



第七章

恒定电流和稳恒磁场



本章内容

§ 7.1 恒定电流

§ 7.2 磁场 磁感应强度

§ 7.3 毕奥-萨伐尔定律**

§ 7.4 安培环路定理* *

§ 7.1 恒定电流

◆ 电流 电流密度

- 宏观-微观
- 电流与电流密度的关系

◆ 恒定电流 恒定电场

◆ 欧姆定律

◆ 电源 电动势

一、电流 电流密度

1、电流

大量电荷的定向运动形成电流

传导电流：自由电子、正负离子、空穴、库伯对在电场作用下定向运动

运流电流：带电体做机械运动

在导体中，形成电流的两个基本条件：

- (1) 导体中存在自由电荷；
- (2) 导体中要维持一定的电场

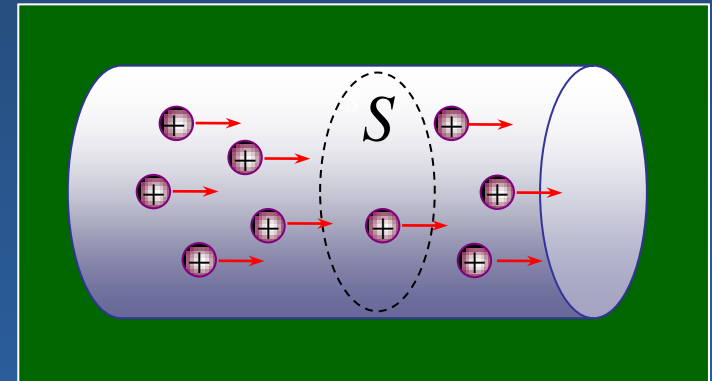
一、电流 电流密度

1、电流

电流强度I: 单位时间内通过导体任一横截面的电量

若在 dt 时间内通过导体 S 截面的电量为 dq ，则通过 S 面的电流强度 I :

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



方向: 正电荷定向运动的方向，但电流是标量

单位: 安（培）（ A ） $1 A = 1 C/s$

一、电流 电流密度

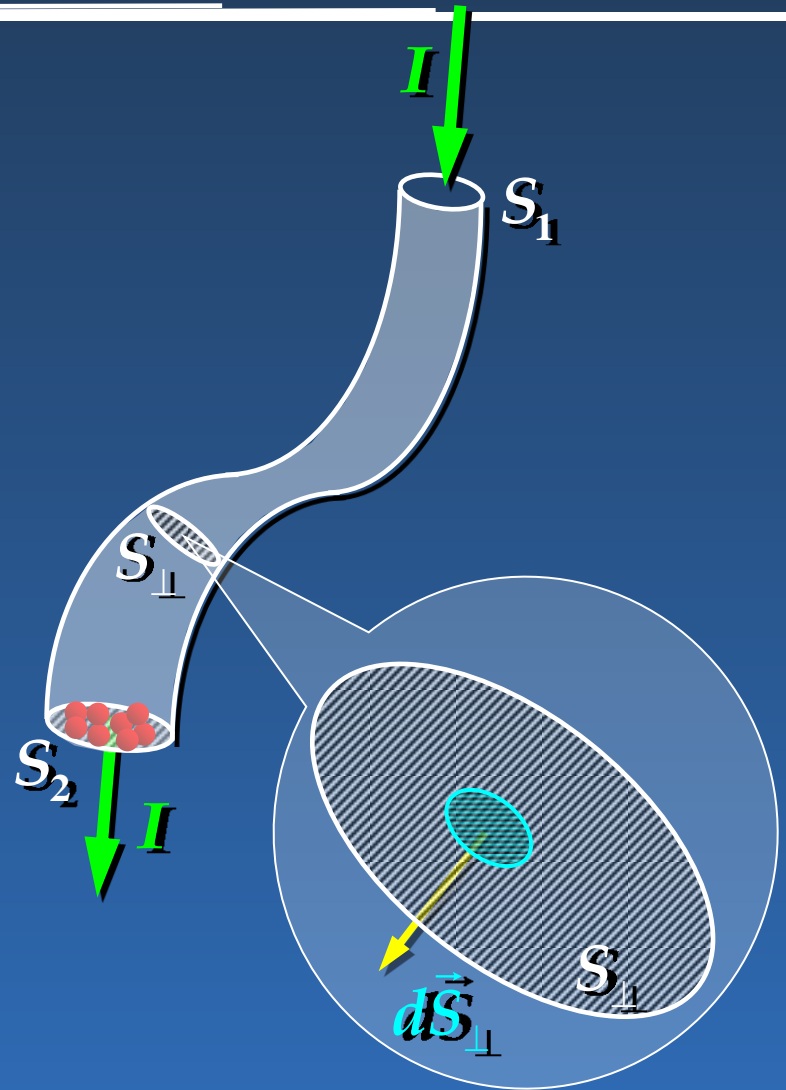
2、电流密度 \vec{j}

为了反映空间各点电流大小和方向，引入电流密度矢量：

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \hat{e}_i \quad (\text{A/m}^2)$$

方向： 该点正电荷定向运动的方向

大小： 单位时间内通过垂直于该点正电荷运动方向的单位面积上的电量



一、电流 电流密度

3、电流线

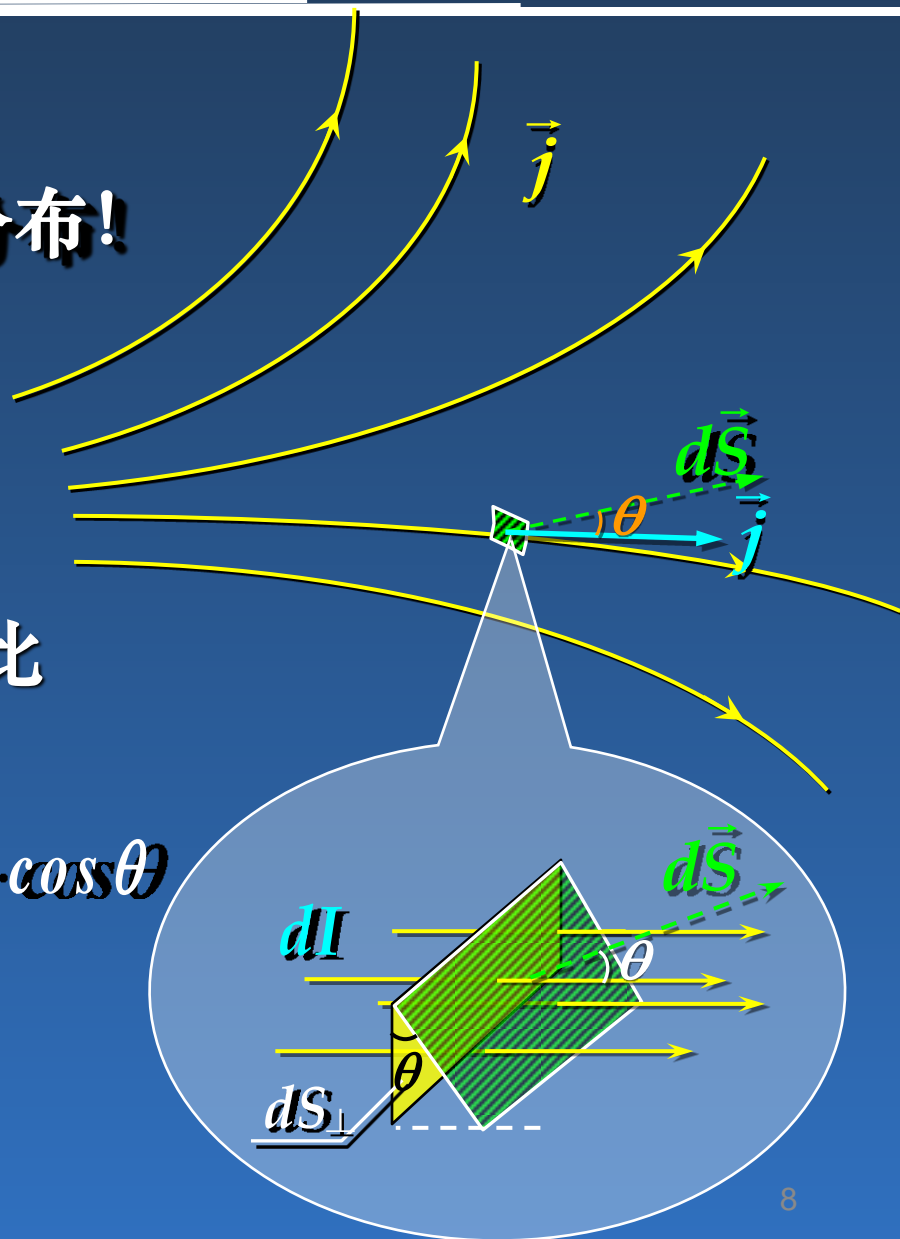
常用 \vec{j} 线来描述电流密度的分布!

方向：某点切线方向即为该点的 \vec{j} 方向。

密度：与该处 \vec{j} 的大小成正比

$$\vec{j} = \frac{dI}{dS_{\perp}} \rightarrow dI = j dS_{\perp} = \vec{j} \cdot d\vec{S} \cdot \cos\theta$$

$$\rightarrow dI = \vec{j} \cdot d\vec{S}$$



一、电流 电流密度

4、电流密度 \vec{j} 与电流强度 I 的关系

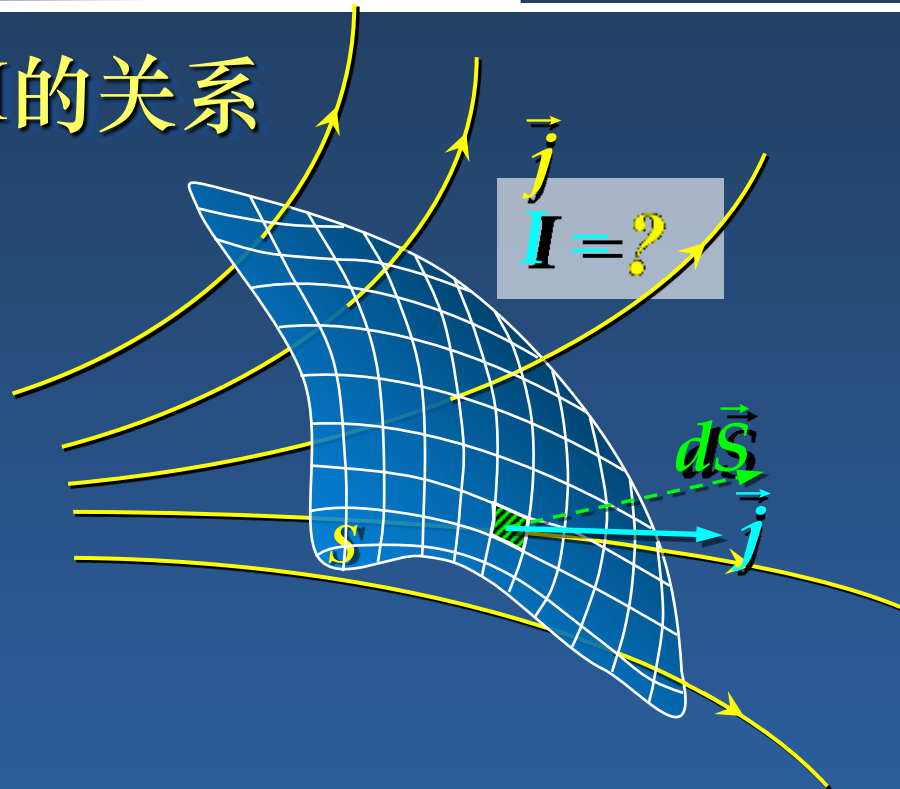
(1) 通过面元 dS 的电流强度 dI 等于通过 dS 的电流密度 \vec{j} 通量

$$dI = j dS_{\perp} = \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

(2) 通过任意面积 S 的电流强度 I :

$$I = \int dI = \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

即电流强度 I 是电流密度矢量 \vec{j} 通过面 S 的通量

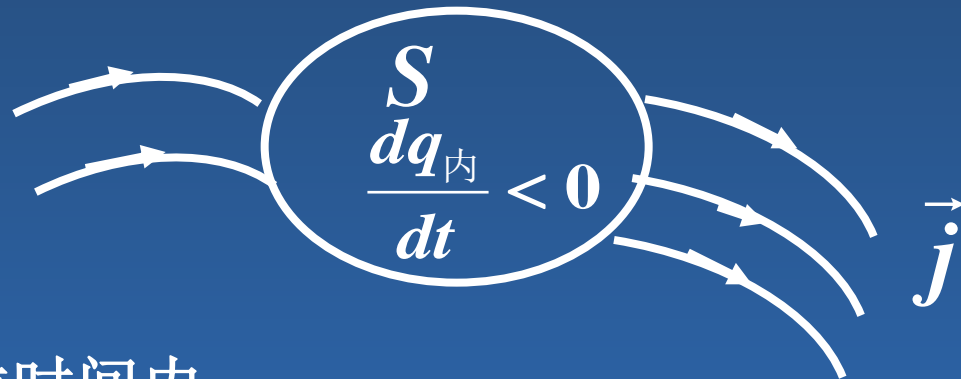


一、电流 电流密度

4、电流密度 \vec{j} 与电流强度 I 的关系

(3) 通过闭合面 S 的电流强度 I :

$$I = \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = - \frac{dq_{\text{in}}}{dt}$$



根据电荷守恒定律，单位时间内
流出封闭曲面的电量应当等于封
闭面内电荷的减少率

一、电流 电流密度

5、电流、电流密度与电荷定向运动速度的关系

金属导电的经典解释：

自由电子运动=无规则热运动+定向加速运动

漂移运动：

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，这个速度叫做漂移速度 u

一、电流 电流密度

5、电流、电流密度与电荷定向运动速度的关系

设电荷数密度为 n ,电荷漂移速度为 \mathbf{u} , 每个载流子所带电荷为 q , 单位时间内通过截面 dS_{\perp} 的电量为电流强度 dI :

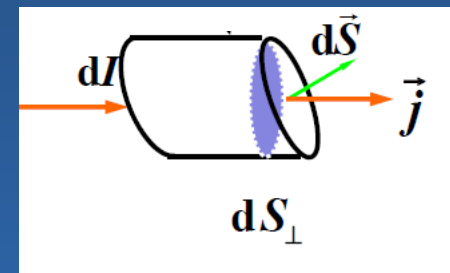
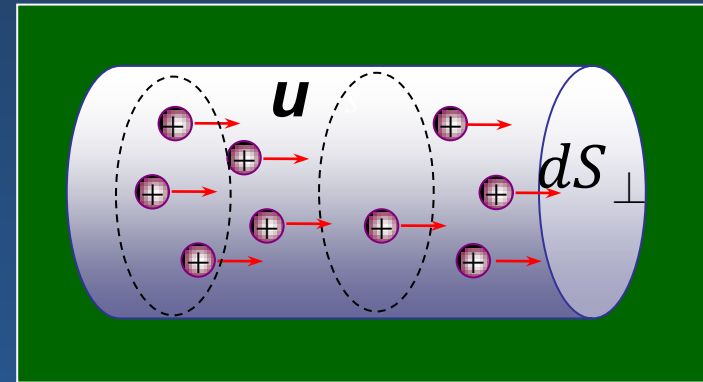
$$dI = \frac{dq}{dt} = nqu dS_{\perp}$$

若 dS 与 dS_{\perp} 夹角 θ

$$dI = nqu dS \cos \theta = nq\vec{u} \cdot d\vec{S}$$

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

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



例1 (1) 若每个铜原子贡献一个自由电子，问铜导线中自由电子数密度为多少？

(2) 家用线路电流最大值 15A，铜导线半径0.81mm此时电子漂移速率多少？

(3) 铜导线中电流密度均匀，电流密度多少？

解 (1)
$$n = \frac{N_A \rho}{M} = 8.48 \times 10^{28} \text{ 个/m}^3$$

(2)
$$v_d = \frac{I}{nSe} = 5.36 \times 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \approx 2 \text{ m} \cdot \text{h}^{-1}$$

(3)
$$j = \frac{I}{S} = \frac{15}{\pi \times (8.10 \times 10^{-4})^2} \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} = 7.28 \times 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$$

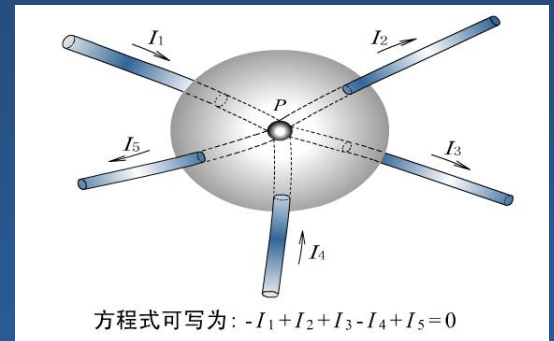
二、恒定电流 恒定电场

1、恒定电流

- 电流场不随时间改变
- 电荷分布不随时间改变

若闭合曲面S内的电荷不随时间变化，有：

$$\frac{dq}{dt} = 0 \quad \oint_S \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$



- 1. 对一段无分支的稳恒电路，各横截面的电流强度相等
- 2. 在电路的任一节点处，流入的电流强度之和等于流出节点的电流强度之和

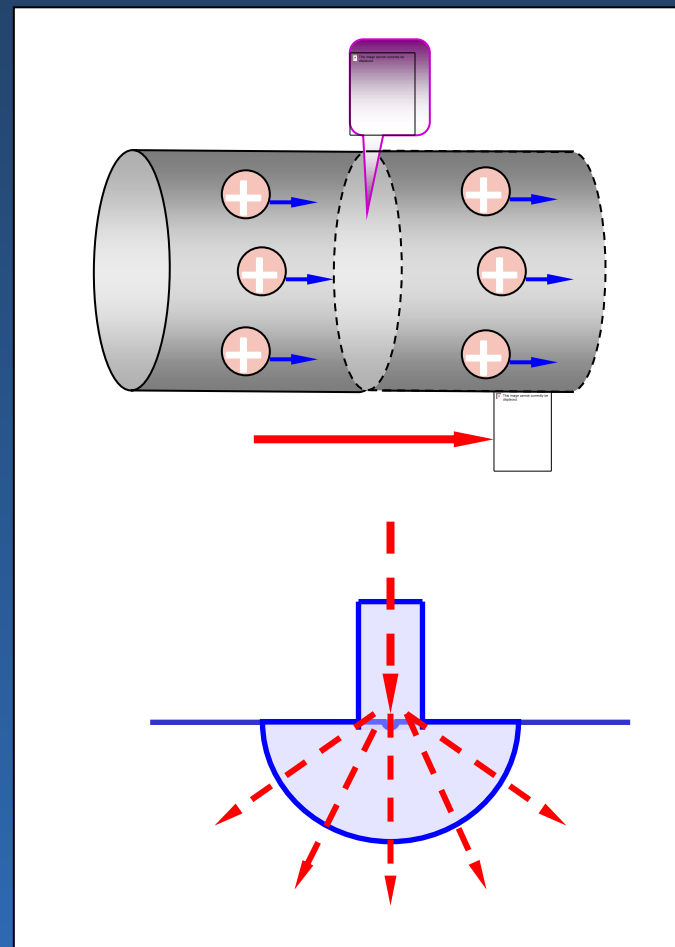
基尔霍夫第一定律： $\sum I_i = 0$

对于节点电流，取流入为负，流出为正

关于恒定电流、电流强度及电流密度 \vec{j} 释疑

1. 电流强度是单位时间内通过导体某一截面的电量，描述导体中某一截面上电荷流动的总体情况，是标量。

2. 电流密度是描述导体中某一点处电荷流动的情况，是矢量；它们之间的关系是：通过曲面的电流强度等于通过该曲面的电流密度的通量。



关于恒定电流、电流强度及电流密度 \vec{j} 释疑

$$\oint_s \vec{j} \cdot d\vec{S} = 0$$

3. 恒定电流是指导体内任一点电流密度矢量的大小和方向都不随时间变化的电流，电流密度只是空间位置的函数，即电荷密度不随时间变化。
4. 在复杂的直流电路中，三条或三条以上电路的交汇点称为节点，对每个节点，流入节点的电流等于流出节点的电流。这就是基尔霍夫第一方程，实质是恒定电流下的电荷守恒定律。

二、恒定电流 恒定电场

2、恒定电场

维持恒定电流所需的电场，其分布不随时间变化，称为恒定电场

恒定电场和静电场比较

(1) 相同之处

- ✓ 电场不随时间改变
- ✓ 满足高斯定理
- ✓ 满足环路定理是保守场，可引入电势

(2) 不同之处

- ✓ 激发静电场的源电荷是静止的，激发恒定电场的源电荷运动
- ✓ 维持恒定电场需要能量转换
- ✓ 导体内部恒定电场不为0

三、欧姆定律

1、欧姆定律

经过一个电阻沿电流的方向电势降低的数值等于电流和电阻的乘积 $U=IR$

2、电阻定律

导体的电阻 R 与导体的长度 l 、横截面积 S 和材料的电阻率 ρ 的关系为

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

电阻率 ρ 的单位：欧(姆)米($\Omega \cdot \text{m}$)；
电阻率的倒数为电导率 σ ， $\sigma = 1/\rho$ ，
 σ 单位：西(门子)每米(S/m)

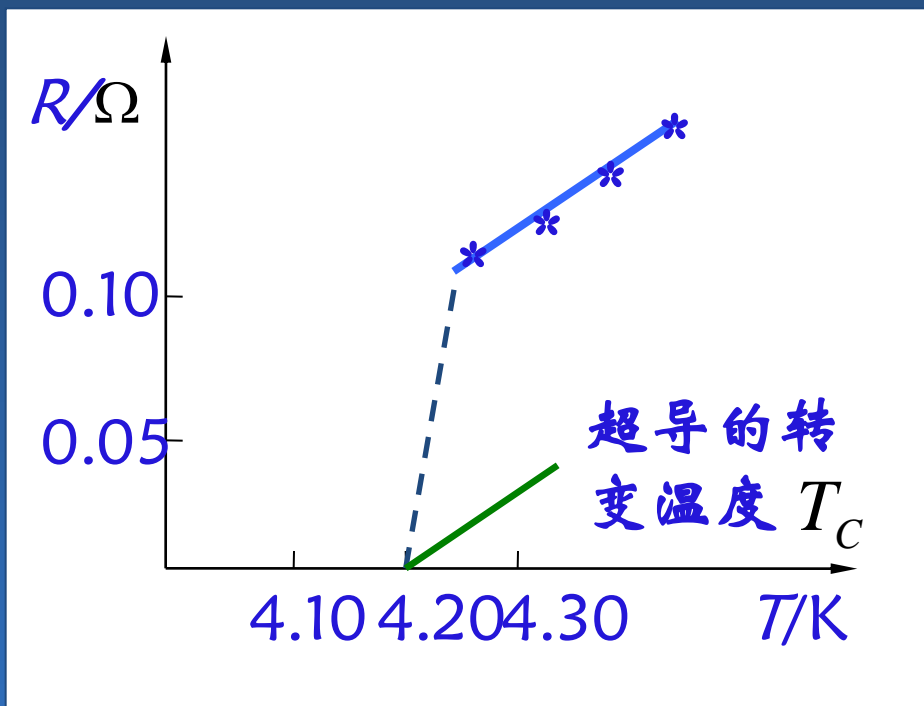
电阻率（电导率）不但与材料的种类有关，而且还和温度有关。

超导体

有些金属和化合物在降到接近绝对零度时，它们的电阻率突然减小到零，这种现象叫超导。



汞在4.2K附近电阻
突然降为零



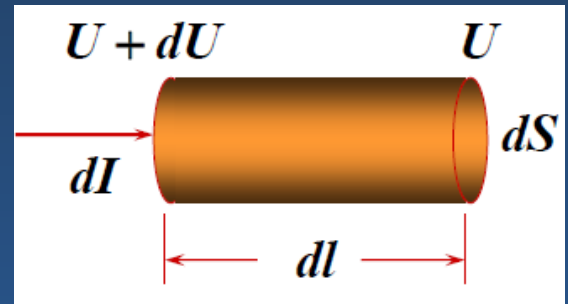
三、欧姆定律

3、欧姆定律的微分形式

在导体的电流场中设想取出一小圆柱体

dU —小柱体两端的电压

dI —小柱体中的电流强度



$$dI = \frac{dU}{R} \quad R = \frac{\rho dl}{dS}$$

$$dI = \frac{1}{\rho} \frac{dU}{dl} dS$$

$$j = \frac{dI}{dS} = \frac{1}{\rho} \frac{dU}{dl} = \frac{1}{\rho} E = \sigma E$$

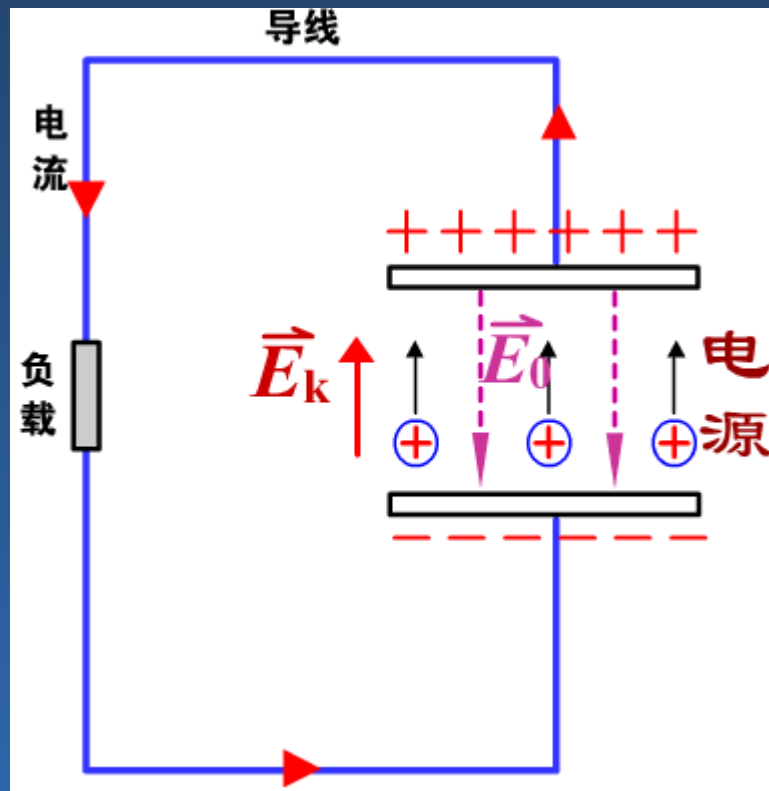
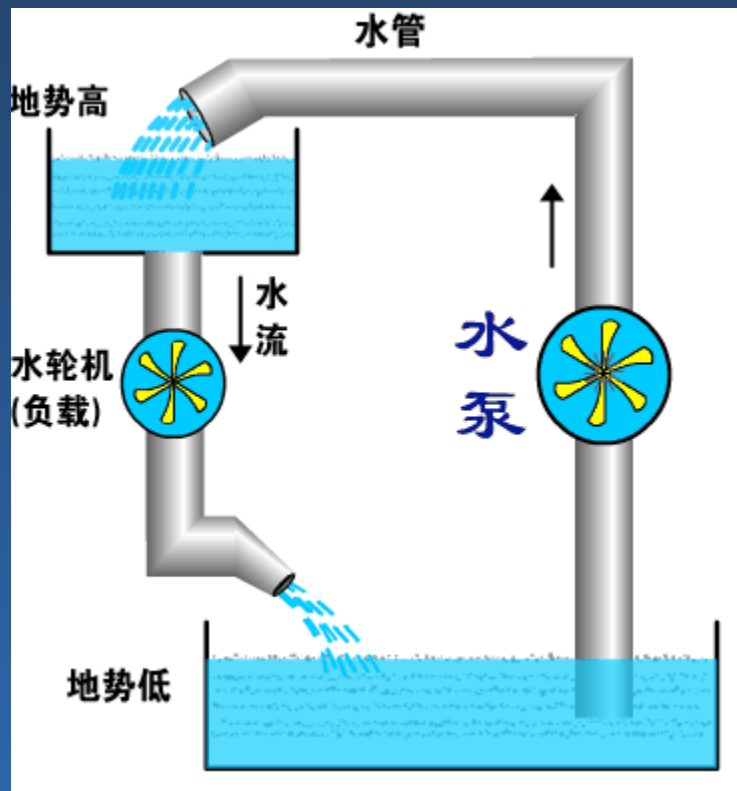
欧姆定律的微分形式: $\vec{j} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E}$



要使导线内形成恒定电流，需要什么装置呢？

四、电源 电动势

电源和水泵作用的类比



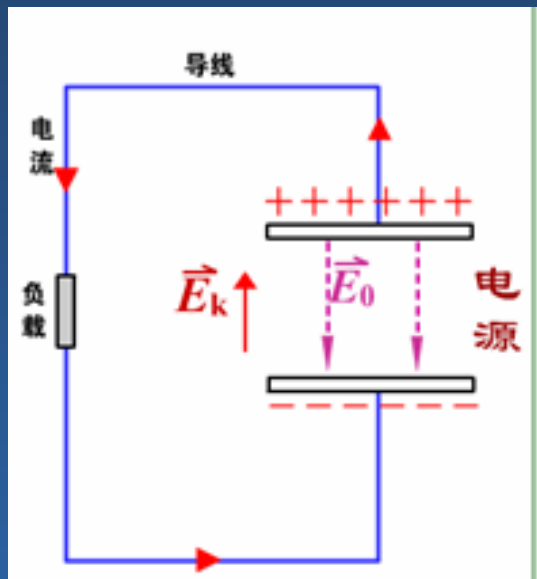
非静电力

能不断分离正负电荷使正电荷逆静电场力方向运动。

四、电源 电动势

1、电源的电动势

要维持恒定电流，电源内部须存在非静电力



电源：提供非静电力维持电势差的装置；
将其他形式的能转换为电能的装置

电源有两极，电势高的叫**正极**，电势低的叫**负极**

外电路：静电力对正电荷作正功，使它从正极板流向负极板，电势降低

内电路：非静电力对正电荷作正功，使它从负极板流向正极板，电势升高

四、电源 电动势

非静电性场强度

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

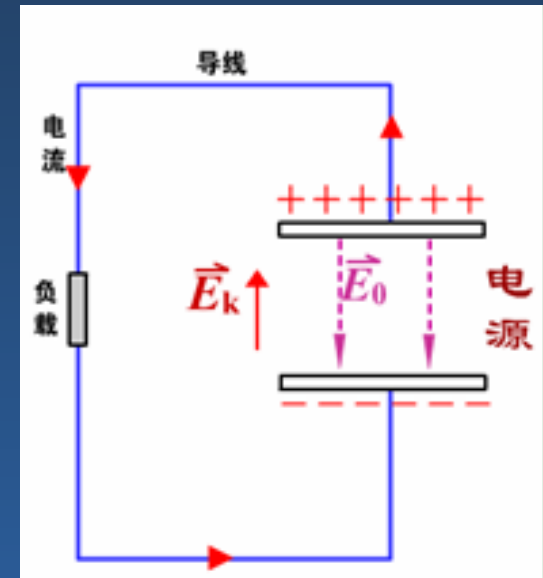
电动势

单位正电荷绕着闭合电路一周，
非静电力所做的功

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

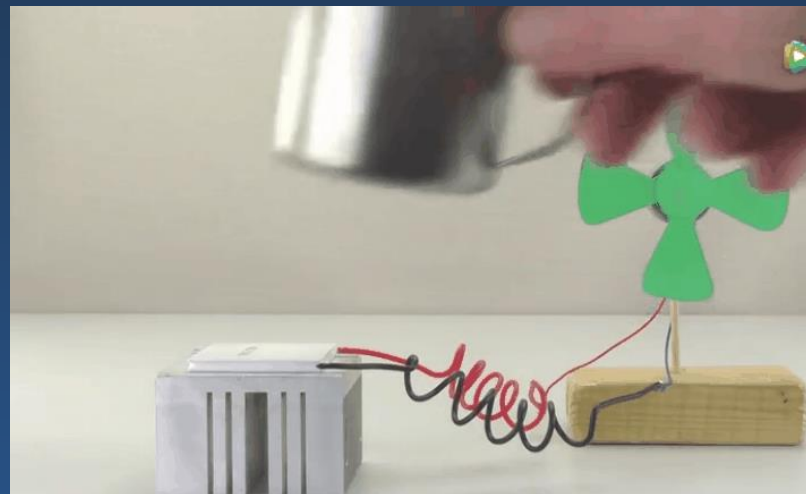
数值上等于单位正电荷从负极板运动到正极板非静电力所做的功
单位：V

电动势的方向：电源内部电势升高的方向，即从负极指向正极





化学电动势



温差电动势



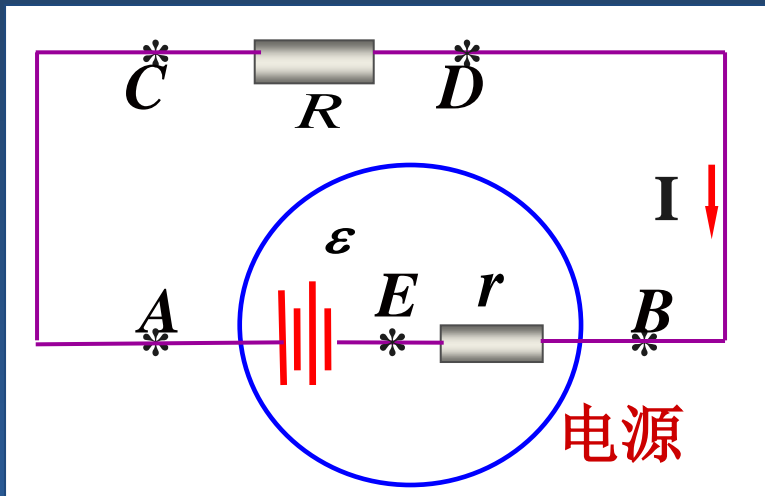
压电电动势



光生电动势

四、电源 电动势

2、全电路欧姆定律



闭合电路由电动势 ε 的电源和电阻 R 组成， r 为电源内阻。

在电源外电路：电流经过在电阻上产生电势降

在电源内电路：电流从电源负极回到正极，产生电势升

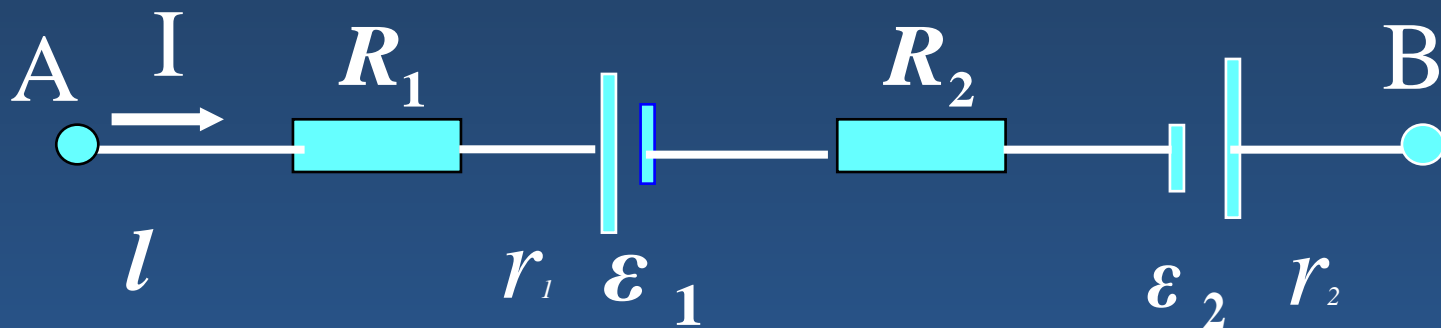
绕行一周，电势降等于电势升： $\varepsilon = U_R + U_i = IR + Ir$

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

若电路开路： $I = 0, \varepsilon = U_R = U_{AB}$

四、电源 电动势

3、一段含源电路的电势差



$$U_{AB} = \sum I_i R_i + \sum I_i r - \sum \varepsilon_i$$

(1) 当电阻中的 I 流向与设定方向一致时电势降取正，反之取负

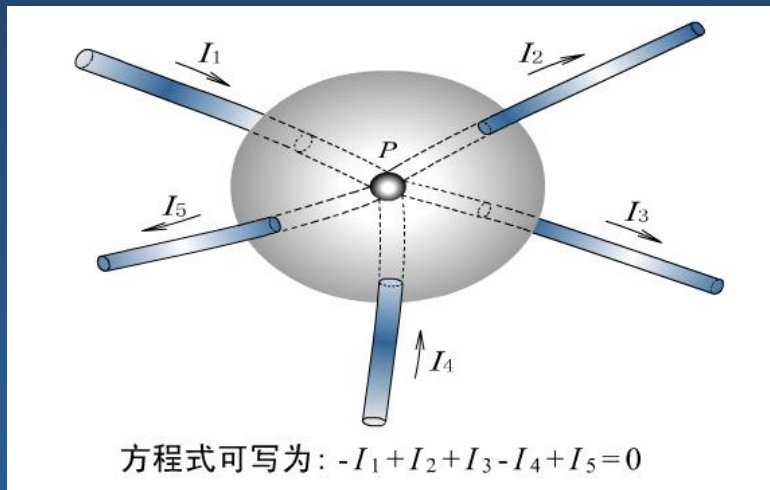
(2) 当电动势 ε_i 的指向与设定方向一致时， ε_i 取负，反之取正

(3) 当 $A=B$ ， $\sum I_i R_i + \sum I_i r - \sum \varepsilon_i = 0$

注意

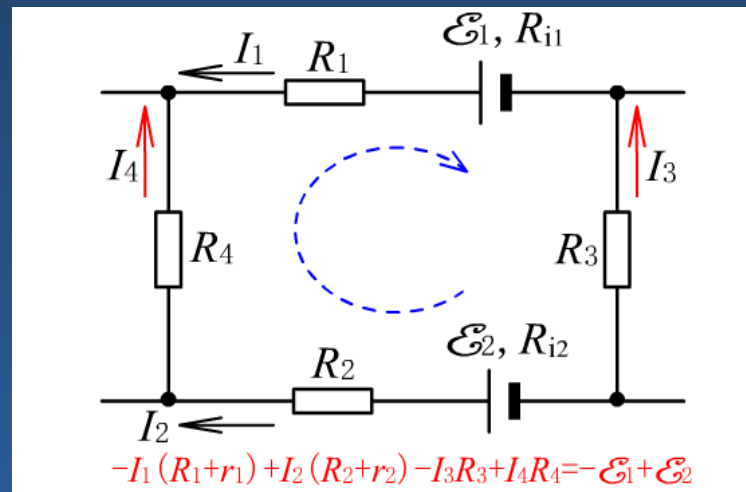
四、电源 电动势

4、基尔霍夫定律



基尔霍夫第一定律
(节点电流定律):

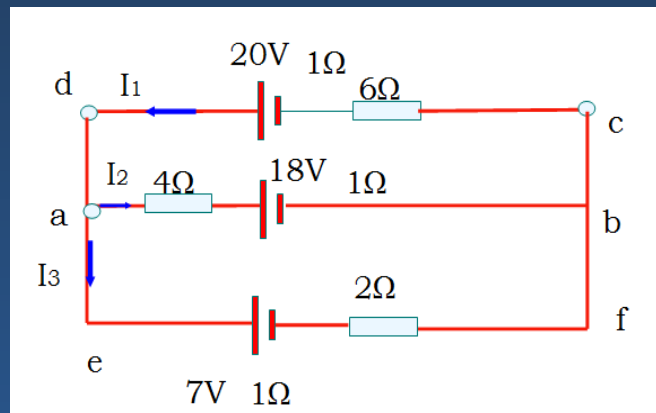
$$\sum (\pm I_i) = 0$$



基尔霍夫第二定律
(回路电压定律):

$$\sum \varepsilon_i - \sum I_i R_i - \sum I_i r = 0$$

例：一电路如图所示，求各支点电流及 U_{ab}



解：对a点

$$I_1 = I_2 + I_3 \quad (1)$$

选回路abcda $-18 + 20 - I_2(4 + 1) - I_1(6 + 1) = 0 \quad \dots\dots(2)$

选回路defbcd $20 - 7 - I_3(2 + 1) - I_1(6 + 1) = 0 \quad \dots\dots(3)$

$$I_1 = 1A, \quad I_2 = -1A, \quad I_3 = 2A$$

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b = 18 + I_2 \times 5 = 13V$$

关于电动势与电势差释疑

1、电源即能产生非静电力的装置。而定量描述电源内部非静电力做功本领的物理量是电动势。 $\varepsilon = \int_{-}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l}$

2、电动势是标量，但为了方便，规定电动势的方向为在电源内部从负极指向正极。只在电源内阻为零或电源开路的情况下，电动势才与电源端电压相同。

3、电动势和电势差都是描述移动单位正电荷的做功本领，只是前者是非静电力做功，而后者是静电性力做功，与路径无关。 $U = \int_A^B \vec{E}_{\text{静电性场}} \cdot d\vec{l}$

4、在闭合电路中须有非静电力和恒定电场共同作用才能形成恒定电流。

关于电动势与电势差释疑

5、在电源内部，非静电力起主要作用，正电荷从低电势移到高电势，电源的非静电力做功，将其他形式的能量转化为电场能量，电场能量增加。

6、在外电路中，正电荷只受恒定电场力的作用从高电势移到低电势，电场能量减少，转化为电阻上的焦耳热。