量的变化量。

A7.（变 Φ 四方式）请分别设计一个使磁通量发生变化的操作：

(1) 只改变 B ；(2) 只改变线圈面积；(3) 只改变线圈与磁场的夹角；(4) 线圈保持不动但改变磁场方向。

A8. 一矩形线圈平放在水平桌面上，竖直向下的匀强磁场穿过它。下列哪些操作会使线圈中产生感应电流？

(1) 线圈沿桌面水平移动；(2) 线圈绕水平边翻转；(3) 磁感应强度均匀增大；(4) 线圈绕竖直轴缓慢转动（竖直轴过线圈中心）。

B 层·真题研习

B1.（2022·上海卷）半径为 R 的金属圆环里，有一个垂直于纸面向里且半径为 r 的圆形区域匀强磁场，磁感应强度大小为 B 。若增大该区域的磁感应强度，则金属圆环的感应电流方向

为（选填“顺时针”或“逆时针”）；若保持圆形区域内磁场的磁感应强度大小不变、方向变化 180° ，则金属圆环的磁通量变化的大小为 。

B2.（2023·海南卷）汽车测速利用了电磁感应现象，汽车可简化为一个矩形线圈 $abcd$ （俯视图中沿 $abcd$ 方向为顺时针），埋在地下的线圈分别为 1、2，通上顺时针（俯视）方向电流，当汽车经过线圈时（ ）

- A. 线圈 1、2 产生的磁场方向竖直向上
- B. 汽车进入线圈 1 过程产生感应电流方向为 $abcd$
- C. 汽车离开线圈 1 过程产生感应电流方向为 $abcd$
- D. 汽车进入线圈 2 过程受到的安培力方向与速度方向相同

C 层·创新拓展

C1.（无线充电）手机无线充电垫内有一个发射线圈，手机内有一个接收线圈。接通电源后，发射线圈中通有变化的交变电流，手机就能充电。

- （1）充电时接收线圈内的磁通量为什么不恒定？感应电流的来源是什么？
- （2）手机离开充电垫越远，充电越慢——请从磁通量变化的角度解释；
- （3）若发射线圈通的是恒定电流，手机还能充上电吗？为什么？

C2.（磁悬浮列车的进站制动）磁悬浮列车进站时不需要摩擦刹车，轨道下方嵌有一排强磁铁，列车底部有金属板（导体）。列车高速掠过磁铁上方时会被“温柔地”减速。

- （1）金属板里为什么会出现感应电流？磁通量是怎么变化的？
- （2）感应电流受什么力阻碍列车运动？这体现了哪个物理规律？
- （3）列车速度越大，减速效果越强还是越弱？为什么？

本章综合·S 层

S1.（来拒去留与磁通量）一个可在光滑水平面上自由移动的闭合线圈，正上方有一块条形磁铁，N 极朝下。

- （1）磁铁向下靠近线圈时，穿过线圈的磁通量如何变化？
- （2）线圈中感应电流的磁场方向如何？由此判断线圈与磁铁之间的相互作用是吸引还是排斥；
- （3）磁铁向下靠近过程中需要“用力压”吗？说明能量来源。

S2.（磁通量变化与感应电动势预告）边长 0.2 m 的正方形线圈共 100 匝，处于磁感应强度 $B = 0.4\text{ T}$ 的匀强磁场中，线圈平面垂直于磁场。在 0.2 s 内将线圈从磁场中完全拉出（线圈运动方向垂直于磁场）。

- （1）求线圈完全拉出前、后穿过线圈的磁通量及磁通量的变化量；
- （2）求此过程中穿过线圈的磁通量的平均变化率 $\Delta\Phi/\Delta t$ ；
- （3）学完第 13 章法拉第定律 $E = n\Delta\Phi/\Delta t$ 后，请预测感应电动势约为多少，并核验量级。

0.49 法拉第定律：电动势是变化率，不是变化量

考点精要

- Q1 法拉第定律的公式是什么？

A $E = n\Delta\Phi/\Delta t$ ——感应电动势正比于磁通量变化率，与 Φ 本身无关 (Φ 大但不变, $E = 0$)。

- Q2 匝数加倍、变化时间减半，电动势各怎么变？

A 都加倍 (E 与 n 成正比、与 Δt 成反比)。

- Q3 B 均匀变化时 ($B-t$ 图为直线)，感应电动势如何？

A $\Delta B/\Delta t$ 恒定 $\rightarrow E$ 恒定、 I 恒定； B 变化越来越快 $\rightarrow E$ 越来越大。“看变化率”是法拉第定律的灵魂。

0.50 楞次定律：电流为什么总“阻碍”变化

考点精要

- Q1 楞次定律的内容是什么？

A 感应电流的方向，总是使感应电流的磁场阻碍引起感应电流的磁通量的变化。

- Q2 判断方向的两个口诀？

A 增反减同 (Φ 增大则感应磁场反向，减小则同向)；来拒去留 (磁铁靠近排斥、远离吸引)。

- Q3 为什么感应电流必须“阻碍”变化？

A 能量守恒——感应电流的能量只能来自外力做功；若“帮助”变化，能量无中生有，违背物理规律。

0.51 互感与自感（变压器与电感的前置）

考点精要

- Q1 什么是互感？

A 一个线圈电流变化，在邻近线圈中引起感应电动势（变压器原理）。

- Q2 什么是自感？

A 线圈自身电流变化，在自身引起感应电动势，“阻碍”自身电流变化——电感像电路的“惯性”（详见第 15 章）。

0.52 感应图像的“四件套”与电量通式

考点精要

- Q1 Φ -t 图怎么看？

A 切线斜率就是感应电动势（ $E = n|\Delta\Phi/\Delta t|$ 的几何意义）。

- Q2 电量通式是什么？

A $q = n\Delta\Phi/R$ ——只由磁通量的变化量决定，与变化快慢无关（插得快慢只影响电流大小，流过总电荷量相同）。

- Q3 图像题两步走？

A 先看斜率判“变不变”，再判方向。

例题 13.1

100 匝线圈面积 $S = 0.02 \text{ m}^2$ 垂直于磁场，B 在 0.1 s 内从 0.2 T 均匀增到 0.6 T。求感应电动势；若线圈电阻 $R = 4 \Omega$ ，求感应电流。

例题 13.2

判断：N 极向下插入线圈时，感应电流方向（从上往下看）。

例题 13.3

50 匝线圈面积 $S = 0.04 \text{ m}^2$ ，回路电阻 $R = 3 \Omega$ ，匀强磁场在 0.2 s 内从 0.3 T 均匀减到零。求感应电动势、感应电流、流过回路的电荷量。

A 层·基础过关

A1. 200 匝线圈面积 $S = 0.01 \text{ m}^2$ 垂直于磁场，磁感应强度在 0.05 s 内从 0.1 T 均匀增到 0.5 T。求感应电动势。

- A2.** 判断：S 极向下插入线圈时，从上往下看，感应电流方向如何？（说明用到的口诀）
- A3.** 条形磁铁 N 极向下，插入线圈后再向上拔出。拔出过程中，从上往下看感应电流方向如何？与插入时相比方向是否相反？
- A4.**（比较）两个线圈面积、匝数相同，第一个线圈磁通量在 0.1 s 内从 0 变到 0.02 Wb，第二个在 0.2 s 内从 0 变到 0.04 Wb。哪个感应电动势大？说明理由。
- A5.** 100 匝线圈面积 $S = 0.02 \text{ m}^2$ ，回路电阻 $R = 5 \Omega$ ，磁感应强度从 0 均匀增大到 0.5 T（方向垂直于线圈平面）。求流过回路的电荷量。若变化时间缩短一半，电荷量变吗？
- A6.** 匀强磁场的 B-t 图像为一条直线，斜率 $\Delta B/\Delta t = 2 \text{ T/s}$ 。线圈 $n = 50$ 匝、 $S = 0.1 \text{ m}^2$ 垂直于磁场。求感应电动势。
- A7.**（楞次定律受力）条形磁铁 N 极向下，从线圈上方静止释放穿过线圈下落。磁铁进入线圈和离开线圈两个阶段，受到线圈的力分别是推拒还是挽留？全程磁铁下落速度与自由落体相比如何？
- A8.** $n = 100$ 匝线圈，磁通量的平均变化率 $\Delta\Phi/\Delta t = 0.05 \text{ Wb/s}$ ，回路电阻 $R = 10 \Omega$ 。求感应电动势与感应电流。

B 层·真题研习

- B1.**（2024·江苏卷）如图所示，在绝缘的水平面上，有闭合的两个线圈 a、b，线圈 a 处在匀强磁场中，现将线圈 a 从磁场中匀速拉出，线圈 a、b 中产生的感应电流方向分别是（ ）
- A. 顺时针，顺时针
B. 顺时针，逆时针
C. 逆时针，顺时针
D. 逆时针，逆时针
- B2.**（2024·北京卷）如图所示，线圈 M 和线圈 P 绕在同一个铁芯上（线圈 M 通电时在铁芯右端产生水平向右的磁场），下列说法正确的是（ ）
- A. 闭合开关瞬间，线圈 M 和线圈 P 相互吸引
B. 闭合开关，达到稳定后，电流表的示数为 0
C. 断开开关瞬间，流过电流表的电流方向由 a 到 b
D. 断开开关瞬间，线圈 P 中感应电流的磁场方向向左
- B3.**（2024·新课标卷）电动汽车制动时可利用车轮转动将其动能转换成电能储存起来。车轮转动时带动磁极绕固定的线圈旋转，在线圈中产生电流。磁极匀速转动的某瞬间，磁场方向恰与线圈平面垂直（此时穿过线圈的磁通量最大）。将两磁极间的磁场视为匀强磁场，则磁极再转过 90° 时，线圈中（ ）（多选）
- A. 电流最小
B. 电流最大
C. 电流方向由 P 指向 Q

D. 电流方向由 Q 指向 P

C 层·创新拓展

C1. (无线充电定量) 手机无线充电接收线圈 $n = 50$ 匝, 面积 $S = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 。发射线圈通高频电流, 某段时间内垂直穿过接收线圈的磁感应强度在 $\Delta t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$ 内从 $B_1 = 2 \times 10^{-3} \text{ T}$ 均匀增大到 $B_2 = 6 \times 10^{-3} \text{ T}$, 接收线圈电阻 $R = 0.4 \Omega$ 。

(1) 求感应电动势和感应电流;

(2) 求这段时间内流过接收线圈的电荷量;

(3) 若把手机放在充电垫正中央改为放在边缘 (磁通量变化率减为一半), 充电电流变为多少? 说明无线充电“要放准”的原因。

C2. (电磁炉定量) 电磁炉炉面下有高频线圈, 交变磁场直接“搅”出锅底的涡流发热。把锅底近似为单匝等效线圈: 锅底等效面积 $S = 0.03 \text{ m}^2$, 磁感应强度在 $\Delta t = 1 \times 10^{-4} \text{ s}$ 内从 0 均匀增大到 $B = 5 \times 10^{-3} \text{ T}$, 锅底等效电阻 $R = 2 \times 10^{-3} \Omega$ 。

(1) 求感应电动势与感应电流的大小;

(2) 求此段时间内的平均热功率;

(3) 若换成玻璃锅 (绝缘体), 还能加热吗? 为什么?

本章综合·S 层

S1. (B-t 图像综合) 50 匝线圈面积 $S = 0.05 \text{ m}^2$ 垂直于匀强磁场, 回路电阻 $R = 10 \Omega$ 。磁感应强度 B 随时间 t 的变化为: 0 2 s 内从 0 均匀增大到 0.4 T; 2 4 s 内保持 0.4 T 不变; 4 6 s 内从 0.4 T 均匀减小到 0。

(1) 求各阶段的感应电动势和感应电流大小;

(2) 判断 0 2 s 与 4 6 s 两阶段感应电流方向是否相同;

(3) 求整个 6 s 内流过回路的电荷量。

S2. (法拉第 + 楞次综合) 100 匝线圈面积 $S = 0.04 \text{ m}^2$, 回路电阻 $R = 8 \Omega$, 磁感应强度 $B = 0.6 \text{ T}$ 垂直纸面向里, 在 0.2 s 内均匀减小到零。

(1) 求感应电动势、感应电流和流过回路的电荷量;

(2) 判断感应电流方向 (从上往下看);

(3) 若磁感应强度不是均匀减小而是“越来越快地减小”, 感应电流的大小如何变化?

0.53 动生电动势: 导体棒切磁感线

考点精要

• Q1 动生电动势公式是什么?

$\mathcal{E} = BLv$ (棒垂直切割磁场); 它是法拉第定律在“切割”情形下的快捷公式 (棒每秒扫

过面积 Lv ，磁通量每秒增加 BLv ）。

- Q2 棒斜着切割时怎么算？

A 取速度垂直于磁场的分量（或磁场垂直于棒的速度分量）。

- Q3 回路中有多个电阻时怎么算电流？

A $I = E/R_{\text{总}}$ ——先合并总电阻再算电流。

- Q4 滑轨题的“五步回路法”是什么？

A 判类型（切割 BLv 还是磁通量变化 $n\Delta\Phi/\Delta t$ ）→ 定电流（楞次/右手定则）→ 判力（左手定则，安培力永远阻碍变化）→ 列方程（受力分析 + $F = ma$ ，把 E 、 I 、 F_A 用 v 表示）→ 收尾（终极速度 / 热量 / 电量）。

例题 14.1

棒长 $L = 0.5 \text{ m}$ ， $B = 0.4 \text{ T}$ ， $v = 2 \text{ m/s}$ ，回路电阻 $R = 0.2 \Omega$ 。求 E 、 I 、安培力。

0.54 恒力滑轨：终极速度

考点精要

- Q1 恒力拉棒为什么最终匀速？

A 速度越大安培力（ $F_A = B^2 L^2 v / R$ ）越大，加速度减小；当安培力等于恒力时 $a = 0$ ，匀速。

- Q2 终极速度公式？

A $v_{\text{max}} = FR / B^2 L^2$ （安培力 = 恒力时）。

- Q3 求焦耳热用什么？

A 能量守恒：恒力做功 - 末动能 = 焦耳热（克服安培力做功 = 电能 = 焦耳热）。

- Q4 求电荷量用什么？

A 动量定理：安培力冲量 = BLq （ q 为流过回路的电荷量），或用 $q = \Delta\Phi / R = BLx / R$ 。

例题 14.2

导轨间距 $L = 1 \text{ m}$, 棒质量 $m = 0.5 \text{ kg}$, $R = 0.5 \Omega$, $B = 1 \text{ T}$, 恒力 $F = 2 \text{ N}$ 拉棒从静止开始。(1) 求终极速度; (2) 求速度 0.5 m/s 时的加速度; (3) 滑行 10 m 达到终极速度, 求产生的焦耳热。

A 层 · 基础过关

A1. 导体棒长 $L = 0.4 \text{ m}$, 以 $v = 3 \text{ m/s}$ 垂直切割 $B = 0.5 \text{ T}$ 的匀强磁场。求感应电动势。

A2. 导体棒长 $L = 1 \text{ m}$, 垂直切割 $B = 0.8 \text{ T}$ 的匀强磁场, 速度 $v = 2 \text{ m/s}$, 回路电阻 $R = 0.4 \Omega$ 。求感应电动势、感应电流和安培力。

A3. (变化规律) 棒切割速度加倍, E 、 I 、 F_A 各变为原来的几倍? (提示: $F_A = BIL = B^2 L^2 v / R$)

A4. 光滑水平导轨间距 $L = 0.5 \text{ m}$, $B = 1 \text{ T}$, 回路电阻 $R = 0.5 \Omega$, 恒力 $F = 4 \text{ N}$ 拉棒。求终极速度。

A5. (参数变化) 例 14.2 中, 若磁感应强度增大一倍 ($B = 2 \text{ T}$), 终极速度变为多少? (其他条件不变)

A6. 光滑水平导轨间距 $L = 1 \text{ m}$, 棒质量 $m = 0.2 \text{ kg}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $R = 0.5 \Omega$, 恒力 $F = 1 \text{ N}$ 拉棒, 滑行 4 m 时已达匀速。求终极速度及此过程中产生的焦耳热。

A7. 光滑水平导轨间距 $L = 1 \text{ m}$, 棒质量 $m = 0.5 \text{ kg}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $R = 1 \Omega$ 。棒以 $v_0 = 4 \text{ m/s}$ 的初速度滑入磁场, 受安培力减速至停下。求流过棒的电量及棒滑行的距离。

A8. 水平导轨间距 $L = 1 \text{ m}$, 棒质量 $m = 0.4 \text{ kg}$, $B = 0.5 \text{ T}$, $R = 0.5 \Omega$, 棒与导轨间动摩擦因数 $\mu = 0.2$ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)。恒力 $F = 3 \text{ N}$ 水平拉棒。求终极速度。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 全国甲卷) 金属导轨平行且水平放置, 导轨间距为 L , 导轨光滑无摩擦, 定值电阻大小为 R , 其余电阻忽略不计。整个装置处于竖直方向且磁感应强度为 B 的匀强磁场中, 金属棒始终与导轨垂直。(简化自原题第 (1) 问) 开关 S 闭合时, 对金属棒施加以水平向右的恒力, 金属棒能达到的最大速度为 v_0 。当外力功率为定值电阻功率的两倍时, 求金属棒速度 v 的大小。

B2. (2023 · 江苏卷) 如图所示, 圆形区域内有垂直纸面向里的匀强磁场, OC 导体棒的 O 端位于圆心, 棒的中点 A 位于磁场区域的边缘。现使导体棒绕 O 点在纸面内逆时针转动。 O 、 A 、 C 点电势分别为 φ_O 、 φ_A 、 φ_C , 则 ()

A. $\varphi_O > \varphi_C$

B. $\varphi_C > \varphi_A$

C. $\varphi_O = \varphi_A$

D. $\varphi_O - \varphi_A = \varphi_A - \varphi_C$

C 层 · 创新拓展

C1. (电磁弹射) 福建舰电磁弹射系统用强磁场中的大电流导体(弹射滑块)对舰载机加速。简化模型: 两根平行导轨间距 $L = 3\text{ m}$, 其间存在竖直向上的匀强磁场 $B = 0.5\text{ T}$, 弹射滑块通有恒定电流 $I = 2 \times 10^5\text{ A}$ (通过两导轨供电), 滑块与舰载机总质量 $m = 2 \times 10^4\text{ kg}$ 。

- (1) 求滑块所受安培力的大小;
- (2) 若导轨长 $s = 90\text{ m}$ 、摩擦与空气阻力忽略, 求舰载机离舰速度(起飞速度);
- (3) 起飞速度与磁场方向和电流方向有什么关系? 改变哪个量能“更快起飞”?

C2. (摇绳发电) 两位同学相距约 5 m , 各拿一根导线的一端, 把一根总长 $L = 5\text{ m}$ 的软导线绷直, 在竖直面内摇动。设当地地磁场竖直分量 $B = 5 \times 10^{-5}\text{ T}$, 导线摇动时某段的切割速度约 $v = 2\text{ m/s}$ 。

- (1) 求这段导线切割地磁场产生的感应电动势大小;
- (2) 摇动频率加快, 感应电动势如何变化? 为什么?
- (3) 为什么两端要接在灵敏电流计上才能“看到电”?

C3. (双杆模型) 如图所示(图略): 两根完全相同的光滑金属棒 ab 、 cd 质量均为 $m = 0.1\text{ kg}$ 、电阻均为 $R = 0.25\ \Omega$, 放在水平光滑平行导轨上(导轨电阻不计, 间距 $L = 0.5\text{ m}$), 导轨处于竖直向下的匀强磁场中($B = 1\text{ T}$)。给 ab 棒一个水平初速度 $v_0 = 4\text{ m/s}$, cd 棒初始静止。

- (1) 定性说明两棒接下来的运动情况: ab 、 cd 分别做什么运动? 最终达到什么状态?
- (2) 求两棒最终的共同速度;
- (3) 求整个过程中回路产生的焦耳热。

C4. (线框进入磁场模型) 正方形金属线框边长 $a = 0.4\text{ m}$ 、质量 $m = 0.1\text{ kg}$ 、电阻 $R = 0.2\ \Omega$, 从距匀强磁场上边界 $h = 1.25\text{ m}$ 高处由静止开始自由下落(磁场方向垂直纸面向里, 水平边界, 磁场宽度远大于线框边长, g 取 10 m/s^2 , 磁感应强度 $B = 0.5\text{ T}$)。

- (1) 求线框下边刚进入磁场时的速度 v ;
- (2) 求此时线框受到的安培力大小, 并判断线框进入磁场过程的运动性质;
- (3) 线框完全进入磁场后、下边尚未出磁场前, 线框做什么运动?
- (4) 求线框从开始下落到完全进入磁场的过程中, 产生的焦耳热 Q 。

本章综合 · S 层

S1. (滑轨 + 能量 + 动量综合) 光滑水平导轨间距 $L = 1\text{ m}$, 棒质量 $m = 0.5\text{ kg}$, 电阻 $R = 1\ \Omega$, 匀强磁场 $B = 1\text{ T}$ 竖直向下。恒力 $F = 2\text{ N}$ 水平拉棒, 从静止开始滑行 $x = 2\text{ m}$ 时速度恰好为 $v = 2\text{ m/s}$ 。

- (1) 判断此时棒是否已达终极速度, 并求出终极速度;
- (2) 求前 2 m 过程中通过棒的电量和产生的焦耳热;
- (3) 此刻撤去恒力, 棒还能继续滑行多远?

S2. (斜面滑轨综合) 光滑斜面倾角 $\theta = 30^\circ$, 导轨间距 $L = 0.5\text{ m}$, 棒质量 $m = 0.2\text{ kg}$, 电阻 $R = 0.5\ \Omega$, 磁感应强度 $B = 0.8\text{ T}$ 垂直斜面向上。棒从斜面顶端静止释放, 沿导轨下滑, 斜面足

够长。

- (1) 棒沿斜面方向受哪几个力？最终做什么运动？
- (2) 求终极速度；
- (3) 若棒下滑 4 m（已匀速），求此过程中产生的焦耳热。

0.55 自感：电路的“惯性”

考点精要

• Q1 自感现象是什么？

A 线圈自身电流变化时，自身磁通量变化，产生阻碍自身电流变化的感应电动势——电感像电路的“惯性”。

• Q2 自感电动势公式？

$\mathcal{E} = L\Delta I/\Delta t$ ， L 是自感系数（单位亨利 H）。

• Q3 为什么断电瞬间开关处会打火花？

A 断电时电流要突变为零，自感“维持”电流不立刻消失，电流只能“挤”过开关间隙—— Δt 极短 $\rightarrow \mathcal{E} = L\Delta I/\Delta t$ 极大 $\rightarrow$ 击穿空气打火花。

• Q4 通电和断电时，自感分别起什么作用？

A 通电时“拖延”电流建立（电流逐渐上升），断电时“维持”电流不立刻消失（延迟消失）。

例题 15.1

为什么断电瞬间开关处会打火花？

例题 15.2

一个自感系数 $L = 0.5 \text{ H}$ 的线圈，电流在 0.1 s 内从 2 A 均匀减小到 0。求自感电动势的大小。

0.56 涡流：变化的磁场在金属里“搅出”电流

考点精要

• Q1 涡流是什么？

A 块状金属在变化磁场中，内部产生旋涡状感应电流——涡流。

• Q2 涡流的三个应用方向？

A 发热（电磁炉、感应电炉）、阻尼（电磁刹车、电表指针快速停下）、探测（金属探测器、安检门）。

• Q3 变压器铁芯为什么用硅钢片叠成？

A 整块铁芯在交变磁场中涡流大、发热严重；硅钢片之间绝缘，把涡流“切”碎限制在薄片内，大大减小涡流损耗。

• Q4 电磁炉为什么不能加热玻璃锅？

A 玻璃不导电，变化磁场无法在其中产生涡流，没有焦耳热——电磁炉只对铁、钢等导体锅底有效。

A 层·基础过关

A1. 自感系数 $L = 0.2 \text{ H}$ 的线圈，电流在 0.05 s 内从 0 均匀增大到 3 A 。求自感电动势的大小。

A2. （方向）闭合开关给线圈通电的瞬间，线圈中自感电动势的方向与原电流方向相同还是相反？它起什么作用？

A3. 为什么断开接有大电感线圈的电路时，开关处常出现火花？用自感电动势公式解释。

A4. （参数变化）线圈自感系数加倍、电流变化时间减半（电流变化量相同），自感电动势变为原来的几倍？

A5. （涡流条件）把一块铜块、一块铝块和一块塑料块分别靠近通有交变电流的线圈。哪几个会产生明显的涡流？为什么？

A6. （应用匹配）将下列装置与“涡流的应用”连线：

- | | |
|---------------|--------------|
| (1) 电磁炉 | A. 涡流阻尼 |
| (2) 机场安检门 | B. 涡流发热 |
| (3) 磁电式电流表阻尼器 | C. 涡流探测 |
| (4) 感应电炉 | D. 涡流发热 + 探测 |

A7. 变压器铁芯为什么要用一片片互相绝缘的硅钢片叠成，而不是一整块铁？从能量角度说明。

A8. (辨析) 下列说法是否正确: 自感会阻碍一切电流, 所以电感元件在直流稳定电路中也会“阻止”电流通过。

B 层·真题研习

B1. (2023·北京卷) 如图所示, L 是自感系数很大、电阻很小的线圈, P 、 Q 是两个相同的小灯泡, 开始时, 开关 S 处于闭合状态, P 灯微亮, Q 灯正常发光, 断开开关 ()

- A. P 与 Q 同时熄灭
- B. P 比 Q 先熄灭
- C. Q 闪亮后再熄灭
- D. P 闪亮后再熄灭

B2. (2024·湖北卷) 《梦溪笔谈》中记录了一次罕见的雷击事件: 房屋被雷击后, 屋内的银饰、宝刀等金属熔化了, 但是漆器、刀鞘等非金属却完好。导致金属熔化而非金属完好的原因可能为 ()

- A. 摩擦
- B. 声波
- C. 涡流
- D. 光照

C 层·创新拓展

C1. (断电自感与续流保护) 电磁铁线圈自感系数 $L = 0.5 \text{ H}$, 工作时电流 $I = 5 \text{ A}$ 。切断电源时, 电流在 $\Delta t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$ 内减为 0。

(1) 求断电瞬间线圈产生的自感电动势;

(2) 若无保护措施, 这么大的电动势发生在开关处, 会有什么后果?

(3) 工程上常在线圈两端反向并联一个“续流电阻”(阻值 $R = 100 \Omega$), 使断电后电流经电阻缓慢衰减。断开瞬间线圈电流仍为 5 A , 求此刻电阻两端电压, 并说明续流电阻为什么能防止打火。

C2. (磁悬浮列车的磁刹车) 磁悬浮列车制动时不需要摩擦刹车: 列车底部的金属鳍片掠过轨道上的一排强磁铁, 靠涡流阻力平稳减速。将鳍片等效为单匝导体条: 有效长度 $L = 0.6 \text{ m}$, 在 $B = 0.3 \text{ T}$ 的磁场中以 $v = 300 \text{ km/h}$ (约 83 m/s) 掠过, 鳍片等效电阻 $R = 0.05 \Omega$ 。

(1) 求鳍片中感应电动势和感应电流的大小;

(2) 求鳍片所受安培力的大小与方向;

(3) 为什么这种刹车“没有摩擦、没有磨损”? 速度越大刹车效果如何?

本章综合·S 层

S1. (断电自感电路综合) 某电路如图: 电源电动势 6 V (内阻不计)、开关 S 、定值电阻 $R = 2 \Omega$ 与自感线圈 $L = 1 \text{ H}$ 串联后与灯泡 P 并联。闭合开关稳定后, 灯泡正常发光, 线圈中电流 $I = 2 \text{ A}$ 。

(1) 闭合开关的瞬间，为什么灯泡不是立刻最亮？用自感原理解释；

(2) 断开开关瞬间，线圈电流不能突变，若电流在 $\Delta t = 1 \times 10^{-3} \text{ s}$ 内减为 0，求自感电动势；

(3) 断开后灯泡为何会“闪亮一下再熄灭”？灯泡闪亮消耗的能量从哪里来？

S2. (涡流与能量转化综合) 一块质量为 $m = 0.1 \text{ kg}$ 的强磁铁，从高 $h = 1 \text{ m}$ 处由静止释放，穿过一根竖直放置的铝管（铝管壁是导体）。磁铁穿过铝管过程中明显减速，出管口时速度 $v = 3 \text{ m/s}$ ($g = 10 \text{ m/s}^2$)。

(1) 磁铁下落过程，铝管壁内产生了什么？磁铁为什么变慢？

(2) 求磁铁从进入铝管到离开铝管过程中，涡流产生的焦耳热；

(3) 若换用铜管（铜的导电性更好），磁铁出管口的速度会更大还是更小？为什么？

0.57 正弦交流电的产生

考点精要

• Q1 正弦交流电是怎么产生的？

A 线圈在匀强磁场中绕垂直于磁感线的轴匀速转动，穿过线圈的磁通量按正弦规律变化，感应电动势随时间也按正弦规律变化： $e = E_m \sin \omega t$ 。

• Q2 峰值 E_m 由什么决定？

$A E_m = nBS\omega$ ：匝数 n 、磁感应强度 B 、线圈面积 S 、角速度 ω 越大，峰值越大。峰值与转轴在平面内的位置无关（只要转轴垂直于磁场）。

• Q3 什么是中性面？线圈经过中性面时有什么特点？

A 线圈平面与磁场垂直的位置叫中性面。在中性面处磁通量最大，但磁通量的变化率为零，感应电动势为零；线圈每经过中性面一次，电流方向改变一次，所以转动一周电流方向改变两次。

• Q4 $e-t$ 图像怎么读？

A 纵坐标是电动势（峰值 E_m ），横坐标是时间（周期 $T = 2\pi/\omega$ ）。若 $t = 0$ 时 e 从最大值开始 ($e = E_m \cos \omega t$)，说明计时起点线圈平面与磁场平行。

例题 16.1

一台小型发电机，矩形线圈 100 匝、面积 $S = 0.2 \text{ m}^2$ ，放在 $B = 0.5 \text{ T}$ 的匀强磁场中，线圈绕垂直于磁场的轴以 600 r/min 匀速转动。求：

- (1) 感应电动势的峰值 E_m ；
- (2) 感应电动势的有效值；
- (3) 电动势的频率 f 。

A 层 · 基础过关

A1. 一矩形线圈在匀强磁场中匀速转动，产生的感应电动势为 $e = 311\sin(100\pi t) \text{ V}$ 。

- (1) 求电动势的峰值、有效值、频率和周期；
- (2) 求 $t = 0.005 \text{ s}$ 时电动势的瞬时值。

A2. 线圈从中性面开始计时，电动势瞬时值 $e = E_m \sin\omega t$ 。已知当线圈平面转过 60° 时， $e = 155.5 \text{ V}$ ，求峰值 E_m 。

A3. 判断下列说法的正误，并说明理由：

- (1) 线圈经过中性面时，感应电流最大；
- (2) 线圈平面与磁场方向平行时，穿过线圈的磁通量变化率最大；
- (3) 线圈每转动一周，感应电流方向改变两次。

0.58 有效值：交流电的“等效直流”

考点精要

• Q1 什么是有效值？为什么要引入有效值？

A 让交流电与某个恒定电流在相同电阻上产生相同热量，这个恒定电流的值就是交流电的有效值。交流电忽大忽小，只有用“等效直流”才能直接套用直流电路的热量、功率公式。

• Q2 正弦交流电的峰值与有效值有什么关系？

A $U = U_m/\sqrt{2}$ ， $I = I_m/\sqrt{2}$ 。我国家庭电路 220 V 是有效值，峰值约 311 V 。

• Q3 算热量、功率、电表读数用哪个值？算击穿电压用哪个值？

A 热量、功率、电压表电流表读数全用有效值（它们反映“平均效果”）；击穿电压用峰值——峰值瞬间就能击穿，平均值和有效值都“骗不了”它。

• Q4 为什么计算热量不能用交流电的平均值？

A 正弦交流电一个周期内的平均值为零（正负抵消），而热量取决于电流的平方（正负都发热），必须用“平方平均”的有效值。

例题 16.2

正弦交流电电压峰值 $U_m = 311 \text{ V}$ ，求有效值；若把它加在 $R = 100 \Omega$ 的电阻上，求电阻的热功率。

A 层 · 基础过关

A4. 某正弦交流电通过阻值为 10Ω 的电阻，在一个周期（ $T = 0.02 \text{ s}$ ）内产生的热量为 0.4 J 。求通过电阻的电流有效值和峰值。

A5. 家庭电路（ 220 V ）中接入一只“ 220 V ， 1000 W ”的电热水壶。

- （1）求电热水壶正常工作时的电流有效值；
- （2）求电流的峰值；
- （3）若将一个耐压 310 V 的电容器并联在电路中，电容会不会被击穿？为什么？
- （4）该壶连续工作 10 分钟，产生多少热量？

A6. 交流电压表接在家庭电路上，读数为 220 V 。

- （1）该电路的电压峰值是多少？
- （2）某电容器标称耐压 250 V ，能否直接接在家庭电路中？为什么？

0.59 电感与电容对交流的阻碍

考点精要

- Q1 电感对直流和交流的阻碍有什么不同？

A 电感“通直流阻交流”：直流电稳定时感抗为零；交流电频率越高感抗越大（ $X_L = 2\pi fL$ ），即“通低频阻高频”。

- Q2 电容对直流和交流呢？

A 电容“隔直流、通交流”：直流电稳定时电容断路；交流电频率越高容抗越小（ $X_C = 1/2\pi fC$ ）。

- Q3 为什么说感抗、容抗“不耗能”？

A 电容把电能储存在电场里、电感把电能储存在磁场里，能量在电源与元件之间来回“借贷”、并不散失；只有电阻把电能转化为热能（能量有去无回）。所以电容、电感不发热，只有电阻发热。

• Q4 滤波电路怎么设计？

A 让某段频率通过：串联电容（通高频阻低频）或串联电感（通低频阻高频）；旁路高频杂波则并联电容。

例题 16.3

把电感 $L = 0.1 \text{ H}$ 的线圈和电容 $C = 10 \mu\text{F}$ 的电容器，分别接到频率为 50 Hz 和 1000 Hz 的交流电源上。求各自的感抗与容抗，并说明频率升高后它们的变化规律。

A 层 · 基础过关

A7. 判断下列说法的正误，并说明理由：

- (1) 电感线圈对恒定电流没有阻碍作用；
- (2) 电容器能够让恒定电流“通过”；
- (3) 在电子电路中，电感常用来“通低频、阻高频”；
- (4) 电容器在交流电路中的作用是“隔直流、通交流”。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 新课标卷) 电动汽车制动时可利用车轮转动将其动能转换成电能储存起来。车轮转动时带动磁极绕固定的线圈旋转，在线圈中产生电流。磁极匀速转动的某瞬间，磁场方向恰与线圈平面垂直。将两磁极间的磁场视为匀强磁场，则磁极再转过 90° 时，线圈中 ()

- A. 电流最小
- B. 电流最大
- C. 电流方向由 P 指向 Q
- D. 电流方向由 Q 指向 P

B2. (2023 · 湖南卷) 某同学自制了一个手摇交流发电机，大轮与小轮通过皮带传动（皮带不打滑），半径之比为 $4:1$ ，小轮与线圈固定在同一转轴上。线圈是由漆包线绕制而成的边长为 L 的正方形，共 n 匝，总阻值为 R 。磁体间磁场可视为磁感应强度大小为 B 的匀强磁场。大轮以角速度 ω 匀速转动，带动小轮及线圈绕转轴转动，转轴与磁场方向垂直。线圈通过导线、滑环和电刷连接一个阻值恒为 R 的灯泡。假设发电时灯泡能发光且工作在额定电压以内，下列说法正确的是 ()

- A. 线圈转动的角速度为 4ω
- B. 灯泡两端电压有效值为 $3\sqrt{2} nBL^2\omega$

C. 若用总长为原来两倍的同种漆包线重新绕制成边长仍为 L 的多匝正方形线圈，则灯泡两端电压有效值为 $(4\sqrt{2}/3) nBL^2\omega$

D. 若仅将小轮半径变为原来的两倍，则灯泡变得更亮

C 层·创新拓展

C1. (电动汽车交流慢充) 某电动汽车随车交流充电桩接 220 V 市电，额定功率 7 kW (功率因数按 1 计算)。

(1) 充电桩正常工作时，电流的有效值约为多少？电流峰值约为多少？

(2) 充电桩的效率为 90% (输入电能的 90% 转化为电池的化学能)。要将一块总容量 60 kW·h、当前电量 20% 的动力电池充满，大约需要充电多少小时？

(3) 从“交变电流能否直接给电池充电”的角度，解释为什么慢充用交流电、而大功率快充却要直接用直流电。

C2. (光伏并网逆变器) 家庭屋顶光伏组件输出直流电，经逆变器转变为交流电后并入电网。某户光伏组件总功率 5 kW，逆变器转换效率 95%，输出交流电压 220 V (有效值)。

(1) 组件满功率发电时，并网交流电流的有效值约为多少？

(2) 天气转阴，组件实际输出功率降为 2 kW，此时并网电流为多大？

(3) 光伏逆变器并网前，为什么必须使输出的交流电与电网“同频率、同相位”？

本章综合·S 层

S1. (发电机与电路综合) 一台手摇发电机，线圈匝数 $n = 200$ ，面积 $S = 0.02 \text{ m}^2$ ，匀强磁场 $B = 0.5 \text{ T}$ ，线圈以 10 r/s 匀速转动。线圈内阻 $r = 2 \Omega$ ，外接电阻 $R = 10 \Omega$ 。

(1) 求感应电动势的峰值与有效值；

(2) 求外接电阻 R 两端电压的有效值；

(3) 求电阻 R 上消耗的平均功率；

(4) 若 $t = 0$ 时线圈平面恰好与磁场方向平行，写出电动势的瞬时值表达式。

S2. (半波整流与有效值) 某交变电流在一个周期内，前半个周期为峰值 $I_m = 2 \text{ A}$ 的正弦交流电，后半个周期电流为零 (即“半波整流”后的电流)。

(1) 求该电流的有效值；

(2) 将它通过 $R = 5 \Omega$ 的电阻，求电阻消耗的平均功率；

(3) 若把该电流接入电流表 (测量有效值)，电流表的读数是多少？

0.60 变压器：互感升降压

考点精要

- Q1 理想变压器满足哪三个规律？

A (1) 电压比: $U_1/U_2 = n_1/n_2$; (2) 电流比: $I_1/I_2 = n_2/n_1$ (只对一个副线圈成立); (3) 功率守恒: $P_1 = P_2$ 。

• **Q2 升压变压器为什么“降电流”? 降压变压器为什么“升电流”?**

A 功率 $P = UI$ 守恒: 电压升高电流必减小, 电压降低电流必增大。升压 ($n_2 > n_1$) 降电流, 降压 ($n_2 < n_1$) 升电流。

• **Q3 变压器能改变直流电压吗?**

A 不能。变压器靠互感传能——直流电流恒定, 铁芯中磁通量不变, 副线圈没有感应电动势。

• **Q4 变压器动态分析的两条主线是什么?**

A (1) 原线圈接恒压交流电时, U_2 只由匝数比决定、与负载无关; (2) 负载变化 $\rightarrow$ 副线圈电流变 $\rightarrow$ 原线圈电流跟着变 (靠功率守恒联动)。

例题 17.1

理想变压器原线圈 $n_1 = 1000$ 匝接 $U_1 = 220\text{ V}$ 交流电, 副线圈 $n_2 = 100$ 匝接 $R = 22\ \Omega$ 的电阻。求副线圈电压和原、副线圈中的电流。

A 层 · 基础过关

A1. 理想变压器原线圈 $n_1 = 1100$ 匝接 220 V 交流电, 副线圈 $n_2 = 55$ 匝。

- (1) 求副线圈电压;
- (2) 若副线圈接 $R = 11\ \Omega$ 的负载, 求副线圈、原线圈中的电流;
- (3) 验证功率守恒。

A2. 判断下列说法的正误, 并说明理由:

- (1) 变压器可以把直流电压升高或降低;
- (2) 理想变压器空载 (副线圈不接负载) 时, 原线圈电流为零;
- (3) 原、副线圈电压之比等于匝数之比, 只在理想变压器 (无能量损失) 时才严格成立;
- (4) 升压变压器同时可以增大电流。

A3. 某变压器原线圈接 220 V 交流电, 副线圈输出电压为 110 V 。已知副线圈匝数为 50 匝。

- (1) 原线圈匝数是多少?
- (2) 若把 110 V 的交流电接到原来的副线圈两端, 原来接 220 V 的那一端输出电压是多少?

0.61 远距离输电：为什么要升压

考点精要

- Q1 输电线上损失的功率怎么算？

A $P_L = I^2 r$ 。电流 $I = P/U$ （输送功率 ÷ 输电电压），线损与电流平方成正比，与输电电压的平方成反比。

- Q2 为什么“升压 k 倍，线损降 k^2 倍”？

A 功率一定时，电压升到 k 倍 → 电流降到 $1/k$ → 线损 $I^2 r$ 降到 $1/k^2$ 。

- Q3 线损功率能不能用 U^2/r 算？

A 不能直接套。 $P = U^2/r$ 中的 U 必须是“输电线两端的电压降”（ $U_{\text{损}} = Ir$ ），不是输电电压。先用 $I = P/U$ 算出电流，再用 $I^2 r$ 。

- Q4 远距离输电分析题的流程是什么？

A 发电 → 升压 → 线路 → 降压 → 用户，共四个环节，逐环列式；功率在各环节守恒，线路环节算线损 $I^2 r$ 。

例题 17.2

（输电定量计算）小型电站输出功率 $P = 100 \text{ kW}$ ，输电线路总电阻 $r = 5 \Omega$ 。

- （1）直接以 250 V 输送，线损功率多大？
- （2）升压到 10 kV 输送，线损功率多大？
- （3）若要求线损不超过输送功率的 1% ，至少升压到多少？

A 层 · 基础过关

A4. 某电站输出功率 $P = 100 \text{ kW}$ ，输电线路电阻 $r = 5 \Omega$ 。

- （1）用 10 kV 输电，求输电电流和线损功率；
- （2）若改用 1 kV 输电，线损功率为多大？
- （3）输电电压升为原来的 10 倍，线损降为原来的几分之几？

A5. 发电机输出电压 250 V 、输出功率 500 kW ，经理想升压变压器升到 10 kV 输送，输电线路总电阻 4Ω ，再经理想降压变压器降压供用户使用。

- (1) 求输电电流与线路损耗功率；
- (2) 求线损功率占输出功率的百分比；
- (3) 求降压变压器原线圈两端的电压。

A6. 小型水电站输出功率 20 kW，输出电压 400 V。

- (1) 直接用 400 V 输送，线路总电阻 $1\ \Omega$ ，线损功率多大？
- (2) 升压到 4000 V 输送，线损功率多大？
- (3) 比较两次线损，说明“升压输电”的价值。

A7. 判断下列说法的正误，并说明理由：

- (1) 输电线上损失的功率可以表示为 $P_L = U^2/r$ ，其中 U 为输电电压；
- (2) 升压变压器原线圈中的电流比副线圈中的电流小；
- (3) “高压输电”的本质是提高电压、减小电流，从而减小线损；
- (4) 输电功率一定时，线路损耗与输电电压的平方成反比。

B 层·真题研习

B1. (2023·山东卷) 某节能储能输电网络如图所示，发电机的输出电压 $U_1 = 250\text{ V}$ ，输出功率 500 kW。降压变压器的匝数比 $n_3:n_4 = 50:1$ ，输电线总电阻 $R = 62.5\ \Omega$ ，其余线路电阻不计，用户端电压 $U_4 = 220\text{ V}$ ，功率 88 kW，所有变压器均为理想变压器。下列说法正确的是 ()

- A. 发电机的输出电流为 368 A
- B. 输电线上损失的功率为 4.8 kW
- C. 输送给储能站的功率为 408 kW
- D. 升压变压器的匝数比 $n_1:n_2 = 1:44$

B2. (2023·北京卷) 自制一个原、副线圈匝数分别为 600 匝和 190 匝的变压器，原线圈接 12 V 的正弦交流电源，副线圈接额定电压为 3.8 V 的小灯泡。实际测得小灯泡两端电压为 2.5 V。下列措施有可能使小灯泡正常发光的是 ()

- A. 仅增加原线圈匝数
- B. 仅增加副线圈匝数
- C. 将原、副线圈匝数都增为原来的两倍
- D. 将两个 3.8 V 小灯泡并联起来接入副线圈

B3. (2023·广东卷) 用一合理想变压器对电动汽车充电。该变压器原、副线圈的匝数比为 1:2，输出功率为 8.8 kW，原线圈的输入电压 $u = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t)\text{ V}$ 。关于副线圈输出电流的有效值和频率，正确的是 ()

- A. 20 A, 50 Hz
- B. 28.3 A, 50 Hz
- C. 20 A, 100 Hz

D. 40 A, 100 Hz

B4. (2025 · 全国 II 卷) 理想变压器原线圈接正弦式交变电源, 副线圈连接定值电阻 R , 原、副线圈匝数比为 $2:1$ 。下列说法正确的是 ()

- A. 原、副线圈两端电压之比为 $2:1$
- B. 原、副线圈输入输出功率之比为 $2:1$
- C. 原、副线圈中电流之比为 $1:2$
- D. 增大负载电阻 R 的阻值, 原线圈输入功率增大

C 层 · 创新拓展

C1. (特高压输电) 某特高压直流输电工程额定输送功率为 $4 \times 10^9 \text{ W}$ (4000 MW), 输电电压 $\pm 800 \text{ kV}$ (按 800 kV 计)。

- (1) 求输电电流;
- (2) 若把输电电压提高到 1000 kV , 输送同样的功率, 输电线路损耗降为原来的几分之几?
- (3) 从“线损与电压平方成反比”的角度, 说明为什么要大力发展特高压输电。

C2. (充电桩里的变压器) 某直流快充桩内部有一台理想变压器, 将 10 kV 高压电降为 750 V 供整流电路使用。原线圈匝数 $n_1 = 2000$ 匝。

- (1) 副线圈匝数 n_2 应为多少?
- (2) 若副线圈输出电流为 80 A , 原线圈输入电流多大?
- (3) 若该充电站有 20 个这样的充电桩同时满负荷工作, 站内变压器从 10 kV 电网取用的总功率和总电流各是多少?

本章综合 · S 层

S1. (四环节输电综合) 某发电厂输出功率 $P_0 = 100 \text{ kW}$, 输出电压 $U_1 = 250 \text{ V}$ 。升压变压器匝数比 $n_1:n_2 = 1:40$, 输电线路总电阻 $r = 12.5 \Omega$, 降压变压器将电压降为 $U_4 = 220 \text{ V}$ 供用户使用。所有变压器均为理想变压器。

- (1) 求升压变压器副线圈两端的电压 U_2 ;
- (2) 求输电电流 I_2 ;
- (3) 求输电线路损失的功率 P_L , 以及降压变压器原线圈两端的电压 U_3 ;
- (4) 求降压变压器的匝数比 $n_3:n_4$;
- (5) 若用户共接入 40 盏“ 220 V , 100 W ”的电灯, 这些灯能否正常工作? 说明理由。

S2. (变压器动态分析) 理想变压器原线圈接电压恒定的 220 V 交流电源, 副线圈接一滑动变阻器 R 。

- (1) 副线圈输出电压 U_2 由什么决定? 与 R 有关吗?
- (2) R 的阻值增大时, I_2 、 I_1 、 P 分别如何变化?
- (3) 若在副线圈两端再并联一个灯泡, 原线圈电流 I_1 如何变化?

(4) 若保持其他不变，仅增大原线圈匝数，副线圈输出电压如何变化？

0.62 麦克斯韦电磁场理论

考点精要

• Q1 麦克斯韦电磁场理论的两条核心假设是什么？

A (1) 变化的磁场产生电场（法拉第电磁感应定律的推广）；(2) 变化的电场产生磁场（麦克斯韦的天才补充）。两者互相激发，电磁场就能脱离电荷以波的形式在空间传播——这就是电磁波。

• Q2 为什么说“光就是电磁波”？

A 麦克斯韦从方程推出电磁波速度 $c = 1/\sqrt{\mu_0\epsilon_0} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ，恰好等于当时已知的光速，数值吻合使他断言“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。

• Q3 电磁波与机械波的根本区别是什么？

A 电磁波不需要介质，真空中也能传播（速度 c ），本质是变化的电场、磁场互相激发；机械波（声波、水波）必须依靠介质，靠介质质点振动传播。

例题 18.1

为什么说“光就是电磁波”？麦克斯韦是怎么证明的？

A 层 · 基础过关

A1. 判断下列说法的正误，并说明理由：

- (1) 只有电流变化才能产生电磁波；
- (2) 均匀变化的电场产生恒定的磁场，均匀变化的磁场产生恒定的电场；
- (3) 电磁波在真空中传播速度约为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ；
- (4) 赫兹用实验证实了电磁波的存在。

A2. 电磁波在传播过程中，电场方向、磁场方向与传播方向三者有什么关系？电磁波是横波还是纵波？

0.63 电磁波谱与应用

考点精要

- Q1 电磁波谱按频率从低到高怎么排列？

A 无线电波 → 微波 → 红外线 → 可见光 → 紫外线 → X 射线 → γ 射线。

- Q2 频率、波长、波速之间有什么关系？

A $c = \lambda f$ 。频率越高、波长越短、能量越高——记住这一条就能排全谱。

- Q3 各波段的典型应用有哪些？

A 无线电波（广播、Wi-Fi）、微波（微波炉、雷达、5G）、红外线（遥控、热成像）、可见光、紫外线（消毒）、X 射线（医学影像、安检）、 γ 射线（放疗、核物理）。

例题 18.2

可见光中心波长 $\lambda = 500 \text{ nm}$ 对应的频率是多大？

A 层 · 基础过关

A3. 按频率从低到高排列：紫外线、红外线、X 射线、无线电波、可见光、 γ 射线、微波。

A4. 某调频广播电台发射频率为 $3 \times 10^8 \text{ Hz}$ 的电磁波（ $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ），求其波长。

A5. 手机 5G 信号（约 3.5 GHz）与家用 Wi-Fi（约 2.4 GHz）相比：

- （1）谁的频率高？谁的波长短？
- （2）谁的穿透墙壁能力更弱？为什么？
- （3）由此解释：为什么 5G 基站的覆盖范围通常比 4G 基站小、需要布设得更密集？

0.64 LC 振荡电路与电磁波的发射、接收

考点精要

- Q1 什么是 LC 振荡电路？振荡周期由什么决定？

A 由电容器与电感线圈组成的回路，电场能与磁场能周期性相互转化，称为电磁振荡。周期 $T = 2\pi\sqrt{LC}$ ，只由电感 L 、电容 C 决定，与电荷量、电流的大小无关。

• Q2 振荡过程中能量如何转化？电荷量与电流有什么关系？

A 放电过程：电场能 $\rightarrow$ 磁场能；充电过程：磁场能 $\rightarrow$ 电场能。电荷量最大时电场能最大、电流为零；电荷量为零时磁场能最大、电流最大。两者相位相差 90° 。

• Q3 电磁波如何发射与接收？

A 发射：振荡电路频率越高越有利于辐射，通过天线将电磁波向空间发射。接收：天线接收电磁波，调谐电路通过改变 L 或 C 使固有频率与信号频率相等（电谐振），再由检波电路取出信号。

例题 18.3

某 LC 振荡电路， $L = 4 \text{ mH}$ ， $C = 0.25 \text{ }\mu\text{F}$ 。

- (1) 求振荡周期和频率；
- (2) 若将电容改为 $1 \text{ }\mu\text{F}$ （电感不变），振荡周期变为原来的几倍？频率变为多少？

A 层 · 基础过关

A6. 某 LC 振荡电路， $L = 0.1 \text{ mH}$ ， $C = 1 \text{ }\mu\text{F}$ 。

- (1) 求振荡周期；
- (2) 若要使振荡频率提高为原来的 2 倍（电感不变），电容 C 应如何调整？

A7. LC 振荡电路中，某时刻电容器正在充电且电流正在减小。判断下列说法的正误：

- (1) 电容器极板上的电荷量正在增大；
- (2) 线圈中的磁场能正在减小；
- (3) 电容器中的电场能正在增大；
- (4) 振荡周期正在变大。

B 层 · 真题研习

B1. (2024 · 浙江 6 月选考) 下列说法正确的是 ()

- A. 中子整体呈电中性但内部有复杂结构
- B. 真空中的光速在不同的惯性参考系中大小都相同
- C. 增加接收电路的线圈匝数，可接收更高频率的电台信号
- D. 分子间作用力从斥力变为引力的过程中，分子势能先增加后减少

B2. (2024 · 浙江 1 月选考) 下列说法正确的是 ()

- A. 相同温度下，黑体吸收能力最强，但辐射能力最弱
- B. 具有相同动能的中子和电子，其德布罗意波长相同

- C. 电磁场是真实存在的物质，电磁波具有动量和能量
- D. 自然光经玻璃表面反射后，透过偏振片观察，转动偏振片时可观察到明暗变化

C 层·创新拓展

C1. (5G 通信与电磁波) 5G 基站常用的中频段频率为 3.5 GHz, 毫米波频段频率约为 26 GHz。

- (1) 求 3.5 GHz 电磁波在真空中的波长;
- (2) 求 26 GHz 电磁波的波长;
- (3) 结合波长与频率的关系, 解释为什么 5G 基站需要比 4G 布设得更密集。

C2. (微波炉里的电磁波) 家用微波炉的工作频率约为 2450 MHz。

- (1) 求该微波在真空中的波长;
- (2) 微波炉加热食物的原理是什么? (提示: 水分子是极性分子)
- (3) 微波炉内壁为什么用金属材料制成?

本章综合·S 层

S1. (LC 振荡与电磁波综合) 某 LC 振荡电路, $L = 2.5 \mu\text{H}$, $C = 100 \text{ pF}$ 。

- (1) 求该电路的振荡频率;
- (2) 该振荡电路产生的电磁波在真空中的波长是多少?
- (3) 若电容增大为原来的 4 倍 (电感不变), 振荡频率和电磁波波长分别变为多少?

S2. (电磁波谱综合) 比较无线电波与 X 射线:

- (1) 谁的频率高? 谁的波长短?
- (2) 两者在真空中的传播速度哪个大?
- (3) 为什么 X 射线能穿透人体软组织拍出 “X 光片”, 而无线电波不能?

0.65 敏感元件

考点精要

• Q1 传感器的作用用一句话怎么说?

A 把非电学量 (光、热、力、磁、声等) 转化为电学量 (电阻、电压、电流) 的器件, 是电子设备的 “感官”。

• Q2 光敏电阻的阻值随什么变化?

A 光照增强 $\rightarrow$ 半导体载流子增多 $\rightarrow$ 导电能力增强 $\rightarrow$ 电阻减小。典型应用: 自动路灯、相机测光、光强报警。

• Q3 热敏电阻的阻值随什么变化?

A 负温度系数（NTC）热敏电阻：温度升高 → 电阻减小。典型应用：温控报警、空调测温、电子体温计。

• **Q4 电容式传感器、霍尔传感器分别利用什么原理？**

A 电容式：极板间距或正对面积变化 → 电容变化（触摸屏、电容话筒、加速度计）。霍尔式：半导体在磁场中产生霍尔电压，电压大小反映磁感应强度（测磁场、无刷电机转子位置、ABS 轮速）。

• **Q5 传感器输出的信号能直接驱动大功率执行器吗？**

A 一般不能。敏感元件输出的是微弱的电学量变化，需要先经转换/放大电路处理，再驱动继电器、电动机等执行器。

例题 19.1

为什么光敏电阻在光照增强时电阻减小？这有什么用？

A 层 · 基础过关

A1. 说出下列装置所用的敏感元件类型，以及它把什么物理量变成了什么电学量：

- (1) 自动路灯的光控开关；
- (2) 空调的室温探头；
- (3) 手机触摸屏；
- (4) 无刷电机中检测转子位置的传感器。

A2. 光敏电阻的阻值随光照增强而减小。用它制作“天黑亮灯、天亮灭灯”的路灯控制电路：光敏电阻与定值电阻串联接电源，继电器并联在光敏电阻两端，天黑时继电器吸合使路灯亮。说明天黑时电路中的电流如何变化，以及继电器为什么会在天黑时吸合。

A3. 判断下列说法的正误，并说明理由：

- (1) 光敏电阻的阻值只与光照有关，与温度无关；
- (2) 负温度系数热敏电阻的温度越高，阻值越小；
- (3) 霍尔电压的大小可以反映磁感应强度的大小；
- (4) 传感器可以直接驱动大功率用电器。

0.66 传感器系统

考点精要

• **Q1 传感器的完整工作链条是什么？**

A 敏感元件（物理量 → 电学量）→ 转换/放大电路 → 执行器（显示、报警、控制）。例：自动路灯 = 光敏电阻 → 桥式电路 → 继电器 → 路灯。

• **Q2 自动路灯为什么“天黑自动亮”？**

A 天黑 → 光照弱 → 光敏电阻阻值大 → 所在支路电流小、分压分配改变 → 控制电路动作 → 继电器吸合 → 路灯亮；天亮则相反。

• **Q3 传感器题的分析套路是什么？**

A 从敏感元件特性推起：物理量变化 → 电阻/电压变化 → 电路状态变化 → 执行器动作，一环扣一环，最后回到题目问的环节。

例题 19.2

画出自动路灯的“传感 → 控制”逻辑。

A 层 · 基础过关

A4. 画出光电式烟雾报警器的“传感 → 执行”链条，说明报警原理。

A5. 某温度报警电路：负温度系数热敏电阻 R_t 与定值电阻 R 串联接电源，电压表并联在定值电阻 R 两端，电压超过设定值时触发报警。

(1) 温度升高时， R_t 的阻值如何变化？

(2) 温度升高时，定值电阻 R 两端的电压如何变化？

(3) 温度升高到一定程度时电路能否报警？说明推理链条。

A6. 补全传感器系统的链条并说明每一环节的作用：

物理量 → () → () → 执行器。

B 层 · 真题研习

B1. (2023 · 浙江卷) 下列说法正确的是 ()

A. 利用电容传感器可制成麦克风

B. 物体受合外力越大，则动量变化越快

C. 利用红外传感器可制成商场的自动门

D. 若物理问题牛顿运动定律不适用，则动量守恒定律也不适用

B2. (2022 · 全国乙卷) 安装适当的软件后，利用智能手机中的磁传感器可以测量磁感应强度

B. 如图，在手机上建立直角坐标系，手机显示屏所在平面为 xOy 面。某同学在某地对地磁场

进行了四次测量，每次测量时 y 轴指向不同方向而 z 轴正向保持竖直向上。根据表中测量结果可推知（ ）

测量序号	$B_x/\mu\text{T}$	$B_y/\mu\text{T}$	$B_z/\mu\text{T}$
1	0	21	-45
2	0	-20	-46
3	21	0	-45
4	-21	0	-45

- A. 测量地点位于南半球
- B. 当地的地磁场大小约为 $50\ \mu\text{T}$
- C. 第 2 次测量时 y 轴正向指向南方
- D. 第 3 次测量时 y 轴正向指向东方

C 层 · 创新拓展

C1.（电容式触摸屏）手机电容触摸屏的基本原理：屏幕表面有一层透明导电膜，手指触碰时人体与导电膜构成电容，触摸位置附近的电容发生局部变化，检测电路据此确定触碰点。

- (1) 电容式触摸屏属于什么类型的传感器？
- (2) 为什么戴普通（绝缘）手套无法操作电容屏，而使用导电手套就可以？
- (3) 屏幕上有水滴时有时会出现“误触”，试从电容角度解释原因。

C2.（霍尔传感器与无刷电机）电动自行车、电动车的驱动电机大多是无刷电机，内部装有霍尔传感器来检测转子磁极的位置，控制电路据此改变线圈电流方向。

- (1) 霍尔传感器测量的是哪个物理量？
- (2) 转子磁极匀速转过霍尔元件时，霍尔电压大致如何变化？
- (3) 若霍尔元件中通入的电流方向不变，磁极 N/S 交替扫过霍尔元件时输出电压出现“高一低—高一低”的交替变化，这说明了什么？

C3.（利用传感器制作自动控制装置 · 光控路灯）要求设计一个“天黑自动点亮、天亮自动熄灭”的路灯控制电路。器材：光敏电阻 R_G （光照越强阻值越小）、定值电阻 R_0 、电磁继电器（线圈电流大于某值时吸合，触点组为“常闭”型）、电源、路灯、导线。

- (1) 画出（或描述）控制电路的连接方案，说明各元件的作用；

- (2) 写出“天黑路灯自动点亮”的工作原理；
- (3) 若要求“天更黑才亮灯”，应如何调整电路参数？说明理由。

本章综合·S层

S1.（光控电路定量分析）某光控路灯电路：光敏电阻 $R_{\text{光}}$ 与定值电阻 $R_0 = 1\text{ k}\Omega$ 串联接 6 V 电源，电压继电器（吸合动作电压 4 V ，触点控制路灯，吸合时灯亮）并联在光敏电阻两端。

(1) 光照强 ($R_{\text{光}} = 1\text{ k}\Omega$) 和黑暗 ($R_{\text{光}} = 9\text{ k}\Omega$) 两种情况下，光敏电阻两端的电压各为多少？

(2) 判断该电路能否实现“天黑亮灯、天亮灭灯”，并说明工作原理；

(3) 若某天晚上路灯一直不亮，分别从“光敏电阻”“电路连接”“继电器”三个环节各提出一个可能的原因。

S2.（传感器链条综合）某智能家居门锁带“人体红外感应”夜灯：人走近时自动亮起，人离开后自动熄灭。

- (1) 人体红外传感器把什么物理量变成了什么电学量？
- (2) 画出该夜灯的“传感 → 控制”完整链条；
- (3) 为什么红外传感器前面通常要加一块菲涅尔透镜？
- (4) 若白天有人经过时夜灯也会点亮，可能是哪些原因造成的？

0.67 静电应用：复印、除尘、起电、避雷

考点精要

• Q1 静电复印机的核心原理是什么？

A 光导材料（硒）“黑暗绝缘、光照导电”。流程五步：充电（暗处给鼓面充静电荷）→ 曝光（白纸部分反光使鼓面电荷跑掉，字迹处电荷保留，形成“电荷画像”）→ 显影（带负电墨粉被库仑力吸到带正电画像区）→ 转印（纸上更强的异号电荷把墨粉抢过去）→ 定影（加热熔粉粘纸）。

• Q2 静电除尘怎么“抓住”烟尘？

A 电离极加几万伏高压击穿空气、电离气体分子；离子使烟尘带电；带电烟尘受库仑力 $F = qE$ 被赶到收集极沉积。电场力比重力大得多，PM2.5 也能除掉。

• Q3 避雷针是“挡雷”还是“引雷”？

A 引雷。尖端电荷密度大、场强强，尖端附近空气先被电离形成导电通道，云层电荷沿低电阻通道缓慢持续地导入大地——把瞬间爆炸变成涓涓细流。

例题 20.1

静电复印机中，一个墨粉颗粒带电荷 $q = 10^{-12} \text{ C}$ ，鼓面附近电场强度 $E = 10^5 \text{ V/m}$ ，颗粒质量约 $m = 5 \times 10^{-13} \text{ kg}$ （取 $g = 10 \text{ m/s}^2$ ）。求墨粉颗粒受到的电场力，并与重力比较。

A 层 · 基础过关

A1. 把静电复印的五个步骤按正确顺序排列，并说明“电荷画像”是怎样形成的：曝光、显影、充电、定影、转印。

A2. 判断下列说法的正误，并说明理由：

- (1) 避雷针的作用是“挡住”雷电，使其不落到建筑物上；
- (2) 静电除尘中，带正电的烟尘受到的电场力方向与场强方向相同；
- (3) 范德格拉夫起电机中，电荷只分布在金属球壳的外表面，球壳内腔场强为零；
- (4) 静电复印中墨粉被吸到“电荷画像”区域，靠的是异号电荷相互吸引。

0.68 磁场与现代科技：磁悬浮、无线充电、霍尔推进器

考点精要

• Q1 磁悬浮列车有哪两种悬浮方式？

A 常导电磁悬浮（吸力型）：车底电磁铁吸在轨道下方，靠吸力托起车体（上海磁浮线）；超导电动悬浮（斥力型）：车跑起来后轨道线圈感应出电流（楞次定律），感应电流磁场排斥磁体，速度越快斥力越大——静止时没有感应电流，悬浮不起来，起步必须用轮子。

• Q2 无线充电的原理是什么？为什么必须用交流电？

A 互感原理：充电垫（初级线圈）通交流电 → 变化的磁场穿透手机内的次级线圈 → 感应出电动势。直流电产生恒定磁场、磁通量不变，次级线圈什么也感应不出来，所以必须用交流电（Qi 标准 100–200 kHz）；手机离垫越远磁通量锐减，充电越慢。

• Q3 霍尔推进器是怎样推进的？

A (1) 电离氙气成离子和电子；(2) 径向磁场让电子绕圈打转（洛伦兹力），同时不断撞出更多氙离子；(3) 轴向电场加速离子喷出（动能定理——磁场只改变方向、不做功，加速靠电场）；(4) 离子以每秒几十公里喷出，飞船获得反向推力（动量守恒），比化学燃料省约 10 倍燃料。

例题 20.2

霍尔推进器中，氙离子电荷量 $q = e$ ，经电压 $U = 1000 \text{ V}$ 的电场加速后喷出。氙原子质量 $m_{\text{Xe}} \approx 2.2 \times 10^{-25} \text{ kg}$ 。求氙离子的喷出速度。

A 层 · 基础过关

A3. 无线充电手机必须“贴紧”充电板才能快充，稍微离开一点充电就明显变慢。用互感原理解释这一现象。

A4. 超导电动悬浮（斥力型）磁悬浮列车为什么静止时悬浮不起来、起步必须用轮子？

A5. 判断下列说法的正误，并说明理由：

- (1) 同步辐射光源中电子做圆周运动时时刻在加速，所以一路转弯一路发光；
- (2) 回旋加速器中带电粒子的最大动能由加速电压决定；
- (3) 霍尔推进器中磁场的作用是给氙离子加速；
- (4) 无线充电必须用交流电，是因为感应电动势只与磁通量的变化有关。

0.69 电路与现代科技：除颤器、加速器

考点精要

• Q1 心脏除颤器用什么储存能量？能量怎么释放？

A 核心是电容器：先充上高压储存 $E = \frac{1}{2}CU^2$ ，然后瞬间把能量“放”进心脏，让所有心肌细胞同时“归零”、再统一起搏。临床体外除颤能量为 200–400 J——电压高、时间短、电流路径专门设计，能把心脏“重启”而不烧伤。

• Q2 直线加速器与回旋加速器怎么加速带电粒子？

A 直线加速器：一串加速管，粒子每过一根管子被电场“踢一脚”（ $qU = \Delta E_k$ ），连续用 n 次，末动能 $E_k = nqU$ ；回旋加速器：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 q/m 决定，与加速电压无关——电压再大只是少转几圈。

A 层 · 基础过关

A6. 心脏除颤器先把电容器充到高压储存能量，再瞬间放电。

- (1) 写出电容器储存能量的公式；
- (2) 若电容 $C = 100 \mu\text{F}$ ，充电电压 $U = 2000 \text{ V}$ ，储存的能量是多少？

(3) 除颤器为什么要采用“高压、短时、专用通道”放电？

B 层·真题研习

B1. (2023·河北卷) 除颤仪是用于突发心室纤颤等心脏疾病的急救医疗设备。某次调试时交流电压表示数为 20 V，电容器充电完毕，开关由“1”掷向“2”，放电电流平均值为 2.8 A，放电时间约为 10^{-2} s，已知电容器电容为 2.0×10^{-5} F。则升压变压器原、副线圈的匝数比约为 ()

- A. 1:25
- B. 1:50
- C. 1:70
- D. 1:100

B2. (2023·浙江卷) 我国 1100 kV 特高压直流输电工程的送电端用“整流”设备将交流变换成直流，用户端用“逆变”设备再将直流变换成交流。下列说法正确的是 ()

- A. 送电端先升压再整流
- B. 用户端先降压再变交流
- C. 1100 kV 是指交流电的最大值
- D. 输电功率由送电端电压决定

C 层·创新拓展

C1. (静电复印的量级) 静电复印机中，一个墨粉颗粒带电荷 $q = 10^{-12}$ C，鼓面附近电场强度 $E = 10^5$ V/m，颗粒质量 $m = 5 \times 10^{-13}$ kg (取 $g = 10$ m/s²)。

- (1) 墨粉颗粒受到的电场力为多大？
- (2) 颗粒的重力为多大？电场力是重力的多少倍？
- (3) 这个数量级对比说明了什么？

C2. (无线充电的量级) 某手机无线充电板输出功率 15 W，次级线圈感应电压有效值约为 10 V。

- (1) 次级线圈中的电流为多大？
- (2) 若整个无线充电系统效率为 70%，初级线圈从电网输入的电功率为多大？
- (3) Qi 标准无线充电为什么用 100–200 kHz 的高频交流电，而不用 50 Hz 工频？

C3. (霍尔推进器的量级) 某霍尔推进器加速电压 $U = 1000$ V，氙离子电荷量 $q = e$ 、质量 $m = 2.2 \times 10^{-25}$ kg。

- (1) 氙离子喷出速度为多大？
- (2) 若推进器每秒喷出 10 mg 氙 (质量流量 $\dot{m} = 10^{-5}$ kg/s)，产生的推力为多大？
- (3) 推力只有零点几牛顿，为什么还能让空间站完成大范围的轨道机动？

C4. (回旋加速器) 某回旋加速器的 D 形盒半径 $R = 1$ m，磁感应强度 $B = 1$ T，用来加速质子

($q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, $m = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)。

(1) 质子离开加速器时的最大动能是多大? (结果用 J 表示, 并换算成 MeV)

(2) 若把加速电压加倍, 质子的最大动能会变吗? 为什么?

本章综合 · S 层

S1. (电磁学在现代科技中的映射) 指出下列科技设备分别主要依赖本卷哪条物理规律 (写出规律名称即可):

(1) 手机无线充电; (2) 磁悬浮列车; (3) 心脏除颤器; (4) 同步辐射光源; (5) 霍尔推进器; (6) 静电复印机; (7) 避雷针; (8) 高压输电网中的变压器。

S2. (霍尔推进器: 动量与能量压轴) 某霍尔推进器每秒喷出质量为 $m = 2 \times 10^{-5} \text{ kg}$ 的氙离子, 喷出速度 $v = 4 \times 10^4 \text{ m/s}$ 。

(1) 每秒喷出的氙离子总动量是多大?

(2) 推进器产生的推力为多大?

(3) 若空间站总质量 $M = 8 \times 10^4 \text{ kg}$, 推进器持续工作 1 小时 (忽略其他力的影响), 空间站速度改变多少?

(4) 化学燃料火箭的喷出速度约为 3 km/s , 而霍尔推进器喷出速度约为 40 km/s 。结合动量定理说明: 为什么同样大小的推力, 霍尔推进器消耗的工质 (燃料) 要少得多?

一、单项选择题 (本部分共 5 小题, 每小题 6 分, 共 30 分)

Z1. 一正弦式交流电的电压瞬时值为 $u = 220\sqrt{2} \sin(100\pi t) \text{ V}$, 把它接在 $R = 110 \Omega$ 的电阻上。下列说法正确的是 ()

A. 通过电阻的电流有效值为 2 A , 峰值为 $2\sqrt{2} \text{ A}$

B. 通过电阻的电流有效值为 $2\sqrt{2} \text{ A}$, 峰值为 4 A

C. 该交流电的频率为 100 Hz

D. 该交流电的周期为 $0.02\pi \text{ s}$

Z2. 理想变压器原、副线圈匝数比 $n_1:n_2 = 2:1$, 原线圈接 220 V 交流电源, 副线圈接 $R = 5.5 \Omega$ 的电阻。下列说法正确的是 ()

A. 副线圈输出电压为 110 V

B. 副线圈电流为 10 A

C. 原线圈电流为 20 A

D. 原、副线圈的功率之比为 $2:1$

Z3. 某电磁波在真空中的波长为 15 m ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。下列说法正确的是 ()

A. 该电磁波的频率为 $2 \times 10^7 \text{ Hz}$, 属于无线电波波段

B. 该电磁波的频率为 $2 \times 10^7 \text{ Hz}$, 属于微波波段

C. 该电磁波的频率为 $4.5 \times 10^9 \text{ Hz}$, 属于微波波段

D. 该电磁波的频率为 $4.5 \times 10^9 \text{ Hz}$ ，属于 X 射线波段

Z4. 某 LC 振荡电路，电感 $L = 0.5 \text{ mH}$ ，电容 $C = 0.2 \mu\text{F}$ 。该电路的振荡周期约为（ ）

A. $6.3 \times 10^{-5} \text{ s}$

B. $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}$

C. $3.1 \times 10^{-5} \text{ s}$

D. $6.3 \times 10^{-4} \text{ s}$

Z5. 光敏电阻与定值电阻 R_0 串联接电源，光敏电阻的阻值随光照增强而减小。光照增强时，下列说法正确的是（ ）

A. 电路总电阻增大，电流减小

B. 光敏电阻两端电压增大

C. 定值电阻 R_0 两端电压增大

D. 电源电压增大

二、多项选择题（本部分共 3 小题，每小题 6 分，共 18 分。全对得 6 分，选对但不全得 3 分，有选错得 0 分）

Z6. 关于远距离输电（所有变压器均为理想变压器），下列说法正确的是（ ）

A. 升压可以减小输电电流，从而减小线路损耗

B. 输电线路损耗功率与输电电流的平方成正比

C. 升压变压器副线圈中的电流大于原线圈中的电流

D. 输送功率一定时，输电电压越高，线路损耗越小

Z7. 关于正弦交流电的“四值”（瞬时值、峰值、有效值、平均值），下列说法正确的是（ ）

A. 计算电阻产生的热量时，必须用有效值

B. 电流表、电压表测得的读数是交流电的峰值

C. 判断电容器能否被击穿时，要考虑交流电的峰值

D. 正弦交流电在一个周期内的平均值为零，所以不能直接用平均值计算热量

Z8. 线圈在匀强磁场中绕垂直于磁感线的轴匀速转动发电。下列说法正确的是（ ）

A. 线圈经过中性面时，穿过线圈的磁通量最大，感应电流为零

B. 线圈平面与磁场方向平行时，穿过线圈的磁通量变化率最大

C. 线圈每转动一周，感应电流方向改变两次

D. 感应电动势的峰值与线圈的转速无关

三、实验题（本部分共 1 小题，共 12 分）

Z9. 某同学用负温度系数（NTC）热敏电阻设计了一个温度报警电路：热敏电阻 R_t 与定值电阻 $R_0 = 5 \text{ k}\Omega$ 串联，接电动势 $E = 3 \text{ V}$ （内阻不计）的电源，电压表并联在定值电阻 R_0 两端，

当电压表示数超过设定阈值时触发报警。已知该热敏电阻在 30°C 时阻值为 $2\text{ k}\Omega$ ，在 60°C 时阻值为 $0.5\text{ k}\Omega$ 。

(1) 分别求温度 30°C 和 60°C 时，定值电阻 R_0 两端的电压；

(2) 若要求“温度达到 60°C 时报警”，报警阈值电压应设为多大（给出一个合理值并说明理由）？

(3) 写出该报警电路的“传感 $\rightarrow$ 执行”逻辑链条。

四、计算题（本部分共 4 小题，共 40 分）

Z10. (10 分) 一台矩形线圈发电机，线圈匝数 $n = 100$ ，面积 $S = 0.1\text{ m}^2$ ，在 $B = 0.5\text{ T}$ 的匀强磁场中绕垂直于磁场的轴以 1200 r/min 匀速转动。线圈内阻 $r = 2\text{ }\Omega$ ，外接电阻 $R = 10\text{ }\Omega$ 。

(1) 求感应电动势的峰值 E_m 和有效值 E ；

(2) 求电路中的电流有效值 I 和外接电阻 R 消耗的功率；

(3) 求线圈从“与磁场平行”位置转过 90° （即四分之一周期）过程中的平均感应电动势。

Z11. (10 分) 某电站输出功率 $P = 200\text{ kW}$ ，经升压变压器将电压升到 $U = 40\text{ kV}$ 后向远处输送，输电线路总电阻 $r = 10\text{ }\Omega$ 。

(1) 求输电电流和输电线路损耗的功率；

(2) 若用户负载增加，使电站输出功率增大到 400 kW （输出电压仍为 40 kV ），线路损耗功率变为多少？是原来的几倍？

(3) 若要求线路损耗不超过输送功率的 2%，当输送功率为 200 kW 时，输电电压至少为多少？

Z12. (10 分) 质子在磁感应强度 $B = 0.5\text{ T}$ 的匀强磁场中做匀速圆周运动，速度 $v = 2 \times 10^6\text{ m/s}$ ，质子的电荷量 $q = 1.6 \times 10^{-19}\text{ C}$ ，质量 $m = 1.67 \times 10^{-27}\text{ kg}$ 。

(1) 求质子的轨道半径 r 和运动周期 T ；

(2) 求质子的动能 E_k （用 J 表示，并换算成 keV ）；

(3) 若利用回旋加速器使质子获得更大动能，应采取哪些措施（定性说明，结合公式 $E_k = q^2 B^2 R^2 / 2m$ ）？

Z13. (10 分，压轴·电磁感应综合) 水平光滑导轨间距 $L = 1\text{ m}$ ，导轨间有磁感应强度 $B = 0.5\text{ T}$ 、竖直向下的匀强磁场。金属棒 ab 垂直放在导轨上，质量 $m = 0.2\text{ kg}$ 、电阻 $R = 0.5\text{ }\Omega$ ，导轨电阻不计。用水平恒力 $F = 1\text{ N}$ 拉棒从静止开始运动。

(1) 当棒的速度 $v = 2\text{ m/s}$ 时，求感应电动势 E 、感应电流 I 、棒所受安培力 F 安，以及此时棒的加速度 a ；

(2) 求棒最终能达到的最大速度 v_{max} ；

(3) 若棒在外力作用下以 $v_0 = 4\text{ m/s}$ 匀速运动，求外力做功的功率和回路电功率，并验证能量守恒。