

第七章 电流与磁场



极光

地球周围空间的磁场如何分布？

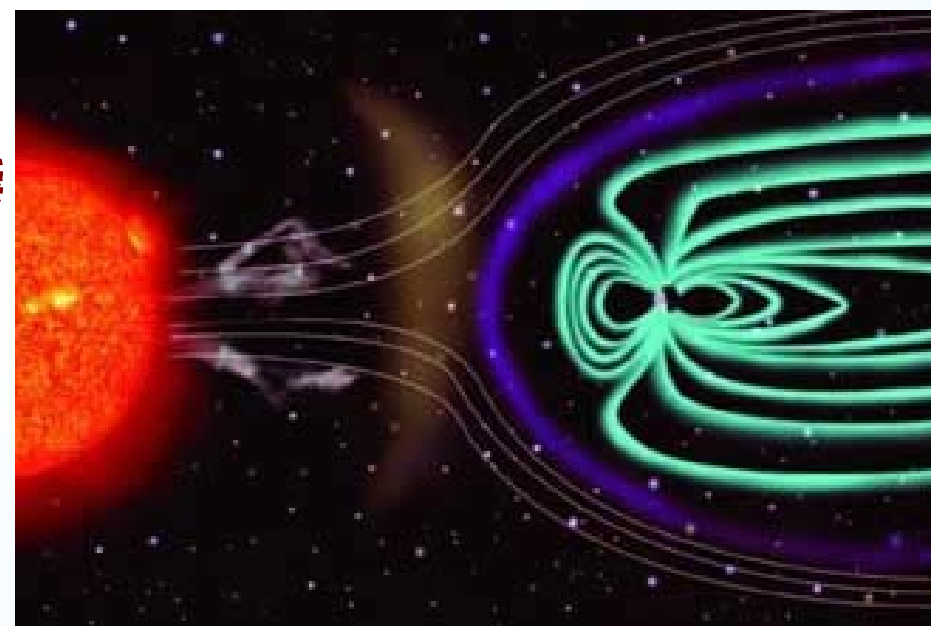
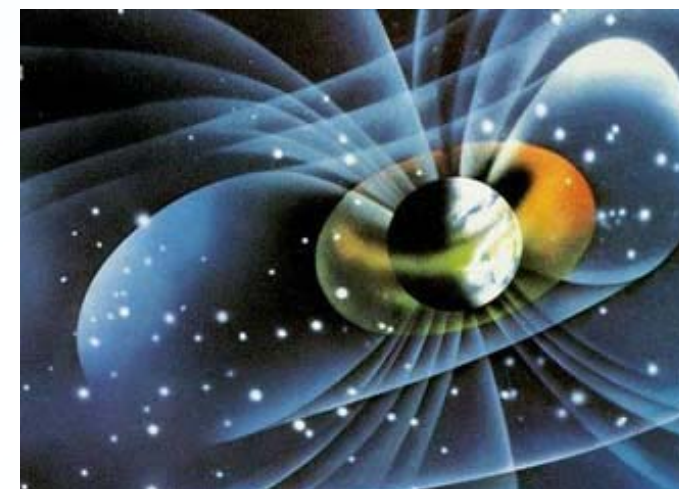
与它内部的结构有关

与它自身的运动状态有关

什么是太阳风？

地磁场能抵挡
太阳风吗？

磁暴是什么？



第7章 电流与磁场

主要任务：研究相对于观察者运动的电荷在空间激发的场——恒定磁场(steady magnetic field)的规律.

静电场：相对于观察者静止的电荷周围的电场

静电感应：电荷瞬间宏观定向运动
介质极化：电荷瞬间微观定向运动 } 平衡后电场

问题：运动电荷周围电场？

恒定电场：存在电荷宏观定向运动(电流)

通过截面 S 的电流强度 I 不变
通过截面内各点电流密度 δ 不变 } 恒定电流

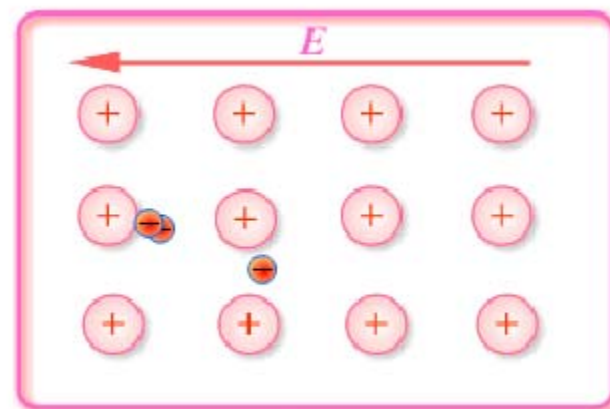
空间电荷分布不变(流入=流出)→分布不变的场

§ 7-1 恒定电流和恒定电场 电动势

一、形成电流的条件

携带电荷并形成电流的带电粒子, 统称为**载流子(carrier)**.
金属内的载流子是电子.

电流 {
 传导电流(conducting current)
 载流子自由电子(free electron)、正负离子(cation、anion)、电子—空穴(hole)对、库伯对...在电场作用下形成。
 运流电流(convection current)
 带电体作机械运动形成。
 位移电流(displacement current)

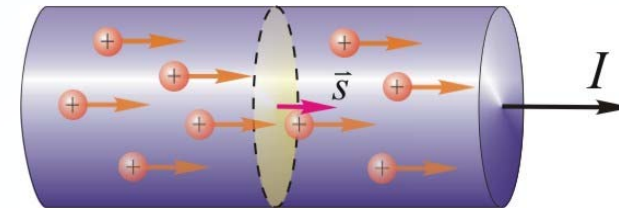


导体中形成电流的条件:

1. 有可以移动的电荷;
2. 有维持电荷作定向移动的电场.

定义：单位时间内通过导体任一截面的电量为电流强度(electric current strength), 简称电流

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



电流强度随时间而变化(例如交流电), 可用瞬时电流强度来表示, 即

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta q}{\Delta t} = \frac{dq}{dt}$$

单位：安培(A)

在SI中, 规定电流强度为基本量, 1s内通过导体任一截面的电荷为1C的电流强度称为1A, 即

$$1\text{A} = \frac{1\text{C}}{1\text{s}}$$



二、恒定电流与恒定电场

1. 恒定电流(steady current): 电流分布不随时间变化

$$\frac{dq}{dt} = \text{常量}$$

2. 恒定电场(steady electric field): 维持恒定电流所需的电场, 其分布不随时间变化.

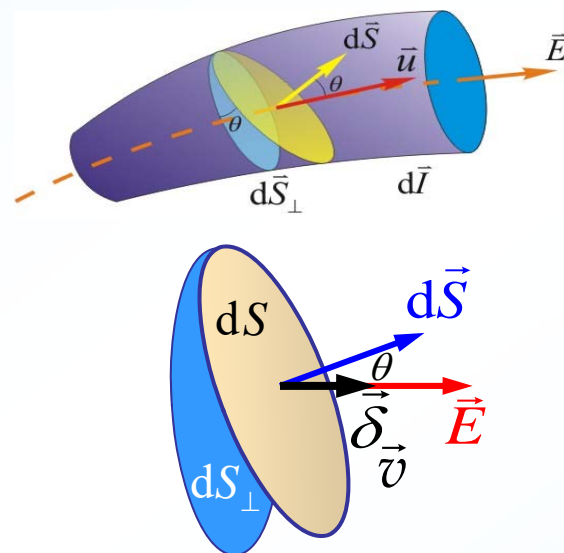
比较	相同	不同
静电场	Q, \vec{E} 分布不随时间变化	$I=0$ 导体内 $\vec{E} = 0$ 一经建立不需能量维持
恒定电场	高斯定理→有源性 环路定理→保守性 均适用	$I = \text{恒量}$ 导体内 $\begin{cases} \vec{E} \neq 0 \\ \vec{E} \text{ 分布不变} \end{cases}$ 其存在一定伴随能量转换

三、电流与电流密度

1. 电流密度(current density)

定义：电流密度矢量

$$\vec{\delta} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \vec{n}$$



$\vec{\delta}$ { 大小：通过与该点 \vec{E} 垂直的单位截面的电流
方向：与 $+q$ 的漂移运动方向 (\vec{E} 方向) 相同
单位：安·米⁻² (A·m⁻²)

$$dI = \delta dS_{\perp} = \delta dS \cos \theta = \vec{\delta} \cdot d\vec{S}$$

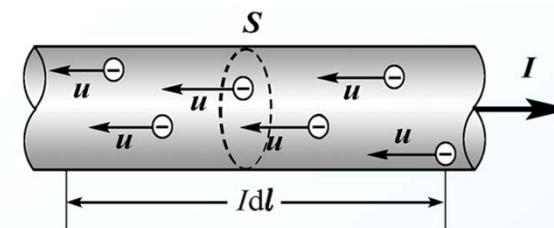
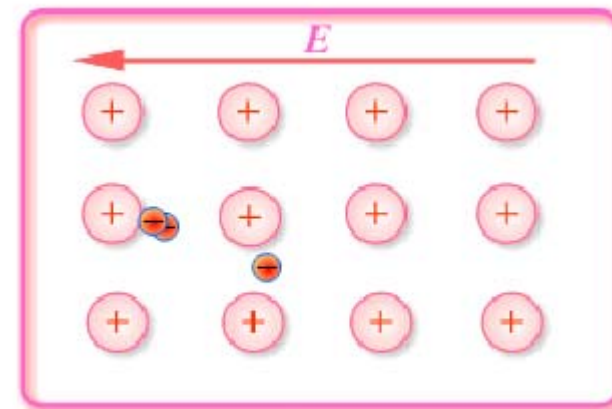
通过一个有限截面 S 的电流强度为 $I = \int_S \vec{\delta} \cdot d\vec{S}$

即：电流强度是电流密度矢量通过 S 面的通量。

2. 电流密度与电子定向速度的关系

金属导电的经典解释：电场中，
电子运动 = 热运动 + 定向加速运动

频繁碰撞使加速运动间断进行，其
平均效果为定向匀速运动 —— **漂移
运动(drift motion)**.




设电子数密度为 n 的电子以速率 u 漂移，单位时间内通过截面 ΔS_{\perp} 的电流强度 ΔI 为：

$$\Delta I = \frac{Q}{\Delta t} = ne\Delta S_{\perp}u$$

电流密度的大小为

矢量式

$$\vec{\delta} = -ne\vec{u}$$

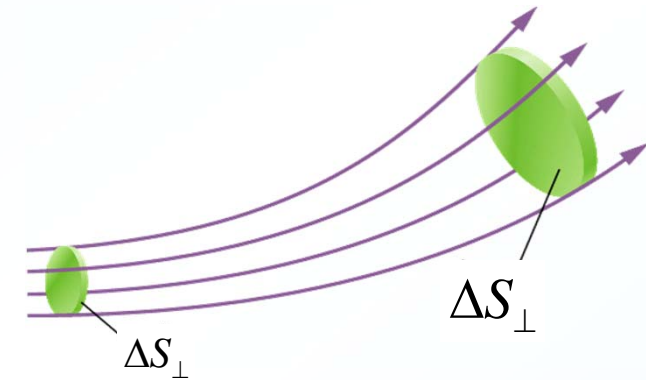

$$\delta = \frac{\Delta I}{\Delta S_{\perp}} = neu$$

$$\vec{\delta} = nq\vec{u}$$

3. 电流的连续性方程(continuity equation)

电流线: 形象描述电流分布, 实际为电流密度矢量线.

规定: 曲线上每一点的切线方向为 $\vec{\delta}$ 的方向, 曲线的疏密表示它的大小.



由 δ 的空间点分布 \rightarrow 场分布, 称之为**电流场**.

在电流场中选一闭合曲面 S , 单位时间内从 S 面内流出的电荷量为

$$\oiint_S \vec{\delta} \cdot d\vec{S}$$

设时间 S 面内的电荷分布的体密度为 ρ , 则在单位时间内 S 面内的电量减少了

$$-\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$



据电荷守恒定律, 电流密度矢量的通量等于该面内电荷减少的速率:

电流连续性方程

$$\oiint_S \vec{\delta} \cdot d\vec{S} = -\iiint_V \frac{\partial \rho}{\partial t} dV$$

当电荷分布不随时间变化(电场不变)时, 电流将达到稳恒:

$$\oiint_S \vec{\delta} \cdot d\vec{S} = 0$$

——稳恒电流条件

说明:

- 在没有分支的恒定电路(electric circuit)中, 通过各截面的电流必定相等; 而且恒定电路必定是闭合的.
- 恒定电流情况下的电荷分布(净电荷的宏观分布不随时间改变)所激发的恒定电场与静电场服从同样的基本规律.

4. 欧姆定律的微分形式

$$I = \frac{U_{AB}}{R}$$

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

$$\gamma = 1/\rho \quad \text{电导率}$$

考察导体中任一微小体积元

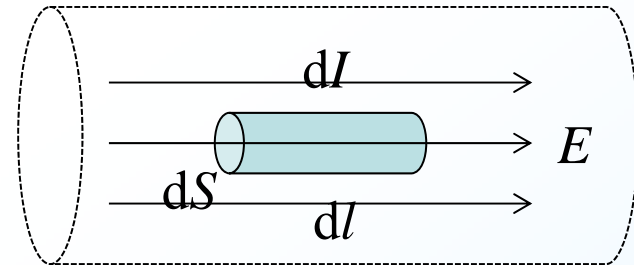
$$dI = \frac{dU}{R}$$

$$dI = \delta dS$$

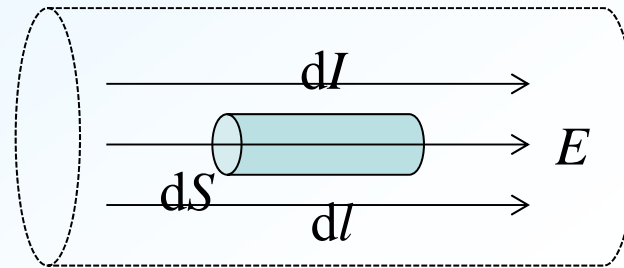
$$dU = E dl$$

$$R = \rho \frac{dl}{dS}$$

$$\delta = \gamma E$$



4. 焦耳-楞次定律的微分形式



$$dQ = (dI)^2 R dt$$

热功率密度 w —— 单位时间单位体积的通电导体产生的热量

$$w = \frac{dQ}{dV dt} = \frac{(dI)^2 R dt}{dS dl dt} = \rho \delta^2$$

$$\delta = \gamma E$$

$$w = \rho (\gamma E)^2 = \gamma E^2$$



四、电源及电源电动势

外电路：电流从高电位向低电位运动

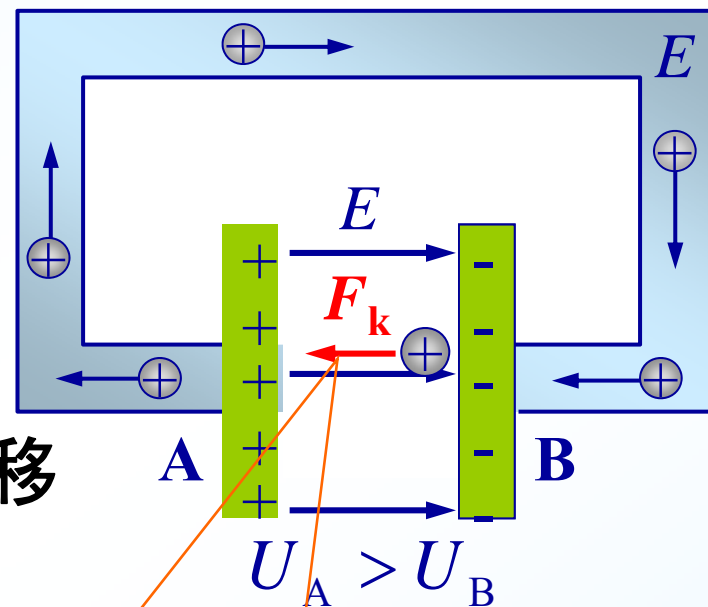
回路中要出现恒定电流必须存在恒定电场.

内电路：外力将电荷从低电位移向高电位, 克服静电场力作功.

电源(power supply): 能够提供非静电力维持电势差的装置.

电源作用：

提供非静电力 \vec{F}_k , 将 $+q$ 由负极板移向正极, 保持极板间电势差, 以形成持续的电流. 电源的高电位叫正极, 电位低的叫负极.

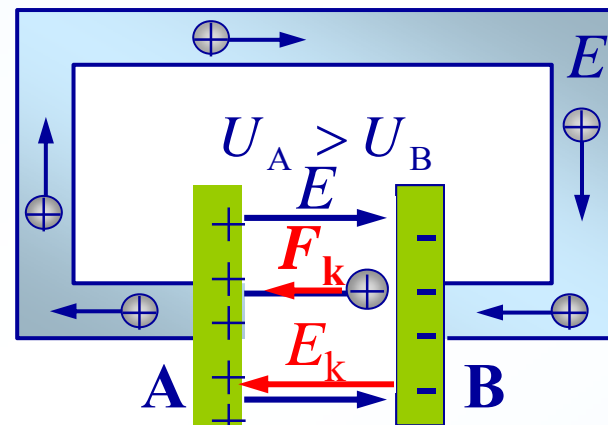


使电荷能逆着电场力方向运动的力, 称**非静电力**. 它使得电流的流动得到维持.

从能量转化观点来看：

断路： $\vec{F}_k = -\vec{F}_e$ 时平衡

\vec{F}_k 反抗 \vec{F}_e 做功，
将其他形式能转变为电能



通路：{ 外电路： \vec{F}_e 作用，将 $+q$ 由正极 \rightarrow 负极
内电路： $|\vec{F}_k| > |\vec{F}_e|$ 作用，将 $+q$ 由负极 \rightarrow 正极
内电路： \vec{F}_k, \vec{F}_e 共同作用形成持续电流

非静电场强： $\vec{E}_k = \frac{\vec{F}_k}{q_0}$ 电荷绕行一周，做功如何？

静电力和非静电力搬运单位正电荷绕闭合回路一周做功：

$$A = \oint_L \vec{F}_e \cdot d\vec{l} + \oint_L \vec{F}_k \cdot d\vec{l} = \oint_L q \vec{E}_k \cdot d\vec{l} > 0$$

电源： 将其他形式的能转换为电能的装置。

电源电动势(electromotive force, Emf): 把单位正电荷经电源内部从负极移到正极, 非静电力所作的功

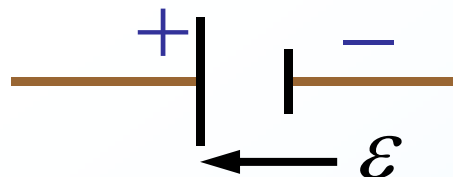
$$\varepsilon = \frac{A}{q} = \oint_L \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

若 \vec{E}_k 只存在于内电路:

$$\varepsilon = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

(经内电路)

规定指向:



说明: ① ε 反映电源做功本领, 与外电路闭合否无关

② ε 是标量, 遵循代数运算法则

