

第九章 恒定磁场

主要内容

9.1: 恒定电流 磁场

9.2: 毕奥-萨伐尔定律

9.3/4: 磁场的高斯定理 安培环路定理

9.5: 带电粒子在电场和磁场中的运动

9.6: 载流导线在磁场中所受的力

9.7: 磁介质及磁化微观机制

9.8: 介质中的安培环路定理

9.1 恒定电流 磁场

9.1 恒定电流 磁场

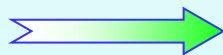
一、电流的分类

1. 传导电流：带电粒子在导体中作定向运动
2. 运流电流：带电物体作机械运动等效的电流
3. 位移电流：变化的电场产生的电流

二、传导电流

1. 电流强度 I ：单位时间内通过某一截面的电量

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



$$I = \frac{dq}{dt}$$

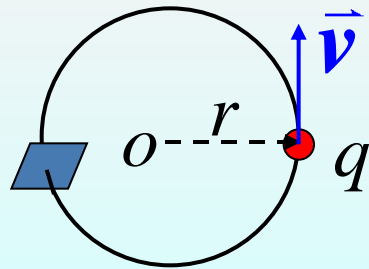
注意： I 是标量

规定： I 的方向

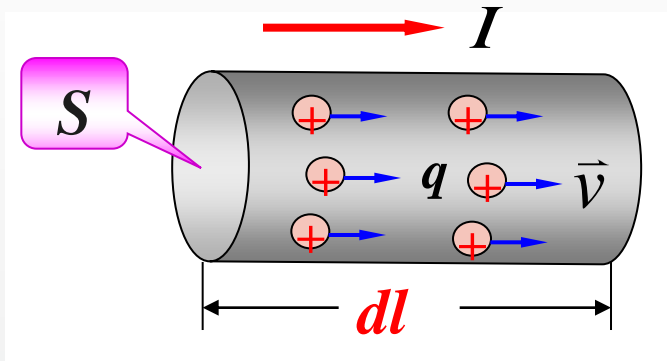
电流强度的定义对运流电流同样适用

例：电量为 q 的点电荷作圆周运动，其运流电流大小为

$$I = \frac{q}{T} = \frac{qv}{2\pi r}$$



2. 宏观电流与微观载流子间的关系



电流元 $I d\vec{l}$

- q — 每个载流子电荷
- \vec{v} — 载流子定向移动速度
- n — 载流子的浓度

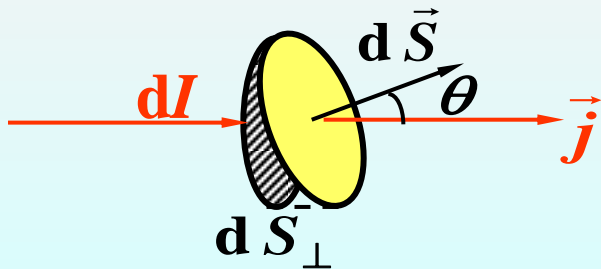
$$I = \frac{dq}{dt} = \frac{nsdlq}{dl/v} = qnvs$$

3. 电流密度: \vec{j}

单位时间内通过单位横截面积的电荷量,
其方向为该点处正电荷的运动方向。

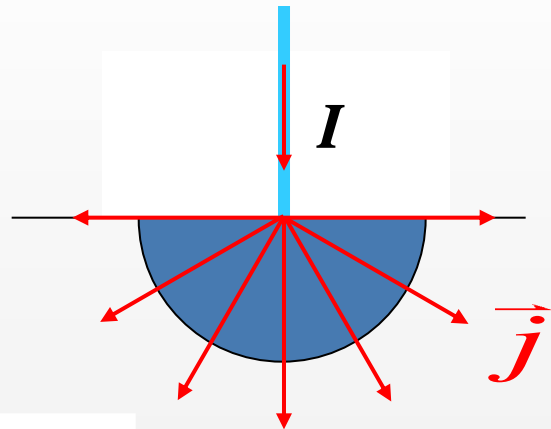
$$\vec{j} = \lim \frac{\Delta q}{\Delta t \Delta S_{\perp}} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \vec{e}_v$$

对任意小面元 $d\vec{S}$ $dI = j dS_{\perp} = \vec{j} \cdot d\vec{S}$



对任意曲面S:

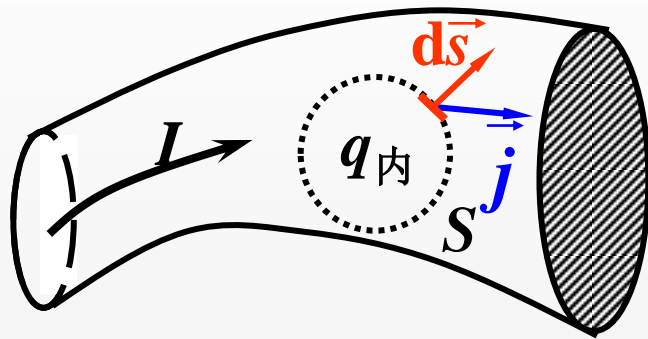
$$I = \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$



三、恒定电流

1. 连续性方程 —— 电荷守恒定律

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = -\frac{dq_{\text{内}}}{dt}$$



单位时间内通过闭合曲面向外流出的电荷，等于此时间内闭合曲面内电荷的减少量。

2. 恒定电流条件

电流进多少，出多少

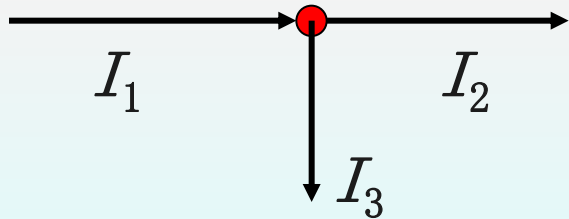
$$\frac{dq_{\text{内}}}{dt} = 0 \quad \Rightarrow \quad \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = \oint_S dI = 0$$

2. 恒定电流条件

电流进多少，出多少

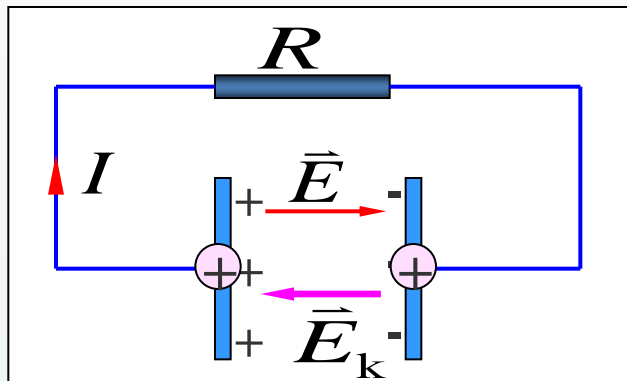
$$\frac{d\mathbf{q}_{\text{内}}}{dt} = \mathbf{0} \quad \Rightarrow \quad \oint_s \vec{j} \cdot d\vec{S} = \oint_s dI = 0$$

应用：基尔霍夫定律（节点定律）



$$I_1 = I_2 + I_3$$

四、电动势 (*electromotive force, emf*)

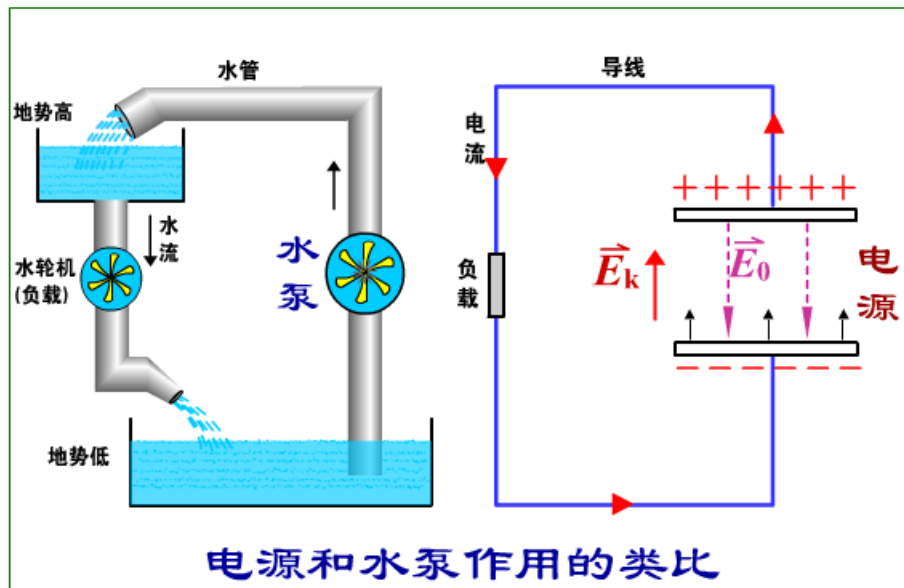


非静电力：在电源内部能反抗静电力，把正电荷从负极搬运到正极的力。

非静电场场强
$$\vec{E}_k = \frac{\vec{F}_k}{q}$$

电源：提供非静电力的装置。

本质：其他形式的能量 \Rightarrow 电能



电动势：将单位正电荷绕闭合回路运动一周时，非静电力所作的功。

$$\varepsilon = \frac{W}{q} = \oint \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$$

$$\varepsilon = \int_{\text{in}} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} + \int_{\text{out}} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} \quad \because \int_{\text{out}} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = 0$$

电源电动势 $\varepsilon = \oint_l \vec{E}_k \cdot d\vec{l} = \int_{-(in)}^+ \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$

电源电动势大小：等于将单位正电荷从负极**经电源内部**移至正极时非静电力所作的功。

注意： (1) 电动势是标量，规定其**正方向**为：由电源负极经内部指向正极的方向

(2) 电动势与电势的异同

相同点：{ 单位相同
开路时的路端电压等于电源电动势

不同点：{ 电势是保守场的线积分，与路径无关
电动势是非保守场的线积分，与路径有关

⇒ { 对电势：某点的电势或两点间的电势差
对电动势：只能说某段路经上的电动势

五、磁场 (*magnetic field*)

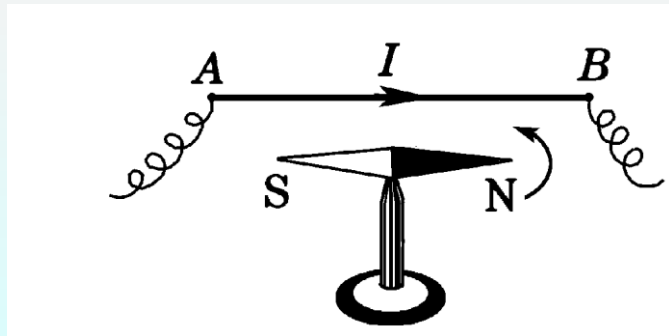
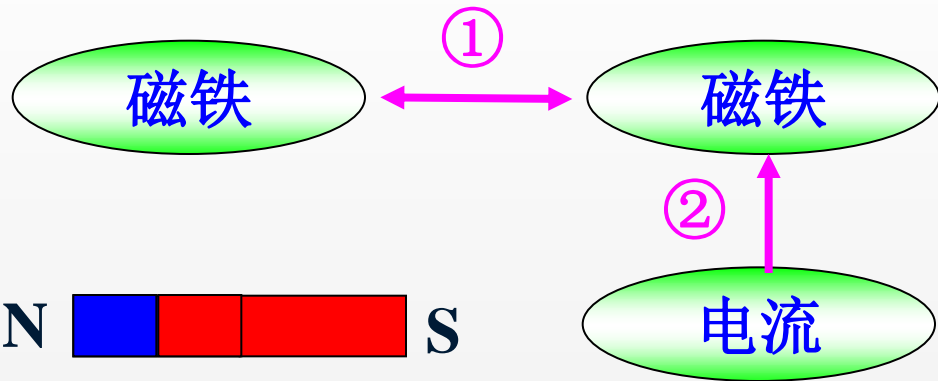
1. 基本磁现象

① 磁极：N极与S极

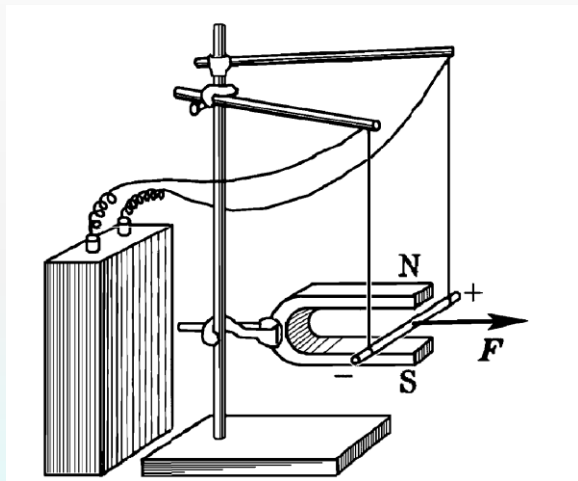
同性相斥, 异性相吸

⇔ 不存在磁单极

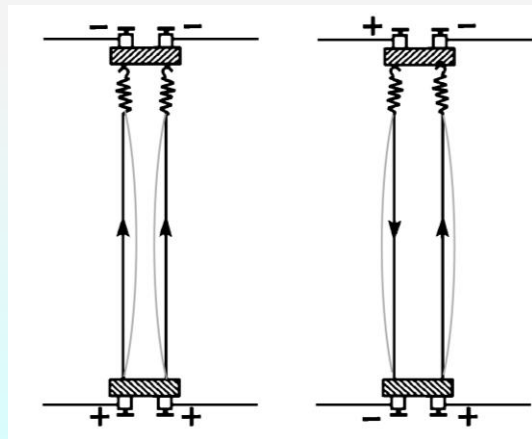
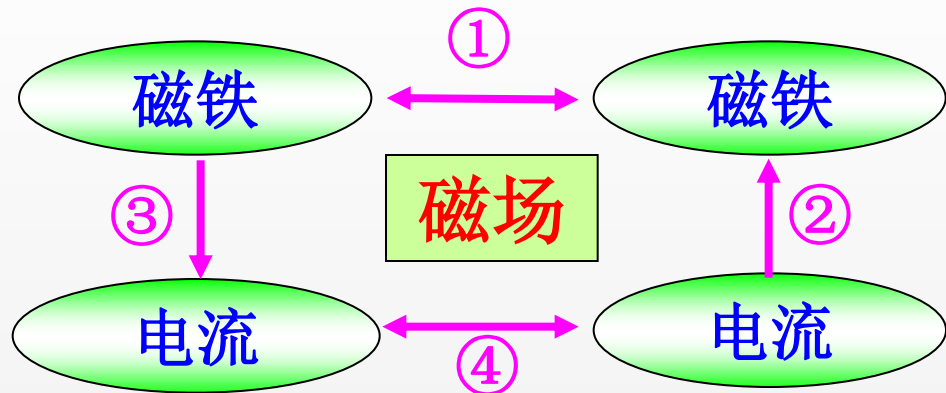
② 1820年，丹麦，奥斯特发现 电流对磁铁有作用力



③ 1820年，法国，安培，
磁铁对电流的作用



④ 安培，电流对电流相互作用



2. 磁场的本质

运动电荷在其周围空间中产生的特殊物质。

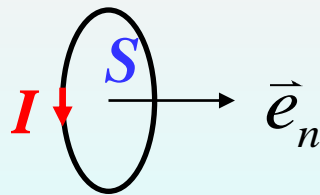
?

磁铁没有电荷运动，为什么会对外显示磁性呢？



安培提出了分子电流的假设，每个分子电流相当于一个小磁体。

定义：磁矩 $\vec{m} = IS\vec{e}_n$



其中： \vec{e}_n 与 I 成右螺旋

3. 磁场的对外表现

- 1) 磁场对运动电荷，或载流导线会有力的作用
- 2) 载流导体在磁场内移动时，磁场的作用力会对载流导体做功

4. 磁力的应用

- 1) 磁力起重机
- 2) 磁选矿机
- 3) 磁共振成像技术
- 4) 磁悬浮列车



真空磁悬浮列车

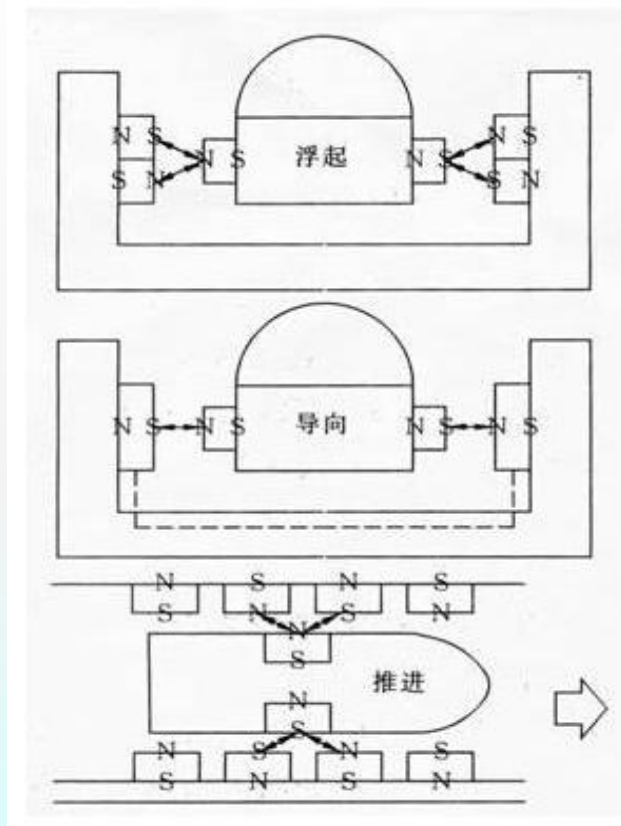
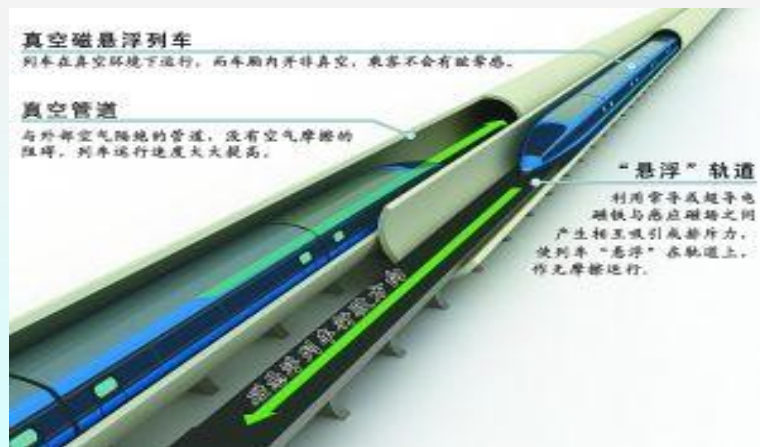
列车在真空环境下运行，而车厢内并非真空，乘客不会有眩晕感。

真空管道

与外部空气隔绝的管道，没有空气摩擦的阻碍，列车运行速度大大提高。

“悬浮”轨道

利用常导或超导电磁铁与感应磁体之间产生相互吸引或排斥力，使列车“悬浮”在轨道上，作无摩擦运行。



5、磁场的表征——磁感应强度 (*magnetic induction*)

电场: \vec{E} q_0 $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}$

磁场: \vec{B} 如何定义磁感应强度?

(1) 方法一: 小磁针

当小磁针静止时, 北极的指向即为磁场的方向

不足: 只能判断方向, 不能判断大小

(2) 方法二：运动电荷

实验表明：磁场对运动电荷的作用力与

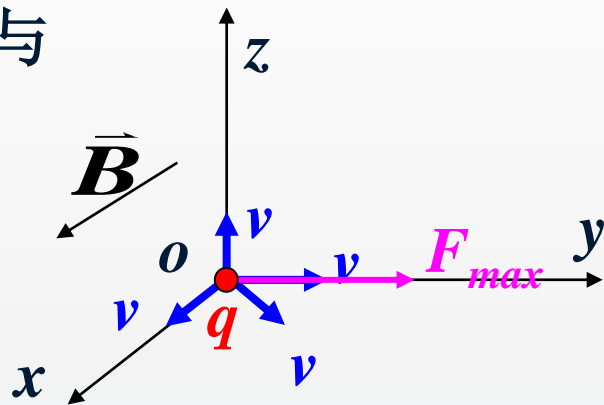
q, \vec{v}, \vec{B} 有关

a) 固定 q 和 \vec{B} ，变化 \vec{v}

\vec{v} 大小不变，方向变化

$$\vec{v} // \vec{B} \quad F_{\min} = 0, \quad \vec{v} \perp \vec{B} \quad F = F_{\max}$$

$\vec{v} \perp \vec{B}$ 时，方向不变，大小变化 $F_{\max} \propto v$

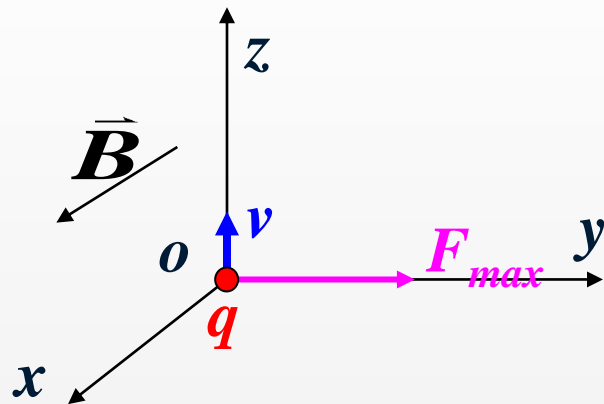


b) 固定 \vec{v} 和 \vec{B} ，变化 q

$$\vec{v} \perp \vec{B} \quad F_{\max} \propto q$$

c) 固定 \vec{v} 和 q ，变化 \vec{B}

方向不变，大小变化 $F \propto B$



定义： 正电荷在磁场中运动受到的力最大时，

$$\vec{B} \text{ 的方向: } \vec{F}_{\max} \times \vec{v} \quad \vec{B} \text{ 的大小: } B = \frac{F_{\max}}{qv}$$