

寻迹 • PATHWAY

物理 II • 电磁学

循迹而上 • 拾级登顶

寻迹 • 梦叶子 编著

情境版v9

2026 年 8 月 12 日

目录

第一章 电荷与库仑定律	3
1.1 摩擦起电与电荷守恒	3
1.2 库仑定律：电荷之间的“万有引力”	5
1.3 一个悬而未决的问题：电荷凭什么“隔空”施力？	7
第二章 电场与电场强度	11
2.1 场的思想：法拉第的力线	11
2.2 电场强度：场的“强度读数”	12
2.3 点电荷的场强与叠加	13
2.4 匀强电场	14
2.5 电荷组的场：等量同号与等量异号	14
第三章 电势与电势能	19
3.1 电场力做功与电势能	19
3.2 电势：电势能的“强度读数”	20
3.3 电势差与场强的关系： $U = Ed$	22
3.4 场强与电势的关系辨析（高频易错）	22
第四章 带电粒子在电场中的运动	25
4.1 匀加与匀减：电场力做功，能量说了算	25
4.2 偏转：类平抛的标准动作	27
4.3 组合：先加速后偏转（示波器）	28
4.4 技法小结：电场运动题的三板斧	29
第五章 电容器与静电应用	33
5.1 电容：储存电荷的本领	33
5.2 平行板电容器的决定式	34

5.3 静电的利用与防范	36
第六章 电流与欧姆定律	39
6.1 电流：电荷的定向移动	39
6.2 电阻与欧姆定律	40
6.3 伏安法测电阻（实验）	43
第七章 闭合电路	47
7.1 电动势与内阻	47
7.2 闭合电路欧姆定律	47
7.3 动态电路分析（含容/含表）	49
7.4 测电动势与内阻（实验）	50
7.5 多用电表（实验）	50
第八章 电功率与焦耳定律	55
8.1 电功与电功率	55
8.2 焦耳定律与非纯电阻	55
8.3 最大功率：滑动变阻器怎么取？	57
8.4 能源与可持续发展	59
第九章 磁场与磁感应强度	63
9.1 磁现象与磁感线	63
9.2 电流的磁场：右手螺旋定则（安培定则）	64
9.3 磁感应强度：磁场版的“场强”	64
第十章 安培力	69
10.1 安培力的大小与方向	69
10.2 平行导线间的相互作用	70
10.3 安培力与平衡：综合应用	70
第十一章 洛伦兹力与带电粒子运动	75
11.1 洛伦兹力：磁场给运动电荷的“横刀”	75
11.2 最重要的性质：洛伦兹力永不做功	76
11.3 圆周运动： r 和 T 的黄金公式	77
11.4 质谱仪：用半径分辨质量	78

11.5 回旋加速器：电加速、磁回旋	78
第十二章 磁通量与电磁感应现象	83
12.1 磁铁插线圈：先看现象	83
12.2 磁通量：数一数穿过线圈的磁感线	84
12.3 感应电流的条件： Φ 要变，不是 Φ 大	84
第十三章 法拉第定律与楞次定律	89
13.1 法拉第定律：电动势是变化率，不是变化量	89
13.2 楞次定律：电流为什么总“阻碍”变化	90
13.3 互感与自感（变压器与电感的前置）	91
13.4 感应图像的“四件套”与电量通式	92
第十四章 动生电动势与滑轨模型	95
14.1 动生电动势：导体棒切磁感线	95
14.2 恒力滑轨：终极速度	96
第十五章 自感与涡流	101
15.1 自感：电路的“惯性”	101
15.2 涡流：金属块里的“旋涡”	102
15.3 减小涡流：硅钢片	103
第十六章 交变电流	107
16.1 正弦交流电的产生	107
16.2 有效值：交流电的“等效直流”	108
16.3 电感与电容对交流的阻碍	109
第十七章 变压器与远距离输电	113
17.1 变压器：互感升降压	113
17.2 远距离输电：为什么要升压	114
第十八章 电磁振荡与电磁波	119
18.1 LC 振荡电路：电磁波的“发射台”	119
18.2 麦克斯韦电磁场理论（全书思想的收束）	120
18.3 电磁波谱与应用	121

第十九章 传感器	125
19.1 敏感元件	125
19.2 传感器系统	127
第二十章 从课本到现代科技：电磁学的拓展应用	131
20.1 静电应用：从复印机到除颤器	131
20.2 粒子物理：加速、发光与探测	132
20.3 磁悬浮与航天推进	133
20.4 无线输电：从特斯拉线圈到充电垫	133
附录 A 电磁学核心公式速查	137
附录 B 读题即解题：电磁学关键词速查	139
附录 C 学生必做实验指导（电磁学）	141

第一章 电荷与库仑定律

冬天脱毛衣，噼啪作响，黑暗中还能看见小火花；梳过头发的梳子能吸起碎纸片。这些“静电”现象两千多年前就被发现了，但直到 18 世纪，人们才意识到：电是一种可以“搬来搬去”的东西，而带电体之间的力，居然和万有引力长得一模一样——都是“隔空”作用的平方反比力。这一章从摩擦起电出发，先认识电荷的守恒，再推导出库仑定律，最后提出一个贯穿全书的问题：**电荷凭什么能隔着空间推拉彼此？**这个问题的答案——场——将指引我们走完整本书。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 用摩擦起电、感应起电解释静电现象，知道电荷守恒定律；(2) 掌握库仑定律并会计算点电荷间的静电力；(3) 会用“电荷守恒 + 库仑定律”分析静电问题。

1.1 摩擦起电与电荷守恒

用毛皮摩擦橡胶棒，橡胶棒能吸起小纸片；用丝绸摩擦玻璃棒，玻璃棒也能。为什么摩擦能让物体带电？

历史上的回答是“两种电”——丝绸摩擦玻璃棒产生“正电”，毛皮摩擦橡胶棒产生“负电”。但你先别急着背结论，问一句：**摩擦真的“造”出电了吗？**如果电能被无中生有地造出来，能量守恒就要改写。今天的回答要深刻得多：**摩擦只是把电子从一种物质搬到另一种物质**——电没有被造出来，只是被“搬运”了。谁抢到电子，谁就带负电；谁失去电子，谁就带正电。最常见的几种摩擦组合：

摩擦组合	谁得到电子	谁失去电子	结果
丝绸与玻璃棒	丝绸	玻璃棒	玻璃棒带正电，丝绸带负电
毛皮与橡胶棒	橡胶棒	毛皮	橡胶棒带负电，毛皮带正电
羊毛与塑料梳子	塑料梳子	羊毛	梳子带负电，羊毛带正电

口诀就四个字：**得负失正**——得到电子带负电，失去电子带正电。任何摩擦组合都能推断：谁抢到电子，谁就是“负”的那一方。

那摩擦起电是“制造”了电荷吗？不是。**电荷既不能创生，也不能消灭，只能从一个物体转移到另一个物体**——这就是电荷守恒定律。摩擦只是搬运，就像弹簧只是转化能量，没有无中生有。正负电荷之间还有个著名规律：**同种电荷相斥，异种电荷相吸**。这是静电学的第一块基石。

“正电”“负电”这两个名字，是一位传奇人物定的——本杰明·富兰克林，美国开国元勋之一，也是第一个认真研究“电”的人。1752年他在雷雨天放风筝，把闪电引下来存进莱顿瓶，证明“雷电”和摩擦起的“电”是同一个东西。从此富兰克林的名字和电学绑在一起——他提出的“单流体说”和正负电命名，至今还在用。〔注 1〕

摩擦起电早就进了工厂：**静电复印机**和激光打印机，先给感光鼓“充电”，再用激光把要打印的内容“画”上去——被光照到的地方电荷消失，留下带静电的字形，然后碳粉被静电吸过去，转印到纸上。你每打印一张卷子，打印机就在做一遍“电荷搬运”。工厂烟囱里的静电除尘器也是同一招：让烟尘带上电荷，被电极吸住，黑烟就出不去了。

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。

想一想：

- 问：C 接触 A，电荷怎么分？
- 想：完全相同的球接触后电荷均分——A、C 各带 $\frac{4q+0}{2} = +2q$ 。
- 问：现在 C 带 $+2q$ ，再接触 B ($-2q$)，结果呢？
- 想：总电荷 $+2q + (-2q) = 0$ ，均分后各带 0。
- 问：最终三球各带多少？验算总电荷守恒吗？
- 想：A 带 $+2q$ ，B、C 均不带电；总电荷 $+2q + 0 + 0 = +2q$ ，与初始 $+4q - 2q = +2q$ 一致——守恒。

详细答案：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。

变式提醒：若先让 C 接触 B 再接触 A，结果会不同（顺序敏感）——按接触顺序一步步算，每一步都均分；若是两个带同号电荷的球接触，均分后各带平均值，总电荷仍守恒。

练一练

- 用丝绸摩擦玻璃棒后，玻璃棒和丝绸各带什么电？谁得到电子？
- 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？
- 摩擦起电后，玻璃棒与丝绸的总电荷量是多少？这体现了什么定律？

参考答案：1. 玻璃棒带正电（失去电子），丝绸带负电（得到电子）。2. 各带 $\frac{0+3q}{2} = +1.5q$ 。3. 总电荷量为零（摩擦前都中性）——电荷守恒定律。

静电感应：不接触也能“带”电：

摩擦要“蹭”，可还有一条带电的路，连碰都不用碰。把带电体靠近（**不接触**）一个不带电的导体，你会看到：导体靠近带电体的一端出现**异号电荷**，远端出现**同号电荷**——这叫**静电感应**。原因一句话：导体内的自由电子被带电体的电场“推”着重新分布了。带电体带正电，自由电子被吸引到近端，近端显负电、远端显正电；带电体带负电则反过来。

如果此时把导体**接地**，远端的同号电荷会顺着导线“跑”进大地，撤去带电体后，导体便带着异号的电荷留下——这叫**感应起电**。生活中到处是它的影子：冬天你摸门把手“啪”地被打一下，是身上的电荷瞬间跑掉；验电器（实验室里那个带金属箔片的小盒）不接触带电体，箔片也会张开——张开就说明有静电感应。注意区分三个词：**摩擦起电**（蹭出来的）、**接触带电**（碰出来的）、**感应起电**（隔空“感”出来的）——前两者直接转移电荷，后者只让电荷在导体内部重新排队。

1.2 库仑定律：电荷之间的“万有引力”

1785 年，库仑用扭秤实验测量了两个带电小球之间的力——力太小了，小到扭秤要转好多圈才能测出来。他得到的规律，你八成觉得眼熟——和万有引力几乎一模一样！两种八竿子打不着的力，凭什么长得这么像？先记住这个直觉，1.3 节揭晓答案。〔注 2〕

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

其中 $k = 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$ 是**静电力常量**。我们把电荷量小到可以看成点的带电体，叫作**点电荷**（类比力学里的质点）。同号相斥（力向外推），异号相吸。

看看它与万有引力 $F = Gm_1m_2/r^2$ 的对称性

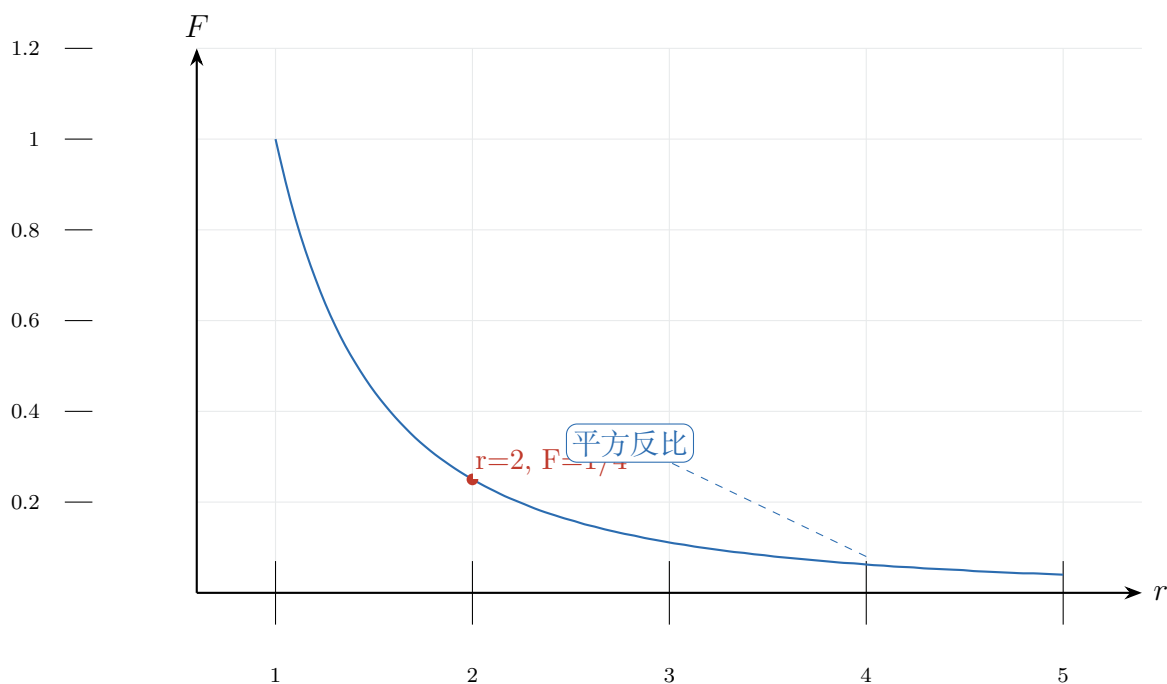


图 1.1: 库仑力随距离平方衰减：距离 2 倍，力变 $1/4$

：都是平方反比，都“隔空”作用。区别只有一点——电荷有正有负，所以库仑力可推可拉；质量只有正，万有引力只能拉。而正因为电荷能“一拉一推”，电子才能被原子核稳稳“拴”住——如果只有引力，微观世界会塌成一团；有了斥力和引力的平衡，原子才能存在，你的身体才能存在。

练一练

- 两个点电荷距离变为原来的 3 倍，库仑力变为原来的几分之几？
- 两个等量同号点电荷连线的中点处，所受合力为多少？
- 库仑定律与万有引力有哪些相同与不同？
- 电子质量约 9.1×10^{-31} kg、电荷量 1.6×10^{-19} C；两个电子相距 10^{-10} m，比较库仑力与万有引力大小，说明为什么微观世界引力可忽略。

参考答案：1. $\frac{1}{9}$ （平方反比）。2. 合力为零——两个力等大反向（都指向对方电荷，但方向相反，大小相等）。3. 相同：都是平方反比、隔空作用、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）、常量不同、适用对象不同（点电荷 vs 质点）。4. $F_E = k \frac{e^2}{r^2} \approx 2.3 \times 10^{-8}$ N, $F_G = G \frac{m_e^2}{r^2} \approx 5.5 \times 10^{-51}$ N，电力约为引力的 10^{42} 倍——微观引力可忽略。

1.3 一个悬而未决的问题：电荷凭什么“隔空”施力？

库仑定律告诉我们力有多大，却没有回答：两个电荷之间空无一物，力是怎么传过去的？你大概听过“超距作用”这个词——意思是“隔空直接作用，不需要媒介”。牛顿的万有引力当年就是这么被理解的，库仑的静电力最初也被这么理解。但物理学家越来越不安：两个不相干的东西，凭什么隔着空无一物的空间互相推拉？这像不像“鬼魂在推你”？

下一章，我们给“隔空施力”一个名字：场。它不是玄学——法拉第会用几根铁屑画出它的形状，麦克斯韦会用四个方程算出它的脾气。场，是这本书后半部分的灵魂。

本章注释

〔注 1〕富兰克林风筝实验（1752 年 6 月，美国费城）：他在雷雨天放风筝，风筝线上挂一把钥匙，把雷电引下来给莱顿瓶充电——证明雷电与摩擦电同源。这个故事的细节长期有争议（富兰克林本人没留下实验记录，只有他 1750 年论文里的设想和事后转述）；更早的“抓闪电”其实另有其人：1752 年 5 月，法国科学家达里巴德用 40 英尺高的铁杆在巴黎成功引下雷电，比富兰克林还早一个月。值得一提的是电学的第一位殉难者：1753 年，俄国科学家列赫曼在圣彼得堡做同类实验时被雷击身亡——他是人类电学史上第一个为研究献出生命的人。

〔注 2〕库仑扭秤（1785 年）和卡文迪许扭秤（1798 年，测万有引力常量 G ）是同一门手艺——都是把微小的力通过细丝扭转放大到可测。还有个鲜为人知的插曲：英国科学家卡文迪许早在 1773 年就用类似方法测过电荷间的作用力，结论也是平方反比，但他没发表，笔记在家族档案里躺了近一个世纪——科学史上“几乎发现却没发表”的遗憾，这算一例。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
摩擦起电	电子搬运	得负失正
接触带电	电荷均分	相同小球均分
电荷总量	守恒定律	不创生不消灭
点电荷 / 库仑力	平方反比	$F = kq_1q_2/r^2$
与万有引力比	对称性	电荷有正负，质量只有正
隔空施力	场（下章）	不靠超距作用

你该记住的流程：读静电题 → (1) 判对象（点电荷/金属球/绝缘体）→ (2) 金属球接触就均分、摩擦就看“得负失正”→ (3) 库仑力用平方反比，距离 2 倍力变 1/4 → (4) 多个电荷：逐个求力再矢量合成 → (5) 验算：同号相斥、异号相吸，方向别画反。

这一章我们认识了电荷与库仑力，但还有一个关键问题没回答：两个电荷“隔空”施力，力到底是怎么传过去的？下一章，我们给这种“隔空施力”一个名字——场。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）三个完全相同的金属小球，A 带 $+6q$ 、B 带 $-2q$ 、C 不带电。先让 C 与 B 接触，再让 C 与 A 接触，最终三球的电荷量分别为？

- A. A 带 $+2.5q$, B 带 $-q$, C 带 $+2.5q$
 B. A 带 $+3q$, B 带 $-1q$, C 带 $+1q$
 C. A 带 $+2q$, B 带 0 , C 带 $+2q$
 D. A 带 $+3q$, B、C 各带 $+1.5q$

答案 A。解析：完全相同小球接触后**均分总电荷**——C 与 B 先接触： $Q_B = Q_C = \frac{-2q+0}{2} = -q$ ；C ($-q$) 再与 A ($+6q$) 接触：总电荷 $+6q + (-q) = +5q$ ，均分后 $Q_A = Q_C = +2.5q$ 。最终 A、C 各带 $+2.5q$, B 带 $-q$ 。验算总电荷： $+2.5q + (-q) + 2.5q = +4q$ ，与初始 $+6q + (-2q) = +4q$ 一致——守恒。**电荷分配题三步：每一步都均分、每步都重新算总电荷、最后验算守恒**；接触顺序敏感，顺序不同结果不同。

章末检测（基础 ★ / 提升 ★★ / 探究 ★★★）

基础

- 自然界存在几种电荷？电荷守恒定律的内容？
- 元电荷 e 的数值？任何带电体的电荷量是 e 的什么？
- 库仑定律的表达式？适用条件是什么？
- 两个点电荷相距 r ，库仑力 F ；距离变为 $2r$ ，力变为多少？
- 摩擦起电的本质是什么？
- 静电感应中，导体两端出现异种电荷，如何解释？

提升

- 两个点电荷 $q_1 = 2 \times 10^{-8} \text{ C}$ 、 $q_2 = 3 \times 10^{-8} \text{ C}$ 相距 0.1 m ，库仑力多大 ($k = 9 \times 10^9$)？
- 两个完全相同的小球各带 $+4Q$ 和 $-2Q$ ，接触后分开，各带多少？接触前库仑力与接触后之比？
- 三个点电荷在一条直线上平衡，两端的电荷电性必须如何？

探究

- 用气球摩擦头发后能吸起小纸片——设计实验探究“电荷量与吸引力的关系”。

参考答案：1. 两种（正、负）；电荷既不能创造也不能消灭，只能从一个物体转移到另一个物体（或从物体的一部分转移到另一部分），总量保持不变。2. $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ；整数倍。3. $F = kq_1q_2/r^2$ ；点电荷（真空中、静止、大小远小于距离）。4. 变为 $F/4$ 。5. 电子在不同物体间转移（得电子带负电、失电子带正电），不是凭空产生电荷。6. 导体内的自由电子受外电场作用重新分布，靠近带电体的一端出现异号电荷（感应起电）。7. $F = 9 \times 10^9 \times 2 \times 10^{-8} \times 3 \times 10^{-8} / 0.01 = 5.4 \times 10^{-4} \text{ N}$ 。8. 接触后各带 $+Q$ ；接触前 $F_1 = k4Q2Q/d^2 = 8kQ^2/d^2$ （引

力), 接触后 $F_2 = kQ^2/d^2$ (斥力), 比值为 8:1。9. 中间电荷与两端电性相反 (两端同号排斥中间, 中间必须与两端异号才平衡)。10. 用气球摩擦后靠近不同大小的纸片, 观察吸引距离; 用相同方式摩擦不同次数 (电荷量不同) 对比吸引纸片数量——电荷量越多, 吸引的纸片越多、距离越远。

第二章 电场与电场强度

先想一个细思恐极的问题：电荷 A 和电荷 B 之间空无一物，A 是怎么“知道”B 在哪里的？是它长了眼睛，还是有看不见的东西在中间传话？

上一章我们留下一个问题：电荷凭什么隔空施力？这一章给出答案——**电场**。法拉第用“力线”把看不见的电场画了出来，麦克斯韦用数学把它写成了方程。本章先学会“读出”电场：场强 E 是场的“强度读数”，电场线是场的“地图”。学完本章，你看到任何电荷分布，都能说出空间各点的场强方向和大小。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解电场概念，会用电场线描述电场；(2) 掌握电场强度定义式与点电荷场强公式；(3) 会用电场叠加原理计算合场强。

2.1 场的思想：法拉第的力线

法拉第是个没有受过正规教育的木匠之子，13 岁就去当订书匠学徒——但恰恰是这个“数学不好”的人，给了物理学最深刻的图像。他想：电荷周围的电场，能不能像磁铁周围的铁屑那样“看见”？他用细小的颗粒撒在带电体周围，颗粒排成了一条条曲线——**电场线**。〔注 1〕

电场线的三条读图规则（全书的看家本领）：

- **方向：**电场线上每点的切线方向，就是该点场强的方向（也是正电荷在该点的受力方向）；
- **密度：**电场线越密，场强越大；
- **起止：**电场线从正电荷出发，终止于负电荷（或无穷远）。

例题 2.1

画出孤立正电荷、孤立负电荷、等量异号电荷（电偶极子）的电场线草图。

想一想：

- 问：孤立正电荷的电场线长什么样？
- 想：从电荷出发，向四周辐射（如太阳的光芒），越远越疏。
- 问：孤立负电荷呢？

- 想：从四周汇聚到电荷（如雨水流入漏斗），箭头指向电荷。
- 问：等量异号电荷之间呢？
- 想：电场线从正电荷出发，弯向负电荷——它们之间电场线最密，场强最大。
- 问：两条电场线能相交吗？
- 想：不能！同一点不可能有两个场强方向。电场线也不闭合（磁感线才闭合）。

详细答案：答：孤立正电荷——辐射状向外；孤立负电荷——汇聚状向内；等量异号电荷——从正弯向负，中间最密。要点：电场线不相交、不闭合，密度代表强弱。

变式提醒：匀强电场的电场线是平行等距的直线；等量同号电荷的电场线从各自出发、在中点“顶开”，中点附近没有电场线穿过（场强为零）。

2.2 电场强度：场的“强度读数”

场看不见摸不着，怎么“定量”地描述它？总不能靠感觉。办法是放一个“探针”：在电场中某点放一个试探电荷 q ，它受力 F ；换一个 $2q$ ，受力 $2F$ ——但 F/q 却始终不变！这个比值只由电场本身决定，与探针大小无关。于是定义**电场强度**：放入电场中某点的电荷所受的静电力与它的电荷量之比，用 E 表示：

$$E = \frac{F}{q}$$

单位 N/C （也常用 V/m ）。它是矢量，方向与正电荷受力方向相同。

注意这是**比值定义法**（ $E = F/q$ 型的量还有电势 $\varphi = E_p/q$ 、电阻 $R = U/I$ 、电容 $C = Q/U$ ——全是“测量方式”而非“成因”）： **E 与 F 、 q 无关**，改变试探电荷不改变 E 。场是电荷分布本身的性质，探针只是“读出”它。先破一个直觉：你可能觉得“探针越大受力越大，场就越强”——恰恰相反， E 是“每单位电荷受力”，已经把探针大小除掉了。

例题 2.2

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；若拿走试探电荷，该点场强如何变化？

想一想：

- 问：场强怎么算？方向怎么定？
- 想： $E = F/q$ ，方向与正电荷受力方向相同（向右）。
- 问：拿走试探电荷，场强变吗？
- 想：不变！ E 是电场本身的性质，与有没有探针无关——这正是比值定义法的意义。

- 问：算一下，数值合理吗？
- 想： $E = \frac{6 \times 10^{-6}}{2 \times 10^{-8}} = 300 \text{ N/C}$ 。

详细答案：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，场强仍为 300 N/C 。
答：该点场强 300 N/C 向右；场强与探针无关。

变式提醒：若把试探电荷换成负电荷，受力方向会反向（向左），但场强方向不变（仍是正电荷受力方向）——别用负电荷的受力方向直接当场强方向。

2.3 点电荷的场强与叠加

由库仑定律 + 定义式可推出点电荷 Q 在距它 r 处的场强：

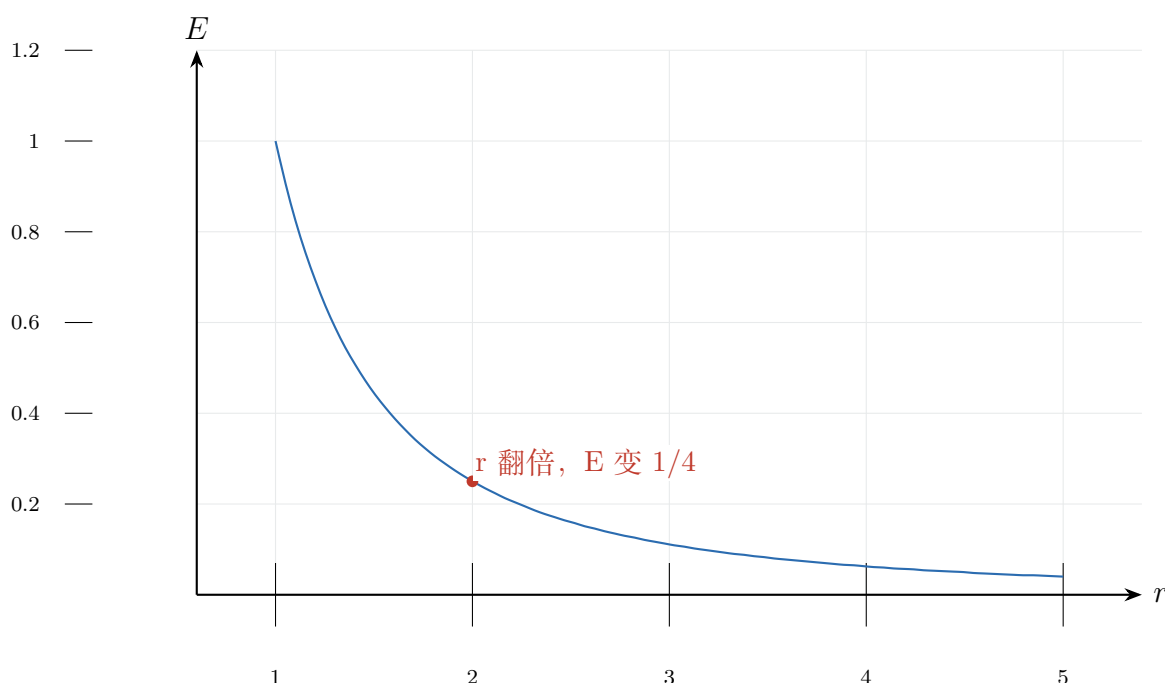


图 2.1: 点电荷场强随距离平方衰减

$$E = k \frac{Q}{r^2}$$

方向： $Q > 0$ 时背离 Q ， $Q < 0$ 时指向 Q 。那电场里有多颗电荷呢？每个电荷都“贡献”一份场——**矢量叠加**：先分别算每个电荷单独产生的场强，再矢量相加。先分开算，再合成，跟物理一力的合成是同一套本事。

例题 2.3

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

想一想：

- 问：两同号电荷，场强哪里可能抵消？
- 想：只有两电荷之间 ($0 < x < 3$) 两场强方向才相反，可能抵消。
- 问：设零点在 $x = d$ ，怎么列方程？
- 想： $k\frac{Q}{d^2} = k\frac{4Q}{(3-d)^2}$ ，即 $\frac{1}{d^2} = \frac{4}{(3-d)^2}$ 。
- 问：解出来，验证了吗？
- 想： $3 - d = 2d$ ， $d = 1 \text{ m}$ ；验证： $d = 1$ 处 $E_1 = kQ$ (向右)， $E_2 = k\frac{4Q}{4} = kQ$ (向左)，恰好抵消。

详细答案：解：设零点在 $x = d$ ($0 < d < 3$)： $k\frac{Q}{d^2} = k\frac{4Q}{(3-d)^2} \Rightarrow \frac{1}{d^2} = \frac{4}{(3-d)^2} \Rightarrow 3 - d = 2d \Rightarrow d = 1 \text{ m}$ 。答：场强为零的位置在 $x = 1 \text{ m}$ 处 (两电荷之间)。验证：该点两场强等大反向。注意： $+Q$ 左侧 ($x < 0$) 两个正电荷产生的场强方向相同 (都指向 $-x$)，大小永远不会相等反相，因此**两同号电荷的外侧不存在场强为零的点**——这是本题最常踩的坑。

变式提醒：等量同号电荷连线中点场强为零 (等大反向)；等量异号电荷连线中点场强为 $2kQ/a^2$ (同向叠加，是连线上最小处但不为零) ——“同号中点零、异号中点叠加”是年年考的选择題底牌。

2.4 匀强电场

两块靠得很近的平行金属板，分别带等量异号电荷，板间电场线平行且等距——这就是**匀强电场**：区域内各点场强大小、方向都相同。匀强电场是高考的主角 (带电粒子加速、偏转、示波器都在其中进行)，下一章的电势差 $U = Ed$ 公式也是它的专属。你的手机触摸屏、老式显像管电视、喷墨打印机，里面都有一块匀强电场在干活。

2.5 电荷组的场：等量同号与等量异号

如果电荷不止一颗，场会变成什么样？两个点电荷组成的“电荷组”是电场题的基础款——它们的场强、电势分布必须背图：

等量异号电荷 (电偶极子)：

- 连线：场强方向从 $+Q$ 指向 $-Q$ ；中点处两场强同向叠加， $E_{\text{中点}} = 2kQ/a^2$ ；
- 中垂线：场强沿中垂线方向 (从 $+Q$ 侧指向 $-Q$ 侧)，越远越弱。

等量同号电荷：

- 连线中点：两场强等大反向， $E_{\text{中点}} = 0$ ；

- 中垂线上：中点处为零，向两侧先增大后减小。

口诀：**异号——连线中点最小非零、中垂线等势；同号——连线中点为零、中垂线先增后减**。这两张图是每年必考的“场强/电势分布”选择题的全部底牌。

电场还有一个反直觉的应用——**静电屏蔽**：把导体做成一个封闭的笼子，外面的电场进不去，里面的电场出不来。法拉第当年就坐进一个巨大的金属笼里，让人在外面给笼子加上几十万伏的高压电，他在里面安然无恙。〔注 2〕你今天天天在用静电屏蔽：电梯里手机没信号、雷雨天坐在车里很安全、微波炉门上那层金属网挡住微波不外泄——都是“法拉第笼”在工作。你正坐在一个现代版的法拉第笼里看这本书（飞机也算一个）。

动手试试（材料：一把塑料梳子、水龙头）

先猜：把摩擦过的梳子靠近细细的水流，水流会怎样？

动手：梳子在头发上摩擦十几下，然后把它靠近（不接触）水龙头流出的细水流。

观察：水流被梳子“吸”弯了！

思考：摩擦过的梳子带电，它周围有电场；水流里的水分子被电场“拽”得偏了方向。带电体不用碰到水，就能隔着一段距离让水流拐弯——这就是“场”的现场演示：力不需要接触，通过场隔空传递。

练一练

- 电场线的方向和密度分别代表什么？
- 电场强度 $E = F/q$ ，如果把试探电荷加倍， E 变吗？为什么？
- 两个等量同号点电荷连线中点的场强和电势分别是什么情况？
- 匀强电场中放一个正电荷，它受力方向与电场线方向什么关系？

参考答案：1. 切线方向 = 场强方向（正电荷受力方向）；密度 = 场强大小（越密越强）。2. 不变——比值定义法， E 是场本身性质，与试探电荷无关。3. 场强为零（等大反向抵消），电势不为零（相对无穷远）。4. 相同——正电荷受力方向就是电场线方向（沿切线）。

本章注释

〔注 1〕法拉第（1791–1867）是科学史上最了不起的自学者：父亲是铁匠，他 13 岁去订书匠铺当学徒，7 年里把店里装订的每一本书都读了——包括一本《大英百科全书》里的“电”条目，从此迷上电学。1813 年他靠给大化学家戴维当助手进入皇家研究院，一路做到教授。他几乎不会数学，全靠“力线”“场”这样的图像直觉思考——恰恰是这个“短板”让他跳出了数学公式的框框，直接抓住了场的本质。后来麦克斯韦说：是法拉第的力线给了他全部灵感，他只是把法拉第的图像翻译成了数学。

〔注 2〕法拉第笼实验（1836 年，皇家研究院）：法拉第造了一个 12 英尺见方、外包金属箔的大箱子，自己坐进去，让人在外面给箱子加上高压静电——他在里面安然无恙，还用电

位计证明箱内确实没有电场。这个实验成了静电屏蔽的经典示范，也回答了“电荷凭什么隔空施力”的追问：力不是隔空传的，是“场”在传，而金属笼把场挡在了外面。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
电场线	切线 = 方向、密度 = 强弱	正电荷出发、负电荷终止
试探电荷受力	场强定义	$E = F/q$ ，比值定义与探针无关
点电荷	场强公式	$E = kQ/r^2$ ，正背离负指向
多电荷	场强叠加	分别算再矢量合成
平行金属板	匀强电场	线平行等距， $U = Ed$ 下章用
等量同号/异号	场强电势分布	同号中点零、异号中点叠加
金属笼/电梯无信号	静电屏蔽	导体封闭，场进不去

你该记住的流程：读电场题 → (1) 判是单个点电荷还是电荷组 → (2) 单电荷套 $E = kQ/r^2$ ，多电荷先分开算再矢量合成 → (3) 方向按正电荷受力定 → (4) 选择题直接调用“同号中点零、异号中点叠加”结论 → (5) 验算方向（正电荷受力方向）。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 如图所示，在边长为 L 的等边三角形顶点 A、B 处各放一个等量正电荷 $+Q$ ，顶点 C 处的电场强度方向为？

A. 沿 AC 方向 B. 沿 BC 方向 C. 沿水平方向指向 AB 中点 D. 沿竖直方向（垂直 AB 向上）

答案 D。解析：两个 $+Q$ 在 C 点产生的场强大小相等 ($E = kQ/L^2$)，方向分别沿 CA 和 CB（背离正电荷）——对称，水平分量抵消，竖直分量同向叠加，合场强垂直 AB 向上。等量同种电荷连线中垂线上：**中点场强为零、越远越强（先增后减）**；等量异种电荷中垂线上：场强方向处处垂直于连线。这类题先“分解再叠加”，对称性是捷径。

章末检测（基础★ / 提升★★ / 探究★★★）

基础

- 电场强度的定义式？单位？它是矢量还是标量？
- 点电荷的场强公式？方向如何确定？
- 电场线的特点（至少 3 条）？
- 电场线能相交吗？为什么？
- 匀强电场的电场线有什么特点？
- 电场强度由什么决定？与试探电荷有关吗？

提升

- 电荷 $Q = 2 \times 10^{-8} \text{ C}$ 在电场中某点受电场力 $F = 4 \times 10^{-4} \text{ N}$ ，该点场强多大？
- 点电荷 $q = 3 \times 10^{-9} \text{ C}$ 在距其 0.3 m 处的场强多大 ($k = 9 \times 10^9$)？

- 两个等量同号点电荷连线的中点，合场强多大？为什么？

探究

- 用头发屑/细屑在蓖麻油中模拟电场线——说明电场线的意义。

参考答案：1. $E = F/q$; N/C (或 V/m); 矢量。2. $E = kQ/r^2$; 正电荷向外、负电荷向内。3. (1) 始于正电荷 (无穷远)、止于负电荷; (2) 疏密表示强弱; (3) 不闭合、不相交; (4) 沿电场线方向电势降低。4. 不能——电场中每点场强方向唯一，若相交则该点有两个场强方向，矛盾。5. 平行等距的直线 (大小方向处处相同)。6. 由场源电荷与位置决定，与试探电荷无关。7. $E = F/q = 4 \times 10^{-4} / 2 \times 10^{-8} = 2 \times 10^4$ N/C。8. $E = kq/r^2 = 9 \times 10^9 \times 3 \times 10^{-9} / 0.09 = 300$ N/C。9. 合场强为 0——两个电荷在中点产生的场强等大反向，矢量叠加抵消。10. 在浅盘装蓖麻油，撒入头发屑，两极板间加高压——细屑沿电场线排列成图样；电场线是人们用来形象描述电场的假想曲线，其疏密与方向反映场强大小与方向。

第三章 电势与电势能

电梯从 1 楼上到 10 楼，和从 1 楼绕到 10 楼，重力做功一样吗？——如果一样，那“功”就只跟起点终点有关，跟怎么走无关。电场也有这个脾气。

力的视角看够了电场，这一章换个视角——**能量**。电场力做功和我们熟悉的万有引力做功一样，与路径无关，只与起点终点有关——这意味着电场也有“势”。就像重力势能让我们可以不用管过程、只比高度，电势能让我们可以不管电场怎么布置、只比位置。这一章用物理一的能量语言重新读电场：**电场力做的功 = 电势能的减少**，这个等式是第 4 章（带电粒子加速）的发动机。而“电压”这个东西能装进电池，全靠一场关于青蛙腿的世纪争论。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解电势能、电势、电势差的概念及关系；(2) 掌握静电力做功与电势能变化的关系；(3) 会用 $U = W/q$ 与 $U = Ed$ 计算。

3.1 电场力做功与电势能

把正电荷 q 在匀强电场中从 A 移到 B（沿电场方向距离 d ），电场力做功 $W = qEd$ 。但如果绕路走呢？——你可能会想：绕远路，做功肯定更多吧？结果恰恰相反：电场力在垂直于电场方向的分段不做功，在平行方向的分段做功的代数和仍等于 qEd 。**电场力做功与路径无关，只与初末位置有关**——这和我们学过的哪种力一模一样？重力！

做功与路径无关，就可以定义**电势能** E_p （类比重力势能）：**电场力做正功，电势能减少；做负功，电势能增加**。即：

$$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$$

注意：电场力做正功，正电荷沿电场线方向运动（电势能减少）；负电荷逆着电场线运动也做正功。判断电势能增减，**永远看电场力做正功还是负功**，不要死记电荷正负。

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。

想一想：

- 问：沿电场线方向，电势怎么变？

- 想：沿电场线方向电势降低——A 在上游，电势高。
- 问：电势差怎么算？注意公式里 d 的方向。
- 想： $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = Ed = 1000 \times 0.05 = 50 \text{ V}$ （沿电场方向的距离）。
- 问： U_{AB} 和 U_{BA} 什么关系？
- 想： $U_{AB} = -U_{BA} = 50 \text{ V}$ ——电势差是带符号的。

详细答案：解：沿电场线方向电势降低，A 在左侧（上游），电势高。 $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B = Ed = 1000 \times 0.05 = 50 \text{ V}$ 。答： $U_{AB} = 50 \text{ V}$ ，A 点电势高。

变式提醒：若问 U_{BA} ，为 -50 V （B 点电势低）。电势差的正负由“起点减终点”决定，别弄反。

3.2 电势：电势能的“强度读数”

电势能的大小和电荷有关（ $2q$ 的势能就是 q 的两倍），但“每库仑电荷的势能”呢？比值 E_p/q 与试探电荷无关，只由电场位置决定——就像场强 $E = F/q$ 一样，又一个比值定义。这个比值就叫**电势**：

$$\varphi = \frac{E_p}{q}$$

单位伏特（V）。电势是标量，与场强 E （矢量）不同。选参考点（通常取无穷远或大地）电势为 0，某点的电势等于“把单位正电荷从该点搬到参考点电场力做的功”。

电势高低的判断（三条，越用越顺）：

- **沿电场线方向，电势降低**（正电荷沿电场线移动，电场力做正功，电势能减少，电势降低）；
- **正电荷在电势高处电势能大，负电荷在电势低处电势能大**（正负电荷对电势的“喜好”相反）；
- **等势面处处与电场线垂直，沿等势面移动电荷不做功。**

电势差不是抽象概念，它就在你身边：**闪电**就是云层和地面之间几百万伏的电势差被“击穿”；你手机充电器的 USB 口输出 5 V 电压，就是电势差 5 V ；高铁接触网上的电压是 25 kV 。而**心电图机**测的，是心脏跳动时心肌细胞产生的微小电势差——医生看你心脏的“电势图”，就是靠这一节的概念。

“电压”这个词你天天用，可你知道吗——第一个把“电”装进容器里的人，是被一只青蛙腿逼出来的。1780 年，意大利解剖学家伽伐尼发现：用两种金属碰青蛙腿，蛙腿会抽搐。他宣布这是“生物电”——生命体内产生的电。伏打（也是意大利人）不信，他做了个大胆的

实验：不用青蛙，只用两种金属夹一张浸了盐水的纸——居然也产生了电！他证明那根本不是“生物电”，是两种金属接触产生的“金属电”。1800年，伏打把铜片和锌片交替叠起来做成“伏打电堆”——人类历史上第一个电池，从此“电”可以随身携带了。〔注1〕

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（ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）从负极板静止出发，到达正极板时速度多大？（电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ ）

想一想：

- 问：板间场强怎么求？
- 想： $E = \frac{U}{d} = \frac{200}{0.02} = 10^4 \text{ V/m}$ 。
- 问：电子从负极到正极，电场力做正功还是负功？功多大？
- 想：电子带负电，被正极吸引，电场力做正功 $W = eU = 3.2 \times 10^{-17} \text{ J}$ 。
- 问：动能怎么变？速度多大？
- 想：全部转化为动能： $\frac{1}{2}m_e v^2 = eU$ ， $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} \approx 8.4 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。
- 问：这个速度量级对吗？
- 想：约光速的 3%，电子的“加速器”一出手就是千万米每秒——这就是阴极射线管（老式电视）里电子被加速的原理。

详细答案：解：(1) $E = \frac{U}{d} = \frac{200}{0.02} = 10^4 \text{ V/m}$ 。(2) 动能定理： $eU = \frac{1}{2}m_e v^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eU}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 200}{9.1 \times 10^{-31}}} \approx 8.4 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。答：板间场强 10^4 V/m ，电子到达正极板时速度约 $8.4 \times 10^6 \text{ m/s}$ 。

变式提醒：若换质子（质量约电子的 1836 倍），同样电压下速度小得多（ $\sqrt{1/1836}$ ）；这题用的是“电场力做功 = 动能变化”的能量视角，与路径无关——第 4 章带电粒子加速的发动机。

练一练

- 电势是标量还是矢量？正负号表示什么？
- 场强为 E 的匀强电场中，沿电场方向相距 L 的两点电势差是 EL ；垂直方向呢？
- 负电荷在电场中从高电势移到低电势，电势能增加还是减少？
- 等势面为什么与电场线垂直？沿等势面移动电荷为什么不做功？

参考答案：1. 标量；正负号表示相对参考点的高低（正电荷在正电势处电势能为正）。2. 垂直方向电势差为零（电势差只算沿电场方向的分量）。3. 负电荷从高电势到低电势，电势能 $E_p = q\varphi$ 中 $q < 0$, φ 降低 $\rightarrow E_p$ 增大（增加）。4. 等势面上各点电势相同，沿等势面移动电荷电场力不做功 ($W = qU = 0$)；电场线方向是电势下降最快的方向，所以垂直等势面。

3.3 电势差与场强的关系： $U = Ed$

匀强电场中，沿场强方向相距 d 的两点电势差为：

$$U = Ed$$

d 必须是沿电场方向的距离（投影），不是任意两点距离——这是最常踩的坑。这个公式也解释了场强单位的两种写法： $V/m = N/C$ （一个是电势差除以距离，一个是力除以电荷）。

3.4 场强与电势的关系辨析（高频易错）

$E = 0$ 处电势一定为 0 吗？——不一定。等量同号电荷连线中点，两电荷场强抵消 $E = 0$ ，但该点电势不为 0（正电荷在该点有电势能）。反过来，电势为 0 处（如无穷远），场强也可能不为 0。

一句话：**场强看“变化率”，电势看“海拔”**——场强是电势的“坡度”（沿电场方向电势下降最快）， E 大说明电势“陡”； $E = 0$ 说明电势“平”（平坦处海拔不一定低）。这两个量一个是“有多陡”、一个是“有多高”，别混。

三个图像，年年必考（读图顺序固定：先看横轴量、再看纵轴量、最后用斜率/面积）：

- **φ - x 图：**斜率 = $-E$ （电势下降最快处场强大）；
- **E - x 图：**面积 = 电势差（ E 图线与 x 轴围成的面积就是 U ）；
- **E - p - x 图：**斜率 = 电场力（力的方向看斜率正负）。

口诀： **φ - x 看斜率得 E ， E - x 看面积得 U ， E - p - x 看斜率得力**。这三兄弟每年都考，读图顺序固定：先看横轴量、再看纵轴量、最后用斜率/面积。

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。求场强的大小和方向。

想一想：

- 问： φ - x 图斜率代表什么？

- 想：斜率 $= -E$ ($E = -d\varphi/dx$)。
- 问：斜率是负的，场强方向怎么定？
- 想： $E = 2 \times 10^3 \text{ N/C}$ ；斜率为负说明电势沿 $+x$ 方向降低，场强指向电势降低最快的方向，即沿 $+x$ 方向。
- 问：这对应什么电场？
- 想：斜率恒定的直线 $\rightarrow$ 电势均匀下降 $\rightarrow$ 匀强电场。

详细答案：解： $E = \left| -\frac{d\varphi}{dx} \right| = 2 \times 10^3 \text{ V/m}$ ，方向沿 $+x$ （电势沿 $+x$ 降低）。答：场强 $2 \times 10^3 \text{ N/C}$ ，方向沿 $+x$ ；该区域为匀强电场。

变式提醒： φ - x 图的斜率是 $-E$ 不是 E ——斜率正负与场强方向相反；若图像是曲线，某点斜率用切线，表示该处场强（非匀强）。

本章注释

〔注 1〕“青蛙腿之争”是科学史上最著名的“歪打正着”：1780 年代，伽伐尼在解剖青蛙时发现，用两种不同金属碰蛙腿，蛙腿会抽搐，他兴奋地宣布发现了“动物电”——生命体内的电。伏打不认同，他证明：只要两种不同金属夹着湿导体（盐水纸），不需要任何生物，照样产生电——所以那不是“生物电”，是“金属电”。1799–1800 年伏打把铜片、锌片、盐水纸交替叠成“伏打电堆”，人类第一个电池诞生，拿破仑亲自来看他演示，伏特（电压单位）以他命名。这场争论里，伽伐尼错了，但他“错的发现”逼出了电池——科学史经常这样：一个错误的问题，通向一个正确的发明。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
电场力做功	与路径无关	$W_{AB} = E_{pA} - E_{pB}$
电势能增减	看电场力正负功	正功减少、负功增加
电势	比值定义	$\varphi = E_p/q$ ，标量
电势差	电势高低差	$U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$
匀强电场两点	电势差公式	$U = Ed$ ， d 是沿场强方向
场强与电势	变化率 vs 海拔	$E = 0$ 处电势可不为 0
φ - x / E - x / E_p - x 图	斜率或面积	斜率得力/场强，面积得电势差

你该记住的流程：读电场能量题 $\rightarrow$ (1) 判对象（电场力做功/电势/场强） $\rightarrow$ (2) 能量走 $W = qU$ 、 $E_p = q\varphi$ ，力走 $E = F/q$ $\rightarrow$ (3) 匀强电场三者桥： $U = Ed$ $\rightarrow$ (4) 图像题先判横纵轴，再斜率/面积 $\rightarrow$ (5) 验算符号（正负电荷对电势“喜好”相反）。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）一带电粒子仅在电场力作用下从 A 点运动到 B 点，其轨迹如图所示（电场线为直线且方向向右，A 在左、B 在右）。下列说法正确的是？

- A. 粒子带正电，电势能减小
- B. 粒子带负电，电势能增大
- C. 粒子带正电，电势能增大
- D. 无法判断电性与电势能变化

答案 A。解析：轨迹向电场方向（右）弯曲，说明电场力沿电场方向——粒子带正电；正电荷沿电场线方向运动，电场力做正功，电势能减小（动能增大）。判断三步：**轨迹弯曲方向定力** → **力与电场线同向为正电荷** → **力做正功则电势能减**。电势能判据两条：电场力做正功电势能减；正电荷在电势高处电势能大。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 静电力做功的特点（与路径有关吗）？
- 电势能的定义？静电力做正功，电势能如何变化？
- 电势的定义式？电势是标量还是矢量？
- 电势差与电势的关系？
- 匀强电场中电势差与场强的关系式？ d 指什么？
- 等势面有什么特点（至少2条）？

提升

- 电荷 $q = 2 \times 10^{-9} \text{ C}$ 从 A 移到 B，静电力做功 $6 \times 10^{-8} \text{ J}$ ，A、B 电势差多大？
- 匀强电场 $E = 1000 \text{ V/m}$ ，沿电场方向距离 0.2 m 两点电势差多大？
- 正电荷从高电势移到低电势，电势能增大还是减小？

探究

- 用验电器和带电金属球，设计实验定性观察“电势差与距离的关系”。

参考答案：1. 与路径无关，只与初末位置有关（静电力是保守力）。2. 电荷在电场中具有的电势能；静电力做正功电势能减小，做负功电势能增大。3. $\varphi = E_p/q$ ；标量。4. $U_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$ 。5. $U = Ed$ ； d 是沿电场方向的距离。6. (1) 等势面与电场线垂直；(2) 等势面上移动电荷不做功；(3) 等差等势面越密场强越大。7. $U_{AB} = W_{AB}/q = 6 \times 10^{-8}/2 \times 10^{-9} = 30 \text{ V}$ 。8. $U = Ed = 1000 \times 0.2 = 200 \text{ V}$ 。9. 减小——正电荷沿电场方向（电势降低方向）移动，静电力做正功，电势能减小。10. 带电金属球靠近验电器，观察箔片张角随距离变化：越近张角越大（电势差越大）——定性验证 $U = Ed$ ，距离越小电势差越大。

第四章 带电粒子在电场中的运动

老式电视的屏幕为什么会被“点亮”？屏幕后面有一支电子枪，把电子加速到极速再打向屏幕——电场就是那把“加速器”。

电场讲完了，现在让电荷在电场里跑起来——这是电场力与运动学的第一次全面联姻，也是高考压轴题的第一主场。带电粒子在电场中只有两种标准动作：**匀加或匀减**（沿电场方向，匀变速直线运动——注意“减”也是常客，逆着电场射入的粒子先减速到零再反向）和**偏转**（垂直电场方向进入，类平抛运动）。把所有问题拆成这两个动作，再加一个“组合”（先加速后偏转，就是示波器），电场大题就没有秘密了。记住一个总原则：**沿电场方向用能量或匀变速，垂直电场方向用匀速**。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 用牛顿第二定律和动能定理分析带电粒子在电场中的直线加速；(2) 掌握带电粒子在匀强电场中的偏转（类平抛）；(3) 会分析示波管、喷墨打印机等应用。

4.1 匀加与匀减：电场力做功，能量说了算

带电粒子（忽略重力）从静止经电压 U 加速：

$$qU = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2qU}{m}}$$

两个洞察，先说最反直觉的：

- **速度只与电压有关，与加速距离无关**——同样 U ，加速 1 cm 和 1 m 最终速度相同。凭什么？因为 $W = qU$ 与路径无关——电场做功只看电压，不看“路有多长”。
- **比荷 q/m 越大，加速越快**——质谱仪正是靠这个区分不同粒子。

但不只是“加速”：电场方向是固定的，而粒子的入射方向可以有两种——顺着电场（匀加速）或逆着电场（匀减速）。两者用同一把武器统一处理——**动能定理**：

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = qU$$

（ U 是初末位置间的电势差，顺场取正、逆场取负。）

逆着电场射入的粒子会发生什么？电场力与速度反向，做匀减速直线运动；若电场足够“长”，粒子会先减速到零、再反向加速——**减速段与反向加速段的时间、位移完全对称**（物理一的匀变速武器直接调用）。高考压轴里“故意做成减速”的题，考的就是这一条：**别看到电场就默认加速——先判断电场力与初速度是同向还是反向。**

例题 4.1

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

想一想：

- 问：质子从静止经电压加速，用什么定理？
- 想：动能定理 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ，能量视角一步到位。
- 问：代入算，注意单位。
- 想： $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5000}{1.67 \times 10^{-27}}} \approx 9.8 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。
- 问：这个速度的量级对吗？
- 想：约光速的千分之三，几千伏的电压就能让质子跑到百万米每秒——电场加速的效率极高。

详细答案：解：由动能定理 $eU = \frac{1}{2}m_p v^2$ 得 $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 5000}{1.67 \times 10^{-27}}} \approx 9.8 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。
答：质子末速度约 $9.8 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。

变式提醒：若问“经过几个相同的加速电场”，速度按 $\sqrt{n}$ 倍增大（动能 n 倍）；若粒子有初速度，用动能定理完整形式，别漏初动能。

例题 4.2

（匀减速：减速到零再反向）一个质子以 $v_0 = 2 \times 10^6 \text{ m/s}$ 逆着场强 $E = 10^4 \text{ N/C}$ 的匀强电场射入（质子比荷 $q/m = 9.6 \times 10^7 \text{ C/kg}$ ）。(1) 求质子减速到零前进的距离 s 和所需时间 t_1 ；(2) 若电场持续存在，求质子从出发到回到入射点的总时间。

想一想：

- 问：质子逆着电场射入，受力方向如何？做什么运动？
- 想：电场力与速度反向，匀减速直线运动，加速度 $a = \frac{qE}{m} = 9.6 \times 10^{11} \text{ m/s}^2$ 。
- 问：减速到零的距离和时间怎么求？
- 想：匀减速公式（物理一武器）： $s = \frac{v_0^2}{2a}$, $t_1 = \frac{v_0}{a}$ 。
- 问：回到入射点的总时间呢？关键是？

- 想：**对称性**——减速段与反向加速段时间、位移完全对称， $t = 2t_1$ 。回到入射点时速率恢复为 v_0 ，方向反向。

详细答案：解：(1) $a = \frac{qE}{m} = 9.6 \times 10^7 \times 10^4 = 9.6 \times 10^{11} \text{ m/s}^2$ ； $s = \frac{v_0^2}{2a} = \frac{(2 \times 10^6)^2}{2 \times 9.6 \times 10^{11}} \approx 2.1 \text{ m}$ ， $t_1 = \frac{v_0}{a} = \frac{2 \times 10^6}{9.6 \times 10^{11}} \approx 2.1 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。(2) 对称性： $t = 2t_1 \approx 4.2 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。答：前进 2.1 m、用时约 2.1 μs ；回到入射点总时间约 4.2 μs 。

变式提醒：判断“能否减速到零再反向”要看电场长度——若电场不够长，粒子还没减到零就穿出去了（与传送带不够长同理）；这类“减速陷阱”题先算 $s = \frac{v_0^2}{2a}$ 再与板长比较。

4.2 偏转：类平抛的标准动作

带电粒子以速度 v_0 垂直进入匀强电场（场强 E ，板长 L ，板间距 d ，板间电压 U ），做类平抛：

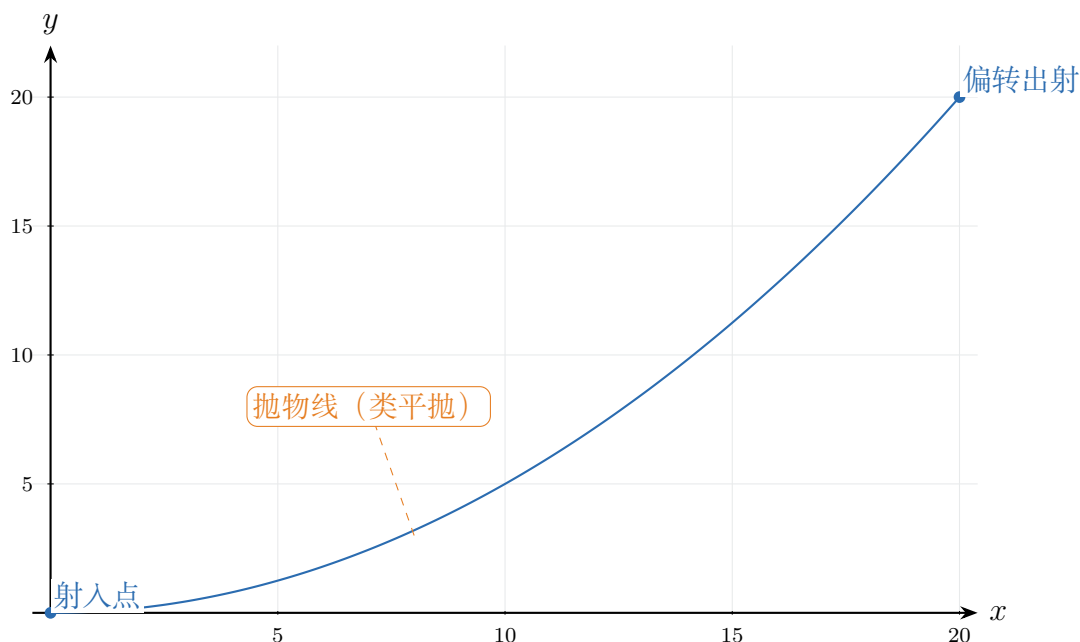


图 4.1: 带电粒子垂直射入匀强电场：类平抛轨迹

- 水平方向（匀速）： $x = v_0 t$ ，穿过板的时间 $t = \frac{L}{v_0}$ ；
- 竖直方向（匀加速）： $a = \frac{qE}{m} = \frac{qU}{md}$ ，侧移量 $y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{qUL^2}{2mdv_0^2}$ ；
- 出电场时竖直速度 $v_y = at = \frac{qUL}{mdv_0}$ ，速度偏角 $\tan \theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{qUL}{mdv_0^2}$ 。

两个值得背的结论：

- 侧移 y 与偏角 $\tan \theta$ 都与 q/m 和 U 成正比，与 v_0^2 成反比；
- $\tan \theta = \frac{2y}{L}$ ——出射速度的反向延长线过中点（示波器不用看就有的几何性质）。

类平抛不是只在试卷上：**喷墨打印机**的墨滴就是带电的——墨滴从喷嘴喷出后穿过一个偏转电场，电场电压一变，墨滴就偏到纸上不同的位置，画出文字和图片。打印机里的那排“电极”，干的就是这节公式的活。

例题 4.3

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 。

想一想：

- 问：电子垂直射入偏转电场，怎么处理？
- 想：类平抛——水平匀速求时间，竖直匀加速求侧移。
- 问：竖直加速度多大？时间多长？
- 想： $a = \frac{eU}{md} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 200}{9.1 \times 10^{-31} \times 0.02} \approx 1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$ ； $t = \frac{L}{v_0} = \frac{0.06}{2 \times 10^7} = 3 \times 10^{-9} \text{ s}$ 。
- 问：侧移量多少？
- 想： $y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \times 1.76 \times 10^{15} \times (3 \times 10^{-9})^2 \approx 7.9 \times 10^{-3} \text{ m} \approx 8 \text{ mm}$ 。

详细答案：解：(1) 类平抛，竖直方向 $a = \frac{eU}{md} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 200}{9.1 \times 10^{-31} \times 0.02} \approx 1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$ 。(2) 穿过时间 $t = \frac{L}{v_0} = \frac{0.06}{2 \times 10^7} = 3 \times 10^{-9} \text{ s}$ 。(3) 侧移 $y = \frac{1}{2}at^2 \approx 7.9 \times 10^{-3} \text{ m}$ 。答：侧移约 7.9 mm。(4) 验算： $y = \frac{qUL^2}{2mdv_0^2}$ 直接代同样得 7.9 mm——公式与分步一致。

变式提醒：若电子从平行板正中间射入，还要检查“会不会打到板上”(y 与 $d/2$ 比较)；“偏转量与 q/m 无关”只在“先加速后偏转”组合里成立——单独偏转时 $y \propto q/m$ 。

4.3 组合：先加速后偏转（示波器）

示波器（老式电视、阴极射线管的原理）就是“先加速后偏转”的标准组合：电子先在加速电场 U_1 中加速，再进入偏转电场 U_2 偏转。组合公式（推导后）：

$$y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1}$$

最关键的性质：q、m 全部消掉——同一台示波器，不管射入的是电子、质子还是 α 粒子，只要加速电压和偏转电压相同，偏转量就相同。这是示波器能通用的物理基础。

例题 4.4

加速电压 $U_1 = 1000 \text{ V}$ ，偏转电场 $U_2 = 200 \text{ V}$ 、板长 $L = 0.04 \text{ m}$ 、板间距 $d = 0.01 \text{ m}$ 。电子经加速后进入偏转电场，求偏转量 y 。

想一想：

- 问：先加速后偏转，偏转量用什么公式？
- 想：组合公式 $y = \frac{U_2 L^2}{4dU_1}$ —— q 、 m 已经消掉了。
- 问：代入算。
- 想： $y = \frac{200 \times 0.0016}{4 \times 0.01 \times 1000} = \frac{0.32}{40} = 0.008 \text{ m} = 8 \text{ mm}$ 。
- 问：换质子、换 α 粒子，偏转量变吗？
- 想：不变！公式里根本没有 q 、 m ——只要 U_1 、 U_2 相同，偏转量就相同。

详细答案：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：电子在屏上的偏转量 8 mm。注意 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。

变式提醒：若偏转板间改为正弦变化的电压，屏上的亮线扫成竖直直线（示波器显示波形的基础）；加速电压增大，偏转量减小（ $y \propto 1/U_1$ ）。

4.4 技法小结：电场运动题的三板斧

- **先判方向：**粒子初速度与电场方向平行（加速/减速，匀变速或动能定理）还是垂直（偏转，类平抛）？
- **平行方向用动能定理**（ $qU = \Delta E_k$ ，与路径无关，最省事），垂直方向拆解（水平匀速 $x = v_0 t$ 、竖直匀加速 $y = \frac{1}{2} a t^2$ ）；
- **组合场按段切：**加速段 → 偏转段逐段用各自公式，段间用速度衔接（出加速段的速度就是偏转段的初速度）。

动手试试（材料：一把塑料尺、一撮碎纸屑）

先猜：摩擦过的尺子靠近碎纸屑，纸屑会怎样动？是慢慢飘过去，还是猛地跳过去？

动手：尺子在头发上摩擦后，靠近桌上的碎纸屑（先远后近）。

观察：纸屑先被吸引，碰到尺子后有的又弹开！

思考：纸屑先被“抢”过来（电场力吸引），接触后带上同号电荷，又被“推”开（同号相斥）——一吸一斥，电场力对纸屑做的功改变了它的运动。带电粒子在电场里的命运，你手里这把尺子已经演示过了。

本章注释

〔注 1〕“电子带多少电荷”这个问题，密立根用油滴实验回答了（1911 年）：他让带电油滴在电场中悬浮，通过平衡电场力和重力，测出油滴带的电荷，发现它们全是某个最小值的整数倍——这个最小值就是电子电荷 $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ，人类第一次“称”出了单个电子的电

荷。但密立根有个科学史上著名的“瑕疵”：他发表的论文报告了 58 次实验，而他的笔记本里其实记了 175 次——他挑选了“好看”的数据发表。这件事后来被学界反复讨论：有人批评他数据筛选，有人辩护说那年代的实验论文都这样。今天教材采用他的结果，是因为后来的实验反复验证 e 的数值是对的——但这个故事提醒我们：科学结论可以被后人验证，科学家的过程也可能不完美。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
从静止加速	动能定理	$qU = \frac{1}{2}mv^2$ ，与路径无关
逆电场射入	匀减速再反向	先算 $s = v_0^2/2a$ ，对称性
垂直射入电场	类平抛	水平匀速、竖直匀加速
偏转侧移	公式	$y = qUL^2/2mdv_0^2$
先加速后偏转	示波器组合	$y = U_2L^2/4dU_1$ ， q/m 消掉
平行/垂直判定	三板斧	平行用能量、垂直拆解、组合按段

你该记住的流程：读电场运动题 → (1) 判方向：平行（匀变速/动能定理）还是垂直（类平抛）？→ (2) 平行： $qU = \Delta E_k$ 一步到位；垂直：拆水平匀速 + 竖直匀加速 → (3) 组合场：先加速后偏转用 $y = U_2L^2/4dU_1$ → (4) 检查陷阱：减速先算 s 与场长比、偏转先算 y 与 $d/2$ 比 → (5) 验算量级。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（填空） 一电子以初速度 v_0 垂直射入平行板电容器之间的匀强电场（板长 L 、板间距 d 、板间电压 U 、电子质量 m 、电荷量 e ），电子恰好从下板边缘飞出。求电子在电场中的飞行时间 t 与出射时竖直方向速度 v_y （忽略重力）。

答案： $t = \frac{L}{v_0}$ ； $v_y = \frac{eUL}{mdv_0}$ 。**解析：**水平方向匀速（ $t = L/v_0$ ，不受力）；竖直方向匀加速， $a = \frac{eE}{m} = \frac{eU}{md}$ ， $v_y = at = \frac{eUL}{mdv_0}$ 。若恰好从下板边缘飞出，还满足 $\frac{1}{2}at^2 = d$ ——可反求电压或初速度。**偏转题的“分解”套路：**水平匀速、竖直匀加速，时间由水平位移定；飞出条件（恰好擦边）是隐含方程。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 带电粒子在电场中加速，常用的两种处理方法？
- 粒子经电压 U 加速后，速度与 U 的关系（用动能定理）？
- 带电粒子垂直进入匀强电场，做什么运动（可分解为哪两个分运动）？
- 偏转位移 y 与哪些因素有关（定性）？
- 重力在什么情况下可以忽略？
- 示波管中电子束偏转依靠什么？

提升

- 质子 ($q = e$) 经 100 V 电压加速, 末速度多大 ($m_p = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$)?
- 电子经 500 V 加速后垂直进入 $E = 10^4 \text{ V/m}$ 的偏转电场, 飞行时间 $t = 10^{-8} \text{ s}$, 偏转位移多大 ($m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$)?
- 偏转距离 y 与加速电压 U_1 、偏转电压 U_2 的关系 (定性)?

探究

- 喷墨打印机如何让墨滴“指哪打哪”? 用带电粒子偏转原理解释并画示意图。

参考答案: 1. (1) 牛顿第二定律 ($a = qE/m$) + 运动学; (2) 动能定理 ($qU = \frac{1}{2}mv^2$)。2. $v = \sqrt{2qU/m}$ ——与 U 的平方根成正比, 与质量平方根成反比。3. 类平抛: 沿电场方向匀加速 + 垂直电场方向匀速。4. 与偏转电压、极板长度、粒子比荷有关; 与加速电压成反比 ($y = U_2 L^2 / 4U_1 d$ 之类)。5. 重力远小于电场力时 (微观粒子、强电场) 可忽略; 宏观带电体通常不能忽略。6. 电场对电子束的偏转作用 (水平、竖直两对偏转板)。7. $v = \sqrt{2eU/m_p} = \sqrt{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 100 / 1.67 \times 10^{-27}} \approx 1.38 \times 10^5 \text{ m/s}$ 。8. $a = eE/m_e = 1.6 \times 10^{-19} \times 10^4 / 9.1 \times 10^{-31} \approx 1.76 \times 10^{15} \text{ m/s}^2$, $y = \frac{1}{2}at^2 = 0.88 \text{ cm}$ 。9. 偏转电压 U_2 越大偏转越大; 加速电压 U_1 越大偏转越小 ($y \propto U_2/U_1$)。10. 墨滴先带电, 通过偏转电极时受电场力偏转, 偏转量与墨滴电荷量、偏转电压有关——通过控制偏转电压让墨滴落在纸面指定位置, 实现“按需喷墨”。

第五章 电容器与静电应用

手机充电宝、相机闪光灯、老式收音机的调谐旋钮——它们的“心脏”都是同一个东西：**电容器**。电容器是“电的蓄水池”：两块金属板夹一层绝缘体，就能储存电荷。这一章认识电容的定义、平行板电容器的决定式，以及静电在现代生活中的利用与防范。你可能想不到，“电”第一次被人类“装进容器”，是 1745 年的一只玻璃瓶——它让整个欧洲的贵族们排队被电击。
本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解电容的概念、公式与单位；(2) 掌握平行板电容器电容的决定因素；(3) 会分析电容器的充放电与静电应用。

5.1 电容：储存电荷的本领

两块平行金属板，中间夹一层绝缘体，接上电源——会发生什么？正负电荷分别聚集在两板上，中间出现电场，电荷被“存”住了。这就是**电容器**，“电的蓄水池”。它储存电荷的本领怎么描述？用**电容**：

$$C = \frac{Q}{U}$$

单位法拉 (F)，1 F 巨大，常用 μF (10^{-6})、 pF (10^{-12})。**C 只由电容器本身结构决定，与是否充电、充多少无关**（比值定义法又见面了）。

电容器的“瞬时放电”能力，是相机的命根子：手机闪光灯先花半秒把电容充饱，然后一瞬间放光——闪一下只需要几毫秒，电池直接供不出这么大的电流，电容来。更狠的是**超级电容**：你坐过的很多城市公交，进站停靠 10 分钟，顶上降下充电弓“刷”一下——靠的就是车顶超级电容，10 分钟充满、能跑几十公里，而且充放电几十万次不衰减。油车里的铅酸电池旁边，也常躺着一个电容，负责启动时那一瞬间的大电流。

例题 5.1

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

想一想：

- 问：电容怎么求？

- 想： $C = \frac{Q}{U} = \frac{4 \times 10^{-5}}{200} = 2 \times 10^{-7} \text{ F} = 0.2 \mu\text{F}$ 。
- 问：电压降了，电容变吗？电荷量呢？
- 想：C 不变（结构决定）， $Q' = CU' = 2 \times 10^{-7} \times 100 = 2 \times 10^{-5} \text{ C}$ 。
- 问：电荷量为什么减半？电荷去哪了？
- 想：电压降低，电容器“放电”了，一部分电荷沿电路流走——电容只决定“装多少对应多少电压”，不决定实际存量。

详细答案：解： $C = \frac{Q}{U} = \frac{4 \times 10^{-5}}{200} = 2 \times 10^{-7} \text{ F} = 0.2 \mu\text{F}$ 。电压降为 100 V 时： $Q' = CU' = 2 \times 10^{-7} \times 100 = 2 \times 10^{-5} \text{ C}$ 。答：电容 $0.2 \mu\text{F}$ ；电压 100 V 时电荷量 $2 \times 10^{-5} \text{ C}$ 。

变式提醒：注意别用 $Q = CU$ 反推“C 与 Q 成正比”——C 是固有属性，与 Q、U 都无关（比值定义法）。日常电容以微法、皮法计，1 法拉的电容巨大到少见。

5.2 平行板电容器的决定式

平行板电容器（正对面积 S、间距 d、介质介电常数 ε_r ）：

$$C = \frac{\varepsilon_r S}{4\pi k d}$$

别死记公式，先想直觉：板越大越能装（S 大——蓄水池底面积大），板越近越能装（d 小——电场更强，把电荷“压”得更紧），介质越好越能装（ ε_r 大——介质帮电场“蓄能”）。三条直觉对上公式，公式就活了。

你手机的屏幕，就是一块电容。电容式触摸屏的玻璃下面有一层透明电极网格，你的手指一靠近，手指和屏幕之间就多了一个“小电容”——指头是导体，屏幕电极是另一块板，指尖的电场改变了局部电容值，芯片一测就知道你按在哪。曲面屏、折叠屏折腾半天，底层还是“两个导体夹层”这笔账。

电容题最常考的是“动”——板距变了、介质插了，C、Q、U、E 跟着怎么变？两类经典动态分析：接通电源（U 不变）和断开电源（Q 不变）。**第一步永远是先判“谁不变”**——U 定则看 $Q = CU$ ，Q 定则看 $U = Q/C$ ，再配合 $E = U/d$ 。

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？

想一想：

- 问：断开电源，什么量不变？
- 想：Q 不变（电荷无处可去）。

- 问：d 增大，C 怎么变？
- 想： $C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ ，d 增大 $\rightarrow$ C 减小。
- 问：U 呢？E 呢？
- 想： $U = \frac{Q}{C}$ 增大； $E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{Cd} = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}$ ——E 与 d 无关，不变（这个结论常考）！
- 问：直观理解，对吗？
- 想：板距拉开，电压升高（电容“憋”住了电荷），但板间场强由电荷面密度决定，电荷没变，场强就不变。

详细答案：解：断开电源 $\rightarrow$ Q 不变。d 增大 $\rightarrow C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$ 减小 $\rightarrow U = \frac{Q}{C}$ 增大。 $E = \frac{U}{d} = \frac{Q}{Cd} = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}$ ，与 d 无关，不变。答：C 减小、U 增大、E 不变。

变式提醒：若改成“接通电源”（U 不变），结果完全不同：d 增大 $\rightarrow$ C 减小 $\rightarrow Q = CU$ 减小 $\rightarrow E = U/d$ 减小——同一个动作，接不接电源结果相反。动态分析三步法：(1) 先判“谁不变”（接电源 U 定，断开 Q 定）；(2) 决定式判 C；(3) $C = Q/U$ 与 $E = U/d$ 推其余。

静电计实验：静电计指针张角反映电容器两端电压。充电后断开电源，插入介质板，张角如何变？——断开 $\rightarrow$ Q 不变；插入介质 ϵ_r 增大 $\rightarrow$ C 增大 $\rightarrow U = Q/C$ 减小 $\rightarrow$ 张角变小。若改问“与电源相连时插入介质”：U 不变、C 增大、 $Q = CU$ 增大（电源继续充电），张角不变。判据就是第一步。

动手试试（材料：两片铝箔、一张纸、一节电池、一个小 LED）

先猜：两块铝箔中间夹张纸，接上电池再断开——它能“存住”电吗？

动手：两片铝箔中间夹纸（像三明治），铝箔各接一根导线，先接电池几秒“充电”，断开，再把两根导线碰一下（或接 LED）。

观察：碰线的瞬间有“啪”的小火花（或 LED 闪一下）——它把电“存”住了！

思考：这就是电容器——两块导体夹一层绝缘体，能储存电荷（ $C=Q/U$ ）。充进去的电荷被“关”在两片铝箔之间，断开电源也跑不掉，直到你让它放电。相机的闪光灯就是靠电容“瞬间放电”打闪的。

练一练

- 电容 $C = Q/U$ 中，C 与 Q 成正比吗？为什么？
- 平行板电容器接通电源，插入介质板，Q、U、E 各如何变化？
- 平行板电容器充电后断开电源，将两板正对面积减小，U、E 如何变化？
- 静电复印、避雷针分别利用/防范了静电的什么原理？

参考答案：1. 不成正比——C 是固有属性，由结构决定（比值定义法）。2. U 不变（接电源）； ϵ_r 增大 $\rightarrow$ C 增大 $\rightarrow Q = CU$ 增大； $E = U/d$ 不变（d 没变）。3. Q 不变；S 减小 $\rightarrow$ C 减小 $\rightarrow$ U

= Q/C 增大; $E = \frac{4\pi kQ}{\epsilon_r S}$, S 减小 $\rightarrow E$ 增大。4. 复印利用静电吸附 (库仑力吸墨粉); 避雷针防范静电 (尖端放电引导雷电入地)。

5.3 静电的利用与防范

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——汽车厂给车身喷漆, 先让车身带上电荷, 漆雾喷出来自动“贴”到车身上, 连犄角旮旯都喷得均匀, 还省漆。

防范: 油罐车后面拖一条铁链 (把摩擦积累的电荷导入大地, 防静电火花引燃油气)、加油站禁止穿化纤衣服 (易起电)、飞机降落前“放静电” (机轮着地瞬间放掉机身积累的电荷)。静电可以救命 (除尘、喷漆), 也可以致命 (油库、医院手术室), 区别只在一句: **电荷积不积累、有没有地方走。**

本章注释

〔注 1〕第一个电容器是 1745 年的“莱顿瓶”: 荷兰莱顿大学的穆申布鲁克把水灌进玻璃瓶、插入金属棒, 发现电荷能被“存”在瓶里——放电时能隔着瓶子把人击倒, 他写信给法国科学家说“我为全法国王室做了一次实验, 差点送命”。莱顿瓶放电轰动了整个欧洲: 在法国皇宫, 700 名修道士手拉手连成一条线, 让电流穿过所有人, 全体同时跳起来; 在德国, 有人用莱顿瓶给火点燃烈酒。第 1 章那位放风筝的富兰克林, 就是用莱顿瓶“接住”了雷——莱顿瓶就是今天所有电容器的老祖宗, 它的原理 (两导体夹绝缘体存电荷) 和你的手机屏幕、相机闪光灯里的电容一模一样。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
电容定义	比值定义	$C = Q/U$, 与充多少无关
平行板电容	决定式	$C = \frac{\epsilon_r S}{4\pi k d}$: S 大、 d 小、介质好 $\rightarrow$ 能装
接通电源	U 不变	$Q = CU$ 联动、 $E = U/d$
断开电源	Q 不变	$U = Q/C$ 、 $E = \frac{4\pi k Q}{\epsilon_r S}$ (d 无关)
静电计张角	看电压	U 大张角大
静电利用/防范	生活常识	除尘/复印 = 利用, 铁链/避雷针 = 防范

你该记住的流程: 读电容器动态题 $\rightarrow$ (1) 先判“谁不变”: 接电源 U 定, 断开 Q 定 (最关键一步) $\rightarrow$ (2) 决定式判 C 变向 $\rightarrow$ (3) $C = Q/U$ 、 $E = U/d$ 推出其余 $\rightarrow$ (4) 静电计张角看 $U \rightarrow$ (5) 验算: 断开时 d 变 E 不变, 接电源时 d 变 E 变。

真题直击 (改编自 2023 全国乙卷) (单选) 平行板电容器充电后与电源断开, 将一金属板插入两板之间 (不接触), 下列说法正确的是?

想一想:

- 问：插入金属板，相当于什么？
- 想：金属板是导体，静电平衡后内部场强为零——相当于把两板间距“劈开”成两个串联电容，等效间距减小（金属板占据的空间无电场）。
- 问：断开电源，什么不变？
- 想：Q 不变。
- 问：等效 d 减小，C、U、E 怎么变？
- 想：C 增大 $\rightarrow U = Q/C$ 减小；E 变吗？板间电场被金属板“截断”，金属板内部无场，实际场强由电荷面密度决定，Q 不变则 E 不变（只是有金属板的地方没电场了）。

详细答案：答：插入金属板后等效板距减小，C 增大、U 减小；Q 不变、E 不变（由电荷面密度决定）。这类“插入导体”题的核心：导体把电场“短路”掉一段，等效 d 变小。

变式提醒：若插入的是介质板（非导体）， ϵ_r 增大，C 增大、U 减小；若接通电源插入金属板，U 不变、Q 增大。先判“谁不变”，再动手。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 电容的定义式？单位？
- 平行板电容器的电容与哪些因素有关（公式）？
- 电容器充电后，两极板带什么电荷？
- 电容器所带电荷量与两极板电压的关系？
- 平行板电容器两极板间插入电介质，电容如何变化？
- 电容器的“耐压值”指什么？

提升

- 电容器电容 $10\ \mu\text{F}$ ，两端电压 $5\ \text{V}$ ，所带电荷量多大？
- 平行板电容器极板面积增大一倍、距离减半，电容变为原来的几倍？
- 电容器充电后断开电源，再增大极板间距，电荷量、电压、场强如何变化？

探究

- 用发光二极管和电容器，演示“电容充电放电”并观察电流方向变化。

参考答案：1. $C = Q/U$ ；法拉 (F)，常用 μF 、 pF 。2. $C = \varepsilon S/4\pi kd$ (正比于相对介电常数与正对面积，反比于极板间距)。3. 两极板带等量异号电荷。4. $Q = CU$ ——正比关系。5. 电容增大 (插入电介质使 ε 增大)。6. 电容器允许加的最大电压，超过会被击穿。7. $Q = CU = 10 \times 10^{-6} \times 5 = 5 \times 10^{-5} \text{ C}$ 。8. 4 倍 (面积 $\times 2$ 、距离 $\div 2$, $C \propto S/d$)。9. 电荷量不变 (断开电源 Q 不变)；电压增大 ($U = Q/C$, C 减小)；场强不变 ($E = U/d = Q/Cd$, 而 $Cd \propto S$ 不变)。10. 电容串 LED 接入电源充电，LED 亮后渐灭 (充满)；反接电源放电，LED 反方向亮一下——充放电电流方向相反，LED 单向导电性正好显示方向。

第六章 电流与欧姆定律

一按开关灯就亮——可你有没有想过：电子真能在一瞬间跑过整根电线？真相会让你大跌眼镜：电子的脚步慢得像蜗牛，“跑得快”的是别的东西。

前三章我们认识了静止的电荷（静电）。现在让电荷动起来——电荷的定向移动就是电流。这一章从电流的微观本质出发，认识电阻、欧姆定律和串并联电路。电路是物理二里“最工具”的一编：它的定律不复杂，但组合起来可以千变万化，是选择题的常客。而“欧姆定律”这条今天每个初中生都会背的规律，它的发现者欧姆当年被冷落了整整十年。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解电流的概念与微观表达式；(2) 掌握欧姆定律与伏安特性曲线；(3) 会计算电阻、区分线性与非线性元件。

6.1 电流：电荷的定向移动

电流是电荷的定向移动。大小定义为**单位时间内通过导体横截面的电荷量**：

$$I = \frac{q}{t}$$

单位安培（A）。方向规定为正电荷定向移动的方向（实际上金属中移动的是电子，方向相反）。电流是标量，但有方向（从高电势流向低电势）。

一按开关灯立刻就亮，电子真的跑得那么快吗？不是！金属导体中有大量自由电子，电场一来，电子整体缓慢漂移（漂移速度其实只有毫米每秒级，比蜗牛还慢几百倍），但**电场传播速度接近光速**。导线里的电子好比排队的人：指令（电场）瞬间传到队尾，大家几乎同时起步，虽然每个人只挪动了一点点。**亮得快，是因为指令快，不是人（电子）快。**

宏观的电流背后，微观到底发生了什么？设导线横截面积为 S ，单位体积内自由电子数为 n ，电子定向移动平均速率为 v ——则 Δt 时间内通过截面的电子占体积 $Sv\Delta t$ ，电荷量就有了：

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t} = neSv$$

这个式子把宏观的电流 I 和微观的 n 、 v 接上了。铜导线里 $n \approx 8.5 \times 10^{28} \text{ m}^{-3}$ ，通 0.5 A 电流时电子的漂移速率只有约 $4 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ 。而手机 120 W 快充时，充电线里流过的是 6 A 的大电流——比普通充电粗了好几倍的电流，靠的也是更多电子在排队。

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？（ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）

想一想：

- 问：电荷量怎么算？
- 想： $q = It = 0.5 \times 120 = 60 \text{ C}$ ——注意 2 分钟要换成 120 秒。
- 问：电子数呢？
- 想： $N = \frac{q}{e} = \frac{60}{1.6 \times 10^{-19}} = 3.75 \times 10^{20}$ 个。
- 问：这个数量级对吗？
- 想：60 库仑对应约 3.75×10^{20} 个电子——宏观的一点点电流，微观是天文数字的电子在排队。

详细答案：解： $q = It = 0.5 \times 120 = 60 \text{ C}$ ； $N = \frac{q}{e} = \frac{60}{1.6 \times 10^{-19}} = 3.75 \times 10^{20}$ 个。答：2 分钟内通过 60 C 电荷，约 3.75×10^{20} 个电子。

变式提醒：若问电子的漂移速率（给 n 、 S ），用 $v = \frac{I}{neS}$ 反推；若问“单位体积电子数”，变形 $n = \frac{I}{eSv}$ ——微观表达式四个量互相可推。

6.2 电阻与欧姆定律

为什么导线越细越热、越长越阻？**电阻**衡量导体阻碍电流的本领： $R = U/I$ （比值定义）。但同样的材料，换成更长的导线、更细的铜丝，电阻还一样吗？——导体材料、长度、截面积决定电阻：

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

ρ 是**电阻率**（材料属性，温度升高一般增大）。**欧姆定律：** $I = U/R$ （适用于金属导体和电解液等线性元件）。

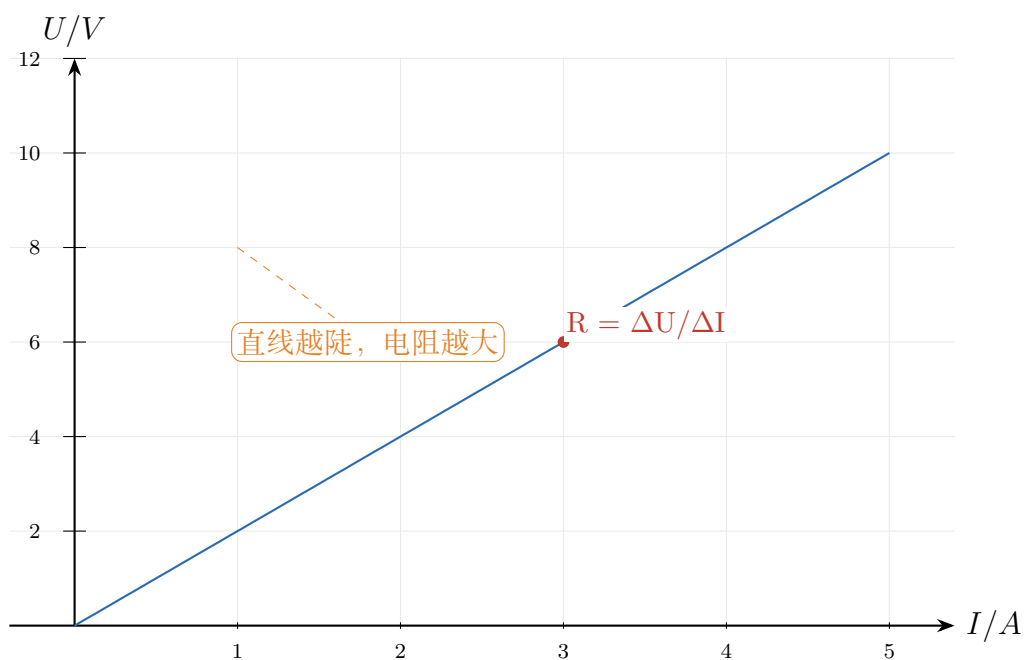


图 6.1: 欧姆定律 U-I 图: 斜率 = 电阻

串并联规律 (必须背熟): 串联 $R = R_1 + R_2$ (电流相同, 电压按电阻分); 并联 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$ (电压相同, 电流按电阻反分)。并联总电阻小于任何一个分电阻。

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。

想一想:

- 问: 并联总电阻怎么求?
- 想: $\frac{1}{R} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$, $R = 2\ \Omega$ ——小于任何一个分电阻。
- 问: 总电流多大?
- 想: $I = \frac{U}{R} = \frac{6}{2} = 3\text{ A}$ 。
- 问: 各支路电流呢? 验证一下。
- 想: $I_1 = \frac{6}{3} = 2\text{ A}$, $I_2 = \frac{6}{6} = 1\text{ A}$; $I_1 + I_2 = 3\text{ A} =$ 总电流, 对上了。

详细答案: 解: $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{3} + \frac{1}{6} = \frac{1}{2}$, $R = 2\ \Omega$ 。 $I = \frac{U}{R} = 3\text{ A}$ 。 $I_1 = \frac{6}{3} = 2\text{ A}$, $I_2 = \frac{6}{6} = 1\text{ A}$ 。 答: 总电阻 $2\ \Omega$, 总电流 3 A , 两支路电流分别 2 A 、 1 A 。

变式提醒: 并联电阻别用 $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ 记错——两只电阻并联的特例公式是“积在和上”, 但两只以上必须用倒数公式; 串联分压、并联分流是动态电路分析的基础 (第 7 章要用)。

鸟站在 3000 A 的输电线为什么没事? 用欧姆定律拆解: 导线每米电阻约 $3.0 \times 10^{-5}\ \Omega$, 鸟两脚相距 6 cm, 这段导线电阻 $R = 3.0 \times 10^{-5} \times 0.06 = 1.8 \times 10^{-6}\ \Omega$, 电压降 $U = IR = 3000 \times 1.8 \times$

$10^{-6} = 5.4 \times 10^{-3} \text{ V}$ ——只有 5 毫伏！流过鸟的电流微乎其微。**危险的不是“线里有 3000 A”，而是“你身上跨过了多少伏”**——触电看的是跨步电压，不是线路电流。

电阻能不能变成 0？——能！某些材料在极低温度下电阻会突然消失，这就是**超导体**。零电阻意味着电流可以无损耗地持续流动——最典型的应用是医院里的 MRI（磁共振成像）：它的强磁场由超导磁体产生，需要几百安培的电流持续运行而不发热。没有超导体，MRI 的强磁场做不出来。超导的代价是低温（液氮约 4 K）——“零电阻”不是免费的，是要用“极低温”去换的。〔注 2〕

电阻还是传感器的“敏感神经”：**电子秤**里贴着一片“电阻应变片”，东西放上去，金属片被压弯、电阻微变，电路立刻换算成重量——你每天过秤称体重，靠的就是“电阻随形变变化”这一条。桥梁、大坝上贴的应力传感器，也是同一个原理。

电表的改装：一只小电流计如何“长”成电压表：

实验室最灵敏的电表是**电流计 G**（也叫灵敏电流计），满偏电流很小（常见的 $I_g = 1 \text{ mA}$ 量级），内阻 R_g 约几十到几百欧。可我们要测的电压是几伏、电流是几安——一只满偏 1 mA 的电流计直接上电路，要么烧表，要么测不出。怎么让它“扛得住”大电压、大电流？**串联分压、并联分流**——就是 6.2 节刚学的两个招。

- **改装成电压表：**与电流计**串联**一个大电阻（分压电阻）。量程 U 对应满偏： $U = I_g(R_g + R)$ ，所以 $R = \frac{U}{I_g} - R_g$ 。
- **改装成电流表：**与电流计**并联**一个小电阻（分流电阻）。量程 I 对应满偏： $I_g R_g = (I - I_g)R$ ，所以 $R = \frac{I_g R_g}{I - I_g}$ 。

口诀四个字：**扩流并联、扩压串联**——要扩的是“电流表”量程就并联，要扩的是“电压表”量程就串联，别记反。

例题 6.3

（改装计算）一只电流计 $I_g = 1 \text{ mA}$ 、 $R_g = 100 \Omega$ 。(1) 改装成量程 3 V 的电压表，需串联多大电阻？(2) 改装成量程 0.6 A 的电流表，需并联多大电阻？

想一想：

- 问：电压表满偏时电流计刚好满偏，两端总电压多少？
- 想： $U = I_g(R_g + R) \rightarrow R = \frac{3}{0.001} - 100 = 3000 - 100 = 2900 \Omega$ 。
- 问：电流表满偏时，分流电阻上流过多少电流？
- 想： $I - I_g = 0.6 - 0.001 = 0.599 \text{ A}$ ；并联电压相等： $R = \frac{I_g R_g}{I - I_g} = \frac{0.001 \times 100}{0.599} \approx 0.167 \Omega$ 。

详细答案：解：(1) $R = \frac{U}{I_g} - R_g = \frac{3}{0.001} - 100 = 2900 \Omega$ 。(2) $R = \frac{I_g R_g}{I - I_g} = \frac{0.001 \times 100}{0.6 - 0.001} \approx 0.167 \Omega$ 。
答：串联 2900Ω 改装成 3 V 电压表；并联约 0.167Ω 改装成 0.6 A 电流表。注意量级：分压电阻是**千欧级**、分流电阻是**零点几欧**——一个“大串”、一个“小并”，正好相反。

变式提醒：改装后的电表内阻变了——电压表内阻 $= R_g + R$ (大)，电流表内阻 $= R_g \parallel R$ (小)。以后做电学实验（附录 C 的伏安法、多用电表）会反复用到“大内阻电压表、小内阻电流表”这个直觉。

6.3 伏安法测电阻（实验）

测电阻的看家本领是伏安法：电压表并联测 U 、电流表串联测 I ， $R = U/I$ 。两个问题绕不开：

问题一：电流表内接还是外接？（电表不是理想的：电压表会分流、电流表会分压）

- **外接法**（电流表在电压表外侧）：电压表分流使 I 偏大， $R_{\text{测}} = U/I < R_{\text{真}}$ ；
- **内接法**（电流表在电压表内侧）：电流表分压使 U 偏大， $R_{\text{测}} > R_{\text{真}}$ 。
- 判据： $R_x < \sqrt{R_V R_A}$ 用外接， $R_x > \sqrt{R_V R_A}$ 用内接。经验法则：**小电阻外接、大电阻内接**（口诀“小外大内”）。

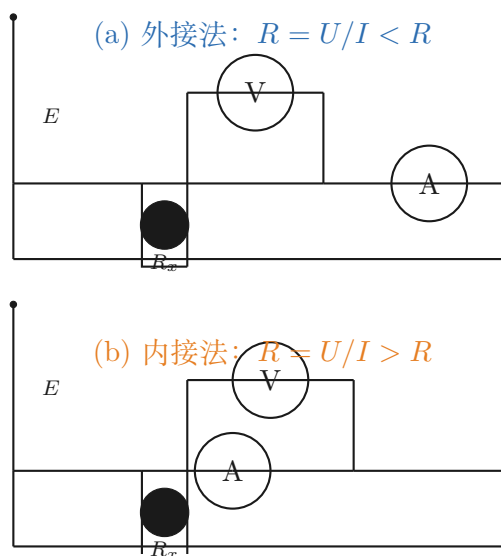


图 6.2: 伏安法两种接法对比：外接法 $R_{\text{测}} < R_{\text{真}}$ （电压表分流），内接法 $R_{\text{测}} > R_{\text{真}}$ （电流表分压）

问题二：滑动变阻器分压还是限流？ 需要电压从 0 开始连续调节、或要求电压变化范围大时用分压接法；只要求粗略调节时用限流接法。

例题 6.4

待测电阻约 $5\ \Omega$ ，电压表内阻约 $3\ \text{k}\Omega$ ，电流表内阻约 $0.1\ \Omega$ 。应选内接还是外接？若用外接法，电压表读 $2.00\ \text{V}$ 、电流表读 $0.42\ \text{A}$ ，测量值多少？与真实值的误差方向？

想一想：

- 问：判内接外接，看什么？
- 想： $\sqrt{R_V R_A} = \sqrt{3000 \times 0.1} \approx 17 \Omega > R_x = 5 \Omega$ ——小电阻，用外接。
- 问：测量值多少？误差方向？
- 想： $R_{\text{测}} = \frac{2.00}{0.42} \approx 4.8 \Omega$ 。外接法电压表分走部分电流， I 偏大 $\rightarrow R_{\text{测}} < R_{\text{真}}$ （偏小约 4%）。
- 问：为什么小电阻要外接？
- 想：小电阻上电压小，电流表的分压占比小；关键是误差占比：小电阻时电压表内阻远大于 R_x ，分流占比小，误差小。

详细答案：解：(1) 判接法： $\sqrt{R_V R_A} = \sqrt{3000 \times 0.1} \approx 17 \Omega > R_x = 5 \Omega$ ——小电阻，用外接法。(2) 测量值： $R_{\text{测}} = \frac{U}{I} = \frac{2.00}{0.42} \approx 4.8 \Omega$ 。答：选外接法；测量值 4.8Ω ，偏小于真实值（约 5Ω ）。(3) 验算：外接法电压表分流， $I_{\text{测}} = I_R + I_V > I_R$ ，故 $R_{\text{测}} = U/I_{\text{测}} < U/I_R = R_{\text{真}}$ ——方向一致。

练一练

- 一按开关灯就亮，是电子跑得快还是电场传得快？电子的漂移速度大约多大？
- 两只电阻 3Ω 和 6Ω 并联，总电阻多大？串联呢？
- 铜导线的电阻率 $\rho = 1.7 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ ，长 $10 m$ 、截面积 $1 mm^2$ 的铜线电阻多大？
- 鸟站在高压线上为什么没事？触电看的是什麼？

参考答案：1. 电场传播（接近光速）快，电子漂移只有毫米每秒级——“亮得快是因为指令快”。2. 并联 2Ω （倒数相加），串联 9Ω 。3. $R = \rho L/S = 1.7 \times 10^{-8} \times 10/10^{-6} = 0.17 \Omega$ 。4. 两脚间导线电压降只有几毫伏（跨步电压小）——触电看跨步电压，不看线路电流。

本章注释

〔注 1〕欧姆定律的发现者是德国中学教师欧姆（Georg Ohm，1787–1854）。1827 年他自费出版《电路的数学研究》，提出了完整的欧姆定律，却遭到学界冷落近十年——因为他用伏打电池做实验，而当时的电池电压不稳定，别人复现不了他的结果，有人甚至嘲笑他“像疯子一样痴迷于数字”。直到 1841 年英国皇家学会授予他科普利奖章（当时科学界的最高荣誉），54 岁的欧姆才等来承认。今天，电阻的单位以他命名（欧姆， Ω ）——这个“被冷落十年”的中学老师，成了每个初中生都要背的名字。

〔注 2〕超导是 1911 年荷兰物理学家昂内斯发现的：他把水银冷却到 $4.2 K$ （约 $-269^\circ C$ ）时，电阻突然降为零——他因此获 1913 年诺贝尔奖。此后近 75 年，人们一直认为超导必须“极低温”，直到 1986 年柏诺兹和缪勒发现陶瓷材料在 $35 K$ 就超导（次年获诺奖），掀起“高温超导”热潮——如今科学家们在寻找室温超导，一旦实现，超导电缆、超导储能、磁悬浮都

会改天换地。教材只要求你记住“超导 = 零电阻 + 低温代价”，至于室温超导能不能成，那是正在发生的历史。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
电流	电荷定向移动	$I = q/t$, 微观 $I = neSv$
电阻	比值定义	$R = U/I$, $R = \rho L/S$
欧姆定律	线性元件	$I = U/R$
串联	电流相同	$R = R_1 + R_2$, 分压
并联	电压相同	$1/R = 1/R_1 + 1/R_2$, 分流
伏安法	内接外接	小外大内, R_x 与 $\sqrt{R_V R_A}$ 比
超导	零电阻	MRI 强磁场、低温代价

你该记住的流程：读电路题 → (1) 判串并联（电流同路串联、电压同路并联）→ (2) 等效电阻：串联相加、并联倒数 → (3) 欧姆定律 $I = U/R$ 三步走 → (4) 实验题：先判内外接、再判分压限流 → (5) 验算：并联总电阻必小于最小分电阻。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 一根均匀金属导线，两端电压为 U 时电流为 I 。若将这根导线均匀拉长为原来的 2 倍（体积不变），仍加电压 U ，则电流变为？

A. $\frac{I}{2}$ B. $\frac{I}{4}$ C. $2I$ D. $4I$

答案 B。解析：拉长 2 倍（体积不变）→ 横截面积减半： $L' = 2L$ 、 $S' = S/2$ 。电阻 $R = \rho \frac{L}{S}$ ： $R' = \rho \frac{2L}{S/2} = 4R$ 。电压不变， $I' = \frac{U}{4R} = \frac{I}{4}$ 。“拉长/压短”题的**口诀**：长度变 k 倍、截面积变 $1/k$ ，电阻变 k^2 倍——体积不变是隐含条件。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 电流的定义式？单位？电流方向如何规定？
- 电流的微观表达式（ $I = nqSv$ ）中各字母含义？
- 欧姆定律的表达式？适用条件？
- 电阻的定义式？与电压、电流有关吗？
- 伏安特性曲线是直线的元件叫什么？灯泡属于什么？
- 金属导体电阻与温度的关系？

提升

- 导线中每秒通过 2×10^{19} 个电子，电流多大（ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）？
- 电阻 $R = 20 \Omega$ 两端加 6 V 电压，电流多大？

- 某导体两端电压 4 V 时电流 0.2 A，电压 6 V 时电流多大（线性元件）？

探究

- 用万用表测量不同长度/粗细的电阻丝，探究“电阻与长度、横截面积的关系”。

参考答案：1. $I = q/t$ ；安培（A）；正电荷定向移动的方向。2. n 单位体积自由电荷数、 q 每个电荷量、 S 横截面积、 v 定向移动速率。3. $I = U/R$ ；纯电阻（金属、电解液等线性元件）。4. $R = U/I$ ；由材料、长度、横截面积决定，与 U 、 I 无关。5. 线性元件；非线性元件（灯丝电阻随温度升高而增大）。6. 温度升高电阻增大（金属）。7. $I = q/t = 2 \times 10^{19} \times 1.6 \times 10^{-19}/1 = 3.2 \text{ A}$ 。8. $I = U/R = 6/20 = 0.3 \text{ A}$ 。9. $R = 4/0.2 = 20 \Omega$ ， $I = 6/20 = 0.3 \text{ A}$ 。10. 用万用表电阻档测量：同材料同粗细、长度加倍电阻加倍（ $R \propto l$ ）；同长度同材料、横截面积加倍电阻减半（ $R \propto 1/S$ ）——验证 $R = \rho l/S$ 。

第七章 闭合电路

上一章把电源当理想电压源用——但真实世界的电池有“内伤”：内阻。为什么电池用久了灯泡会变暗？这就是本章要回答的。电动势、内阻、路端电压，三个概念讲清楚闭合电路欧姆定律，你就能分析“为什么电池旧了灯泡变暗”这类真实问题。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解电动势、内阻概念；(2) 掌握闭合电路欧姆定律；(3) 会分析路端电压随外电阻的变化与 U-I 图像。

7.1 电动势与内阻

同样是电池，1.5 V 和 12 V 差别在哪？**电动势 E**：电源把单位正电荷从负极搬到正极时非静电力做的功（单位伏特）——它是电源“搬运电荷”本领的量度，由电源本身决定。注意：电源内部也有电阻（**内阻 r**），它才是“电池旧了”的元凶。

换个说法理解电压：电压是“电能密度”——每 1 库仑电荷“装载”了多少焦耳能量。1 C 电荷流过 12 V 的电瓶就带走 12 J 能量，流过 1.5 V 的干电池只带走 1.5 J。所以“12 V 比 1.5 V 更有劲”，不是 12 V 的电荷更多，而是**每单位电荷带的能量更多**。电动势 E 就是电源给每库仑电荷“装”上的能量——装得越多，电压越高。

你手机电池标着“3.7 V、4500 mAh”——3.7 V 是它的**标称电压**（实际工作电压在 3.0 ~ 4.2 V 之间随电量变化），4500 mAh 是它能搬的电荷总量（约 1.6 万库仑）。电动车更夸张：一块电池包电压几百伏，靠的是几百节小电池串起来——串联升电压，并联加容量，这就是电池包的基本盘。

从伏打 1800 年叠出第一个电池，到今天你兜里的锂离子电池，电池走了两百多年。2019 年诺贝尔化学奖颁给了“锂离子电池”的三位奠基人——其中古迪纳夫获奖时已经 97 岁，是诺贝尔奖历史上最年长的获奖者。他 57 岁才转行研究电池，一干就是 40 年。〔注 1〕

7.2 闭合电路欧姆定律

闭合回路中：

$$I = \frac{E}{R + r}$$

路端电压（外电路两端的电压，即电源两极间电压）：

$$U = E - Ir$$

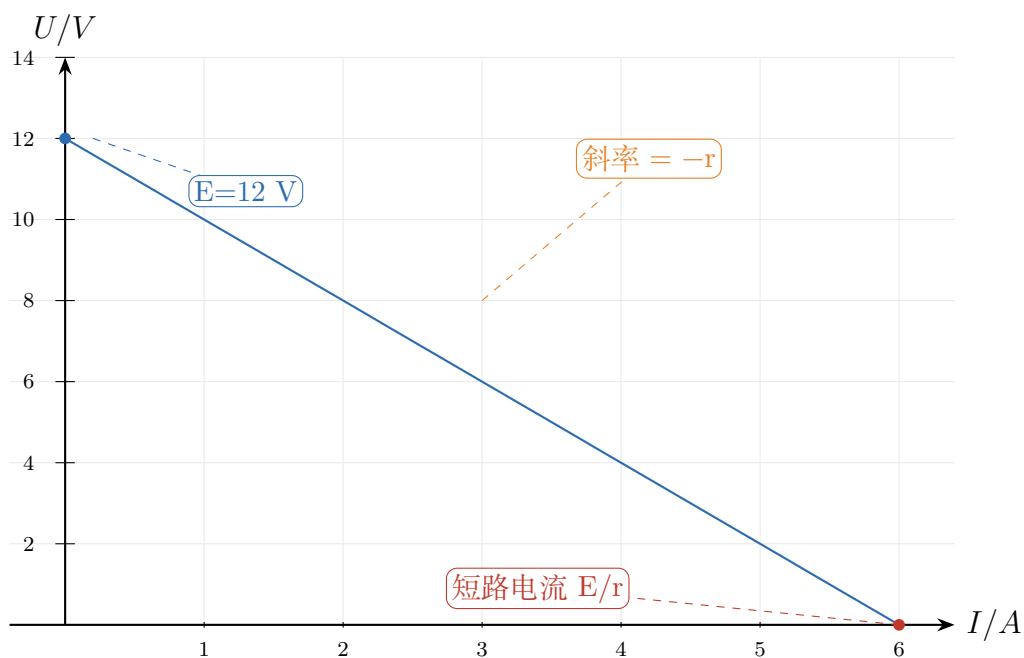


图 7.1: 闭合电路 U-I 图：纵截距 = 电动势，斜率绝对值 = 内阻

这公式藏着一个反直觉结论：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 反而增大。极端情况最直观：断路 ($R \rightarrow \infty$) 时 $U = E$ ，短路 ($R \rightarrow 0$) 时 $I = E/r$ 巨大到烧电源。

这也解释了**为什么手机快充时充电头会发烫、电池会发热**：快充 = 大电流，电流一大，内阻 r 上的发热 $I^2 r$ 按平方往上飙。所以快充手机都装了温控——不是怕你烫手，是物理上大电流必然带来内阻发热。

例题 7.1

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

想一想：

- 问：回路电流怎么求？
- 想： $I = \frac{E}{R+r} = \frac{6}{5+1} = 1 \text{ A}$ ——内阻也算进去。
- 问：路端电压呢？内压降呢？
- 想： $U = E - Ir = 6 - 1 = 5 \text{ V}$ ；内压降 $Ir = 1 \text{ V}$ 。
- 问：验证一下？

- 想： $U = IR = 1 \times 5 = 5 \text{ V}$ ，与 $E - Ir$ 一致。

详细答案：解： $I = \frac{E}{R+r} = \frac{6}{6} = 1 \text{ A}$ ； $U = E - Ir = 6 - 1 = 5 \text{ V}$ ；内压降 $Ir = 1 \text{ V}$ 。答：电流 1 A，路端电压 5 V，内压降 1 V。

变式提醒：若外电阻减小到 1Ω ， $I = \frac{6}{2} = 3 \text{ A}$ ， $U = 3 \text{ V}$ ——外阻越小，电流越大，路端电压越低；这就是“电池旧了灯泡变暗”的物理：内阻变大，路端电压被内阻吃掉更多。

7.3 动态电路分析（含容/含表）

滑动变阻器滑片一移，各表读数全都跟着动——怎么“预测”它们？记住**三步法**：(1) 判断总电阻变化（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，一步不乱。含电容器时记住：**电容器稳定时断路（无电流），两极板电压等于并联支路两端电压**。

例题 7.2

电路如图：电源 E 、内阻 r ， R_1 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？

想一想：

- 问：第一步看什么？
- 想：总电阻—— R 增大，串联总电阻增大。
- 问：总电流怎么变？
- 想： $I = \frac{E}{R_{\text{总}} + r}$ 减小（电源电动势不变）。
- 问：路端电压呢？
- 想： $U = E - Ir$ ， I 减小 $\rightarrow$ 内压降减小 $\rightarrow$ 路端电压增大。
- 问：各表读数呢？
- 想：电流表（测总电流）减小；电压表（测路端电压）增大。

详细答案：答：滑片右移 $\rightarrow R$ 增大 $\rightarrow$ 总电阻增大 $\rightarrow$ 总电流减小 $\rightarrow$ 内压降减小 $\rightarrow$ 路端电压增大。电流表示数减小，电压表示数增大。

7.4 测电动势与内阻（实验）

测 E 、 r 的经典方法：改变外电阻，读多组 U 、 I ，画 U - I 图——纵截距 = E ，斜率的绝对值 = r （图 7.1 那张图反过来用）。误差分析要点：电压表分流导致测得的 I 偏小（外接法）， $E_{\text{测}} < E_{\text{真}}$ 、 $r_{\text{测}} < r_{\text{真}}$ ；用“等效电源”法判断更方便：把电压表并入电源看作新电源。

例题 7.3

某同学测电池的 E 、 r ，得到 U - I 图像：纵截距 1.5 V、斜率 -0.5。求 E 和 r 。

想一想：

- 问：纵截距是什么？斜率呢？
- 想：纵截距 = $E = 1.5 \text{ V}$ ；斜率绝对值 = $r = 0.5 \Omega$ 。
- 问：这个电池短路电流多大？
- 想： $I_{\text{短}} = \frac{E}{r} = \frac{1.5}{0.5} = 3 \text{ A}$ 。

详细答案：解： $E = 1.5 \text{ V}$ ， $r = 0.5 \Omega$ 。答：电动势 1.5 V、内阻 0.5Ω ，短路电流 3 A。

7.5 多用电表（实验）

多用电表是“一表多能”：测电压、电流、电阻。测电阻用的是欧姆挡——表内有电池， R_x 越大电流越小、指针偏转越小——所以欧姆挡刻度是“右零左大”、不均匀（越往左越密）。

使用步骤（背）：(1) **选挡**：估测电阻，选合适倍率让指针落在刻度中段；(2) **欧姆调零**：红黑表笔短接调零（换挡必须重新调零）；(3) **测量读数**：示数 $\times$ 倍率；(4) **用完**拨到 OFF 挡或交流电压最高挡。

例题 7.4

多用电表欧姆挡选“ $\times 10$ ”，指针指在刻度 15 处，被测电阻多大？若改用“ $\times 100$ ”挡测同一电阻，指针会指在哪？换挡后第一步做什么？

想一想：

- 问：读数怎么算？
- 想： $R = 15 \times 10 = 150 \Omega$ ——示数乘倍率。
- 问：换“ $\times 100$ ”挡呢？
- 想：同一电阻，示数变为 $\frac{150}{100} = 1.5$ ——但指针贴近左端稀疏区，读数误差大。

- 问：换挡后第一步？
- 想：**重新欧姆调零**！每换一档都要短接调零。而且 $150\ \Omega$ 用 $\times 100$ 挡指针太靠左，应选回 $\times 10$ 挡。

详细答案：解： $R = 15 \times 10 = 150\ \Omega$ 。改用 $\times 100$ 挡示数变 1.5，但指针偏转太小、读数误差大，应选回 $\times 10$ 挡；换挡后第一步是重新欧姆调零。答：被测电阻 $150\ \Omega$ ； $\times 100$ 挡示数 1.5；换挡先调零。

变式提醒：欧姆表测电阻必须断开电源、让被测电阻脱离电路（表内有电池）；红表笔接表内电池负极、黑表笔接正极（电流从黑笔流出）；倍率越大中值电阻越大。

练一练

- 电池旧了灯泡为什么变暗？（用内阻解释）
- 外电阻增大时，路端电压怎么变？为什么？
- 闭合电路欧姆定律 $I = E/(R + r)$ 中，短路电流多大？为什么不能长时间短路？
- 多用电表欧姆挡换挡后第一步做什么？为什么？

参考答案：1. 电池用久了内阻 r 增大，路端电压 $U = E - Ir$ 减小，灯泡变暗。2. 增大——外阻增大 $\rightarrow$ 电流减小 $\rightarrow$ 内压降减小 $\rightarrow$ 路端电压增大（反直觉但要信公式）。3. 短路电流 $I = E/r$ （很大），内阻发热 $I^2 r$ 巨大，会烧坏电源。4. 重新欧姆调零（换挡后表内电路变化，必须重新短接调零）。

本章注释

〔注 1〕电池的进化史就是一部“便携能源史”：1800 年伏打电堆（第一个电池） $\rightarrow$ 1836 年丹尼尔电池（第一个实用电池，给铁路电报供电） $\rightarrow$ 1866 年勒克朗谢锌碳电池（干电池的鼻祖） $\rightarrow$ 1991 年索尼商业化锂离子电池。2019 年诺贝尔化学奖颁给锂离子电池三巨头：古迪纳夫、惠廷厄姆、吉野彰——其中古迪纳夫获奖时 97 岁，是诺奖史上最年长得主。他 57 岁才转行研究电池（此前研究磁学），却在古稀之年发明了让手机、电动车普及的钴酸锂/磷酸铁锂正极材料。古迪纳夫说：“不要因为年纪大就不去做新东西。”——你手机里那块电池，是一位 97 岁老人的坚持。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
电源	电动势 + 内阻	画成 E 串 r
闭合回路	闭合电路欧姆定律	$I = E/(R + r)$
路端电压	内压降吃掉电压	$U = E - Ir$
动态电路	三步法	总电阻 → 总电流 → 路端电压
电池旧了/灯泡变暗	内阻变大	$U = E - Ir$, 内阻吃掉更多
测 E、r 实验	U-I 图像	纵截距 = E, 斜率 = -r
欧姆表	四步走	选挡 → 调零 → 读数 → OFF

你该记住的流程：读闭合电路题 → (1) 画等效电路（把电源画成 E+r）→ (2) 总电阻 → (3) 总电流 → (4) 路端电压 → (5) 逐支路；实验题：U-I 图截距斜率；多用电表：四步口诀。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 如图所示的闭合电路中，当滑动变阻器的滑片向右移动（阻值增大）时，下列说法正确的是？

A. 电流表读数增大 B. 电压表读数减小 C. 路端电压增大 D. 电源内部消耗功率增大

答案 C。解析：滑片右移 → 外电阻 R 增大 → 总电流 $I = \frac{E}{R+r}$ 减小（A 错）→ 路端电压 $U = E - Ir$ 增大（C 对）→ 内电压 Ir 减小、内耗 I^2r 减小（D 错）→ 电压表（测路端电压）读数增大（B 错）。动态电路“程序法”：**局部电阻变 → 总电阻变 → 总电流变 → 路端电压变 → 分压分流变**；判断读数变化用“先看总、再看路端、最后看支路”。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 电动势的物理意义？单位？与非静电力做功的关系？
- 闭合电路欧姆定律的表达式？
- 路端电压与外电阻的关系？
- 短路时路端电压多大？断路时呢？
- 电源的 U-I 图像中，纵轴截距和斜率各代表什么？
- 内电路电压与外电路电压之和等于什么？

提升

- 电源 $E = 6\text{ V}$ 、 $r = 1\ \Omega$ ，外接 $R = 5\ \Omega$ ，电流和路端电压多大？
- 外电路短路（ $R = 0$ ），短路电流多大（上题数据）？
- 外电阻增大，路端电压如何变化？为什么？

探究

- 用伏安法测一节干电池的电动势和内阻——写出实验方案与数据处理方法。

参考答案：1. 电源把其他能转化为电能的本领，等于非静电力做功与电荷量的比值，单位 V。
2. $I = E/(R + r)$ 。3. 外电阻增大，路端电压增大 ($U = E - Ir$, I 减小则 U 增大)。4. 短路 $U = 0$ ；断路 $U = E$ 。5. 纵轴截距 = 电动势 E；斜率绝对值 = 内阻 r。6. 等于电动势 (U)。7. $I = 6/6 = 1\text{ A}$, $U = IR = 5\text{ V}$ 。8. $I = E/r = 6/1 = 6\text{ A}$ 。9. 增大——外电阻增大使干路电流减小，内电压 Ir 减小，路端电压 $U = E - Ir$ 增大。10. 用电流表、电压表、滑动变阻器组成电路，改变 R 测多组 U、I；作 U-I 图像，纵截距为 E、斜率的绝对值为 r；或用 $U = E - Ir$ 联立多组数据求平均。

第八章 电功率与焦耳定律

同一个 220 V 插座，为什么电饭锅几分钟煮好饭、手机充电器却要充几小时？差别不在电压，在“功率”——能量流得快慢。

电不只是能“搬运电荷”，更能“搬运能量”——电功率就是电能的流速。这一章用物理一的能量语言分析电路：电流做功、电功率、焦耳定律，以及纯电阻与非纯电阻（电动机）的区别。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 区分电功、电功率、热功率；(2) 掌握焦耳定律；(3) 会分析纯电阻与非纯电阻电路。

8.1 电功与电功率

电流做功（电能转化为其他形式能）： $W = UIt$ 。**电功率**： $P = UI$ 。对纯电阻（电能全转化为内能）， $P = I^2 R = \frac{U^2}{R}$ 。

算功率有个铁规矩：**U 和 I 必须是同一个元件的**——“别拿苹果比橘子”。算整个电路，用电源电压 × 电源输出的总电流；算某个灯泡，用灯泡两端的电压降 × 流过灯泡的电流。60 W 灯泡每秒把 60 J 电能变成光和热，这 60 W 对应的是灯泡自身的电压和电流，不是电源的全部功率。混用得到的数字毫无物理意义——8.2 的电动机题就是“对应性”的实战。

功率这个数，你天天在手机上看到：充电器上印的“120 W”、电动车仪表盘上显示“电机最大功率 200 kW”、电饭锅铭牌“800 W”——同样接 220 V，功率差这么多，是因为它们“吃”的电流差这么多。功率越大，能量流得越快，活儿干得越快。

8.2 焦耳定律与非纯电阻

焦耳定律（电流热效应）： $Q = I^2 R t$ ——电流产生的热量与电流平方成正比。电热水壶、电热毯、电吹风，全是靠 $I^2 R$ 发热干活的。这条定律是 1841 年一个 23 岁的啤酒厂老板发现的——对，就是物理一第 8 章那位用 40 年证明“热与功等价”的焦耳，他的啤酒厂实验室里还有一套专门测电流发热的装置。〔注 1〕

非纯电阻电路（如电动机）：电能 = 机械能 + 内能，即：

$$UI = P_{\text{机}} + I^2 R$$

此时 $UI \neq I^2 R$ ，**不能用 U^2/R 算功率**（U 不是纯电阻上的电压）——这是最常错的点。

你开的电动车，电机就是一个巨大的“非纯电阻”：输入功率几百千瓦，只有很小一部分变成线圈发热，绝大部分变成车轮的机械能——电动车的电机效率能到 90% 以上，比内燃机（约 40%）高出一大截，原因就在这里：内燃机要先把化学能变成热再变机械能，绕远路；电机直接“电 → 磁 → 机械”，不经过发热这条弯路。

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。

想一想：

- 问：输入功率怎么算？
- 想： $P = UI = 220 \times 5 = 1100 \text{ W}$ ——输入功率永远是 UI 。
- 问：热功率呢？用哪个公式？
- 想：线圈发热用 $P_{\text{热}} = I^2 R = 25 \times 4 = 100 \text{ W}$ （热功率永远用 $I^2 R$ ）。
- 问：机械功率呢？ U^2/R 对吗？
- 想： $P_{\text{机}} = P - P_{\text{热}} = 1100 - 100 = 1000 \text{ W}$ 。 $U^2/R = 220^2/4 = 12100 \text{ W}$ 是**错的**——U 不全是线圈上的电压（220 V 里大部分转化为机械能了）。

详细答案：解：输入功率 $P = UI = 220 \times 5 = 1100 \text{ W}$ ；热功率 $P_{\text{热}} = I^2 R = 5^2 \times 4 = 100 \text{ W}$ ；机械功率 $P_{\text{机}} = P - P_{\text{热}} = 1000 \text{ W}$ 。答：输入 1100 W、热 100 W、机械 1000 W。

变式提醒：电动机卡住不转时， $P_{\text{机}} = 0$ ， $UI = I^2 R$ ， $I = U/R$ 会很大——电机烧毁就是因为卡住时电流暴增；非纯电阻题记住“输入用 UI 、发热用 $I^2 R$ 、机械用减法”。

8.3 最大功率：滑动变阻器怎么取？

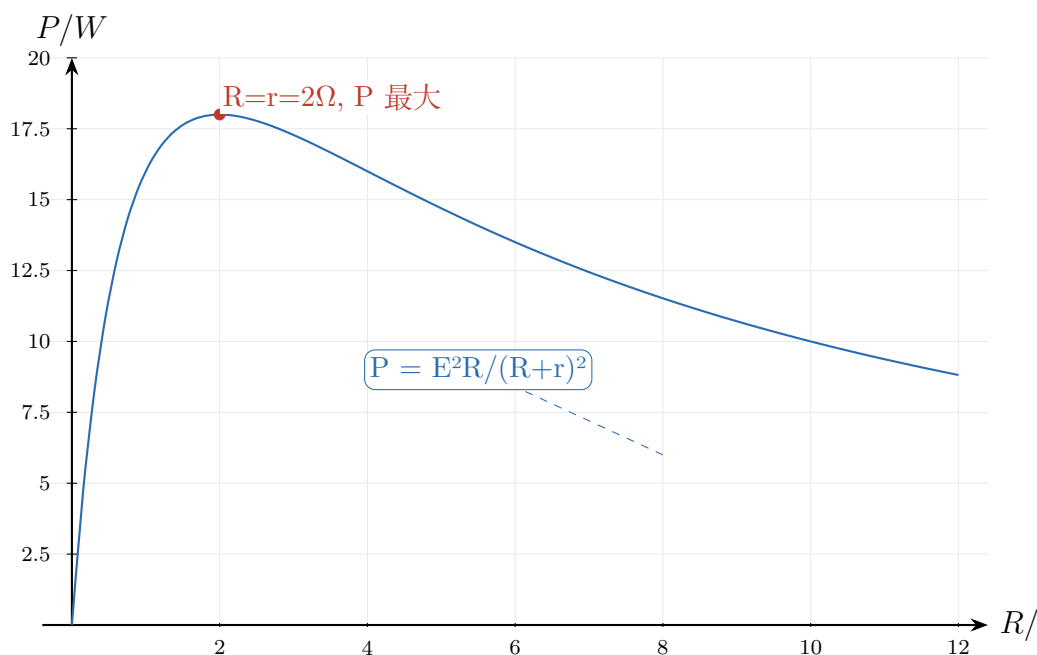


图 8.1: 输出功率随外电阻变化： $R = r$ 时最大

“给你一个滑动变阻器，问调到多大功率最大”——这是闭合电路题最经典的问法。先想直觉：电阻调太小，电流是大，但“摊”在外电阻上的电压少；调太大，外电阻是大，但电流又小了——这中间一定藏着一个最佳值。电源（ E 、 r ）接外电阻 R ，输出功率：

$$P = I^2 R = \frac{E^2 R}{(R + r)^2}$$

P 随 R 变化的图像是一条先升后降的曲线（ $R \rightarrow 0$ 或 $R \rightarrow \infty$ 时 $P \rightarrow 0$ ），峰值在 $R = r$ ：

$$P_{max} = \frac{E^2}{4r}$$

两个必背结论：(1) 外电阻等于电源内阻时，电源输出功率最大；(2) 对同一个 P （小于最大值），有两个 R 满足—— $R_1 R_2 = r^2$ 。

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？

想一想：

- 问：电源输出功率最大的条件？
- 想： $R = r$ ——外电阻等于内阻时最大。

- 问：最大功率多少？
- 想： $P_{max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{144}{8} = 18 \text{ W}$ 。
- 问：为什么 $R = r$ ？直观理解？
- 想： R 太小时电流大但外电阻小， R 太大时外电阻大但电流小——两者权衡取中间，正好 $R = r$ 时“匹配”最好。

详细答案：解： $R = r = 2 \Omega$ 时输出功率最大： $P_{max} = \frac{E^2}{4r} = \frac{12^2}{4 \times 2} = 18 \text{ W}$ 。答： R 调到 2Ω ，最大输出功率 18 W 。

变式提醒：若外电路是定值电阻 R_0 与变阻器 R 串联，问 R 上的功率最大——把 R_0 和 r 一起看作“等效内阻”： $R = R_0 + r$ 时 R 上功率最大（等效内阻法：问谁最大功率，就把“别人”都并进电源）。

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？

想一想：

- 问：现在问 R 上功率最大，谁是“等效内阻”？
- 想：把 R_0 和电源内阻 r 一起看作等效内阻： $r_{\text{等效}} = R_0 + r = 10 \Omega$ 。
- 问： R 调到多少？
- 想： $R = r_{\text{等效}} = 10 \Omega$ 时 R 上功率最大。
- 问：最大功率多大？
- 想： $P_{R,max} = \frac{E^2}{4(R_0+r)} = \frac{144}{40} = 3.6 \text{ W}$ 。

详细答案：解：把 R_0 与 r 看作等效内阻 $r_{\text{等效}} = 8 + 2 = 10 \Omega$ ； $R = 10 \Omega$ 时 $P_{R,max} = \frac{E^2}{4(R_0+r)} = \frac{144}{40} = 3.6 \text{ W}$ 。答： R 调到 10Ω ， R 上最大功率 3.6 W 。

变式提醒：等效内阻法是“滑动变阻器取最值”压轴小题的总套路：问谁最大功率，就把“别人”都并进电源。

动手试试（材料：两节电池、两个相同的小灯泡、导线）

先猜：两个灯泡串联和一个灯泡单独接，哪个亮？并联呢？

动手：(1) 一个灯泡接一节电池，看亮度；(2) 两个灯泡串联接同一节电池；(3) 两个灯泡并联接同一节电池。

观察：串联的两个灯泡明显变暗（每个只分到一半电压）；并联的两个和单独接一样亮。

思考：串联分压、并联分压均等——灯泡的亮度由它“自己分到的电压 × 电流”（功率）决定。功率守恒：输入功率 = 各部分功率之和。

练一练

- 电功率 $P = UI$ 中， U 、 I 必须是同一元件的吗？为什么？
- 电动机正常工作时， UI 与 I^2R 谁大？为什么？
- 电源输出功率最大的条件是什么？最大功率公式？
- 两个 220 V、60 W 灯泡串联接 220 V，总功率多少？（提示：每个分到 110 V）

参考答案：1. 必须是同一元件——“别拿苹果比橘子”，混用毫无物理意义。2. $UI > I^2R$ —— UI 是输入功率（含机械能）， I^2R 只是热功率。3. 外电阻 = 内阻（ $R = r$ ）时最大， $P_{max} = E^2/4r$ 。4. 每个灯泡 110 V 时功率降为原来的 1/4（ $P \propto U^2$ ），总功率 = 15 + 15 = 30 W（原来 120 W 的四分之一）。

8.4 能源与可持续发展

夏天教室里的空调轰隆隆往外吹热风——它把屋里的热“搬”到了外面，可耗的电一点没少；电动车比油车省钱，因为电动机把电能变机械能的效率超过 90%，而内燃机只有四成上下。电从哪来、用多少、用完了怎么办？这一小节把“能量”这本账从元件层面抬到国家层面。

能源分类：按来源分，**一次能源**（直接从自然界取来就能用：煤、石油、天然气、水能、风能、太阳能、核能）与**二次能源**（由一次能源加工转化而来：电能）；按能否再生分，**可再生能源**（水、风、太阳）与**不可再生能源**（煤、石油、天然气、核燃料——用一点少一点）。

能量守恒 ≠ 能源取之不尽：第 7 章说能量不会凭空消失，那为什么还要“节约用电”？因为能量转化有**方向性**（热力学第二定律的通俗版）：机械能可以全部变成内能（刹车、摩擦生热），内能却不能自发全部变回机械能。不可再生能源烧掉一吨少一吨，而且转化中总有**能量耗散**（变成低品位热散失掉）——账没丢，但“好用的”那部分越来越少了。化石燃料燃烧还排放 CO_2 、 SO_2 ，带来温室效应与酸雨。

对策：提高能效（电动车电机效率 90%+ 对内燃机约 40%，同样的电跑得更远）、发展可再生能源（风、光、水、核）、节约用电（随手关灯不是小气，是不可再生能源在减少）。**考点提示：**能源分类（一次/二次、可再生/不可再生）、能量守恒与能量耗散的区别——前者说“总量不变”，后者说“能用的少了”，两个命题都对，别混。

练一练

- 电能是一次能源还是二次能源？太阳能呢？
- 能量守恒定律说能量不会消失，为什么还要节约能源？二者矛盾吗？

参考答案：1. 电是二次能源（由煤/水/风/核等转化而来）；太阳能是一次能源。2. 不矛盾——能量总量守恒，但转化有方向性、有耗散，不可再生能源用一点少一点，可用的“高品质”能量在减少，所以要节约。

本章注释

〔注 1〕焦耳定律的发现者焦耳（James Joule，1818–1889）是英国啤酒厂老板，科学史上有名的“业余科学家”。1841 年他 23 岁时用电流通过电阻丝加热水的实验，得出 $Q = I^2 R t$ （焦耳定律）；1843 年他测出热功当量，此后 40 年用 400 多次实验反复验证“做功与热量可以互相换算”。他的实验装置五花八门：搅拌水的叶轮、压气缸、通电线圈——实验室就是自家啤酒厂。物理一第 8 章提过，他和迈尔、亥姆霍兹一起确立了能量守恒定律。一个“业余的”啤酒厂老板，用 40 年做了一件专业科学家没做完的事——科学不问出身，只问坚持。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
电功/电功率	能量流速	$W = UIt$ 、 $P = UI$
纯电阻	三个公式通用	$P = UI = I^2 R = U^2 / R$
非纯电阻（电机）	能量分流	$UI = P_{\text{机}} + I^2 R$ ，发热用 $I^2 R$
焦耳定律	电流热效应	$Q = I^2 R t$ ，与电流平方成正比
电源最大输出功率	$R = r$	$P_{\text{max}} = E^2 / 4r$
等效内阻法	问谁最大	把“别人”并进电源

你该记住的流程：读功率题 → (1) 判纯电阻还是非纯电阻（电动机/电解槽 = 非纯）→ (2) 纯电阻三公式通用；非纯电阻“输入 UI 、发热 $I^2 R$ 、机械相减” → (3) 最大功率： $R = r$ （或等效内阻）→ (4) 算某元件功率， U 、 I 必须对应同一元件 → (5) 验算：功率守恒（输入 = 各项之和）。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 一台电风扇，额定电压 220 V、额定电流 0.5 A、线圈电阻 20 Ω。正常工作时，下列说法正确的是？

- A. 电风扇消耗的电功率为 5 W
- B. 线圈发热功率为 50 W
- C. 电风扇输出的机械功率为 100 W
- D. 电风扇的总功率 110 W、热功率 5 W、机械功率 105 W

答案 D。解析：总功率 $P = UI = 220 \times 0.5 = 110 \text{ W}$ ；热功率 $P_{\text{热}} = I^2 R = 0.5^2 \times 20 = 5 \text{ W}$ ；机械功率 $P_{\text{机}} = P - P_{\text{热}} = 105 \text{ W}$ 。A 错（5 W 是热功率不是总功率）、B 对一半（热功率确实是 5 W，但题目问“正确的是”要选最完整表述）、C 错（105 W 不是 100 W）、D 对。**非纯电阻电路（电动机/风扇）：** $UI \neq I^2 R$ ，**总功率** $UI = \text{热功率 } I^2 R + \text{机械功率}$ ；算发热只能用 $I^2 R$ ，用 U^2 / R 就错了。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 电功的公式？单位？

- 电功率的公式？常用单位千瓦时的换算？
- 焦耳定律的表达式？
- 纯电阻电路中，电功与电热的关系？
- 非纯电阻电路中，电功与电热的关系？（电动机）
- 额定功率与实际功率的区别？

提升

- 电饭锅 220 V、1100 W，正常工作电流多大？电阻多大？
- 电动机额定电压 12 V、电流 2 A、内阻 $1\ \Omega$ ，输入功率、热功率、输出机械功率各多大？
- 1 度电（1 kWh）能让 100 W 灯泡亮多久？

探究

- 用电流表和电压表测量小灯泡在不同电压下的实际功率，画出 P-U 图。

参考答案：1. $W = UIt$ ；焦耳（J）。2. $P = UI$ ；1 kWh = 3.6×10^6 J。3. $Q = I^2 R t$ 。4. 相等——电功全部转化为电热（ $W = Q$ ）。5. 电功 > 电热——部分电能转化为机械能（ $W = Q + E$ ）。6. 额定功率是铭牌标注的正常工作功率；实际功率由实际电压决定，可大于或小于额定。7. $I = P/U = 1100/220 = 5\text{ A}$ ， $R = U/I = 44\ \Omega$ 。8. 输入功率 $P_{\lambda} = UI = 12 \times 2 = 24\text{ W}$ ；热功率 $P_{\text{热}} = I^2 R = 2^2 \times 1 = 4\text{ W}$ ；输出机械功率 $P_{\text{机}} = P_{\lambda} - P_{\text{热}} = 20\text{ W}$ 。9. $t = W/P = 1000/100 = 10\text{ h}$ 。10. 小灯泡与滑动变阻器串联，改变电压读 U、I 算 $P = UI$ ，作 P-U 图——功率随电压增大而增大（非线性，因灯丝电阻随温度变）。

第九章 磁场与磁感应强度

指南针为什么总是指北？这个问题人类问了两千年。直到 19 世纪人们才明白：磁不是玄学，它是“运动的电荷”在幕后指挥。

电讲完了，轮到磁。磁现象比电更古老（指南针两千年前就有），但“磁的本质是运动的电荷”这个认识直到 19 世纪才确立——奥斯特发现电流能产生磁场，从此电和磁成了一家人。这一章认识磁场本身：磁感线、电流的磁场（右手螺旋定则），以及磁感应强度（磁场版的“场强”）。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解磁场概念，会用磁感线描述磁场；(2) 掌握磁感应强度的定义与方向；(3) 了解常见磁体的磁场分布（条形/蹄形/地磁场）。

9.1 磁现象与磁感线

磁场看不见、摸不着，怎么描述它？——和电场一样，用**磁感线**。磁感线从 N 极出发回到 S 极（磁体外部）。但等一下，它和电场线有个关键不同：磁感线是**闭合曲线**！为什么闭合？因为磁感线在磁体内部从 S 到 N 继续，首尾相接——电场有孤立的“电荷”当起点终点，磁场却找不到孤立的“磁荷”。（物理学家不是没找过“磁单极子”——1931 年狄拉克从理论上预言了它，物理学家找了快一百年，至今没找到。）

一次课堂演示引发的革命：1820 年 4 月 21 日，丹麦物理学家奥斯特在课堂上做演示实验，当他把通电导线放到指南针旁边时，磁针偏转了！这个“意外”让物理界明白——**电流能产生磁，电和磁是一家**。〔注 1〕磁不是抽象概念，它藏在你的冰箱（电动机）、汽车（启动马达）、电梯、门铃里；发电站靠它发电，医院用 MRI 磁共振成像扫描人体，高速磁悬浮列车靠它悬在空中。

你坐过磁悬浮吗？上海磁浮线列车悬在轨道上方约 1 厘米，以 400 km/h 飞驰——没有车轮摩擦，靠的就是车底电磁铁与轨道之间的**吸引力**把车体吸住、悬起来（常导电磁悬浮，吸引力型）。而医院里做核磁共振时，那个把你推进去的“大圆筒”里，是一块强到能吸起汽车的超导磁体。磁场不是课本概念，它托得起列车、照得见身体。

先别急着记结论，想一个反直觉的问题：指南针的 N 极指向北方，可“异名相吸”——N 极该被 S 极吸引啊？矛盾吗？不矛盾：**地理北极附近恰好是地磁南极**，N 极被它吸引，所以指向北方。N 指 S，说的就是这个。

9.2 电流的磁场：右手螺旋定则（安培定则）

电流产生的磁场，方向怎么判断？总不能每次摆个指南针。奥斯特实验告诉我们电流产生磁场，方向判断用**右手螺旋定则**（安培定则）：

- **通电直导线**：右手握住导线，四指弯曲方向为磁场环绕方向（拇指指电流）；
- **通电螺线管**：右手四指绕电流方向，拇指指 N 极（拇指即磁场方向）。

记忆锚“左力右电”第一部分：凡是“电生磁”（电流产生磁场），用右手。

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？

想一想：

- 问：电流产生磁场，用什么定则？
- 想：右手螺旋定则（安培定则）——电生磁用右手。
- 问：怎么比划？
- 想：右手握住导线，拇指指向上（电流方向），四指弯曲环绕——磁场绕导线一圈。
- 问：导线右侧的磁场方向？
- 想：在导线右侧，四指弯曲方向指向纸面内（向里）——所以右侧磁场垂直纸面向里。

详细答案：答：用右手螺旋定则，拇指指电流方向（向上），四指弯曲——导线右侧四指指向纸面内，磁场方向垂直纸面向里。

变式提醒：左侧磁场则垂直纸面向外（环绕方向相反）；若电流向下，所有方向反向。“电生磁用右手”是三条定则的第一条，后面两条（右手定则、左手定则）别搞混。

9.3 磁感应强度：磁场版的“场强”

磁场有多“强”，怎么定量？——又是比值定义三连击：放入磁场中的通电导线（垂直于磁场方向），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。这个比值就叫**磁感应强度 B** ，单位特斯拉（T）。

B 是矢量，方向即该点磁场方向（N 极受力方向）。匀强磁场（磁感线平行等距）中 B 处处相同。你手机里的“指南针”功能、汽车里的电子罗盘，靠的都是芯片里一个小小的**霍尔传感器**——它利用通电半导体在磁场中产生电压差来测磁场方向，地球磁场虽弱（约 5×10^{-5} T），它照样读得出来。

动手试试（材料：一块磁铁、一串回形针）

先猜：把回形针一颗颗吸到磁铁上，能串起多长一串？回形针之间也会“互相吸”吗？

动手：磁铁吸住第一颗回形针，再让第二颗回形针吸在第一颗下面，继续往下接。

观察：能串起长长一串！每颗回形针都被磁化了，变成“小磁铁”。

思考：磁铁让回形针磁化，磁化后的回形针又能磁化下一颗——磁场像链条一样传下去。磁感线从 N 极出发回到 S 极，这串回形针就是磁感线的“实物版”。磁场看不见，但它让铁“排了队”。

练一练

- 磁感线与电场线的相同与不同（闭合性）？
- 右手螺旋定则判断：电流向下，导线左侧磁场方向？
- 通电导线与磁场方向平行时受不受力？（提示： $F = BIL \sin \theta$ ）
- 指南针 N 极为什么指向地理北极？

参考答案：1. 相同：都描述场的强弱方向（密 = 强、切线 = 方向）；不同：磁感线闭合（内外衔接）、电场线不闭合（正电荷出发负电荷终止）。2. 用**右手螺旋定则**：右手拇指指向电流方向（向下），四指弯曲方向即磁场环绕方向，据此比划判断导线左侧磁场方向。注意：换用右手后方向与“用左手”推出的结论相反——以右手比划结果为准（电生磁用右手，磁生电/力用左手）。3. 不受力—— $F = BIL \sin \theta$ ， $\theta = 0$ 时 $F = 0$ （平行无安培力）。4. 地理北极附近是地磁南极，异名相吸，N 极被地磁南极吸引指向北方。

想一想（概念边界）：磁感线和电场线都描述“场”，但磁感线是闭合的、电场线不闭合——为什么有这一条根本区别？

提示：因为自然界找不到孤立的“磁荷”（单极子）：磁场线只能从 N 极出发绕回 S 极、在内部继续走，首尾相接；而电荷有正有负、可以孤立存在，电场线就能从正电荷出发终止于负电荷。

本章注释

〔注 1〕奥斯特实验是 1820 年 4 月 21 日在哥本哈根大学做的——注意，不是传说中“课后收拾器材时偶然发现”：奥斯特早在 1813 年就怀疑电与磁有关，当天他是有意把磁针放在通电导线旁做演示的。但当时在场的听众几乎没人意识到这个“磁针偏转”的份量——磁针动了一下，仅此而已。然而消息传开后，欧洲物理界炸了锅：三个星期内，安培就提出电流间相互作用的定量理论并发明了安培定则；几个月后，法拉第开始转向电磁研究。一个课堂演示，点燃了电磁学的整个世纪。今天，“奥斯特”是磁场强度单位 CGS 制的名字——他站在电磁学大门的门口，第一个推开了它。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
磁感线	闭合曲线	外部 N→S, 内部 S→N
指南针指北	地磁南极点	地理北极 ≈ 地磁南极
电流产生磁场	右手螺旋	直导线握导线、螺线管四指绕电流
磁感应强度	比值定义	$B = F/IL$, 与 I、L 无关
通电导线平行磁场	不受力	$F = BIL \sin \theta$

你该记住的流程：读磁场题 → (1) 判是谁产生的场（磁铁/电流）→ (2) 电流的场用右手螺旋定则判方向 → (3) 场强弱看磁感线密度或 B 值 → (4) 导线受力看夹角（垂直最大、平行为零）。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 关于磁感应强度 $B = \frac{F}{IL}$ ，下列说法正确的是？

- A. B 与 F 成正比、与 IL 成反比
- B. B 的方向就是电流所受安培力的方向
- C. 通电导线在某处不受安培力，该处磁感应强度一定为零
- D. B 是描述磁场强弱的物理量，由磁场本身决定

答案 D。解析：A 错——B 是磁场自身的性质，由磁场（电流）决定，与试探的 F、IL 无关（定义式不是决定式）；B 错——B 的方向垂直于安培力方向（F 垂直 B 与 I 所在平面）；C 错——导线平行于磁场放置时 $F = BIL \sin 0^\circ = 0$ ，但 B 不为零；D 对。**场强类定义式**（ $E = F/q$ 、 $B = F/IL$ 、 $C = Q/U$ ）都是“比值定义”：大小由场本身决定——这是所有“比值定义量”的统一考点。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 磁场的基本性质是什么？
- 磁感应强度的定义式？单位？方向如何规定？
- 磁感线的特点（至少 3 条）？
- 条形磁铁外部磁感线方向？内部呢？
- 匀强磁场的磁感线特点？
- 地磁场的北极在地理南极附近还是北极附近？

提升

- 通电直导线长 0.2 m，电流 5 A，垂直磁场放置，受安培力 1 N，磁感应强度多大？
- 两根平行导线同向电流，相互吸引还是排斥？为什么？
- 磁感应强度 B 由什么决定？与电流、导线长度有关吗？

探究

- 用铁屑演示条形磁铁/蹄形磁铁的磁场分布，说明磁感线的疏密。

参考答案：1. 对放入其中的磁体（电流）产生力的作用。2. $B = F/IL$ ；特斯拉（T）；小磁针 N 极受力方向。3. (1) 闭合曲线（外部 N→S、内部 S→N）；(2) 疏密表示强弱；(3) 不相交；(4) 磁感线是假想的。4. 外部从 N 极到 S 极；内部从 S 极到 N 极（闭合）。5. 平行等距直线（大小方向处处相同）。6. 地理南极附近（地磁北极在地理南极附近）。7. $B = F/IL = 1/(5 \times 0.2) = 1 \text{ T}$ 。8. 相互吸引——同向电流的磁场使彼此受力相吸（安培定则 + 左手定则可判）。9. 由磁场本身（场源）决定，与放入的电流、导线无关—— $B = F/IL$ 是定义式不是决定式。10. 玻璃板下撒铁屑，放上条形/蹄形磁铁轻敲——铁屑沿磁感线排列，两极附近最密（磁场最强）；磁感线越密磁场越强。

第十章 安培力

电动机为什么一转起来就能带着冰箱、电梯、电动汽车跑？秘密在磁场里——通电导线放进磁场会“挨推”，这个力就是安培力。

磁场认识完毕，现在让“场”开始做工——通电导线在磁场中要受力，这就是**安培力**。它是三大力的第二位（作用对象：通电导线）。这一章学会安培力的大小与方向（左手定则），并第一次看到“力×运动学”的电磁学版本（为第14章滑轨模型埋伏笔）。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 掌握安培力公式与左手定则；(2) 理解安培力是洛伦兹力的宏观表现；(3) 会分析安培力作用下的平衡与运动。

10.1 安培力的大小与方向

通电导线放进磁场里会怎样？——它会受力！这个力叫**安培力**。大小怎么算？通电导线（电流 I 、长度 L ）在磁场 B 中：

$$F = BIL \sin \theta$$

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

那方向呢？磁场方向、电流方向、受力方向，三者的关系怎么记？——**左手定则**：伸开左手，让磁感线穿入手心（手心对着 N 极方向），四指指向电流方向，拇指所指的方向就是安培力方向。口诀“**力用左手，电生磁用右手**”——把第9章的右手螺旋和这里的左手定则分清：电生磁（电流产生磁场）用右手，磁场推导线（安培力）用左手。

安培力就在你的耳朵里。你戴的耳机、家里的音箱，里面都有一块永磁铁和一个线圈——音频电流流过线圈，线圈在磁场里被安培力推着前后振动，带动振膜推空气，声音就出来了。你听歌的每一秒，都是安培力在“推”你的耳膜。电动牙刷、电动剃须刀、无人机螺旋桨、电动汽车的驱动电机，全是“安培力把电能变成转动”的工厂。〔注2〕

例题 10.1

长 $L = 0.2 \text{ m}$ 的导线通 $I = 5 \text{ A}$ ，放在 $B = 0.4 \text{ T}$ 的匀强磁场中。导线与磁场垂直，求安培力；若导线与磁场成 30° ，安培力多大？

想一想：

- 问：垂直时安培力多大？
- 想： $F = BIL = 0.4 \times 5 \times 0.2 = 0.4 \text{ N}$ 。
- 问：成 30° 呢？用哪个公式？
- 想： $F = BIL \sin \theta = 0.4 \times 5 \times 0.2 \times \sin 30^\circ = 0.2 \text{ N}$ ——垂直时最大，夹角越小力越小。

详细答案：解：垂直时 $F = BIL = 0.4 \times 5 \times 0.2 = 0.4 \text{ N}$ ；成 30° 时 $F = BIL \sin 30^\circ = 0.4 \times 5 \times 0.2 \times 0.5 = 0.2 \text{ N}$ 。答：垂直时 0.4 N ，成 30° 时 0.2 N 。

变式提醒： $F = BIL \sin \theta$ 中 θ 是 B 与 I 的夹角；“垂直最大、平行为零”是判断题常客；左手定则判方向时，磁感线穿手心、四指指电流、拇指指安培力。

10.2 平行导线间的相互作用

两根平行导线，通同向电流时相互吸引，反向电流相互排斥。怎么判断？两步走：先用右手螺旋定则判断一根导线在另一根处产生的磁场方向，再用左手定则判断安培力方向。你家里电线杂乱地缠在一起却很少“打架”——因为一般电流方向不同（回路），大多是排斥力在起作用。

10.3 安培力与平衡：综合应用

安培力 + 力学：通电导体棒在斜面上、在导轨上，受力分析照旧（重力、弹力、摩擦力、安培力），只是多了一个新力。核心还是物理一的本事：**受力分析** → **正交分解** → **列平衡方程** 或 **牛顿第二定律**。

例题 10.2

光滑斜面上放一根通电直导线（电流 I 、长度 L ），斜面倾角 θ ，磁感应强度 B 竖直向上。求导线静止时电流方向与大小。

想一想：

- 问：导线受哪些力？
- 想：重力 mg （竖直向下）、支持力 N （垂直斜面向上）、安培力 F （方向由左手定则）。
- 问： B 竖直向上，电流水平——安培力方向？
- 想：左手定则： B 竖直向上（穿手心向上），四指指电流方向，拇指指安培力方向——若电流垂直于纸面向里，安培力水平向右。

- 问：静止平衡，怎么列方程？
- 想：沿斜面： $F \cos \theta = mg \sin \theta$ （重力沿斜面分量与安培力沿斜面分量平衡）；垂直斜面： $N = mg \cos \theta + F \sin \theta$ 。由 $BIL \cos \theta = mg \sin \theta$ 得 $I = \frac{mg \tan \theta}{BL}$ 。

详细答案：解：受力分析后沿斜面列平衡： $BIL \cos \theta = mg \sin \theta \Rightarrow I = \frac{mg \tan \theta}{BL}$ 。答：电流大小 $I = \frac{mg \tan \theta}{BL}$ ，方向垂直于纸面向里（由左手定则配合平衡条件确定）。

变式提醒：若 B 沿斜面向上，安培力垂直斜面，方程变成 $BIL = mg \sin \theta$ （更简单）；“斜面 + 安培力”题的关键是先画清楚安培力方向（左手定则），再正交分解。

动手试试（材料：一节电池、一段铜线、一块磁铁）

先猜：把导线通电放进磁场里，导线会动吗？往哪动？

动手：把导线两端分别接到电池两极（形成回路），把中间一段放进磁铁的磁场里（注意别短路太久，导线会热）。

观察：导线动了！放进磁场通电的导线真的会“挨推”。

思考：这就是安培力——通电导线在磁场中受力 $F=BIL$ 。电动机就是把这个“推力”持续变成转动：电流一通电，线圈在磁场里转起来。你刚做的，就是世界上最小的电动机雏形。

练一练

- 安培力方向、电流方向、磁场方向三者什么关系？两两垂直吗？
- 通电导线与磁场平行时安培力多大？为什么？
- 两平行导线同向电流为什么相吸？用定则分析。
- 电动机为什么能转动？安培力在其中的作用？

参考答案：1. 安培力垂直于 B 和 I 决定的平面；B 与 I 不要求垂直（ $F = BIL \sin \theta$ ），但 F 一定同时垂直 B、I。2. 零—— $\sin \theta = 0$ ，平行无安培力。3. 左导线在右导线处产生垂直纸面向里的磁场，右导线受左手定则指向左导线的安培力（对称地，左导线也受力），同向相吸。4. 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。

想一想（概念边界）：通电导线与磁场方向平行时，安培力是多大？如果不知道夹角，能直接用 $F=BIL$ 吗？

提示：平行时 $F=0$ ——安培力 $F=BIL \sin \theta$ ， $\sin \theta=0$ 。不知道夹角不能直接用 $F=BIL$ （那是垂直时最大值的公式）。先判夹角，再用带 $\sin \theta$ 的完整式。

本章注释

〔注 1〕安培（André-Marie Ampère, 1775–1836）是电磁学的“闪电战”高手：1820 年 9 月，他听说奥斯特发现电流使磁针偏转，激动得一周内就建立了完整的“电动力学”——包括电流间相互作用力的定量规律（安培力公式）、安培定则、以及一个超前百年的假说：一切

磁现象都源于分子电流（每个分子内部都有一个环形电流，宏观磁性是这些分子电流排列的结果）。这个假说当时没有实验支持，被同行嘲笑——直到 100 多年后电子论建立，人们才发现安培说对了：磁的本质就是运动的电荷。电流的单位“安培”以他命名，他的雕像立在巴黎，手里拿着那根他为之痴迷的导线。他的人生并不顺遂：父亲死于法国大革命，妻子早逝，但他在丧妻后的几个月里完成了电动力学的主要工作——科学是他的避难所。

〔注 2〕电动机的起点是 1821 年：法拉第（又是他）做出第一个“电磁旋转”装置——通电导线绕着磁铁转起来，那是人类第一台电动机的雏形（虽然只有几厘米大）。此后 60 多年，电动机从实验室玩具变成工业动力，关键一步是 1888 年特斯拉发明交流感应电动机——不需要换向器、结构简单可靠，直接为第 16 章的“电流之战”埋下伏笔。你今天耳机里的小喇叭、电动车里的驱动电机，往上追溯都是法拉第 1821 年那根转起来的导线。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
通电导线在磁场中	安培力	$F = BIL \sin \theta$
安培力方向	左手定则	磁穿手心、四指电流、拇指力
平行导线	同向吸反向斥	逐根用左手 + 右手螺旋
安培力 + 斜面	受力平衡	沿斜面分解, $BIL = mg \sin \theta$
电动机/电流计	安培力矩	力转成转动

你该记住的流程：读安培力题 → (1) 判夹角（垂直最大、平行零）→ (2) 大小代入 $F = BIL \sin \theta$ → (3) 方向左手定则（力用左手）→ (4) 平衡/运动题受力分析后列方程 → (5) 平行导线想“同向吸、反向斥”。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 一根长直导线垂直于纸面放置，通有垂直于纸面向里的电流 I ，处在纸面内竖直向上的匀强磁场 B 中，则导线所受安培力方向为？

A. 水平向右 B. 水平向左 C. 竖直向上 D. 竖直向下

答案 A。解析：左手定则——磁感线（竖直向上）穿入掌心，四指指向电流方向（垂直纸面向里），拇指指向安培力方向：水平向右（也可用 $F = IL \times B$ 叉乘验证：向里 $\times$ 向上 = 向右）。这类“导线垂直纸面”的设定最清晰：电流用 $\square$ （向里）标在纸面上， B 与 F 都落在纸面内，二维可判；若电流改为向外，安培力变为水平向左。**左手定则三要素：磁感线穿掌心、四指指电流、拇指指安培力**；若 I 与 B 不垂直，先分解 B 的垂直分量 $F = BIL \sin \theta$ 。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 安培力的公式？适用条件？
- 左手定则的内容（四指/拇指/掌心各代表什么）？
- 电流方向与磁场方向平行时，安培力多大？
- 安培力方向与电流方向、磁场方向的关系？

- 两根平行导线中电流方向相反，相互作用力是吸引还是排斥？
- 扬声器发声利用了什么原理？

提升

- 直导线长 0.3 m、电流 4 A，垂直 $B = 0.5 \text{ T}$ 磁场，安培力多大？
- 电流方向向东、磁场方向竖直向下，安培力方向？
- 通电矩形线圈在匀强磁场中，力矩与什么有关（定性）？

探究

- 用两根平行金属导轨 + 导体棒演示“通电导体在磁场中运动”，解释电动机原理。

参考答案：1. $F = BIL \sin \theta$ (B 、 I 、 L 三者)；电流与磁场垂直时 $F = BIL$ 。2. 伸开左手：磁感线穿掌心、四指指向电流方向、拇指指向安培力方向。3. 0 ($\sin 0^\circ = 0$)。4. 安培力垂直于电流与磁场决定的平面。5. 排斥（反向电流相斥，可用安培定则 + 左手定则判断）。6. 通电线圈在磁场中受安培力振动，推动纸盆发声。7. $F = BIL = 0.5 \times 4 \times 0.3 = 0.6 \text{ N}$ 。8. 向北（左手定则：掌心向上（ B 向下穿掌心），四指向东，拇指指北）。9. 与电流、磁感应强度、线圈面积、匝数有关（ $M = nBIS \cos \theta$ 类）。10. 金属棒放在导轨上，通电流后受安培力沿导轨运动；改变电流方向/磁场方向，运动方向改变——这就是电动机“电能 $\rightarrow$ 机械能”的原理。

第十一章 洛伦兹力与带电粒子运动

三大力的最后一位，也是高考压轴的最大主角——**洛伦兹力**。它作用在“运动的电荷”上，方向和速度永远垂直，因此它有一个极其优雅的性质：**永不做功，只改变方向**。这一个性质，让带电粒子在磁场里走出完美的圆。质谱仪用它分辨原子，回旋加速器用它把质子推到接近光速，极光、太阳风、显像管都是它的杰作。这一章是全书的重心：洛伦兹力 → 圆周运动 → 质谱仪/回旋加速器 → 有界磁场临界 → 叠加场。学完它，你就拿到了电磁学压轴题的钥匙。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 掌握洛伦兹力公式与左手定则；(2) 理解洛伦兹力不做功；(3) 会分析带电粒子在匀强磁场中的圆周运动（半径、周期）。

11.1 洛伦兹力：磁场给运动电荷的“横刀”

带电量为 q 的粒子以速度 v 在磁场 B 中运动，受到的洛伦兹力：

$$F = qvB \sin \theta$$

θ 是 v 与 B 的夹角。 $v \perp B$ 时 $F = qvB$ 最大； $v \parallel B$ 时 $F = 0$ 。

方向：左手定则（四指指**正电荷**运动方向，拇指指受力；**负电荷方向相反**——四指要反向）。注意与安培力的区别：安培力作用在通电导线上（宏观），洛伦兹力作用在运动电荷上（微观）——**安培力本质是导线内大量电荷所受洛伦兹力的宏观总和**。

这个力以荷兰物理学家洛伦兹命名——他 1892 年给出带电粒子在磁场中受力的公式，还顺手推导出“洛伦兹变换”，那是物理三第 6 章相对论的数学骨架。一个公式，牵起电磁学和相对论两个世界。〔注 2〕

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 $B = 0.5 \text{ T}$ 。求洛伦兹力大小和方向。

想一想：

- 问： v 与 B 垂直吗？
- 想：水平向右、竖直向下——垂直， $F = qvB$ 取最大值。

- 问：大小多少？
- 想： $F = qvB = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^6 \times 0.5 = 1.6 \times 10^{-13} \text{ N}$ 。
- 问：方向呢？负电荷要注意什么？
- 想：左手定则——磁场向下穿手心（手心向上），四指指向右（正电荷运动方向），拇指指向前（垂直纸面向外）。质子是正电荷，四指直接指运动方向。

详细答案：解： $F = qvB = 1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^6 \times 0.5 = 1.6 \times 10^{-13} \text{ N}$ 。方向：左手定则，磁场穿手心、四指指正电荷运动方向，拇指指向垂直纸面向外。答：洛伦兹力 $1.6 \times 10^{-13} \text{ N}$ ，方向垂直纸面向外。

变式提醒：若换电子（负电荷），四指要指向运动的反方向，受力方向相反（垂直纸面向里）；洛伦兹力永远垂直于速度方向——这决定了它只能“转弯”不能“加速”（见 11.2）。

演示：速度选择器——洛伦兹力的第一次“联用”：平行板间有匀强电场 E （向下）和垂直纸面的匀强磁场 B 。正电荷以速度 v 水平射入，受向下的电场力 qE 和向上的洛伦兹力 qvB 。当 $qvB = qE$ 时二力平衡，粒子匀速直线穿过——此时 $v = E/B$ ，与电荷种类、质量无关； $v > E/B$ 洛伦兹力赢（向上偏）， $v < E/B$ 电场力赢（向下偏）。这个装置是“速度过滤器”，质谱仪用它“挑速度”，霍尔效应是它的反向应用。

11.2 最重要的性质：洛伦兹力永不做功

这个力最优雅的性质来了： F 永远垂直于 v ，所以 F 的瞬时功率恒为 0——**洛伦兹力永不做功**。这意味着什么？磁场只能改变带电粒子的速度方向，不能改变速度大小（动能不变）。想想看：一个只能“转弯”不能“加速”的力，会让粒子走出什么轨迹？这是它与电场力（做功改变动能）最本质的区别。

这个性质带来一个必然结果：**垂直进入匀强磁场的带电粒子做匀速圆周运动**

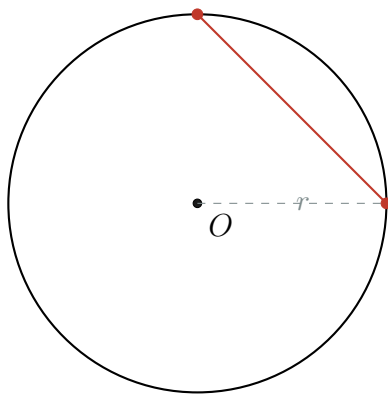


图 11.1: 带电粒子垂直射入磁场：匀速圆周运动（虚线为轨迹弦）

——大小不变的力提供向心力，方向永远指向圆心。

11.3 圆周运动：r 和 T 的黄金公式

垂直进入磁场的粒子走圆——圆的半径多大？周期多长？由 $qvB = \frac{mv^2}{r}$ 一推就出：

$$r = \frac{mv}{qB}, \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$

两个黄金结论：

- **半径 r 与速度成正比**：跑得越快，转的圈越大；
- **周期 T 与速度无关**（只由 m、q、B 决定）——回旋加速器正是利用这一点，让粒子在磁场中“绕圈等电场加速”。

这个“磁场让电荷转弯”的本事，正在托举人类的终极能源梦想——**可控核聚变**。中国 EAST 装置里，上亿摄氏度的等离子体任何容器都装不住，靠的就是强磁场把它“关”起来：带电粒子在磁场里转圈、被“困”在磁笼里，碰不到墙壁。没有洛伦兹力，太阳之火在地球上点不燃。

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。（ $m_e = 9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$, $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）

想一想：

- 问：半径用什么公式？
- 想： $r = \frac{mv}{qB}$ ——洛伦兹力提供向心力推出来的。
- 问：周期呢？与速度有关吗？
- 想： $T = \frac{2\pi m}{qB}$ ——与速度无关，只由 m、q、B 决定。
- 问：代入算，量级对吗？
- 想： $r = \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-4}} \approx 8.5 \times 10^{-2} \text{ m} = 8.5 \text{ cm}$ ； $T = \frac{2\pi \times 9.1 \times 10^{-31}}{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-4}} \approx 1.8 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。

详细答案：解： $r = \frac{mv}{qB} = \frac{9.1 \times 10^{-31} \times 3 \times 10^6}{1.6 \times 10^{-19} \times 2 \times 10^{-4}} \approx 8.5 \text{ cm}$ ； $T = \frac{2\pi m}{qB} \approx 1.8 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。答：半径 8.5 cm，周期约 $1.8 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。这个周期有多短？一秒钟里电子能转约 550 万圈——磁场的「回旋」快得肉眼根本跟不上，而回旋加速器恰恰利用「周期与速度无关」，让电子在磁场里一圈圈等电场加速。

变式提醒：若 B 加倍，半径减半、周期减半；若速度加倍，半径加倍、周期不变——“速度变半径、磁场变周期”是选择题最爱。

11.4 质谱仪：用半径分辨质量

质谱仪结构：电离室 → 加速电场（U）→ 速度选择（可选）→ 偏转磁场（B）→ 感光板。
粒子经电压 U 加速： $\frac{1}{2}mv^2 = qU$ ，进入磁场偏转：

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$$

半径 r 与质量 m 的平方根成正比——不同质量的离子落在感光板不同位置，测出 r 就测出 m。
质谱仪是化学分析、同位素测定的神器。考古队拿一块古木去测碳-14，医院化验血液里的药物浓度，靠的都是质谱仪“按质量把离子分开”这一手。

例题 11.3

质谱仪中，一价离子经 $U = 2000 \text{ V}$ 加速后进入 $B = 0.1 \text{ T}$ 的偏转磁场，打在距入口 $2r = 0.2 \text{ m}$ 处。求离子的质量。（ $e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$ ）

想一想：

- 问：打到距入口 $2r$ 处，说明偏转半径多大？
- 想： $2r = 0.2 \text{ m} \rightarrow r = 0.1 \text{ m}$ （半圆轨迹，入射点到感光板距离就是直径）。
- 问：r 与 m 什么关系？怎么反推质量？
- 想： $r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$ ，平方得 $r^2 = \frac{2mU}{qB^2}$ ， $m = \frac{qB^2r^2}{2U}$ 。
- 问：代入算。
- 想： $m = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.01 \times 0.01}{4000} = 4 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ——碳-12 附近离子的量级，合理。

详细答案：解： $r = 0.1 \text{ m}$ ；由 $r^2 = \frac{2mU}{qB^2}$ 得 $m = \frac{qB^2r^2}{2U} = \frac{1.6 \times 10^{-19} \times 0.1^2 \times 0.1^2}{2 \times 2000} = 4 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。答：离子质量约 $4 \times 10^{-27} \text{ kg}$ 。

变式提醒：质谱仪“半径辨质量”三步：加速得速度 → 磁场定半径 → 平方反推质量；同位素质量差越小，需要的分辨本领越高（磁场越大、半径差越明显）。

11.5 回旋加速器：电加速、磁回旋

回旋加速器 = 两个 D 形盒（接交变电场）+ 均匀磁场。粒子在盒内做半圆运动（磁场回旋，周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ 与速度无关），每次穿过两盒间隙被电场加速一次。

关键设计：交变电场频率必须等于回旋频率 $f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}$ ——粒子每次到间隙时电场正好加速（谐振）。最终速度由最外圈半径 R 决定：

$$v_{max} = \frac{qBR}{m}, \quad E_{kmax} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$

注意： E_{kmax} 与加速电压 U 无关（电压只决定加速次数），由 B 、 R 、 q/m 决定——这是常考陷阱。〔注 1〕

回旋加速器的原理，今天救了很多人的命：**质子治疗**——医院里的质子刀用回旋加速器把质子加速到接近光速的 60%，精确瞄准肿瘤，质子在病灶处停下来释放全部能量杀死癌细胞，对周围健康组织几乎无伤。一台质子治疗设备，核心就是一台医学版回旋加速器。

想一想（概念边界）：洛伦兹力对运动电荷做功吗？如果做功，能量从哪来？如果不做功，粒子速度大小变吗？

提示：永不做功（ F 恒垂直 v ，瞬时功率为零）——所以粒子速度大小不变、动能不变，只改变方向。这也解释了为什么磁场能让粒子走圆却“加速”不了它，加速必须靠电场。

动手试试（材料：一张纸、一枚硬币）

先猜：带电粒子垂直进入磁场会走出什么轨迹？——不用真磁场，用眼睛“看”。

动手：把硬币放在纸上，用铅笔沿着硬币边缘画一个圆。这就是粒子在磁场里走出的“圆”——半径由 mv/qB 决定。

观察：换一枚更大的硬币（半径不同），对比两个圆——半径越大，说明“速度越快”或“磁场越弱”。

思考：垂直进入磁场的粒子轨迹永远是个圆（匀速圆周运动），半径 $r = mv/qB$ 。质谱仪就是靠“圆的大小”分辨质量，回旋加速器靠“圆里等加速”——这张纸上的一圈，就是整个电磁学压轴题的起点。

练一练

- 洛伦兹力为什么不做功？对粒子的速度和动能各有什么影响？
- 垂直进入磁场的粒子，半径与速度什么关系？周期与速度什么关系？
- 电子与质子以相同速度进入同一磁场，谁的半径大？
- 质谱仪中为什么半径与质量平方根成正比？
- 回旋加速器为什么要求交变电场频率等于回旋频率？最大动能由什么决定？

参考答案：1. 洛伦兹力永远垂直速度，瞬时功率为零——只改变速度方向、不改变速度大小（动能不变）。2. 半径与速度成正比（ $r = mv/qB$ ）；周期与速度无关（ $T = 2\pi m/qB$ ）。3. 质子质量大得多，半径大（质量比 ≈ 1836 倍）。4. $r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2mU}{q}}$ ——质量在根号里。5. 频率必须等于回旋频率才能每次到间隙恰好加速（谐振）；最大动能 $E_{kmax} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$ 由 B 、 R 、 q/m 决定，与加速电压无关。

本章注释

〔注 1〕回旋加速器是美国人劳伦斯 (Ernest Lawrence, 1901–1958) 1931 年在伯克利发明的——灵感正是本章 11.3 的结论“带电粒子在磁场中的回旋周期与速度无关”。这意味着只要交变电场频率固定, 粒子转多少圈都能同步被加速, 不需要给加速管加越来越高的电压。第一台回旋加速器只有手掌大, 能加速的质子能量只有 1.2 MeV; 劳伦斯不断把它做大, 到 1939 年建成的 60 英寸加速器已经能轰出多种新元素——他因此获 1939 年诺贝尔物理学奖。今天世界上最大的加速器 LHC 是回旋加速器的远房后代, 而医院里的质子刀是它的民用版。劳伦斯伯克利国家实验室至今以他命名。

〔注 2〕洛伦兹 (Hendrik Lorentz, 1853–1928) 是荷兰物理学大师: 1892 年他推导出运动电荷在磁场中受力的公式 (即洛伦兹力, 以他命名), 1895 年提出“洛伦兹变换”——描述高速运动的物体如何看时间和空间, 那是爱因斯坦相对论的数学骨架 (物理三第 6 章)。爱因斯坦后来多次说, 洛伦兹是他最尊敬的人。1902 年洛伦兹与塞曼共获诺贝尔物理学奖 (研究磁场对光的影响, 即塞曼效应)。一个以他名字命名的力, 牵起了从电磁学到相对论的两百年——你这一章学的公式, 是两座物理学大厦之间的桥。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
运动电荷在磁场中	洛伦兹力	$F = qvB \sin \theta$, 左手定则
洛伦兹力做功	永不做功	只转弯不加速, 动能不变
垂直进入匀强磁场	匀速圆周	$r = mv/qB$, $T = 2\pi m/qB$
质谱仪	半径辨质量	$r \propto \sqrt{m}$, 测 r 得 m
回旋加速器	电加速磁回旋	频率 = 回旋频率, $E_{k\max}$ 与 U 无关
有界磁场/临界	找圆心定半径	几何相切, $t = \theta T/2\pi$
重力 + 电场 + 磁场	叠加场	能消则消 ($qE=mg$), 等效重力场法
速度选择器	二力平衡	$v = E/B$, 与电荷无关

你该记住的流程: 读带电粒子大题 → (1) 判场型: 电场 (加速/偏转) 还是磁场 (圆周) 还是组合 (分段切)? → (2) 磁场必背三件套: r 、 T 、圆心定位法 → (3) 组合场按段切, 段间速度衔接 → (4) 临界问题画轨迹: 找圆心 → 定半径 → 几何求范围 → (5) 叠加场先试“消不掉”再等效重力场。

真题直击 (改编自近年高考考查方式) (单选) 一带电粒子 (不计重力) 以速度 v 垂直射入磁感应强度为 B 的匀强磁场, 做匀速圆周运动。若将磁感应强度增大为 $2B$, 则粒子的轨道半径和运动周期分别变为原来的?

A. 半径减半、周期减半 B. 半径加倍、周期减半 C. 半径减半、周期不变 D. 半径不变、周期加倍

答案 A。解析: 洛伦兹力提供向心力 $qvB = \frac{mv^2}{r}$: $r = \frac{mv}{qB}$ —— B 加倍, r 减半; 周期 $T = \frac{2\pi m}{qB}$ —— B 加倍, T 减半。**两个公式记牢:** $r = mv/qB$ 、 $T = 2\pi m/qB$ —— **T 与 v 、 r 无关** (这是回旋加速器能“同一频率加速”的根本原因); 比荷 q/m 大则转得又小又快。

章末检测 (基础 ★ / 提升 ★★ / 探究 ★★★)

基础

- 洛伦兹力的公式？方向用哪个定则判断？
- 洛伦兹力对运动电荷做功吗？为什么？
- 带电粒子垂直进入匀强磁场，做什么运动？
- 粒子做圆周运动的半径公式？周期公式？
- 速度与磁场方向平行时，洛伦兹力多大？
- 质谱仪、回旋加速器分别利用了什麼原理？

提升

- 质子以 10^6 m/s 垂直进入 $B = 0.5$ T 磁场，半径多大 ($m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg)？
- 上题质子的运动周期多大？
- 电子与质子以相同速度进入同一磁场，谁的半径大？

探究

- 回旋加速器为什么能不断加速粒子？说明电压方向如何配合。

参考答案：1. $f = qvB \sin \theta$ ；左手定则（四指指向正电荷运动方向）。2. 不做功——洛伦兹力始终与速度垂直，只改变方向不改变速度大小。3. 匀速圆周运动（洛伦兹力提供向心力）。4. $r = mv/qB$ ； $T = 2\pi m/qB$ （周期与速度无关）。5. 0 ($\sin 0^\circ = 0$)。6. 质谱仪：不同 m/q 粒子半径不同被分离；回旋加速器：电场加速 + 磁场偏转（盘旋加速）。7. $r = mv/qB = 1.67 \times 10^{-27} \times 10^6 / (1.6 \times 10^{-19} \times 0.5) \approx 2.09 \times 10^{-2} \text{ m} \approx 2.1 \text{ cm}$ 。8. $T = 2\pi m/qB = 2 \times 3.14 \times 1.67 \times 10^{-27} / (1.6 \times 10^{-19} \times 0.5) \approx 1.31 \times 10^{-7} \text{ s}$ 。9. 质子半径大—— $r = mv/qB$ ，质子质量比电子大三个数量级（同 v 、 q 、 B 时 $r \propto m$ ）。10. 带电粒子在磁场中做匀速圆周运动回到电场区，若电场方向恰好反向（半周期换向），粒子每经过一次 D 形盒间隙就被电场加速一次——回旋加速器用交变电场配合粒子回旋周期，实现反复加速。

第十二章 磁通量与电磁感应现象

1831 年，法拉第做了个著名动作：把磁铁插进线圈，电流表跳了；拔出来，又跳了。动一动就能生电？——这个“魔法”后来变成了发电机和无线充电。

第三编里磁场只会“转弯”（洛伦兹力）和“推拉”（安培力）。这一编迎来电磁学最精彩的一幕：**变化的磁场能生出电**。1831 年法拉第做了那个著名的动作——把磁铁插进线圈，电流表跳了；拔出来，又跳了，方向相反。发电机、变压器、无线充电全是这个动作的后代。这一章先做法拉第的实验，认识磁通量，回答“什么条件下会有感应电流”。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解磁通量概念与计算；(2) 掌握产生感应电流的条件（磁通量变化）；(3) 会判断磁通量的增减。

12.1 磁铁插线圈：先看现象

先看一个现象（你随时能复现）：把条形磁铁慢慢插入线圈——电流表轻轻偏一下；飞快插入——猛跳一下；插到底不动——归零；拔出——又跳，方向相反。这一连串现象藏着什么规律？

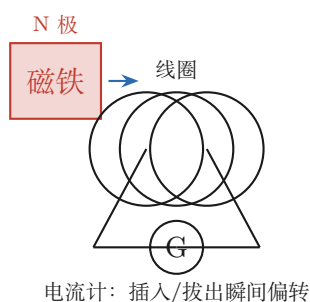


图 12.1: 磁铁插线圈实验：插入/拔出瞬间电流计偏转，插到底归零

四个现象三个结论：(1) **磁铁动才有电流**（变化是关键）；(2) **动得越快电流越大**（变化快慢是度量）；(3) **插和拔方向相反**（方向有规律）。

还有个微妙的细节：插入时感觉线圈在推拒磁铁，拔出时在挽留——线圈“知道”该推还是该留？答案在第 13 章的楞次定律（能量守恒）。

信用卡为什么必须“刷”？信用卡背面的黑条是一层极薄的磁性材料，信息就“写”在磁条上。读取时，卡片必须在读卡器的感应线圈上划过——因为划过的瞬间，磁条的运动让线圈里的

磁通量变化，感应出电流，读卡器把电流翻译成信息。为什么不能把卡静止放上去？**因为只有变化才有感应**——这正是本节“磁铁要动才有电流”的结论。

你天天在用的**手机无线充电**也是同一个原理：充电板里是一个通电线圈，通交变电流产生变化的磁场；手机背面的接收线圈处在变化的磁场里，磁通量不断变化，感应出电流给电池充电。充电板插着电，能量却“隔空”传进了手机——传的正是“变化的磁通量”。

12.2 磁通量：数一数穿过线圈的磁感线

“穿过线圈的磁感线有多少”，需要一个量来数——定义**磁通量**（线圈平面垂直于磁场时）：

$$\Phi = BS$$

单位韦伯（Wb）。直觉： Φ 是“穿线圈的磁感线总根数”。 Φ 变化的四种方式：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？

想一想：

- 问：磁通量怎么算？
- 想： $\Phi = BS = 0.5 \times 0.02 = 0.01 \text{ Wb}$ 。
- 问：转过 90° 呢？
- 想：磁场与线圈平面平行，磁感线“穿”不过去， $\Phi = 0$ 。
- 问：这个 0 意味着什么？
- 想：磁场还在，但穿线圈的磁感线根数为零—— Φ 是“穿过”的量，与场强是两回事。

详细答案：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， $\Phi = 0$ 。
答：初始 0.01 Wb ，转 90° 后为 0。

变式提醒：若磁场与线圈平面成角 θ （不是垂直）， $\Phi = BS \cos \theta$ （取垂直分量）；磁通量有正负（与穿入方向有关），但正负只表示方向，标量。

12.3 感应电流的条件： Φ 要变，不是 Φ 大

电磁感应现象：闭合回路中磁通量发生变化时，回路中产生感应电流。

注意一个最常踩的坑： Φ 大 $\neq$ 有感应电流。 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。所以判断依据永远只有一个—— Φ 变不变，而不是 Φ 大不大。

动手试试（材料：一块磁铁、一部智能手机）

先猜：把磁铁靠近手机，手机里的指南针 App 会怎样？

动手：打开手机的指南针 App，把磁铁慢慢靠近手机（别贴屏幕上，隔几厘米）。

观察：指南针的指针疯狂偏转！磁铁拿走又恢复正常。

思考：磁铁靠近，手机里传感器的磁通量剧变——磁场的变化“传导”到了手机里。电磁感应的核心就是“变化”：磁通量变了，才有感应。指南针偏转只是第一步，1831 年法拉第让这个“变化”生出了电——发电机就是这么来的。

练一练

- 线圈在匀强磁场中平动（不转动），有没有感应电流？转动呢？
- 磁通量是标量还是矢量？正负号怎么理解？
- 举例说明“ Φ 大但无感应电流”和“ Φ 小但有感应电流”。
- 信用卡为什么要“刷”而不能静止放上去？

参考答案：1. 平动（沿磁场方向或垂直方向整体移动）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。2. 标量；正负表示穿入方向（穿入/穿出），不表示大小。3. “ Φ 大但无感应”：线圈静止在强磁场中（ Φ 很大但不变）；“ Φ 小但有感应”：磁铁快速从远处插入小线圈（ Φ 从 0 快速增大，虽然绝对值小但变化快）。4. 划过时磁条相对线圈运动，磁通量变化产生感应电流；静止时磁通量不变，读不出来。

想一想（概念边界）：线圈在很强的匀强磁场中静止不动，磁通量很大——有感应电流吗？什么情况下才有？

提示：没有！感应电流的条件是“磁通量变化”，不是“磁通量大”。静止在强磁场中 Φ 大但不变，无感应；快速转动/靠近磁铁 Φ 变化快，才有感应电流。判据永远是： Φ 变不变。

本章注释

〔注 1〕“从磁生电”这条路，法拉第走了整整十年。1821 年他做出电磁旋转实验（第一台电动机雏形）后，在日记里写下目标：“把磁变成电”——当时人们只知道电生磁，没人能磁生电。此后十年，他不断实验、不断失败：用强磁铁靠近各种线圈、导线，都测不到电流。直到 1831 年 8 月 29 日，他用一个铁环（一边绕通电线圈、另一边绕检测线圈）做实验，当接通电源的瞬间，检测线圈的电流表跳了一下——他发现：**不是磁铁本身生电，是磁场的“变化”生电**。当天他的日记写着：“终于有了结果！”几乎同时（1830 年夏），美国物理学家亨利也独立发现了电磁感应，但他没及时发表——科学史又一次“几乎同时”，但这次法拉第抢先公布了。发电机、变压器、无线充电，都从这个铁环开始。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
磁铁插拔线圈	变化才有电	动才有、快则大、反向
磁通量	穿过的磁感线数	$\Phi = BS \cos \theta$
Φ 大	不一定有感应	看变不变，不看大不大
刷卡/磁条	磁通量变化	划动才有感应电流
四种变 Φ 方式	B 变/S 变/转/变形	磁铁靠近远离、转动、变形

你该记住的流程：读电磁感应题 $\rightarrow$ (1) 先问 Φ 变了吗？(B 变？S 变？夹角变？) $\rightarrow$ (2) 没变：无感应；变了：有感应 $\rightarrow$ (3) 变得越快，感应越强 (第 13 章定量) $\rightarrow$ (4) 刷卡、发电机、变压器全是“让 Φ 变”。

真题直击 (改编自近年高考考查方式) (单选) 如图所示，一矩形线框平面与磁场方向垂直，磁感应强度为 B、线框面积为 S。下列说法正确的是？

- A. 磁通量 $\Phi = BS$ ，与线框平面有关
- B. 线框绕一边转动 180° 的过程中，磁通量先减小后增大，感应电流方向不变
- C. 若 B 不变、线框平行于磁场移动，磁通量变化，产生感应电流
- D. 产生感应电流的条件是磁通量发生变化，与导体是否闭合无关

答案 A。解析：A 对—— $\Phi = BS$ (平面垂直磁场时)，转动则 $\Phi = BS \cos \theta$ ；B 错——转动 180° 磁通量从 $+BS$ 到 $-BS$ ，穿过零点的过程中磁通量变化方向改变，感应电流方向会改变 (增反减同)；C 错——线框平行于磁场平移，穿过线框的磁通量恒为 0，不产生感应电流；D 错——感应电流要求“磁通量变化 + 闭合回路”两个条件 (不闭合只有感应电动势、没有电流)。**感应电流双条件：磁通量变 + 回路闭合**——只变不闭、只闭不变都不行。

章末检测 (基础 ★ / 提升 ★★ / 探究 ★★★)

基础

- 磁通量的定义式？单位？
- 产生感应电流的条件是什么？
- 线圈在匀强磁场中如何转动才有感应电流？
- 磁通量是矢量还是标量 (虽然有正负)？
- 感应电流“阻碍磁通量变化”是楞次定律的内容吗？
- 磁通量变化有哪些方式 (至少 3 种)？

提升

- 线圈面积 0.1 m^2 、 $B = 0.5 \text{ T}$ 垂直穿过，磁通量多大？
- 线圈平面与磁场平行时，磁通量多大？

- 磁通量从 0.2 Wb 均匀增加到 0.6 Wb 用时 0.1 s，磁通量变化率多大？

探究

- 用线圈和电流表演示“什么情况下产生感应电流”——总结条件。

参考答案：1. $\Phi = BS \cos \theta$ ；韦伯（Wb）。2. 穿过闭合回路的磁通量发生变化。3. 转动使穿过线圈的磁通量变化时（线圈平面从垂直转离磁场方向）才有；平行时磁通量为零但变化率大。4. 标量（正负只表示磁感线穿过的方向，不表示大小）。5. 是的——感应电流的方向总是阻碍引起感应电流的磁通量变化（楞次定律核心）。6. (1)B 变化；(2) 面积 S 变化；(3) 夹角变化（转动）；(4) 线圈移动进出磁场。7. $\Phi = BS = 0.5 \times 0.1 = 0.05 \text{ Wb}$ 。8. 0（ $\cos 90^\circ = 0$ ，磁感线不穿过线圈面）。9. $\Delta\Phi/\Delta t = (0.6 - 0.2)/0.1 = 4 \text{ Wb/s}$ 。10. 线圈接电流表：(1) 磁铁插入/拔出线圈时有电流；(2) 磁铁静止在线圈中无电流；(3) 线圈在磁场中转动有电流——结论：只有穿过闭合线圈的磁通量变化时才有感应电流（磁通量不变则无）。

第十三章 法拉第定律与楞次定律

磁铁插得越快，电流越大——但你想过吗：电流的方向也有规矩。更妙的是，线圈好像“通人性”：你插它推、你拔它留。它凭什么这么“懂事”？

上一章建立了“变化”的度量（磁通量），这一章回答两个问题：**感应电动势多大**（法拉第定律——看变化率）和**感应电流往哪流**（楞次定律——看能量守恒）。前者决定量，后者决定方向，合起来就是电磁感应的核心。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 掌握法拉第电磁感应定律 ($E = n\Delta\Phi/\Delta t$)；(2) 会用楞次定律判断感应电流方向；(3) 掌握右手定则处理导体切割磁感线。

13.1 法拉第定律：电动势是变化率，不是变化量

上一章的直觉“动得越快电流越大”，怎么定量？——“快”就是 $\Delta\Phi/\Delta t$ 大。法拉第定律：

$$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

n 是线圈匝数（放大 n 倍，变压器靠它升压）。关键：**正比于变化率，与 Φ 本身无关**—— Φ 大但不变， $E = 0$ 。

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。

想一想：

- 问：磁通量变化多少？
- 想： $\Delta\Phi = \Delta B \cdot S = 0.4 \times 0.02 = 0.008 \text{ Wb}$ 。
- 问：感应电动势多大？注意匝数。
- 想： $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100 \times \frac{0.008}{0.1} = 8 \text{ V}$ 。
- 问：感应电流呢？

- 想： $I = \frac{E}{R} = \frac{8}{4} = 2 \text{ A}$ 。

详细答案：解： $\Delta\Phi = 0.4 \times 0.02 = 0.008 \text{ Wb}$ ； $E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 100 \times \frac{0.008}{0.1} = 8 \text{ V}$ ； $I = \frac{E}{R} = 2 \text{ A}$ 。

答：感应电动势 8 V，感应电流 2 A。

变式提醒：若 B 均匀变化（B-t 图是直线），E 恒定、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。

13.2 楞次定律：电流为什么总“阻碍”变化

回到上一章的谜团：线圈“知道”该推还是该留？答案不是玄学，是**能量守恒**——物理世界最硬的铁律：感应电流有能量（能让电流表偏转），这能量只能来自你推磁铁做的功。如果推磁铁毫不费力，能量就无中生有——不可能。所以线圈必须“阻碍”你的动作：你插它推，你拔它拽，你做的功越多，感应电流的能量越充足。一切自洽。

楞次定律：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**。

怎么快速判断方向？口诀就八个字：**增反减同**（ Φ 增大，感应电流的磁场与原磁场反向；减小则同向）、**来拒去留**（磁铁靠近排斥、远离吸引）。

这条定律以俄国物理学家楞次命名——1834 年他发表楞次定律时年仅 30 岁，此前他刚从一次绕地球半圈的环球科学考察回来（1830 年代俄国组织的环球航行）。有趣的是，楞次定律“简单到像废话”（电流阻碍变化），但它其实是能量守恒的直接推论——最简洁的定律往往最深刻。〔注 1〕

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）。

想一想：

- 问：N 极向下插入，线圈内磁场方向？ Φ 怎么变？
- 想：N 极向下，磁感线向下穿过线圈， Φ 增大。
- 问：增反减同，感应电流的磁场方向？
- 想： Φ 增大 $\rightarrow$ 感应电流的磁场方向**向上**（反抗增大）。
- 问：由感应电流的磁场方向，怎么定电流方向？
- 想：用右手螺旋定则：拇指指向上（磁场向上），四指绕向为感应电流方向——从上往下看为逆时针。

详细答案：解： Φ 增大（向下），增反减同 $\rightarrow$ 感应电流的磁场向上；右手螺旋定则 $\rightarrow$ 感应电流从上往下看为逆时针。答：逆时针（从上往下看）。

变式提醒：S 极插入则相反（顺时针）；判断方向三步：判 Φ 增减 $\rightarrow$ 定感应电流磁场方向（增反减同） $\rightarrow$ 右手螺旋定电流方向。

“来拒去留” 还有一重力学身份：磁铁靠近线圈时，感应电流对磁铁产生一个**排斥力**，让你推得更费劲；拔出时产生**吸引力**，让你拉得更费劲——这正对着你做的功：**你推/拉磁铁做的功，一部分转化成感应电流的电**（还有一部分变成电阻发热）。所以楞次定律可以换一句话说：**感应电流总是阻碍相对运动**，这个“阻碍”就是能量守恒在电磁感应里的具象化。磁悬浮列车利用的正是这个力的身份：列车底部强磁铁在轨道线圈上方掠过，感应电流产生“托举 + 牵引”的力，把车悬起来跑。

例题 13.3

如图所示，N 极向下**远离**线圈（向上拔），判断感应电流方向（从上往下看），并说明磁铁受到的是吸引力还是排斥力。**想一想：**

- 问：拔出的瞬间，穿过线圈的磁通量怎么变？
- 想：磁感线向下穿过线圈的条数减少， Φ 减小。
- 问：增反减同，感应电流的磁场方向？
- 想： Φ 减小 $\rightarrow$ 感应电流的磁场**向下**（与原磁场同向，帮它“续命”）。
- 问：电流方向？磁铁受力？
- 想：右手螺旋定则：拇指向下 $\rightarrow$ 四指绕向为电流方向，从上往下看**顺时针**；磁铁被“留”——受吸引力（阻碍它离开）。

详细答案：解： Φ 减小（向下），增反减同 $\rightarrow$ 感应电流的磁场向下 $\rightarrow$ 从上往下看顺时针；感应电流对磁铁是“留”，表现为吸引力。答：顺时针（从上往下看），磁铁受吸引力。

变式提醒：插入 = 拒（排斥力）、拔出 = 留（吸引力）——**力的方向永远阻碍相对运动**；做题先定 Φ 增减，再走“增反减同 $\rightarrow$ 右手螺旋”，最后一步判断受力别忘“来拒去留”。判断导体棒切割磁感线的情况更简单：**右手定则**（伸右手，磁感线穿掌心，拇指指向运动方向，四指指向电流方向）——它与楞次定律结论一致，只是用在一根棒“主动切割”的场景更顺。

13.3 互感与自感（变压器与电感的前置）

互感：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）。**自感：**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”，见第 15 章）。

13.4 感应图像的“四件套”与电量通式

电磁感应最爱考图像： Φ - t 、 B - t 、 I - t 、 U - t （或 E - t ）。读图要点：

- **Φ - t 图**：切线斜率就是感应电动势（ $E = n|\Delta\Phi/\Delta t|$ 的几何意义）；
- **B - t 图**（匀强磁场变化）： $E = nS|\Delta B/\Delta t|$ ——斜率不变 $\rightarrow$ 电动势恒定 $\rightarrow$ 电流恒定；
- **I - t 图**：方向用楞次定律（“来拒去留”），大小 $I = E/R$ ；
- **图像题两步走**：先看斜率判“变不变”，再判方向。

电量通式（必背）：磁通量变化 $\Delta\Phi$ 时流过回路的电荷量：

$$q = \bar{I}\Delta t = \frac{n\Delta\Phi}{R}$$

q 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和热功率，流过的总电荷量相同。

例题 13.4

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。

想一想：

- 问：B 均匀减到零，E 恒定吗？
- 想：恒定—— $\Delta B/\Delta t$ 是常数， $E = nS\frac{\Delta B}{\Delta t} = 50 \times 0.04 \times \frac{0.3}{0.2} = 3 \text{ V}$ 。
- 问：感应电流多大？
- 想： $I = \frac{E}{R} = \frac{3}{3} = 1 \text{ A}$ 。
- 问：电荷量呢？两种算法对一下。
- 想：(1) $q = \frac{n\Delta\Phi}{R} = \frac{50 \times 0.04 \times 0.3}{3} = 0.2 \text{ C}$ ；(2) $q = I\Delta t = 1 \times 0.2 = 0.2 \text{ C}$ ——两条路一致。

详细答案：解： $E = nS\frac{\Delta B}{\Delta t} = 50 \times 0.04 \times \frac{0.3}{0.2} = 3 \text{ V}$ ； $I = \frac{E}{R} = 1 \text{ A}$ ； $q = \frac{n\Delta\Phi}{R} = \frac{50 \times 0.04 \times 0.3}{3} = 0.2 \text{ C}$ 。答：电动势 3 V、电流 1 A、电荷量 0.2 C。

变式提醒：若变化时间减半（0.1 s），E 加倍（6 V）、I 加倍（2 A），但 q 不变（仍 0.2 C）——“q 与快慢无关”是滑轨题“流过回路电量”的直接依据（第 14 章还会用到）。

动手试试（材料：一块强磁铁、一张铝箔纸卷成的筒）

先猜：磁铁从铝箔筒里掉下去，和从空管里掉下去，一样快吗？

动手：把铝箔纸卷成比磁铁略粗的筒，磁铁从筒口落下（竖着落）；再和没有筒时对比落地时间。

观察：磁铁穿过铝箔筒时明显“变慢”了，像在水里下落！

思考：磁铁下落时，铝箔里感应出电流（电磁感应），感应电流的磁场“阻碍”磁铁下落（楞次定律：阻碍变化）——这就是磁阻尼。你推磁铁做的“功”，变成了感应电流的能量；磁铁越重越快，阻力越大。楞次定律不是抽象口诀，是“能量守恒”在你手里直接显形。

练一练

- 法拉第定律中，匝数加倍，电动势如何变？变化时间减半呢？
- 用“来拒去留”解释：磁铁下落穿过线圈，速度如何变化？
- 如果楞次定律不成立（感应电流“帮助”变化），会发生什么？
- B-t 图斜率不变意味着什么？

参考答案：1. 匝数加倍 → E 加倍；时间减半 → E 加倍 ($E = n\Delta\Phi/\Delta t$)。2. 磁铁进入线圈时被“拒”（减速），离开时被“留”（减速）——全程受阻碍，速度比自由落体慢。3. 感应电流“帮助”磁铁下落，磁铁越掉越快、电流越来越大、能量无中生有——违背能量守恒，物理规律不允许。4. $\Delta B/\Delta t$ 恒定 → 电动势恒定 → 感应电流恒定。

想一想（概念边界）：楞次定律说感应电流“阻碍”磁通量变化——如果它反过来“帮助”变化，会发生什么？

提示：会违背能量守恒：磁铁下落越落越快、电流越来越大、能量无中生有。所以“阻碍”不是玄学，是能量守恒的必然——你推磁铁做的功，变成了感应电流的能量。

本章注释

〔注 1〕楞次（Heinrich Lenz，1804–1865）是俄国物理学家，出身德国移民家庭。1830 年代他参加俄国组织的环球科学考察（从喀琅施塔得出发绕地球一圈），考察途中研究了电磁现象；1833 年回国后，他发现了“感应电流阻碍磁通量变化”的规律，1834 年正式发表楞次定律——那年他 30 岁。这条定律表述极简（“阻碍变化”），却是能量守恒在电磁感应里的直接体现，也是“判断感应电流方向”的万能钥匙。今天，楞次的名字和法拉第定律一起，印在每一本电磁学教材里。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
感应电动势大小	法拉第定律	$E = n \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$ ，看变化率
感应电流方向	楞次定律	增反减同、来拒去留
Φ -t / B-t 图	斜率 = E	斜率不变电流恒定
流过电量	与快慢无关	$q = n\Delta\Phi/R$
互感/自感	邻圈/自身	变压器/电感前置

你该记住的流程：读电磁感应计算题 → (1) 求 E ：法拉第定律（变化率）→ (2) 求 I ： $I = E/R$ → (3) 判方向：楞次定律（增反减同）→ (4) 求 q ：电量通式（与快慢无关）→ (5) 图像题：先斜率后方向。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 一个 100 匝的线圈，面积 0.02 m^2 ，在 0.1 s 内磁感应强度从 0.2 T 均匀增大到 0.6 T（线圈平面与磁场垂直），则线圈中感应电动势大小为？

A. 0.8 V B. 4 V C. 8 V D. 16 V

答案 C。解析： $E = n \frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = nS \frac{\Delta B}{\Delta t} = 100 \times 0.02 \times \frac{0.6-0.2}{0.1} = 100 \times 0.02 \times 4 = 8 \text{ V}$ 。**法拉第定律两用：** $E = n \Delta \Phi / \Delta t$ （磁通量变化）与 $E = nS \Delta B / \Delta t$ （磁场均匀变化、面积不变）；注意 $\Delta \Phi$ 是变化量不是瞬时量， B 均匀变化时 E 恒定。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 法拉第电磁感应定律的表达式？ n 代表什么？
- 感应电动势与磁通量变化率还是与磁通量本身有关？
- 楞次定律的内容？口诀是什么？
- “来拒去留”说明感应电流对磁铁产生什么作用？
- 右手定则（导体切割）中四指指向什么？
- 感应电流的能量从哪里来？

提升

- 100 匝线圈面积 0.02 m^2 ， B 在 0.1 s 内从 0.2 T 增到 0.6 T，感应电动势多大？
- 导体棒长 0.5 m 以 4 m/s 垂直切割 $B = 0.8 \text{ T}$ 磁场，感应电动势多大？
- 磁铁 N 极向下插入线圈，从上往下看感应电流方向？

探究

- 用线圈 + 电流计验证“感应电流方向阻碍磁通量变化”（增反减同）。

参考答案：1. $E = n \Delta \Phi / \Delta t$ ；线圈匝数。2. 与磁通量的变化率有关，与磁通量本身无关（ Φ 大不一定 E 大，看变化快慢）。3. 感应电流方向总是阻碍引起它的磁通量变化；增反减同、来拒去留。4. 排斥力（靠近时）或吸引力（远离时）——阻碍相对运动。5. 四指指向感应电流方向（拇指指向运动方向，掌心迎磁感线）。6. 来自外力做功（克服安培力/阻力做功转化为电能）——能量守恒。7. $E = nS \Delta B / \Delta t = 100 \times 0.02 \times (0.6 - 0.2) / 0.1 = 8 \text{ V}$ 。8. $E = BLv = 0.8 \times 0.5 \times 4 = 1.6 \text{ V}$ 。9. 逆时针（从上往下看）—— Φ 增大，感应磁场向上反抗，右手螺旋定则判定。10. 磁铁插入（ Φ 增大），电流计偏转方向使线圈产生反向磁场（增反）；拔出（ Φ 减小）偏转反向（减同）——用电流计指针方向验证感应电流方向的规律。

第十四章 动生电动势与滑轨模型

一根金属棒在磁场里滑一滑，就能“发电”——这听起来像永动机的雏形？不，棒滑得越快，阻力越大，最后匀速。物理从来不会白送能量。

这一章是“电磁学 × 运动学”的全面联姻，也是物理二大题压轴的常客。导体棒一动就切割磁感线，产生电动势，生出电流，电流受安培力，安培力又阻碍运动——速度、电动势、电流、力形成一个闭环。学会五步回路法，任何滑轨题都是这五步；学会终极速度，你就看懂了“为什么恒力拉棒最后匀速”。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 掌握动生电动势公式 $E = BLv$ ；(2) 会分析滑轨模型（电路 + 受力 + 能量）；(3) 掌握电磁感应综合题的“五步回路法”。

14.1 动生电动势：导体棒切磁感线

导体棒在磁场里“跑”起来会怎样？——棒一切割磁感线，就产生电动势。棒长 L 以速度 v 垂直切割磁场 B ：

$$E = BLv$$

（它是法拉第定律在“切割”情形下的快捷公式：棒扫过的面积每秒增加 Lv ，磁通量每秒增加 BLv 。）人类第一台“这样发电”的机器，是 1831 年法拉第做的铜盘发电机——一个铜盘在磁铁两极间转动，从盘心和盘缘引出电流，虽然电压低得可怜，却是发电机家族的祖宗。〔注 1〕

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。

想一想：

- 问：感应电动势多大？
- 想： $E = BLv = 0.4 \times 0.5 \times 2 = 0.4 \text{ V}$ 。
- 问：电流多大？

- 想： $I = \frac{E}{R} = \frac{0.4}{0.2} = 2 \text{ A}$ 。
- 问：安培力多大？方向呢？
- 想： $F_A = BIL = 0.4 \times 2 \times 0.5 = 0.4 \text{ N}$ ，方向与运动方向相反（阻碍切割——楞次定律的能量视角）。

详细答案：解： $E = BLv = 0.4 \times 0.5 \times 2 = 0.4 \text{ V}$ ； $I = \frac{E}{R} = 2 \text{ A}$ ； $F_A = BIL = 0.4 \text{ N}$ ，方向与运动方向相反。答： $E = 0.4 \text{ V}$ 、 $I = 2 \text{ A}$ 、安培力 0.4 N （阻碍运动）。

变式提醒：若棒斜着切割（ v 与 B 不垂直），取垂直分量；若回路中有多个电阻， $I = E/R_{\text{总}}$ ——先合并外电阻再算电流。

滑轨题千变万化，骨架只有五步。**五步回路法**（任何滑轨题的骨架）：

- **判类型：**切割（ $E = BLv$ ）还是磁通量变化（ $E = n\Delta\Phi/\Delta t$ ）？
- **定电流：**楞次定律/右手定则判方向；
- **判力：**左手定则判安培力方向（永远阻碍“变化”）；
- **列方程：**受力分析 + $F_{\text{net}} = ma$ ，把 E 、 I 、 F_A 用 v 表示；
- **收尾：**终极速度（ $a = 0$ ）、位移/热量（能量）、冲量（动量定理）。

14.2 恒力滑轨：终极速度

恒力 F 拉棒，把第 4 步（受力分析）写出来：

$$F - \frac{B^2 L^2}{R} v = ma$$

v 越大安培力越大，加速度越小；当安培力等于 F 时 $a = 0$ ，达到终极速度：

$$v_{\text{max}} = \frac{FR}{B^2 L^2}$$

v - t 曲线渐近逼近 v_{max} （水平渐近线——物理一的图像语言直接调用）。

这个“越滑越阻”的原理，正在弹射航母上的战斗机：**福建舰的电磁弹射器**，用强磁场给滑块一个巨大的安培力，把几十吨的舰载机在百米内加速到起飞速度——比蒸汽弹射更平顺、更快、可调。反过来，磁悬浮列车进站刹车不用刹车片：列车滑进磁场，轨道里感应出涡流，磁场“推拒”列车让它减速——你上一节学的安培力，一边推着飞机上天，一边拉着列车停下。

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。

想一想：

- 问：终极速度怎么求？
- 想：安培力 = 恒力时匀速： $v_{max} = \frac{FR}{B^2L^2} = \frac{2 \times 0.5}{1 \times 1} = 1 \text{ m/s}$ 。
- 问：速度 0.5 时加速度呢？
- 想： $F_A = \frac{B^2L^2v}{R} = 1 \text{ N}$ ， $a = \frac{F-F_A}{m} = \frac{2-1}{0.5} = 2 \text{ m/s}^2$ 。
- 问：焦耳热怎么算？
- 想：能量守恒——恒力做功 $W = Fx = 20 \text{ J}$ ，一部分变成动能 $\frac{1}{2}mv_{max}^2 = 0.25 \text{ J}$ ，其余全变热： $Q = 20 - 0.25 = 19.75 \text{ J}$ 。

详细答案：解：(1) $v_{max} = \frac{FR}{B^2L^2} = 1 \text{ m/s}$ 。(2) $v = 0.5$ 时 $F_A = 1 \text{ N}$ ， $a = \frac{2-1}{0.5} = 2 \text{ m/s}^2$ 。(3) 能量守恒： $Q = Fx - \frac{1}{2}mv_{max}^2 = 20 - 0.25 = 19.75 \text{ J}$ 。答：终极速度 1 m/s ； $v=0.5$ 时加速度 2 m/s^2 ；焦耳热 19.75 J 。注意这个数字的分量：恒力做了 20 J 的功，只有 0.25 J 变成动能，剩下的 19.75 J 全变成了热——也就是说 98.75% 的能量都「烧」掉了。滑轨题考能量时，这个「功去哪了」的账本永远是核心。

变式提醒：万能账本：克服安培力做的功 = 转化的电能 = 焦耳热；动量定理里安培力冲量 = BLq (q 为流过回路的电荷量)。滑轨题三把钥匙：速度（动力学）、能量（焦耳热）、冲量（电荷量）。

动手试试（思想实验，不需要器材）

先猜：如果滑轨上的棒“越滑越快、能量凭空增加”，会怎样？

动手：闭上眼睛想一个“永动机”：导体棒在磁场里滑，产生电流，电流给棒加速，棒更快又产生更多电流……能量从哪来？

观察（推理）：能量不会无中生有——所以必然有一个力在“刹车”：安培力阻碍运动，棒最终匀速（恒力拉棒时）。

思考：这就是“恒力拉棒最终匀速”的必然性——没有阻力，能量就不守恒了。物理的每个“极限”“匀速”“临界”，背后都站着能量守恒这条铁律。你推理出的“必须有阻力”，就是安培力的存在证明。

练一练

- 恒力拉棒为什么最终匀速？终极速度由什么决定？

- 棒切割速度加倍， E 、 I 、 F_A 各变为几倍？
- 例 14.2 中磁场增大一倍，终极速度变为多少？
- 光滑斜面上棒由静止滑下（ B 垂直斜面），终极速度表达式？

参考答案：1. 速度越大安培力越大，加速度减小，安培力等于恒力时 $a = 0$ 匀速； $v_{max} = FR/B^2L^2$ 。2. E 变 2 倍、 I 变 2 倍、 F_A 变 4 倍（ $F_A = BIL = B^2L^2v/R$ ， v 在平方里）。3. $v_{max} \propto 1/B^2$ ， B 加倍 $\rightarrow v_{max}$ 变为 $\frac{1}{4}$ （0.25 m/s）。4. 下滑分量等于安培力： $mg \sin \theta = \frac{B^2L^2v}{R}$ ， $v_{max} = \frac{mgR \sin \theta}{B^2L^2}$ 。

想一想（概念边界）：恒力拉棒，如果不知道终极速度公式，你能推理出 v_{max} 跟哪些量成正比、哪些成反比吗？

提示：能——匀速时安培力 = 恒力： $BIL = F$ 而 $I = BLv/R$ ，所以 $F = B^2L^2v/R$ ， $v_{max} = FR/B^2L^2$ 。 F 大 R 大 $\rightarrow v_{max}$ 大； B 大 L 大 $\rightarrow v_{max}$ 小。先想“谁推谁阻”，再写公式。

本章注释

〔注 1〕人类第一台发电机是法拉第的“铜盘发电机”（1831 年 10 月 17 日）：一个铜盘架在 U 形强磁铁两极之间，转动铜盘，从盘心（轴）和盘缘（边缘）各引出一根导线接电流计——铜盘转动时切割磁感线，产生持续的感应电流（直流）。虽然它电压只有不到一伏、电流微弱，但它是“用机械运动持续发电”的第一台机器——从此人类知道了“磁能生电、转动能生电”。20 年后，工程师们把这台玩具级的圆盘放大成工业发电机，点亮了全世界的灯。你今天用的每一度电，往上追溯都是法拉第那台转起来的铜盘。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
棒切磁感线	动生电动势	$E = BLv$
滑轨题	五步回路法	判来源 $\rightarrow$ 定电流 $\rightarrow$ 判力 $\rightarrow$ 列方程 $\rightarrow$ 收尾
恒力拉棒	终极速度	$v_{max} = FR/B^2L^2$ ，渐近匀速
求焦耳热	能量守恒	恒力功 - 末动能
求电荷量	安培力冲量	BLq ，动量定理
求位移	动能定理	全过程首尾分析

你该记住的流程：读滑轨题 $\rightarrow$ (1) 五步回路法走一遍 $\rightarrow$ (2) 恒力求终极速度（安培力 = 外力） $\rightarrow$ (3) 求热用能量、求电量用冲量 $\rightarrow$ (4) 含容切割： $I = CBl a$ ，恒力恒加速度 $\rightarrow$ (5) 验算：终极速度量级合理吗。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 如图所示，长为 L 的导体棒 ab 以速度 v 在磁感应强度为 B 的匀强磁场中沿导轨向右匀速滑动，导轨电阻不计、导体棒电阻为 R 。下列说法正确的是？

- A. 导体棒中感应电流方向为 $a \rightarrow b$
- B. 导体棒两端的感应电动势 $E = BLv$

C. 导体棒受到的安培力方向向右

D. 若 v 加倍, 感应电动势不变

答案 B。解析: 右手定则——掌心迎磁感线、拇指指运动方向 (右), 四指指电流方向: $b \rightarrow a$ (A 错); 动生电动势 $E = BLv$ (B 对, B 、 L 、 v 两两垂直时); 感应电流在磁场中受安培力, 方向**阻碍相对运动** (向左, 楞次定律/左手定则均得), C 错; $E \propto v$, v 加倍 E 加倍, D 错。**滑轨模型的“三量”:** $E = BLv$ 、 $I = E/R$ 、 $F_{\text{安}} = BIL = B^2 L^2 v/R$ —— v 是唯一自变量, 其余全跟它走。

章末检测 (基础 ★ / 提升 ★★ / 探究 ★★★)

基础

- 动生电动势的公式? 适用条件?
- 导体棒切割磁感线产生的感应电流方向如何判断?
- 导体棒匀速切割时, 外力与安培力的关系?
- 感应电流在磁场中受的安培力方向与运动方向什么关系?
- 滑轨模型中能量如何转化?
- 电磁感应与电路结合问题的一般步骤?

提升

- 导体棒长 0.4 m 以 5 m/s 垂直切割 $B = 0.6 \text{ T}$, 接 $R = 2 \Omega$ 回路, 感应电动势和电流多大?
- 上题中安培力多大?
- 导体棒从静止在恒力作用下在导轨上运动, 最终达到什么状态?

探究

- 用金属导轨、导体棒、磁铁和电流表, 演示“电磁弹射”原理并说明能量转化。

参考答案: 1. $E = BLv$ (B 、 L 、 v 两两垂直)。2. 右手定则 (或楞次定律)。3. 匀速时外力等于安培力 ($F = BIL$), 合力为零。4. 安培力阻碍相对运动 (与运动方向相反)。5. 外力做功 $\rightarrow$ 电能 (焦耳热) $\rightarrow$ 部分动能 (匀速时全部转化为焦耳热)。6. (1) 确定哪部分导体产生电动势; (2) 画等效电路; (3) 算电流; (4) 分析安培力; (5) 能量分析。7. $E = BLv = 0.6 \times 0.4 \times 5 = 1.2 \text{ V}$, $I = E/R = 0.6 \text{ A}$ 。8. $F = BIL = 0.6 \times 0.6 \times 0.4 = 0.144 \text{ N}$ 。9. 加速度逐渐减小, 速度增大, 最终匀速 (F 时达到最大速度 $v_m = FR/B^2 L^2$)。10. 导轨上放导体棒, 通强电流, 安培力推动导体棒运动——这就是电磁弹射/电磁炮的原理; 能量: 电能 $\rightarrow$ 动能 (导体棒运动), 同时部分电能转化为焦耳热。

第十五章 自感与涡流

拔掉充电器插头那一瞬，插头处常冒个小火花——谁在“拉”着电流不放？还有：电磁炉凭什么锅自己发热、炉面却不烫？都是“涡流”在捣鬼。

电磁感应不只发生在发电机里，也发生在每个用电器的“内部”。**自感**——线圈阻碍自身电流变化；**涡流**——块状金属在变化磁场中“自生”旋涡电流。这两个现象是变压器、电磁炉、金属探测器的物理基础。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解自感现象与自感系数；(2) 会分析通电/断电自感电路；(3) 了解涡流产生及应用（电磁炉/阻尼/安检）。

15.1 自感：电路的“惯性”

电流“刚想”变，线圈就拦着不让——为什么？线圈电流变化时，自身磁通量变化，产生阻碍自身电流变化的感应电动势，这就是**自感**。电感像电路的“惯性”：通电时“拖延”电流建立，断电时“维持”电流不立刻消失——断电瞬间开关处的火花，就是它在“垂死挣扎”。

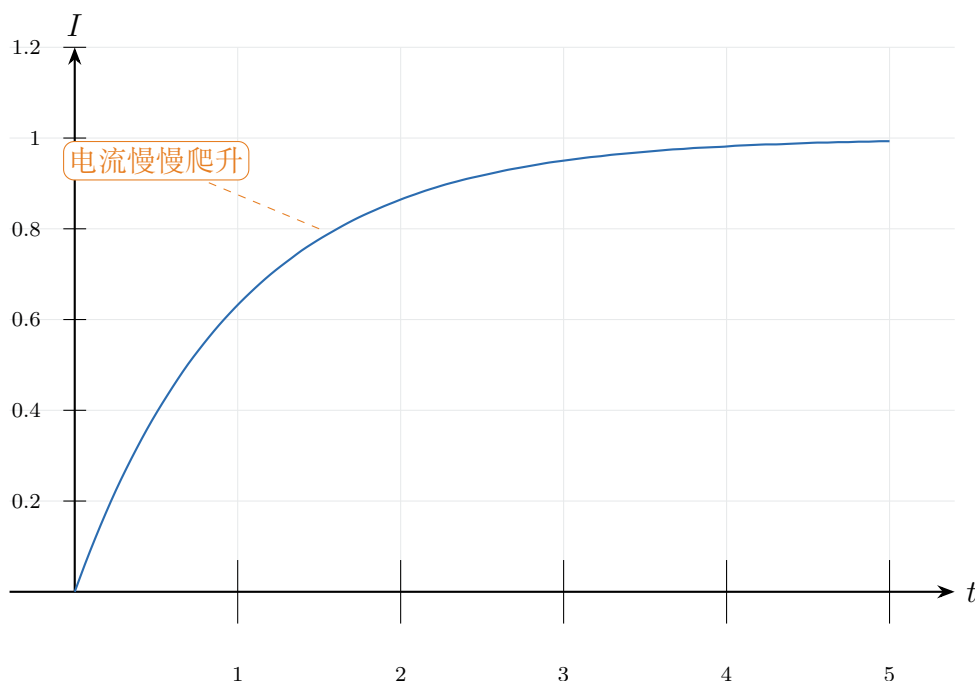


图 15.1: 电感像惯性：通电瞬间电流从零逐渐上升（不能突变）

自感电动势：

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

L 是自感系数（单位亨利 H）——这个单位以美国物理学家亨利命名，他是独立发现电磁感应和自感的人，比法拉第早一年做出感应实验，却因为没及时发表而失去优先权。〔注 1〕

例题 15.1

为什么断电瞬间开关处会打火花？

想一想：

- 问：断电时线圈想干什么？
- 想：线圈电流要减小，自感阻碍减小——“维持”电流不立刻消失（电感惯性）。
- 问：电流不消失，去哪了？
- 想：回路断开，电流只能“挤”过开关处的空气间隙——电压很高（ $E = L\Delta I/\Delta t$ ， Δt 极短），空气被击穿打火花。
- 问：这和“来拒去留”什么关系？
- 想：同源——都是楞次定律“阻碍变化”，只是从磁通量变成“电流变化”。

详细答案：答：断电瞬间线圈的自感阻碍电流减小，维持电流“挤”过开关的空气间隙，瞬间高电压击穿空气产生火花。本质：楞次定律（阻碍变化）+ 自感电动势 $E = L\Delta I/\Delta t$ 。

变式提醒：日光灯启动器里也有一个线圈：启动时它的自感产生高压脉冲，帮灯管“点火”；路灯、电梯的降压启动也利用自感——“电感是电路的惯性”这句话，理解比背熟更重要。

15.2 涡流：金属块里的“旋涡”

块状金属放在变化的磁场里，金属内部会感应出旋涡状的电流——**涡流**（也叫“傅科电流”，1855 年法国物理学家傅科发现——他原本在研究阻尼，却意外找到了涡流这个“发热大户”）。涡流有三个用武之地：

发热：电磁炉的锅底就是一块金属——炉面下的线圈通高频交变电流，产生变化的磁场，锅底感应出涡流，涡流直接发热把饭煮熟。为什么锅热炉面不热？因为炉面是陶瓷（不导电，没有涡流）。**阻尼：**磁悬浮列车刹车、电表里转盘的制动，靠的都是涡流的“阻碍”（金属在磁场里动，涡流产生反作用力）。

探测：地铁安检门、机场安检门里有一圈线圈，金属物品一过，涡流改变线圈的电磁状态，警报就响了——你每天过的那道安检门，就是涡流在“看”你的口袋。

15.3 减小涡流：硅钢片

涡流发热在变压器、电机里是“有害的”——白白烧掉能量。怎么减小？把整块铁芯改成**相互绝缘的硅钢片叠层**：涡流只能在薄片内部转小圈，路径长了、电阻大了、发热小了。你拆过变压器会看到一叠一叠的铁片——那不是在偷工减料，是在“防涡流”。

动手试试（材料：一枚硬币、一块强磁铁）

先猜：把强磁铁在硬币上方快速晃动，硬币会怎样？

动手：硬币平放，磁铁在硬币上方约 1 厘米处快速来回晃动（或转动）。

观察：硬币会轻微“跟着动”，甚至被磁铁拖着走——而且硬币会微微发热！

思考：磁铁晃动，硬币里的磁通量变化，产生涡流；涡流的磁场“阻碍”磁铁的运动（楞次定律），磁铁感觉“被黏住”；涡流在硬币里发热，硬币变暖。一块硬币，把自感、涡流、楞次定律全演示了一遍。

练一练

- 自感为什么像“惯性”？断电火花是怎么回事？
- 电磁炉为什么锅热炉面不热？
- 涡流有哪些利用和危害？
- 变压器铁芯为什么用硅钢片叠层？

参考答案：1. 电感阻碍电流变化（通电拖延建立、断电维持消失）；断电瞬间自感高压击穿空气产生火花。2. 锅底是导体感应涡流发热，炉面陶瓷不导电无涡流。3. 利用：电磁炉、安检门、磁阻尼；危害：铁芯发热损耗。4. 减小涡流——薄片让涡流路径变长、电阻变大、发热变小。

想一想（概念边界）：涡流在变压器铁芯里发热是“有害”的——如果不想办法减小，会发生什么？

提示：铁芯温度升高、能量白烧掉（变压器效率下降甚至烧毁）。所以用硅钢片叠层让涡流“转小圈”——同样是“阻碍变化”的楞次定律，在这里从“帮手”变成了“要防的对手”。

本章注释

〔注 1〕亨利（Joseph Henry，1797–1878）是美国自学成才的物理学家：出身贫寒、13 岁辍学当学徒，靠自学进入奥尔巴尼学院，后来成为普林斯顿大学教授。1830 年夏天他就做出了电磁感应实验（比法拉第的 1831 年 8 月还早一年多），1832 年又发现自感——但他在美国发表，当时欧洲学界根本没注意；而法拉第在英国及时公布了成果，优先权归了法拉第。亨利后来的贡献同样惊人：他发明了实用的电磁铁、帮助莫尔斯改进电报机，还是美国国家科学院的创始人、首任史密森尼学会秘书。电感单位“亨利”（H）以他命名——科学史记住他，不是因为抢先，而是因为做得够多。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
线圈自身电流变	自感	$E = L\Delta I/\Delta t$, 电路惯性
断电火花	自感高压	楞次定律阻碍变化
金属块在变磁场	涡流	发热/阻尼/探测三用途
电磁炉	涡流发热	锅底导体, 炉面陶瓷
安检门	涡流探测	金属改变线圈状态
铁芯	硅钢片叠层	减小涡流发热

你该记住的流程：读自感涡流题 → (1) 判现象：自感（自身电流变）还是涡流（块状金属）→ (2) 自感想“电流惯性”（延迟建立/消失）→ (3) 涡流想“旋涡电流”（发热、阻尼、探测三用途）→ (4) 减小涡流：硅钢片叠层 → (5) 用“来拒去留”统一理解。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）关于自感现象，下列说法正确的是？

- A. 自感电动势总是阻碍电流的变化，所以电流最终会变为零
- B. 自感系数 L 与线圈中电流大小有关
- C. 接通电路瞬间，自感电动势阻碍电流增大，电流从零逐渐增大
- D. 断开电路瞬间，自感电动势一定大于电源电动势

答案 C。解析：A 错——自感电动势“阻碍变化”但不阻止，稳定后电流照常（阻碍不是阻止）；B 错——自感系数 L 由线圈本身决定（匝数、形状、有无铁芯），与电流无关；C 对——通电瞬间电流增大，自感电动势反向阻碍，电流从零逐渐增大（“电感像惯性”）；D 错——断开瞬间自感电动势大小由 $E = L\Delta I/\Delta t$ 决定，与电源电动势没有必然大小关系。**自感一句话：电感“惯性”大、电流“急不得”**——通电慢慢来、断电也要“续一下”（断电瞬间灯泡闪亮就是证据）。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 什么是自感现象？自感系数 L 与什么有关？
- 断电自感中灯泡为什么可能闪亮一下？
- 自感电动势的表达式？
- 什么是涡流？涡流在什么情况下产生？
- 电磁炉为什么能让锅热而炉面不热？
- 涡流有哪些应用和危害？

提升

- 线圈自感系数 2 H ，电流在 0.1 s 内从 2 A 均匀减小到 0 ，自感电动势多大？

- 断电自感中，为什么灯泡闪亮说明流过灯泡的电流超过了原电流？
- 变压器的铁芯为什么要用叠片而不用整块？

探究

- 用电磁炉或线圈加热实验，观察“金属锅发热、塑料杯不热”，解释涡流。

参考答案：1. 线圈自身电流变化在自身引起的电磁感应； L 与线圈匝数、形状、有无铁芯有关（单位亨利 H ）。2. 断电瞬间自感电动势维持电流，若线圈电流大于灯泡原电流，灯泡闪亮后熄灭。3. $E = L\Delta I/\Delta t$ 。4. 块状金属中因磁通量变化产生的旋涡状感应电流；金属在变化磁场中（或相对磁场运动）时产生。5. 电磁炉线圈通交变电流产生交变磁场，涡流在金属锅底产生焦耳热；炉面是绝缘陶瓷，不产生涡流，所以不热。6. 应用：电磁炉、安检门、涡流制动；危害：铁芯发热（涡流损耗）。7. $E = L\Delta I/\Delta t = 2 \times 2/0.1 = 40 \text{ V}$ 。8. 断电瞬间自感电动势维持原线圈电流流过灯泡；若闪亮说明流过灯泡的瞬时电流大于其正常工作电流（线圈中电流本来就大于灯泡电流）。9. 叠片之间绝缘，阻断大涡流回路，减小涡流损耗（发热）；整块铁芯涡流大、发热严重。

第十六章 交变电流

你手机充电头插进插座的那一刻，电流就已经在电线里“来回跑”了——每秒换向 100 次（50 个完整周期，每个周期方向改变两次）。为什么全世界的电网都这么折腾，不用安安稳稳的直流？因为交流电有一个直流给不了的本事：可以方便地变压（第 17 章），于是能高压输电、低压入户。这一章认识正弦交流电是怎么产生的、怎么描述它（峰值/有效值/周期/频率），以及电感、电容对交流电的“另类阻碍”。而“全世界都用交流”这件事，是一场 130 年前打出来的胜仗——爱迪生和特斯拉的“电流之战”。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解交变电流的产生与描述（峰值/有效值/周期/频率）；(2) 掌握正弦式交变电流的有效值与峰值关系；(3) 会分析含电感、电容的交流电路。

16.1 正弦交流电的产生

交流电从哪来？——发电机。先想一个最朴素的场景：你骑过的那种“发电自行车”（或者手摇发电手电筒），摇得越快灯越亮，摇得慢灯就暗。为什么？因为灯接在转动的线圈上——线圈在磁场里转，穿过它的磁通量一会儿变大一会儿变小，感应电动势也就跟着忽大忽小、方向来回换。

把磁通量变化画出来，恰好是正弦曲线：穿过线圈的磁通量按正弦变化，感应电动势也是正弦：

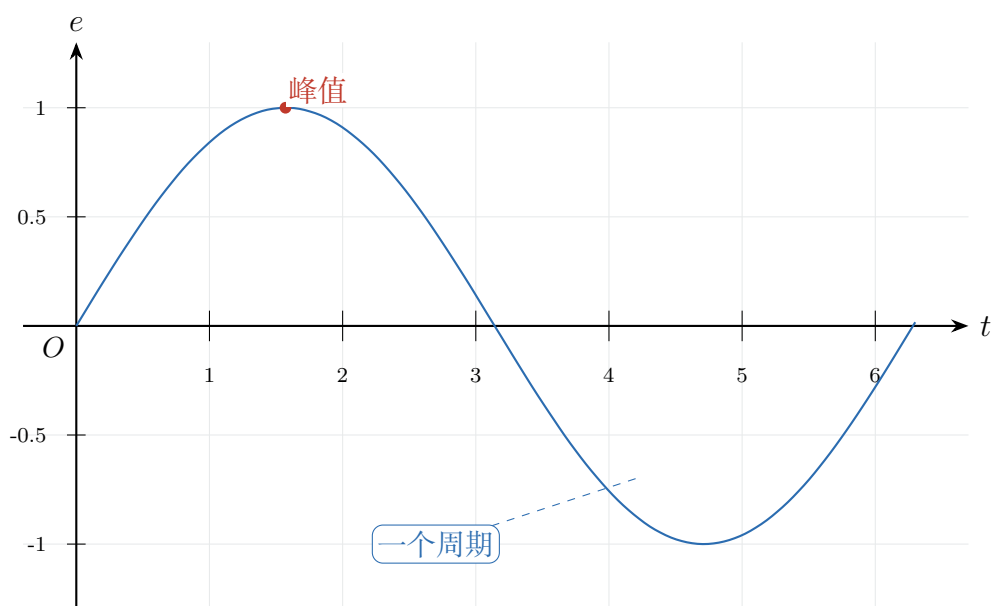


图 16.1: 正弦交流电：峰值 E_m 、周期 T

$$e = E_m \sin \omega t, \quad i = I_m \sin \omega t$$

我们把电动势、电压、电流随时间按正弦规律变化的电流，叫作**正弦交流电**。 $E_m = nBS\omega$ 是峰值——线圈匝数越多、磁场越强、转得越快，峰值越大； $\omega = 2\pi f$ 是角频率， f 是频率，我国市电 $f = 50 \text{ Hz}$ ，即每秒完成 50 个完整循环。

50 Hz 不是纸上数字，它就在你家屏幕上。家里的电视、电脑屏幕其实在以 50/60 Hz 的频率“闪烁”——每一帧画面在亮暗之间快速交替，只是人眼反应慢（约 1/24 秒），把闪烁“糊”成了连续画面。但用手机去拍屏幕，画面会出现条纹滚动——那是手机摄像头的帧率和屏幕刷新率对不上造成的。屏幕闪烁、条纹滚动，都是交流电 50 次/秒换方向的直接证据。

16.2 有效值：交流电的“等效直流”

交流电忽大忽小，怎么跟直流比“力气”？你想烧一壶水，交流电压 220 V，直流电压也 220 V，哪个烧得快？这问题没法直接比——交流电的电压一秒钟从 0 冲到 311 V 再掉回 0，反复 50 次，“力气”到底按哪个算？

物理学家的回答很干脆：不比瞬时，比“干活的平均效果”。让交流电与某个恒定电流通过同一个电阻，在相同时间内产生**相同热量**，这个恒定电流的值，就是交流电的**有效值**。正弦交流电恰好有简洁关系：

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

我国家庭电路电压 220 V 就是有效值，对应的峰值约 311 V。**计算热量、功率、电表读数**

全用有效值；求瞬时值、击穿电压用峰值。这句是本章最常考的一句话：220 V 说的是“等效直流”的干活能力，不是它瞬间的最高电压。

例题 16.1

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

想一想：

- 问：有效值怎么求？
- 想： $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}} = \frac{311}{1.414} \approx 220 \text{ V}$ 。
- 问：热功率用哪个电压？
- 想：用有效值（热功率是“平均效果”）： $P = \frac{U^2}{R} = \frac{220^2}{100} = 484 \text{ W}$ 。
- 问：为什么不能用峰值算功率？
- 想：峰值只在一瞬间出现，热量是全程累积的平均效果——有效值就是“等效直流”，专门用来算热量功率。

详细答案：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。

变式提醒：求击穿电压用峰值 ($U_m = \sqrt{2}U$)；求电流表/电压表读数、电功、电热用有效值；求某一瞬间的电动势用瞬时值 $e = E_m \sin \omega t$ ——“算平均用有效值、算瞬时用峰值或瞬时式”。

顺带说一句，插座、插线板上的 220 V 就是有效值，用万用表**交流挡**测市电读出的数字同样是有效值——它反映的是设备真正“干活”的电压。注意区分：充电器输出端标注的 5 V、2 A 是**直流输出**，直流电压不区分“有效值”。

16.3 电感与电容对交流的阻碍

同样是“阻碍电流”，电阻、电感、电容对直流和交流的态度截然不同。直流电流恒定，电感就是个普通导线（只有导线电阻）；可交流电一来，电感就不干了——电流一变，线圈里就产生自感电动势反抗变化，频率越高反抗越强。我们把这种阻碍叫**感抗** $X_L = 2\pi fL$ ：**频率越高阻碍越大**，一句话就是“通直流阻交流、通低频阻高频”。

电容正好反过来。直流稳定后，电容相当于断路（隔直流）；交流电来了，极板上的电荷一会儿充一会儿放，电流“看起来”能通过——频率越高，充放越频繁，阻碍越小。**容抗** $X_C = \frac{1}{2\pi fC}$ ：**频率越高阻碍越小**，即“通交流隔直流”。

这套“频率过滤器”就是滤波电路（让某段频率通过）的原理：手机充电头里，电感滤掉高频噪声、电容滤掉低频纹波，各管一段。

注意：感抗、容抗和电阻的单位都是欧姆，但**本质不同**——电阻把电能耗散成热（能量有去无回），而电容只是储存、释放电能，电感把电能暂存在磁场里——能量来回“借贷”，不真正消耗。所以纯电容、纯电感不发热，只有电阻发热。

动手试试（材料：一部智能手机）

先猜：用手机拍电脑或电视屏幕，会看到什么奇怪现象？

动手：打开手机相机，对准电脑屏幕或电视屏幕拍视频（或照片）。

观察：画面里出现滚动的条纹/波浪！

思考：屏幕以 50/60 Hz 的频率刷新（亮暗快速交替），手机相机的采样频率和它对不上，就“拍”出了干涉条纹。这就是交流电“每秒换方向 50 次”的直接证据——频率不是课本数字，它就在你屏幕上流动。

练一练

- 220 V 市电的峰值是多少？为什么要标有效值？
- 计算热量为什么必须用有效值而不是平均值？
- 电感对直流和交流的阻碍有什么不同？电容呢？
- 为什么说“容抗、感抗不耗能”？

参考答案：1. 峰值约 311 V ($\sqrt{2} \times 220$)；标注有效值是因为它决定实际做功能力（热量、功率）。2. 平均值是 $\frac{1}{T} \int i dt$ ，正弦交流电的平均值为 0（正负抵消），算热量必须用“平方平均”的有效值。3. 电感通直流（直流时无感抗）、阻交流，频率越高阻碍越大；电容隔直流（直流稳定时断路）、通交流，频率越高阻碍越小。4. 电容储电、电感储磁，能量来回借贷不散失；只有电阻把电能变成热。

想一想（概念边界）：计算电阻发热、电表读数时，用有效值还是峰值？如果题目问“电容器的击穿电压”，用哪个？

提示：发热/功率/读数用有效值（那是“等效直流”的意义）；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。一句话：算平均效果用有效值，算瞬时极限用峰值。

本章注释

〔注 1〕“电流之战”是 19 世纪末最著名的技术对决：爱迪生押注直流电（他的直流电网已经铺遍纽约），特斯拉押注交流电（可以变压、远距离输电）。爱迪生不择手段地抹黑交流电——公开用电刑椅（交流电）处决动物、宣传“交流会杀人”；特斯拉和西屋公司则用技术说话：1893 年芝加哥世博会，西屋用交流电点亮了 25 万盏灯，震惊世界；1895 年尼亚加拉水电站用交流电把电力送到 35 公里外的水牛城——交流电赢了。今天你家里的插座、电网、充电头，全是那场“电流之战”的胜利果实。有趣的是，特斯拉 1884 年刚到美国时就是给爱迪生打工的，爱迪生承诺给他巨额奖金改进直流电机，事成后却食言——这成了特斯拉自立门户、倒向交流的直接原因。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
正弦交流电	发电机产生	$e = E_m \sin \omega t$, $E_m = nBS\omega$
有效值/峰值	等效直流	热量功率读数用有效值, 瞬时击穿用峰值
市电 220 V	有效值	峰值约 311 V
电感	通直阻交	$X_L = 2\pi fL$, 频率高阻碍大
电容	通交隔直	$X_C = 1/(2\pi fC)$, 频率高阻碍小
电抗	不耗能	只挡路错相位, 不发热

你该记住的流程：读交流电题 → (1) 判用哪个值：算热量功率读数 → 有效值；瞬时/击穿 → 峰值 → (2) 峰值 $\sqrt{2}$ 倍有效值 → (3) 电感电容对交流：通直阻交 / 通交隔直 → (4) 验算：单位、量级 (220 V $\leftrightarrow$ 311 V 对应)。

真题直击 (改编自近年高考考查方式) (单选) 一正弦式交变电流, 其电压随时间变化为 $u = 311 \sin(100\pi t)$ V。下列说法正确的是?

- A. 电压的有效值为 311 V
- B. 该交变电流的频率为 50 Hz, 周期 0.02 s
- C. 用交流电压表测量该电压, 读数约为 311 V
- D. 该电压加在 100 Ω 电阻上, 热功率约为 968 W

答案 B。 解析: $u = U_m \sin \omega t$, $U_m = 311$ V 是峰值, 有效值 $U = U_m/\sqrt{2} \approx 220$ V, A 错; $\omega = 100\pi = 2\pi f \Rightarrow f = 50$ Hz、 $T = 0.02$ s, B 对; 电压表读的是有效值约 220 V (不是 311 V), C 错; $P = U^2/R = 220^2/100 = 484$ W (不是 968 W), D 错。交流电“三值”: 峰值 (击穿、瞬时)、有效值 (热量、功率、电表读数)、平均值 (算电荷量) ——算功率必用有效值。

章末检测 (基础 ★ / 提升 ★★ / 探究 ★★★)

基础

- 交变电流与直流电的区别?
- 正弦式交变电流的瞬时值表达式一般形式?
- 有效值的定义? 正弦交流的有效值与峰值关系?
- 我国电网的频率和周期是多少?
- 为什么说“有效值”用于计算功率/热量?
- 电感对交流电的“阻碍”叫什么? 与频率的关系?

提升

- 正弦交流峰值 311 V, 有效值多大?
- 有效值 220 V 的交流电接 40 W 灯泡, 通过灯泡的电流有效值多大?

- 交变电流通过电阻 R 在 0.01 s 内产生热量 Q ；直流电流多大才等效？

探究

- 用手机拍摄屏幕观察“条纹”现象，解释 50 Hz 交流电与 LED 频闪。

参考答案：1. 电流方向周期性变化的是交流电；方向不变的是直流电。2. $e = E_m \sin \omega t$ ($\omega = 2\pi f$)。3. 让交流与直流通过同一电阻，相同时间内产生相同热量，该直流值即交流有效值； $U = U_m / \sqrt{2}$ 、 $I = I_m / \sqrt{2}$ 。4. 50 Hz ；周期 0.02 s 。5. 功率、热量与电流平方成正比，用有效值计算才能与直流等效。6. 感抗 $X_L = 2\pi fL$ ；频率越高感抗越大（通直流、阻交流）。7. $U = 311 / \sqrt{2} \approx 220\text{ V}$ 。8. $I = P/U = 40/220 \approx 0.18\text{ A}$ 。9. 求交流的有效值 $I = \sqrt{Q/(Rt)}$ ——使 $I^2 Rt$ 与交流产生的热量相等，该 I 即等效直流电流。10. 手机拍屏幕出现明暗条纹/滚动条纹——屏幕（LED 或荧光灯）以 50 Hz 或更高频率闪烁，摄像头采样率与光源频率不匹配产生差拍条纹——证明交流电/光源在周期性变化。

第十七章 变压器与远距离输电

电站发出的电，为什么要先“升”到几十万伏再送出去，到你家门口又“降”回 220 V？来回折腾不是多此一举——这是数学算出来的最优解，而算这笔账的工具，就是变压器。

发电厂往往建在偏远地区（水电站靠山、风电场靠海），可电要送到城市——电线有电阻，电流一大就发热，损耗惊人。怎么让电“跑”上千公里还损失最小？答案是升压。这一章认识变压器的工作原理、理想变压器的规律，以及“升压输电”这笔账怎么算。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 掌握变压器原理与电压、电流比；(2) 会计算变压器相关问题；(3) 理解远距离输电采用高压的原因。

17.1 变压器：互感升降压

怎么把 220 V 变成 22 V 或 2200 V？想一个你天天见的东西：手机充电头。它比大拇指大不了多少，插进 220 V 插座，出来却是 5 V——凭什么“降压”？拆开老式充电头（那种又大又沉的），里面核心就是一个小变压器：一个铁芯，上面绕两组线圈。

变压器由铁芯 + 原线圈（ n_1 匝）+ 副线圈（ n_2 匝）组成。原线圈接交流电，变化的电流在铁芯里产生变化的磁通量，磁通量“穿”过副线圈，感应出电动势——这个过程叫**互感**。注意关键：**必须是交流电**。直流电的磁通量恒定不变，副线圈什么也感应不出来（这也就是“变压器不能改变直流电压”的原因，本章末尾想一想还会再考）。理想变压器（无能量损失）有个三连规律：

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}, \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}, \quad P_1 = P_2$$

升压（ $n_2 > n_1$ ）降电流；降压（ $n_2 < n_1$ ）升电流。电压比看匝数，电流比看反比，功率守恒。三句话背下来，变压器题就拿下了一半——电压由匝数比决定，电流由功率守恒反推，两头一夹，答案就出来了。

变压器的老祖宗是 1851 年的“鲁姆科夫感应圈”——一根铁芯上绕两组线圈，靠互感把低压直流变成高压脉冲，是第一个把“互感”变成实用器件的发明；今天它进化成了你家插座旁的充电头、变电站里的巨型变压器。〔注 1〕

例题 17.1

理想变压器原线圈 $n_1 = 1000$ 匝接 $U_1 = 220\text{ V}$ ，副线圈 $n_2 = 100$ 匝接 $R = 22\ \Omega$ 。求副线圈电压和两线圈电流。

想一想：

- 问：副线圈电压多大？
- 想： $U_2 = U_1 \frac{n_2}{n_1} = 220 \times \frac{100}{1000} = 22\text{ V}$ ——匝数比定电压。
- 问：副线圈电流呢？
- 想： $I_2 = \frac{U_2}{R} = \frac{22}{22} = 1\text{ A}$ ——负载定副线圈电流。
- 问：原线圈电流怎么求？
- 想：功率守恒（或电流反比）： $I_1 = I_2 \frac{n_2}{n_1} = 1 \times 0.1 = 0.1\text{ A}$ 。
- 问：验证功率守恒？
- 想： $P_1 = 220 \times 0.1 = 22\text{ W} = P_2 = 22 \times 1$ ——对上了。

详细答案：解： $U_2 = U_1 \frac{n_2}{n_1} = 22\text{ V}$ ； $I_2 = \frac{U_2}{R} = 1\text{ A}$ ； $I_1 = I_2 \frac{n_2}{n_1} = 0.1\text{ A}$ 。答：副线圈电压 22 V ，副线圈电流 1 A ，原线圈电流 0.1 A 。

变式提醒：变压器动态分析两条主线：“匝数比定电压、负载定电流、功率处处守恒”——原线圈接恒压交流电时， U_2 只由匝数比决定、与负载无关；负载电阻变化 $\rightarrow$ 副线圈电流变 $\rightarrow$ 原线圈电流跟着变（靠功率守恒联动）。

今天你在用的充电头已经升级成“开关电源”（先整流成直流再高频开关，体积更小），但手机充电器、楼道里的“电表箱”、学校的“变压器房”，原理还是 17.1 这一页的三连规律——你把充电头插上墙的那一刻，就是在跟互感打交道。

17.2 远距离输电：为什么要升压

电送得越远，损失越大——损失到底怎么算？输电线上损失功率 $P_L = I^2 R_L$ ——与电流平方成正比！所以功率一定时，电压升到 k 倍，电流降到 $1/k$ ，线损降到 $1/k^2$ 。这就是高压输电的数学理由。

这套逻辑在现实里被用到了极致：我国“特高压输电”把电压升到 $\pm 1100\text{ kV}$ （110 万伏），一条“昌吉—古泉”线路从新疆把电送到 3000 多公里外的安徽——世界上最远的输电纪录。要是用低电压送，光导线发热就能把整条线路“烧”成暖气片。输电线路分析题的三步：**发电 $\rightarrow$ 升压 $\rightarrow$ 线路 $\rightarrow$ 降压 $\rightarrow$ 用户**，功率在各环节守恒。

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?

想一想:

- 问: 250 V 输送, 电流多大? 线损呢?
- 想: $I = \frac{P}{U} = \frac{10^5}{250} = 400 \text{ A}$; $P_L = I^2 r = 400^2 \times 5 = 8 \times 10^5 \text{ W}$ ——线损是输送功率的 8 倍, 荒唐至极, 这就是不升压的下场。
- 问: 升压到 10 kV 呢?
- 想: $I = \frac{10^5}{10^4} = 10 \text{ A}$; $P_L = 10^2 \times 5 = 500 \text{ W} = 0.5\%$ ——升压 40 倍, 线损降了 1600 倍 (40^2)。
- 问: 要求线损 $\leq 1\%$, 电压至少多少?
- 想: $P_L \leq 10^3 \text{ W} \rightarrow I \leq \sqrt{\frac{10^3}{5}} \approx 14.1 \text{ A} \rightarrow U \geq \frac{P}{I} \approx 7.1 \text{ kV}$ 。

详细答案: 解: (1) $I = 400 \text{ A}$, $P_L = 8 \times 10^5 \text{ W}$ (线损是输送功率的 8 倍)。(2) $I = 10 \text{ A}$, $P_L = 500 \text{ W} = 0.5\%$ 。(3) $P_L \leq 1 \text{ kW} \rightarrow U \geq \frac{P}{I} = \frac{10^5}{14.1} \approx 7.1 \text{ kV}$ 。答: 250 V 输送线损 800 kW (8 倍于输送功率); 10 kV 输送线损 500 W ; 线损 $\leq 1\%$ 至少升压到约 7.1 kV 。对比最有冲击力: 同样 100 kW 的电, 250 V 送损失 8 倍、 10 kV 送只损失 0.5% ——电压升 40 倍, 线损降了 1600 倍。这就是「升压输电」的全部理由。

变式提醒: 线损 $P_L = I^2 r$ 用电流平方 (别用 $\frac{U^2}{r}$ —— U 是线路两端的压降, 不是输电电压, 两个 U 别混); “升压 k 倍、线损降 k^2 倍” 是远距离输电的灵魂。

练一练

- 变压器为什么不能改变直流电压?
- 理想变压器中, 副线圈空载 (不接负载) 时原线圈电流多大?
- 输电电压从 10 kV 升到 100 kV (10 倍), 相同线路损耗降为原来的多少?
- 远距离输电分析题的流程是什么?

参考答案: 1. 变压器靠互感传能——直流电流恒定, 铁芯中磁通量不变, 副线圈不产生感应电动势。2. 接近零 (原线圈电流只有很小的励磁电流, 理想变压器为零)。3. 线损与电流平方成正比, 电压升 10 倍电流降 $1/10$, 线损降为 $1/100$ 。4. 发电 $\rightarrow$ 升压 $\rightarrow$ 线路 $\rightarrow$ 降压 $\rightarrow$ 用户, 功率各环节守恒, 线损用 $I^2 r$ 算。

想一想 (概念边界): 变压器能改变直流电压吗? 如果能, 会怎么样?

提示: 不能——变压器靠互感传能, 直流电流恒定、铁芯磁通量不变、副线圈没有感应电动势。所以变压器只认交流: 频率越高、同样匝数下感应越强 ($E \propto f\Phi$ 的直觉)。

本章注释

〔注 1〕 变压器的前身是 1851 年德国钟表匠鲁姆科夫 (Heinrich Rühmkorff) 发明的“感应圈”：一根铁芯上绕两组线圈，一组接电池（低压），另一组匝数很多，靠互感把低压直流“斩”成高压脉冲——它能产生几万伏的电压，当时被用来做实验、点亮早期的放电管（霓虹灯的前身）。它就是变压器的雏形：同样的铁芯、同样的互感原理，只是它处理的是“变化”的电流。今天从充电头到特高压变电站，全是这枚感应圈的子孙。而“变压器能升压”这个能力，直接决定了 19 世纪末“电流之战”的结局——交流电之所以赢，就是因为它能变压（第 16 章注释讲过这场战争）。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
变压器	匝数比定电压	$U_1/U_2 = n_1/n_2, P_1 = P_2$
电流比	反比	$I_1/I_2 = n_2/n_1$
负载变	副线圈电流变	功率守恒联动原线圈
输电线路	线损	$P_L = I^2 r$, 升压降流
升压 k 倍	线损降 k^2 倍	高压输电原理
直流电	变压器失灵	磁通量不变无互感

你该记住的流程：读变压器/输电题 → (1) 电压走匝数比、电流走反比、功率守恒 → (2) 动态：负载变 → 副线圈电流变 → 原线圈跟着变 → (3) 输电：先算电流 $I = P/U$ ，线损 $P_L = I^2 r$ → (4) 升压 k 倍线损降 k^2 → (5) 验算功率守恒。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 一理想变压器，原线圈 1100 匝接 220 V 交流电，副线圈 110 匝。副线圈接 11 Ω 电阻时，下列说法正确的是？

- A. 副线圈输出电压为 44 V
- B. 副线圈输出电流为 4 A
- C. 原线圈输入电流约为 0.2 A
- D. 若副线圈匝数加倍（电阻不变），输出功率变为原来的 2 倍

答案 C。解析： $U_2 = U_1 \frac{n_2}{n_1} = 220 \times \frac{110}{1100} = 22 \text{ V}$ ，A 错； $I_2 = U_2/R = 22/11 = 2 \text{ A}$ ，B 错；原线圈电流由功率守恒： $I_1 = \frac{U_2 I_2}{U_1} = \frac{22 \times 2}{220} = 0.2 \text{ A}$ ，C 对；副线圈匝数加倍则 U_2 加倍（44 V），电阻不变则 I_2 加倍，输出功率 $U_2 I_2$ 变为 4 倍（不是 2 倍），D 错。**变压器三关系：电压比 = 匝数比、电流比 = 匝数反比、功率处处守恒**——先定 U_2 ，再算 I_2 ，最后用功率守恒回推 I_1 。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- 变压器的工作原理是什么？
- 理想变压器的电压比公式？电流比公式？
- 变压器为什么不能改变直流电压？

- 升压变压器原、副线圈匝数关系？
- 远距离输电为什么要用高压？
- 输电线上损失的功率公式（两种写法）？

提升

- 变压器原线圈 2200 匝、副线圈 110 匝，输入 220 V，输出电压多大？
- 输出电压 5 V、输出电流 2 A 的变压器，输入电流多大（理想）？
- 输电功率 P 一定，电压升为 2 倍，线损变为原来的几分之几？

探究

- 设计一个“手机充电器电路”示意：220 V 交流 $\rightarrow$ 5 V 直流需要哪些环节？

参考答案：1. 电磁感应（互感）——原线圈交变电流在铁芯中产生交变磁通量，副线圈感应出电动势。2. $U_1/U_2 = n_1/n_2$ ； $I_1/I_2 = n_2/n_1$ （理想、功率相等）。3. 直流电产生恒定磁通量，副线圈无感应电动势（没有磁通量变化）。4. 升压变压器 $n_2 > n_1$ （副线圈匝数多）。5. 输电功率 $P = UI$ 一定时，电压越高电流越小，线损 $P_{\text{损}} = I^2 R_{\text{线}}$ 越小（与电流平方成正比，即与电压平方成反比）。6. 线损 $P_{\text{损}} = I^2 R_{\text{线}}$ （线路电流与线路电阻）；或用 $P_{\text{损}} = (P_{\text{送}}/U_{\text{送}})^2 \cdot R_{\text{线}}$ 表示（由 $I = P_{\text{送}}/U_{\text{送}}$ 代入）。7. $U_2 = U_1 n_2/n_1 = 220 \times 110/2200 = 11 \text{ V}$ 。8. $I_1 = I_2 n_2/n_1 = P/U_1$ ，功率守恒： $I_1 = U_2 I_2/U_1 = 5 \times 2/220 \approx 0.045 \text{ A}$ 。9. 线损变为原来的 1/4—— $P_{\text{损}} = I^2 R_{\text{线}}$ 且 $I = P/U$ ：输电电压 U 加倍 $\rightarrow$ 电流 I 减半 $\rightarrow I^2$ 变为 1/4。10. 220 V 交流 $\rightarrow$ 变压器降压（到十几伏） $\rightarrow$ 整流（二极管桥） $\rightarrow$ 滤波（电容） $\rightarrow$ 稳压（稳压芯片） $\rightarrow$ 5 V 直流——充电器的“降压、整流、滤波、稳压”四环节。

第十八章 电磁振荡与电磁波

你手机里的 Wi-Fi、微波炉里的微波、医院的 X 光片——这些东西有一个共同的祖先：1865 年麦克斯韦纸上的四个方程。他算出了“电磁波”，还发现它跑得跟光一样快。

麦克斯韦用四个方程统一了电与磁，并预言：**变化的电场产生磁场、变化的磁场产生电场**——两者互相激发，就能脱离电荷“飞”出去，成为电磁波。1888 年赫兹用实验证实，今天 Wi-Fi、手机、微波炉、X 光片全是它的后代。这一章是电磁学思想的收束：从法拉第的场线，到麦克斯韦的电磁波，再到你的手机。

不过，在麦克斯韦开口之前，得先解决一个工程问题：**用什么电路才能把电磁波“发”出去？**——这就是本章的开场。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解 LC 振荡电路的工作原理与周期公式；(2) 理解麦克斯韦电磁场理论的两条假设；(3) 认识电磁波谱及应用。

18.1 LC 振荡电路：电磁波的“发射台”

手机里的 Wi-Fi 信号怎么产生的？

先把一个电容器和一个电感线圈接成一个闭合回路——这就是 **LC 振荡电路**（L 是电感、C 是电容）。给电容器充上电，然后放手，会发生什么？

充放电的“拉锯战”：电容器放电，电流流过线圈——但线圈有电感，它“不想”让电流突变（第 15 章自感）：电流不是一下子冲过去，而是**慢慢增大**，一边增大一边把能量存进线圈的磁场。等到电容器放完电（电场能为 0），按说该停了——可线圈的磁场能还在，它继续“推”电流，把电容器**反向充上电**。反向充满后，又反向放电……如此周而复始，电场能和磁场能来回转化，电流在回路里**来回振荡**。

这个过程跟**弹簧振子**一模一样：电容器像弹簧（存“势能”——电场能），线圈像质量（存“动能”——磁场能）；电容放电像弹簧释放，线圈续流像质量惯性。物理 I 第 10 章的简谐运动，在这里换了一身电磁装束重演。

振荡周期：LC 电路每完成一次充放电循环的时间，由电感和电容共同决定：

$$T = 2\pi\sqrt{LC}$$

电感越大，电流变化越“懒”、振荡越慢；电容越大，充放电的“水量”越多、也越慢——

所以周期与 $\sqrt{LC}$ 成正比。频率 $f = 1/T = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 。要发高频电磁波，就得用小 L、小 C——Wi-Fi 的 2.4 GHz 信号，用的就是微亨级电感和皮法级电容。

两种振荡：没有能量损失时，振幅不变，叫**等幅振荡**（理想情况）；实际上电流总有电阻损耗、还会向外辐射能量，振幅逐渐减小，叫**阻尼振荡**。广播电台要持续发射，就必须不断给电路“补充能量”——用晶体管或电子管定时“加油”，维持等幅振荡。赫兹当年用火花隙放电产生阻尼振荡，成功发射并接收了电磁波——人类第一封“无线电报”（虽然只传过了实验室）。

例题 18.1

某 LC 振荡电路，电感 $L = 10^{-4}$ H，电容 $C = 10^{-10}$ F。求振荡周期和频率；这个频率落在电磁波谱的哪一段？想一想：

- 问：振荡周期公式？
- 想： $T = 2\pi\sqrt{LC}$ 。
- 问：代入算？
- 想： $T = 2\pi\sqrt{10^{-4} \times 10^{-10}} = 2\pi \times 10^{-7} \approx 6.28 \times 10^{-7}$ s。
- 问：频率呢？落在哪段？
- 想： $f = 1/T \approx 1.6 \times 10^6$ Hz = 1.6 MHz——中波/短波无线电波段。

详细答案：解： $T = 2\pi\sqrt{LC} = 2\pi\sqrt{10^{-14}} \approx 6.28 \times 10^{-7}$ s， $f = 1/T \approx 1.6 \times 10^6$ Hz = 1.6 MHz。
答：周期约 6.3×10^{-7} s，频率约 1.6 MHz，属于无线电波（中波）波段——广播电台正是用这类 LC 振荡电路产生载波的。

变式提醒：LC 振荡与弹簧振子完全类比（电容 = 弹簧存势能、电感 = 质量存动能）；**周期只由 L、C 决定**，与充电电压无关——想调频率，改 L 或 C（收音机旋钮就是可变电容）。

18.2 麦克斯韦电磁场理论（全书思想的收束）

先想一件你每天都在做的事：把手机连上 Wi-Fi。路由器没有线连到手机，信息是怎么“穿”过空气、穿过墙、钻进你手机里的？答案是电磁波。可电磁波到底怎么“产生”的？

麦克斯韦的天才，浓缩成两条核心假设：

- **变化的磁场产生电场**（法拉第电磁感应定律的推广）；
- **变化的电场产生磁场**（麦克斯韦的天才补充，对称性之美）。

一条来自法拉第（实验早就验证），另一条是麦克斯韦“补”上去的——他凭什么敢补？因为物理规律讲究对称：既然变化的磁场能生电场，那变化的电场凭什么不能生磁场？这个对称性的信念，让电磁学从“电生磁、磁生电”的两件事，统一成了一件事。

两者互相激发 → 电磁场以波的形式在空间传播，速度等于光速 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ——**光就是电磁波**！电、磁、光，两千年的谜团在麦克斯韦手里统一。你手机里 Wi-Fi 信号穿过的那面墙，和阳光穿过你窗玻璃的“东西”，是同一个东西，只是频率不同。〔注 1〕

例题 18.2

为什么说“光就是电磁波”？麦克斯韦怎么证明的？

想一想：

- 问：变化的磁场和变化的电场会怎样？
- 想：互相激发——变化的电场产生磁场，变化的磁场又产生电场，一环扣一环向外传播。
- 问：这个“波”的速度是多少？
- 想：麦克斯韦从方程推出电磁波速度 $c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ （★拓展： μ_0 、 ϵ_0 是真空磁导率和真空介电常数，此公式了解即可、非考纲要求）——恰好等于当时已知的光速！
- 问：巧合还是必然？
- 想：不是巧合——数值吻合让麦克斯韦断言“光是电磁波”，20 年后赫兹用实验证实。

详细答案：答：麦克斯韦从理论上推出电磁波传播速度等于光速（数值吻合），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。光和无线电波、X 射线本质相同，只是频率不同。

变式提醒：电磁波不需要介质（真空中也能传播，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。

18.3 电磁波谱与应用

既然光、Wi-Fi、X 光都是电磁波，它们有什么区别？——频率不同。按频率（能量）从低到高排：**无线电波**（广播/Wi-Fi）→ **微波**（微波炉/雷达）→ **红外**（遥控/热成像）→ **可见光** → **紫外线**（消毒）→ **X 射线**（医学影像）→ **γ 射线**（医疗/核物理）。记一条铁律：频率越高，波长越短，能量越高。波速公式： $c = \lambda f$ 。

同一族“兄弟”，频率一变就各司其职：微波炉用的 2.45 GHz 微波，恰好让水分子剧烈共振、摩擦生热——所以微波炉热饭快，但空碗放进去不烫（没有水分子吸收）；5G 用的毫米波频率更高，带宽大、速度快，但穿墙弱，所以 5G 基站要建得密；X 射线能量高到能穿透人体软组织，才成了医院的“拍片神器”。波谱不是背出来的表，是“频率决定用途”的活逻辑。

例题 18.3

可见光中心波长 500 nm 对应的频率多大？

想一想：

- 问：波长、频率、波速什么关系？
- 想： $c = \lambda f$, $f = \frac{c}{\lambda}$ 。
- 问：代入算（注意单位换算）。
- 想： $\lambda = 500 \text{ nm} = 5 \times 10^{-7} \text{ m}$, $f = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。
- 问：这个频率意味着什么？
- 想：每秒振荡 600 万亿次——可见光频率极高，所以单个光子能量也高（第 4 章光电效应会用）。

详细答案：解： $f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8}{5 \times 10^{-7}} = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。答：频率约 $6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。

变式提醒：电磁波谱按频率排：无线电 < 微波 < 红外 < 可见 < 紫外 < X < γ ；“频率越高、波长越短、能量越高”——记这一条就能排全谱。

还有一位“波谱顶流”值得认识：贵州的 **FAST 天眼**（500 米口径射电望远镜）听的也是电磁波——不过是频率很低的无线电波。脉冲星、快速射电暴这些宇宙“心跳”，全是靠“听”电磁波发现的。你连 Wi-Fi 和天眼听宇宙，用的都是 1865 年那四个方程。

动手试试（材料：一部手机、一台收音机（或带收音功能的设备））

先猜：手机来电/上网时，旁边的收音机会有什么反应？

动手：把收音机调到没有台的空白频率（沙沙声），让手机靠近它拨打电话或收发消息。

观察：收音机发出“哒哒哒”的干扰声！手机一停就恢复。

思考：手机的天线在发射电磁波（变化电场磁场互相激发向外传），电磁波被收音机收到就变成了干扰声。你的手机每秒都在做麦克斯韦 1865 年预言的事——电磁波不是课本概念，它正从你口袋里往外冒。

练一练

- 变化的电场为什么能产生磁场？两者如何“接力”传播？
- 为什么说“光就是电磁波”？
- 按频率从低到高排列电磁波谱，并各举一应用。
- 电磁波和机械波有什么根本区别？

参考答案：1. 麦克斯韦假设：变化的电场产生磁场（对称于法拉第定律），变化的磁场产生电场——两者互相激发，一环扣一环向外传播。2. 麦克斯韦算出电磁波速度恰好等于光速，断言光是电磁波；赫兹实验证实。3. 无线电波（广播）→ 微波（微波炉）→ 红外（遥控）→ 可见光 → 紫外线（消毒）→ X 射线（拍片）→ γ 射线（放疗）。4. 电磁波不需介质（真空中可传、速度 c ），机械波需介质（声波、水波）；电磁波是横波。

想一想（概念边界）：电磁波在真空中能传播吗？它和声波（机械波）的根本区别是什么？

提示：能——电磁波不需要介质（真空速度 c ），声波必须靠空气等介质传播。根本区别：电磁波是“变化的电场磁场互相激发”向外传，机械波是“介质质点振动”向外传。

本章注释

〔注 1〕麦克斯韦（James Clerk Maxwell, 1831–1879）一生只活了 48 岁，但他在 1865 年用四个方程统一了电磁学——从那时起，“电”“磁”“光”这三个词在物理学里就是一件事。他没来得及看到自己的预言被证实：1879 年他去世时，电磁波还只是纸上的数学；9 年后（1888 年），德国人赫兹用火花放电实验真正“造”出了电磁波。有个流传甚广的段子：赫兹的实验被问到“有什么用”，他答“没什么用”——和法拉第当年被问“电磁感应有什么用”的回答如出一辙。今天 Wi-Fi、手机、卫星通信全是“赫兹那个没用的实验”的后代，频率单位“赫兹”以他命名。而麦克斯韦本人出身贵族、是剑桥数学天才，却谦逊到把自己的方程全部归功于法拉第的图像——“我只是给法拉第的力线配上了数学”。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
变化的磁场	产生电场	法拉第定律推广
变化的电场	产生磁场	麦克斯韦补充（对称性）
电磁波	互相激发传播	速度 = c ，不需介质
光	就是电磁波	麦克斯韦预言、赫兹证实
电磁波谱	频率排序	无线电 → 微波 → 红外 → 可见 → 紫外 → X → γ
波长频率	波速公式	$c = \lambda f$

你该记住的流程：读电磁波题 → (1) 判“光/无线电/X 射线”都是电磁波 → (2) 波速 $c = \lambda f$ 三量互推 → (3) 频率排序：从低到高记“无微红可紫 X 伽马” → (4) 频率越高能量越高 → (5) 区分电磁波（不需介质）与机械波（需介质）。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选）某 LC 振荡电路，电感 $L = 40\ \mu\text{H}$ 、电容 $C = 100\ \text{pF}$ ，其振荡频率约为？

A. 约 2.5 kHz B. 约 25 kHz C. 约 2.5 MHz D. 约 25 MHz

答案 C。解析： $f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{40\times10^{-6}\times100\times10^{-12}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{4\times10^{-15}}} = \frac{1}{2\pi\times6.3\times10^{-8}} \approx 2.5\times10^6\ \text{Hz} = 2.5\ \text{MHz}$ 。**LC 振荡两公式：** $T = 2\pi\sqrt{LC}$ 、 $f = 1/T$ ；数量级判断技巧：L 微亨、C 皮法组合，频率落在 MHz 量级（收音机调谐就是这个范围）。

章末检测（基础★/提升★★/探究★★★）

基础

- LC 振荡电路中，电容与电感分别“扮演”什么角色（类比弹簧振子）？
- LC 振荡电路的周期公式？

- 电磁波的传播需要介质吗？
- 光与电磁波有什么关系？
- 电磁波谱按频率从低到高的顺序？
- 微波炉加热食物利用了什麼原理？

提升

- LC 电路 $L = 10^{-3} \text{ H}$ 、 $C = 10^{-9} \text{ F}$ ，振荡周期多大？
- 波长 3 m 的电磁波（无线电波），频率多大（ $c = 3 \times 10^8$ ）？
- 可见光波长 500 nm 对应频率多大？

探究

- 收音机调台“旋钮”实际在调什麼？用 LC 电路解释。

参考答案：1. 电容像弹簧（存电场能 = 势能）、电感像质量（存磁场能 = 动能）。2. $T = 2\pi\sqrt{LC}$ 。3. 不需要——电磁波真空中也能传播（与机械波根本不同）。4. 光就是电磁波（麦克斯韦预言 + 赫兹实验证实），只是频率不同。5. 无线电波 → 微波 → 红外 → 可见光 → 紫外 → X 射线 → γ 射线。6. 微波频率与食物中水分子转动频率接近（2.45 GHz），水分子共振吸收微波能量——微波炉“专烤水分子”。7. $T = 2\pi\sqrt{10^{-3} \times 10^{-9}} = 2\pi \times 10^{-6} \approx 6.28 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。8. $f = c/\lambda = 3 \times 10^8/3 = 10^8 \text{ Hz} = 100 \text{ MHz}$ 。9. $f = c/\lambda = 3 \times 10^8/(500 \times 10^{-9}) = 6 \times 10^{14} \text{ Hz}$ 。10. 收音机调台调节可变电容（改变 C），改变 LC 电路的固有频率——当固有频率与某电台载波频率相同时发生谐振，该台信号最强——“调台”就是在调 LC 振荡频率。

第十九章 传感器

手机屏幕是怎么知道你的手指碰了哪里的？电梯门又是怎么“看见”有人要进，然后及时停住的？——这些“电子感官”把温度、压力、光照等物理量翻译成电信号，它们叫**传感器**。

你身上其实有一个天然的“传感器系统”：皮肤感觉到烫、眼睛看见光、耳朵听见声，然后把信号传给大脑、做出反应。传感器就是给机器装上的“感官”——把温度、压力、光照等物理量变成电信号。手机里的光线传感器、电梯的光幕、汽车的气囊触发，全是传感器。这一章科普向（高考占比小），认识几种敏感元件的工作原理。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 理解传感器的组成与工作原理；(2) 认识常见敏感元件（光敏/热敏/力敏）；(3) 会分析传感器在自动控制中的应用。

19.1 敏感元件

传感器的核心是**敏感元件**——一种“一碰就变”的元件：外界物理量一变，它的电阻（或电容、电压）就跟着变。常见的有四类：

- **电阻式：**热敏电阻（温度升高电阻变化，负温度系数电阻随温度升高减小）、光敏电阻（光照增强电阻减小）；

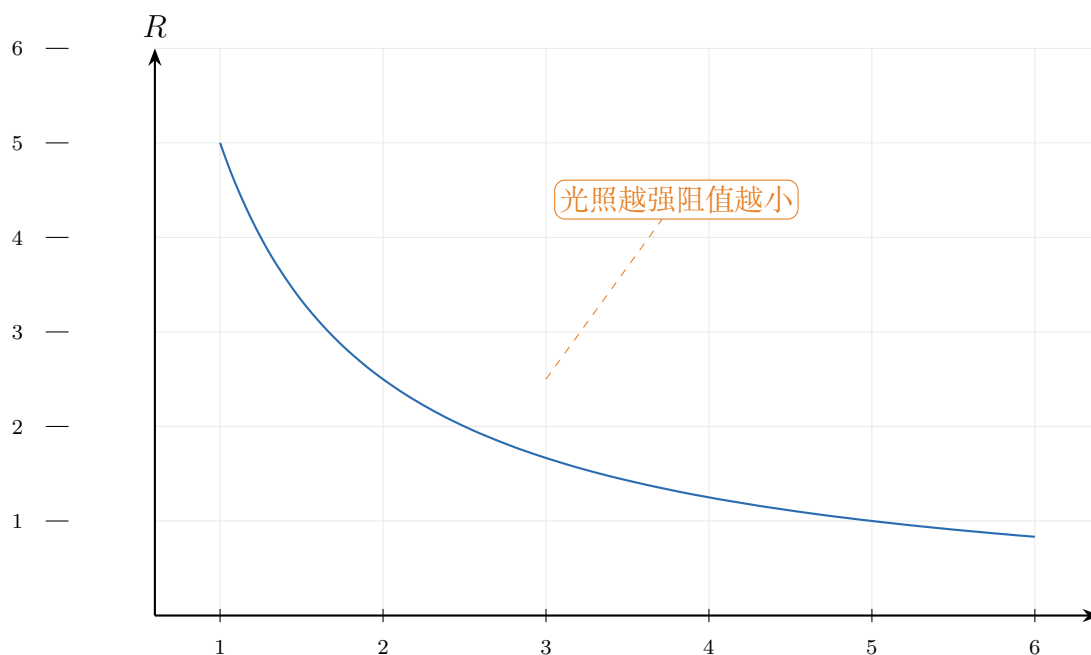


图 19.1: 光敏电阻：光照增强，电阻减小

- **电容式**：极板间距/面积变化 → 电容变化（如触摸屏）；
- **霍尔式**：半导体在磁场中产生霍尔电压（测磁场）。

为什么光敏电阻“遇光变小”？因为光照让半导体里的载流子（能导电的电子/空穴）变多——光越强，能跑的电越多，导电能力越强，电阻自然越小。热敏电阻同理：温度高，载流子活跃，电阻变小。一句话记法：**光敏随光、热敏随温、电容随间距、霍尔随磁场**——问“它随什么变”，就是考你认不认识这个元件。

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？

想一想：

- 问：光敏电阻的“光敏”指什么？
- 想：光照增强 → 载流子增多 → 导电能力增强 → 电阻减小。
- 问：这个特性怎么用？
- 想：做成光控开关——天黑了电阻大、电流小，控制电路让路灯亮；天亮电阻小，路灯灭。
- 问：热敏电阻呢？
- 想：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）。

详细答案：答：光敏电阻受光照时载流子增多、电阻减小；利用它做光控电路（自动路灯天黑亮天亮灭）。热敏电阻随温度变化电阻改变，做温控电路。

变式提醒：传感器把非电学量（光、热、力、磁）转成电学量（电阻、电压、电流）；判断敏感元件类型：问“随什么变”——光敏随光照、热敏随温度、电容式随间距/面积、霍尔式随磁场。

19.2 传感器系统

单个敏感元件还不够，传感器是怎么“干活”的？完整链条：传感器 → 放大电路 → 执行器（显示/报警/控制）。例如：烟雾报警器（光电传感器 → 报警）、自动路灯（光敏电阻 → 控制开关）。

链条的每一步都有分工：敏感元件负责“感觉”（物理量 → 电学量），转换电路负责“翻译”（电阻变化 → 电压变化），放大电路负责“放大”（信号太弱推不动执行器），执行器负责“动手”（亮灯、报警、开门）。就像你的眼睛看到光、大脑处理信号、手做出反应——传感器系统是机器的“感官 + 大脑 + 手脚”。

例题 19.2

画出自动路灯的“传感 → 控制”逻辑。

想一想：

- 问：自动路灯的“感觉器官”是什么？
- 想：光敏电阻——感知光照强弱。
- 问：怎么把“天黑”变成“开灯”？
- 想：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 → 控制电路动作 → 继电器闭合 → 路灯亮。
- 问：关键是什么？
- 想：**把物理量变化转成电路参数变化**，再由电路状态控制执行器——传感器的完整链条。

详细答案：答：光敏电阻感知光照（天黑阻值增大）→ 桥式电路输出电压变化 → 放大电路 → 继电器吸合 → 路灯亮。链条：敏感元件 → 转换电路 → 放大 → 执行器。

变式提醒：传感器题套路：物理量 → 电学量 → 控制电路 → 执行器；高考常给“光控/温控/力控”电路图，问某个物理量变化时输出怎么变——从敏感元件特性推起，一路推到执行器。

传感器离你有多近？你的手机里装着几十个：光线传感器（自动亮度）、加速度计（计步/横竖屏）、陀螺仪（游戏转向）、磁力计（指南针）、距离传感器（打电话时熄屏防误触）……电

梯门靠光幕“看见”挡门的人，汽车的碰撞传感器 0.01 秒内决定要不要弹安全气囊，自动售货机靠红外线“看见”你伸手取货。每一样都是“物理量 → 电学量 → 动作”这条链。〔注 1〕

动手试试（材料：一部智能手机）

先猜：手机屏幕的亮度会自己变吗？它怎么知道周围亮不亮？

动手：打开手机“自动亮度”，用手盖住屏幕上方（光线传感器位置），再看屏幕亮度变化；再把手拿开。

观察：屏幕自动变暗了！手一拿开又变亮。

思考：手机里有个“电子感官”——光线传感器（光敏元件），把光照强弱变成电信号，电路再据此调亮度。这就是传感器的完整链条：物理量（光）→ 电学量（电阻/电压）→ 控制电路 → 执行（调亮度）。你的手机里装着几十个这样的“感官”。

练一练

- 光敏电阻、热敏电阻的电阻随什么变化？
- 自动路灯为什么天黑自动亮？（画出传感 → 控制逻辑）
- 霍尔传感器能测量什么物理量？
- 传感器的完整链条是什么？

参考答案：1. 光敏电阻随光照增强减小；负温度系数热敏电阻随温度升高减小。2. 天黑 → 光弱 → 光敏电阻阻值大 → 控制电路动作 → 继电器闭合 → 路灯亮。3. 磁场（磁感应强度）——半导体在磁场中产生霍尔电压，电压大小反映磁场强弱。4. 敏感元件（物理量 → 电学量）→ 放大电路 → 执行器。

想一想（概念边界）：传感器的作用用一句话说是什么？光敏电阻、热敏电阻分别把什么物理量变成了什么？

提示：一句话：把非电学量变成电学量（电阻/电压/电流）。光敏电阻把“光照强弱”变成电阻大小（光强 → 阻小）；热敏电阻把“温度高低”变成电阻大小（温高 → 阻小）。

本章注释

〔注 1〕传感器的历史比你想象的久：1821 年，德国物理学家塞贝克发现“两种不同金属接成回路，两端温度不同会产生电流”——这就是热电偶，人类第一个“温度传感器”，至今还在用（工业测温的主力）。1876 年贝尔发明电话，送话器把声音振动变成电流——第一个“声传感器”。20 世纪半导体技术让传感器微型化，今天手机里几十个传感器大多做成了指甲盖大小的芯片（MEMS 微机电系统）：一个比头发丝还细的硅片结构，既能当加速度计（测你走了多少步）又能当陀螺仪（测你手机转没转）。“电子感官”的进化史，就是物理量 → 电学量这条链不断变小的历史。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
传感器	电子感官	物理量 → 电学量
光敏电阻	光照强电阻小	自动路灯
热敏电阻	温度高电阻小 (NTC)	温控报警
电容式	间距/面积变电容变	触摸屏
霍尔式	磁场产生电压	测磁场
传感器系统	链条	敏感元件 → 放大 → 执行器

你该记住的流程：读传感器题 → (1) 判敏感元件类型（光/热/力/磁）→ (2) 物理量变化 → 电阻/电压怎么变 → (3) 电路状态怎么变 → (4) 执行器动作 → (5) 回读题目问什么，对应链条某环节。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 关于传感器的说法，下列说法正确的是？

- A. 传感器是把电学量转换为非电学量的装置
- B. 光敏电阻的阻值随光照增强而增大
- C. 热敏电阻（负温度系数）的阻值随温度升高而减小
- D. 干簧管是利用光电效应工作的

答案 C。解析：A 错——传感器是把**非电学量（光、热、力、磁）转换为电学量**（电压、电流、电阻）的装置，方向说反了；B 错——光敏电阻随光照增强**阻值减小**（光照越强导电性越好）；C 对——负温度系数热敏电阻随温度升高阻值减小；D 错——干簧管是**磁控开关**（磁场使簧片吸合），不是光电效应。**传感器题一句话：先把“物理量变化”翻译成“电阻变化”，再用欧姆定律算电学量**——光敏随光照减、热敏（负温）随温度减、力敏随压力变。

章末检测（基础★/提升★★/探究***）

基础

- 传感器的基本组成（三部分）？
- 光敏电阻的特性？
- 热敏电阻的特性（负温度系数）？
- 电容式传感器利用什么变化来感知？
- 传感器的输出一般是电学量还是非电学量？
- 手机里至少有哪些传感器（举例 3 个）？

提升

- 光敏电阻在光照增强时阻值如何变化？电路中的电流如何变化？
- 热敏电阻（NTC）温度升高，阻值和电流如何变化？
- 电梯光幕用什么传感器？原理？

探究

- 设计“光控路灯”电路：用光敏电阻和继电器实现“天黑灯亮”。

参考答案：1. 敏感元件（感受被测量）+ 转换元件（转换为电学量）+ 信号处理电路。2. 光照增强阻值减小（光电导效应）。3. 温度升高阻值减小（NTC 负温度系数）。4. 极板间距/正对面积/介电常数变化引起电容变化。5. 电学量（电压、电流、电阻、电容等）。6. 加速度计（计步）、陀螺仪（方向）、光线传感器（自动亮度）、霍尔传感器（指南针）、指纹/压力传感器等。7. 阻值减小，电路中电流增大（光越强电流越大）。8. 阻值减小，电流增大（温度越高电流越大）。9. 光电传感器（红外对射）——电梯门两侧红外发射/接收阵列，遮挡时输出变化触发防夹。10. 光敏电阻与继电器线圈串联（或经放大电路），天暗时光敏电阻阻值大、电路电流小 → 控制电路触发继电器吸合 → 路灯通电；天亮时阻值小 → 继电器释放 → 灯灭——“光控路灯”。

第二十章 从课本到现代科技：电磁学的拓展应用

把书合上之前，先回答一个问题：你每天用的手机无线充电、坐的磁悬浮列车、体检拍的 CT——它们身上各藏了这本书的哪条定律？

这一章是“彩蛋章”——把前 19 章的定律接上真实世界。四个大主题、十二个拓展应用，都是物理教材的经典内容，也是新高考“情境题”的素材库。不要求背，要求**眼熟**：看到静电复印想到库仑力，看到无线充电想到互感，看到霍尔推进器想到洛伦兹力——你就把课本和世界连起来了。

本章学习目标：学完本章，你能：(1) 把静电、粒子加速、磁悬浮、无线输电等科技应用对号入座到课本定律；(2) 建立“情境题 → 课本定律”的迁移思维；(3) 了解电磁学前沿（霍尔推进器、粒子探测器、分数电荷）。

20.1 静电应用：从复印机到除颤器

静电复印机：复印机怎么把纸上的字“印”到另一张纸上？心脏是一根涂有光导材料（硒）的“光导鼓”。硒有个“开关”特性：黑暗中几乎不导电（绝缘体），被光照后变成导体——这个特性是整个复印过程的核心。完整流程五步：(1) **充电**：黑暗中给鼓面均匀充上静电荷；(2) **曝光**：光照原稿，白纸部分反光打到鼓面，鼓面该区域导电、电荷跑掉；字迹部分不透光、电荷保留——鼓面上形成一幅“电荷画像”；(3) **显影**：带负电的墨粉被库仑力吸到带正电的画像区（异号相吸）；(4) **转印**：纸上充上更强的异号电荷，把墨粉“抢”过去；(5) **定影**：加热让墨粉熔化粘在纸上。

量级感受：一个墨粉颗粒带电荷约 $q = 10^{-12} \text{ C}$ ，鼓面附近电场约 $E = 10^5 \text{ V/m}$ ，受电场力 $F = qE = 10^{-7} \text{ N}$ ；颗粒重力约 $5 \times 10^{-12} \text{ N}$ ——**电场力比重力大 4 个数量级（约两万倍）**，这就是“库仑力让墨粉搬家”的底气。

静电除尘：发电厂烟囱里并排立着电离极（细金属线）和收集极（金属板）。电离极上加几万伏高压，细线附近电场强到击穿空气，气体分子被电离；离子碰到烟尘颗粒，让烟尘带上电荷；带电烟尘受库仑力 $F = qE$ ，被“赶”到收集极沉积下来。

量级感受：某除尘器 $E = 5 \times 10^5 \text{ V/m}$ ，一颗烟尘带电荷 10^{-10} C ，电场力 $5 \times 10^{-5} \text{ N}$ ，重力约 10^{-6} N ——**电场力比重力大 50 倍**，PM2.5 这样细小到重力抓不住的颗粒也能被除掉。

范德格拉夫起电机：科技馆里摸一下金属球、头发就竖起来的那个装置，就是范德格拉夫起电机。橡胶传送带把电荷源源不断“搬”到空心的金属球壳上。关键在**静电平衡**：电荷只能分布在外表面，空腔内场强为零——所以球壳可以把电荷无限堆上去。头发会竖起来，是因为头发接触球壳后带上同号电荷，**同号相斥**、一根根张开——静电“同性相斥”的现场演示。

闪电与避雷针：云层内冰晶不断摩擦，云的上部积正电、下部积负电，云与地之间形成上亿伏的电位差。当场强超过空气击穿值（约 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ ），空气被“撕”开成离子、瞬间导通——这就是闪电，电流可达 10^4 A 量级。**避雷针不是“挡住”雷，是“引导”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，云层电荷沿这条低电阻通道缓慢、持续地导入大地——把瞬间爆炸变成涓涓细流。

心脏除颤器：心室纤颤时心脏乱跳，抢救的办法是“电击重启”——除颤器。它的核心就是电容器：先给电容充上高压，储存 $E = \frac{1}{2}CU^2$ 的能量，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。临床除颤能量正是 $200\text{--}400 \text{ J}$ （体外）——**电压高、时间短、电流路径专门设计**，所以能把心脏“重启”而不烧伤。

20.2 粒子物理：加速、发光与探测

粒子加速器：

- **直线加速器：**一串加速管，带电粒子每过一根管子被电场“踢一脚”—— $qU = \Delta E_k$ 连续用 n 次，出射动能 $E_k = nqU$ ；
- **回旋加速器**（第 11 章已详讲）：最大动能 $E_{k\max} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$ 只由 B 、 R 、 q/m 决定，与加速电压无关——电压再大只是少转几圈。

例题 20.1

质子经 10 级加速管、每级电压 $U = 100 \text{ kV}$ 加速，末动能多大？速度多大？

想一想：

- 问：直线加速器末动能怎么算？
- 想： $E_k = nqU = 10 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^5 = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ （约 1 MeV ）。
- 问：速度呢？
- 想： $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-13}}{1.67 \times 10^{-27}}} \approx 1.38 \times 10^7 \text{ m/s}$ （光速的 4.6%）。

详细答案：解： $E_k = nqU = 1.6 \times 10^{-13} \text{ J}$ ； $v = \sqrt{\frac{2E_k}{m_p}} \approx 1.38 \times 10^7 \text{ m/s}$ 。答：末动能约 1 MeV ，速度约光速的 4.6%。

变式提醒：要加到接近光速（ $0.99c$ ）就绕不开相对论效应——回旋加速器约 30 MeV 之后周期随速度漂移，得改用同步加速器（LHC 让质子沿 27 公里环形隧道跑，撞出希格斯玻色子）。

同步辐射光源：带电粒子在磁场中做圆周运动 = 时刻在加速（向心加速），所以**一路转弯一路发光**——这就是同步辐射。为什么用电子不用质子？电子比荷大，同 B 、 r 下速度高（ $v = \frac{qBr}{m_e}$ ），容易冲到接近光速，转弯辐射才够亮。上海光源、北京高能同步辐射光源都靠它给材料“拍 X 光片”——蛋白质结构、芯片内部，全靠电子转弯时“随手”发的光。

20.3 磁悬浮与航天推进

磁悬浮列车：悬浮两种路线：**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）**——车上装超导磁体，列车一跑，轨道线圈感应出电流（楞次定律），感应电流的磁场反过来排斥磁体，速度越快斥力越大。注意：斥力型静止时没有感应电流、悬浮不起来，所以起步要用轮子——这既是考点（楞次定律“来拒去留”），也是常识。推进用**直线电机**：电流在轨道里形成向前移动的磁场“波”，车体被行波磁场推着前进——本质就是安培力 $F = BIL$ ，只是把“转圈”改成了“直走”。

20.4 无线输电：从特斯拉线圈到充电垫

无线充电：手机往垫上一放就充电，凭什么？充电垫（初级线圈）通交流电，变化的磁场穿透手机里的次级线圈，感应出电动势——**互感原理的日常版**。每天把手机放上充电垫，都在做一次“磁铁插线圈”实验，只不过“磁铁”换成了通交流电的线圈。为什么必须用交流电？直流电产生的磁场恒定，磁通量不变，次级线圈什么也感应不出来。所以手机必须贴紧充电垫：**距离一远，穿过次级线圈的磁通量锐减，感应电动势骤降，充电就慢了。**〔注 1〕

霍尔推进器：我国“天宫”空间站用它控制姿态和轨道。原理四步：(1) **电离**：把氙气电离成氙离子和电子；(2) **环形通道**：径向磁场让电子绕着圈转（洛伦兹力），转圈的电子不断撞出更多氙离子，同时把电子困住；(3) **轴向电场加速离子**：氙离子在强电场中加速喷出（动能定理）——磁场对离子只改方向、不改速度大小，加速靠的是电场；(4) **反作用力推进**：离子以每秒几十公里喷出，飞船获得反向推力（动量守恒）——喷出速度比化学燃料高一个量级，所以同样推力省约 10 倍燃料。

例题 20.2

氙离子 $q = e$ ，经电压 $U = 1000 \text{ V}$ 加速，氙原子质量 $m_{Xe} \approx 2.2 \times 10^{-25} \text{ kg}$ 。喷出速度多大？

想一想：

- 问：加速靠什么？用什么公式？
- 想：电场加速，动能定理 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ——磁场只转弯不做功。
- 问：代入算。

- 想： $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_{Xe}}} = \sqrt{\frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 1000}{2.2 \times 10^{-25}}} \approx 3.8 \times 10^4 \text{ m/s} = 38 \text{ km/s}$ ——每秒几十公里，跟实际对上了。

详细答案：解： $v = \sqrt{\frac{2eU}{m_{Xe}}} \approx 3.8 \times 10^4 \text{ m/s}$ 。答：喷出速度约 38 km/s。

变式提醒：若每秒钟喷出 10 mg 氙（质量流量 $\dot{m} = 10^{-5} \text{ kg/s}$ ），推力 $F = \dot{m}v = 10^{-5} \times 3.8 \times 10^4 \approx 0.38 \text{ N}$ ——几牛顿的推力，长期累积就能让空间站完成大范围轨道机动。

粒子探测器：用磁场“称”出粒子：高能物理实验（如 LHC）怎么知道撞出了什么粒子？靠探测器里的磁场：带电粒子在磁场中偏转，半径 $r = \frac{mv}{qB}$ ——**测出径迹的弯曲半径，就测出了粒子的动量**。动量对上了、电荷对上了，粒子身份就验明了；中性粒子不偏转，只能靠它衰变成的带电粒子间接推断。磁场给电荷画了一个圆弧，弧的半径就是粒子的“身份证”。

电荷的分数：最小单位不是 e（★拓展，了解即可）：第 1 章说电荷量是 e 的整数倍——这话在 1960 年代以后得加个注脚：**夸克带 $\pm\frac{1}{3}e$ 、 $\pm\frac{2}{3}e$ 的分数电荷**。拼回去验证：质子由两个上夸克和一个下夸克组成（uud）： $+\frac{2}{3}e + \frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e = +e$ ——正好一个质子电荷；中子（udd）： $+\frac{2}{3}e - \frac{1}{3}e - \frac{1}{3}e = 0$ ——正好不带电。为什么观察不到自由夸克？夸克被强相互作用“锁”在强子里（**色禁闭**）——单个夸克永远跑不出来，所以实验上看到的电荷量仍是 e 的整数倍，分数电荷只是强子内部的“结构账本”。

想一想（概念边界）：无线充电为什么必须用交流电？如果用直流电，手机能充上电吗？

提示：不能——感应电动势只看磁通量变化，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。所以无线充电用高频交流（Qi 标准 100-200 kHz）：频率越高感应越强。

本章注释

〔注 1〕“无线输电”是人类 130 年前就做过的梦：1891 年，特斯拉（就是第 16 章电流之战那位）在纽约做实验，用两个线圈隔空点亮了几米外的灯泡——他相信电能像无线电波一样“隔空传送”，甚至计划建一座全球无线输电塔，但因为资金耗尽而失败。他当年点亮灯泡用的“特斯拉线圈”，原理和今天的手机无线充电一模一样：初级线圈通高频交流电，次级线圈靠互感感应出电压。今天你的手机充电垫只是把特斯拉的线圈缩小了、频率提高了——他要是看到你随手把手机放上充电垫，应该会露出“我说过吧”的表情。

你这一章攒下了这些武器

看到	想到	用
静电复印	光电导开关 + 库仑力	电荷画像、异号相吸
静电除尘	尖端击穿电离	带电烟尘被电场“抓”
范德格拉夫	静电平衡	电荷外表面、尖端放电
避雷针	尖端引导	不是挡雷是引雷
除颤器	电容储能	$E = \frac{1}{2}CU^2$ ，毫秒级放电
加速器	电场加速	直线 nqU 、回旋 $q^2B^2R^2/2m$
同步辐射	转弯发光	电子比荷大
磁悬浮	楞次定律/安培力	斥力型起步用轮子
无线充电	互感	交流才行、贴紧才快
霍尔推进器	动能定理 + 动量守恒	氙离子喷出反推
粒子探测器	半径辨动量	$r = mv/qB$
分数电荷	夸克	$uud=+e$ 、 $udd=0$ ，色禁闭

你该记住的流程：读情境题 → (1) 找装置背后的“课本定律”（复印 → 库仑、充电 → 互感、推进 → 动量）→ (2) 把情境转成熟悉的模型（除颤器 → 电容储能、加速器 → 动能定理）→ (3) 套公式算量级 → (4) 回挂课本章节 → (5) 眼熟即可，不要求背。

真题直击（改编自近年高考考查方式）（单选） 关于现代科技中的电磁学应用，下列说法正确的是？

- A. 电磁弹射利用的是静电引力
- B. 无线充电利用互感原理，必须用直流电
- C. 霍尔推进器利用磁场加速离子、电场转弯离子
- D. 磁悬浮列车（超导电动型）起步时斥力为零，需要轮子辅助

答案 D。解析：A 错——电磁弹射利用**安培力**（通电导体在磁场中受力），福建舰弹射舰载机就是它；B 错——无线充电靠**互感**，**必须用交流电**（直流产生恒定磁场、磁通量不变，次级感应不出电动势）；C 错——霍尔推进器是**电场加速离子、磁场让电子转弯**（磁场对离子只改方向不做功，加速靠电场），说反了；D 对——超导电动悬浮（斥力型）靠感应电流产生斥力，静止时没有感应电流、悬浮不起来，起步必须用轮子。科技应用题的读法：**先定位课本定律**（弹射 = 安培力、充电 = 互感、推进 = 动能定理、磁浮 = 楞次定律），再逐项核对“谁做功、谁转弯”。

章末检测（基础★/提升★★/探究***）

基础

- 静电复印机的“光导鼓”利用了什么材料特性？
- 静电除尘中烟尘为什么会被“抓”走？
- 避雷针是“挡雷”还是“引雷”？原理？
- 除颤器的核心储能元件是什么？
- 磁悬浮列车（斥力型）为什么起步要用轮子？

- 无线充电为什么必须用交流电？

提升

- 直线加速器中粒子经 n 级电压 U 加速，末动能多大？
- 霍尔推进器喷出氙离子的能量来源是什么力做功？
- 为什么夸克带分数电荷却观察不到自由夸克？

探究

- 电磁弹射舰载机的原理是什么？用安培力原理解释。

参考答案：1. 光导材料（硒）——黑暗中绝缘、被光照后导电的“开关”特性。2. 烟尘被电离的离子碰撞带上电荷，受库仑力 $F = qE$ 被电场“赶”到收集极。3. 引雷——尖端电荷密度大，先电离形成导电通道，把云层电荷缓慢导入大地，化瞬间爆炸为涓涓细流。4. 电容器（先充高压储存 $E = \frac{1}{2}CU^2$ ，瞬间放电“重启”心脏）。5. 斥力型靠感应电流产生斥力，静止时无感应电流、悬浮不起来，所以起步用轮子。6. 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——必须用交流（变化的磁场）。7. $E_k = nqU$ （每级踢一脚， n 次累加）。8. 电场力（动能定理 $qU = \frac{1}{2}mv^2$ ）——磁场只改变方向不做功。9. 夸克被强相互作用“锁”在强子里（色禁闭），单个夸克永远无法脱离，实验上只能看到 e 的整数倍。10. 舰载机下方滑块通电，在强磁场中受安培力 $F = BIL$ 沿轨道加速——比蒸汽弹射更快更可控；能量：电能 $\rightarrow$ 动能。

附录 A 电磁学核心公式速查

板块	公式	适用
静电场	$E = F/q$ 、 $E = kQ/r^2$	场强定义 / 点电荷
静电场	$U = Ed$	匀强电场 (d 沿电场方向)
静电场	$C = Q/U$ 、 $C = \epsilon_r S / 4\pi k d$	电容定义 / 平行板
静电场	$qU = \frac{1}{2}mv^2$	带电粒子加速
静电场	$y = qUL^2 / 2mdv_0^2$	偏转类平抛
电路	$I = q/t$ 、 $I = neSv$	电流定义 / 微观式
电路	$R = \rho L / S$ 、 $I = U / R$	电阻 / 欧姆定律
电路	$I = E / (R + r)$ 、 $U = E - Ir$	闭合电路
电路	$P = UI = I^2 R$ (纯电阻)	电功率
电路	$Q = I^2 R t$	焦耳定律
磁场	$B = F / IL$	磁感应强度
磁场	$F_A = BIL \sin \theta$	安培力
磁场	$F_L = qvB \sin \theta$	洛伦兹力
磁场	$r = mv / qB$ 、 $T = 2\pi m / qB$	圆周运动黄金公式
电磁感应	$\Phi = BS$	磁通量
电磁感应	$E = n\Delta\Phi / \Delta t$	法拉第定律
电磁感应	$E = BLv$	动生电动势
电磁感应	$v_{max} = FR / B^2 L^2$	滑轨终极速度
电磁感应	$q = n\Delta\Phi / R$	电量通式 (与快慢无关)
交流电	$e = E_m \sin \omega t$ 、 $U = U_m / \sqrt{2}$	正弦交流 / 有效值
交流电	$U_1 / U_2 = n_1 / n_2$ 、 $P_1 = P_2$	理想变压器
交流电	$P_L = I^2 R_L$	输电线损

附录 B 读题即解题：电磁学关键词速查

做题卡壳时先翻这张表。读到关键词 → 立刻反应模型 → 选方法。每一条都是全书正文反复讲过的“底牌”：

第一编静电场（第 1–5 章）：

读到	立刻反应	首选方法
从静止释放 / 经电压加速	匀加速（能量转化）	动能定理 $qU = \Delta E_k$
逆着电场射入	匀减速，可能减速到零再反向	动能定理，时间对称
垂直射入匀强电场	类平抛	水平匀速 + 竖直匀加速
恰好平衡 / 缓慢移动	受力平衡（临界）	力的合成与分解
等量同号/异号电荷	电荷组场强电势分布	连线中点/中垂线结论
电势、电势能变化	电场力做功与路径无关	$W = qU$ 、 $E_p = q\varphi$
电容器/静电计	动态分析	先判 Q 定还是 U 定，三步法
φ -x / E-x 图像	图像读法	斜率得 E、面积得 U

第二编电路（第 6–8 章）：

读到	立刻反应	首选方法
滑动变阻器滑片移动	动态电路	三步法：总阻 → 总流 → 路端
功率最大/取什么值	最大功率	等效内阻法 $R = r_{\text{等}}$
电动机/非纯电阻	电能 ≠ 焦耳热 $ UI = P_{\text{机}} + I^2 R $	
表头改装	电表改装	扩流并联、扩压串联
欧姆表/多用电表	欧姆挡	选挡 → 调零 → 读数 → OFF
测电动势和内阻	实验	U-I 图像：截距 E、斜率 -r

第三编磁场（第 9–11 章）：

读到	立刻反应	首选方法
垂直射入匀强磁场	匀速圆周	$r = mv/qB$ 、 $T = 2\pi m/qB$
恰好从边界射出	临界问题	找圆心、定半径、几何相切
速度选择器	二力平衡	$v = E/B$ ，与电荷无关
质谱仪	半径分辨质量	$r = \frac{1}{B} \sqrt{2mU/q}$
回旋加速器	最大动能	$E_{k\text{max}}$ 与 U 无关
重力 + 电场 + 磁场	叠加场	等效重力场法

第四编电磁感应（第 12–15 章）：

读到	立刻反应	首选方法
磁通量变化	感应电动势	$E = n\Delta\Phi/\Delta t$
流过回路的电荷量	电量通式	$q = n\Delta\Phi/R$ ，与快慢无关
导体棒切割磁感线	动生电动势	$E = BLv$ ，五步回路法
感应图像题	图像读法	先判斜率（变不变）再判方向
阻碍/来拒去留	楞次定律	能量守恒视角
自感/断电自感	电感惯性	电流不能突变

第五编交流电与电磁波（第 16–19 章）：

读到	立刻反应	首选方法
有效值/热量/电表读数	交流有效值	$U = U_m/\sqrt{2}$
变压器	匝数比定电压	$U_1/U_2 = n_1/n_2$
远距离输电	线损	$P_{\text{损}} = I^2 R$ ，升压降损
电感/电容对交流	感抗容抗	$X_L = 2\pi fL$ 、 $X_C = 1/(2\pi fC)$
电磁波/光速	麦克斯韦	波长频率： $c = \lambda f$

附录 C 学生必做实验指导（电磁学）

实验一观察电容器的充、放电现象

目的：观察电容器的充电、放电过程，理解电容的储能特性。

原理： $C = Q/U$ 。充电时电流由电源流入电容，放电时电流反向流出；充放电电流都随时间衰减，快慢由 $\tau = RC$ 决定。

器材：大容量电容器（如 1000 μF 电解电容）、电阻（约 1 $\text{k}\Omega$ ）、电源（几伏直流）、电流表（或两个反接的发光二极管）、开关、导线。

步骤：1. 电容与电阻、电源、开关串联，闭合开关充电，观察电流表指针偏转方向与衰减；2. 断开电源，将电容两端通过电阻短接放电，观察指针反向偏转与衰减；3. 用两只反接的发光二极管代替电流表，充电与放电各点亮一只，方向一目了然。

数据处理：定性记录：充电电流先大后小、最终为零；放电电流反向、同样衰减； RC 越大过程越慢。

误差与注意：电解电容有极性，接反会损坏；放电前必须确认已断开电源；不要用手触碰电容两极。

实验二长度的测量及其测量工具的选用

目的：练习使用刻度尺、游标卡尺、螺旋测微器，学会按精度选用工具。

原理：游标卡尺精度由分度数决定（10 分度 0.1 mm、20 分度 0.05 mm、50 分度 0.02 mm）；螺旋测微器精度 0.01 mm，可估读到 0.001 mm。

器材：待测物体（金属圆柱、小钢球等）、刻度尺、游标卡尺、螺旋测微器。

步骤：1. 刻度尺粗测（估读到毫米下一位）；2. 游标卡尺：主尺读数 + 游标上第 n 条与主尺对齐的刻度 $\times$ 精度；3. 螺旋测微器：主尺（含半毫米刻度）读数 + 可动刻度读数 $\times$ 0.01 mm（估读一位）；4. 每个位置测 3 次取平均。

数据处理：同一物体用三种工具测量并比较有效数字位数（工具精度决定有效数字）。

误差与注意：使用前检查零刻度（螺旋测微器要记录零误差并修正）；读数时视线与刻度垂直；游标卡尺不需估读，螺旋测微器必须估读。

实验三测量金属丝的电阻率

目的：测定金属丝的电阻率 ρ 。

原理： $R = \rho \frac{L}{S}$ ，得 $\rho = \frac{RS}{L} = \frac{\pi d^2 R}{4L}$ (d 为金属丝直径)。

器材：金属丝、米尺、螺旋测微器、电压表、电流表、滑动变阻器、电源、开关、导线。

步骤：1. 螺旋测微器在金属丝不同位置测直径 d (3 次取平均)；2. 米尺测接入电路的有效长度 L ；3. 金属丝电阻较小，用**外接法**测电阻，滑动变阻器可用限流接法；4. 移动滑片测多组 U 、 I 。

数据处理：作 U - I 图，斜率即 R ；代入 $\rho = \pi d^2 R / 4L$ 计算。

误差与注意：直径 d 的误差在公式里被平方放大 (相对误差约为 2 倍)，务必多次测量；长度要测“接入电路”部分而不是整根；外接法使 R 测量值偏小。

实验四用多用电表测量电学中的物理量

目的：学会用多用电表测量电压、电流、电阻。

原理：欧姆表内有电池与表头， R_x 越大回路电流越小、指针偏转越小，故欧姆刻度“右零左大、不均匀”；指针落中值附近最准。

器材：多用电表、定值电阻 (若干)、干电池、小灯泡、开关、导线。

步骤：1. 测电压：选直流电压挡，表笔并联接入；2. 测电流：选直流电流挡，表笔串联接入；3. 测电阻：选欧姆挡 → **短接调零** → 测量 → 读数 × 倍率；4. 用完拨到 OFF 挡或交流电压最高挡。

数据处理：记录各量测量值与标称值比较；电阻测量值 = 指针示数 × 倍率。

误差与注意：测电阻必须断电、并让被测电阻脱离电路；每换一次欧姆挡必须重新调零；指针偏转过大 (靠右) 换更小倍率、过小换更大倍率，尽量使指针在中值附近。

实验五测量电源的电动势和内阻

目的：测定干电池的电动势 E 和内阻 r 。

原理： $U = E - Ir$ ； U - I 图纵截距 = E ，斜率绝对值 = r 。

器材：干电池、电压表、电流表、滑动变阻器、开关、导线。

步骤：1. 按电路连接 (电压表测路端电压、电流表测干路电流)；2. 移动滑片，测 6~8 组 U 、 I ；3. 作 U - I 图。

数据处理：图线延长交纵轴得 E ，斜率得 r ；或由 $E = U + Ir$ 联立多组数据求平均。

误差与注意：电压表有分流，导致 $E_{\text{测}} < E_{\text{真}}$ 、 $r_{\text{测}} < r_{\text{真}}$ (系统误差)；作图时让点尽量分布均匀，舍去明显偏离的点；滑动变阻器不要调得太小 (电流过大电池发热)。

实验六探究影响感应电流方向的因素

目的：探究感应电流方向与磁通量变化的关系，归纳楞次定律。

原理：楞次定律——感应电流的磁场总是阻碍引起感应电流的磁通量的变化（增反减同）。

器材：灵敏电流计、大线圈（带接线柱）、条形磁铁、导线。

步骤：1. 用试触法确定电流计指针偏转方向与电流流入方向的关系；2. 磁铁 N 极插入线圈，记录磁通量变化方向与感应电流方向；3. N 极拔出、S 极插入、S 极拔出，重复记录；4. 归纳规律。

数据处理：列表对比： Φ 增大 $\rightarrow$ 感应电流的磁场与原磁场反向（增反）； Φ 减小 $\rightarrow$ 同向（减同）。

误差与注意：电流计量程小，磁铁插入要快但不猛，防止打表；接线前先判明电流计极性；操作前确认电流计机械调零。

实验七探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系

目的：探究理想变压器原、副线圈电压比与匝数比的关系。

原理： $\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2}$ （理想变压器，互感传能）。

器材：可拆变压器（可换不同匝数线圈）、低压交流电源、交流电压表、导线。

步骤：1. 原线圈接低压交流电（如 4 V），副线圈空载，测副线圈电压；2. 更换不同匝数组合（如原 800 匝、副 400/200 匝等），测多组；3. 比较 U_1/U_2 与 n_1/n_2 。

数据处理：列表比较 U_1/U_2 与 n_1/n_2 ，误差范围内相等。

误差与注意：电源必须用交流（直流时铁芯磁通量不变，副线圈无感应电压）；副线圈空载测量；实际变压器有漏磁与铜损铁损，比值略偏离匝数比属正常；电压不得超过线圈额定值。

实验八利用传感器制作简单的自动控制装置

目的：用光敏电阻（或热敏电阻）制作光控（或温控）自动电路。

原理：敏感元件电阻随物理量变化 $\rightarrow$ 串联分压改变 $\rightarrow$ 三极管导通/截止 $\rightarrow$ 继电器或指示灯动作。

器材：光敏电阻、负温度系数热敏电阻、定值电阻、三极管（如 9013）或继电器、小灯泡（或蜂鸣器）、电池组、导线、面包板。

步骤：1. 光敏电阻与定值电阻串联接电源，分压点接三极管基极，集电极回路串小灯泡；2. 遮光观察：光照减弱 $\rightarrow$ 光敏电阻阻值增大 $\rightarrow$ 分压点电压升高 $\rightarrow$ 三极管导通 $\rightarrow$ 灯泡亮；3. 光照恢复 $\rightarrow$ 灯泡灭；4. 换热敏电阻做温控版本（温度升高阻值减小，可做成高温报警）。

数据处理：记录“遮光/光照”“升温/降温”时电路输出状态，验证传感器链条：物理量 $\rightarrow$ 电阻 $\rightarrow$ 电压 $\rightarrow$ 控制动作。

误差与注意：三极管引脚极性别接反（e、b、c）；继电器型号的线圈电压要与电源匹配；光敏电阻要避免被灯泡直射造成自锁；改电路前先断开电源。