稳恒电流

Electric current

跟电流相关的知识，大家知道哪些？

第一部分您将学习

- 认识电流密度矢量
- 欧姆定律的微分形式
- 焦耳楞次定律的微分形式
- 金属导电的微观解释

稳恒电流：数值和方向都不随时间变化的电流。

1800年发明伏达电堆

亚历山德罗·伏特 意大利物理学家
1745年2月18日—1827年3月5日

§1 稳恒条件与导电规律

一、 电流和电流密度

1、 电流：大量电荷有规则的定向运动。

传导电流:

自由电荷在导体中定向运动时形成的电流称为传导电流

运流电流:

电子、离子或其他带电体在真空或气体中定向运动形成的电流

位移电流：变化的电场产生的电流

磁化电流：极化电荷产生的电流

２、电流强度：

电流强度： 单位时间内通过导体某横截面的电量

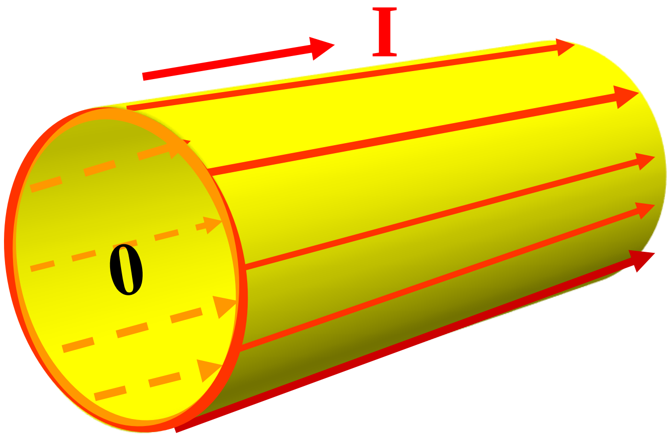
$$I=\frac{dq}{dt}$$

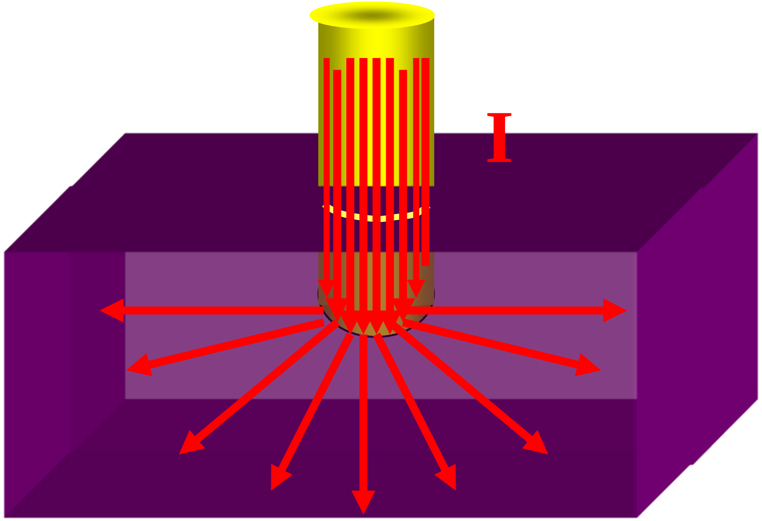
电流I 的方向：正电荷宏观定向运动的方向

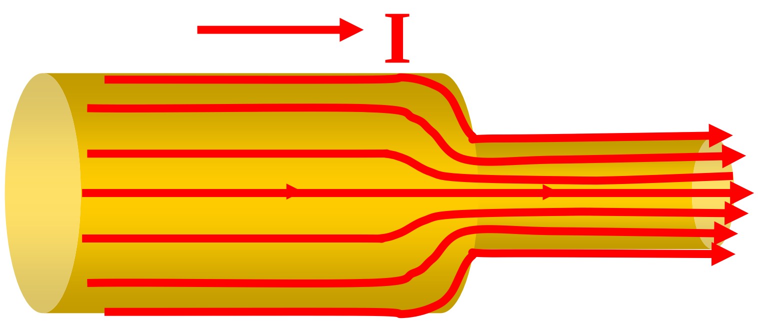
单位：安培（A）

3、电流密度

※用电流强度还不能细致地描述电流的分布。







所谓分布不同是指在导体的不同地方单位面积中通过的电流不同。

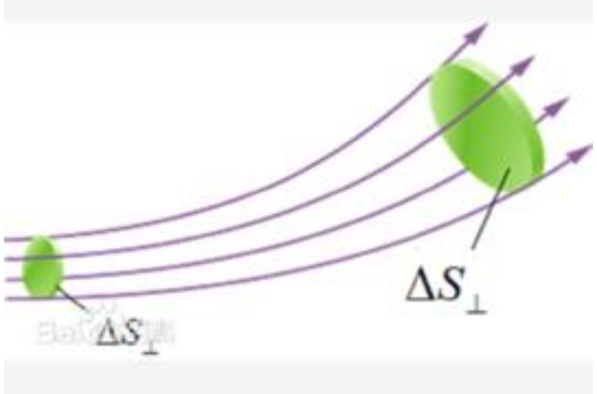
※为了描述导体内各点的电流分布情况，引入电流密度矢量

$$\vec{j} = \frac{dI}{ds_{\perp}} \vec{n}$$

大小：通过与正电荷运动方向垂直的单位面积上的电流强度

方向：与正电荷运动方向相同

单位： $\mathrm{A \cdot m^{-2}}$

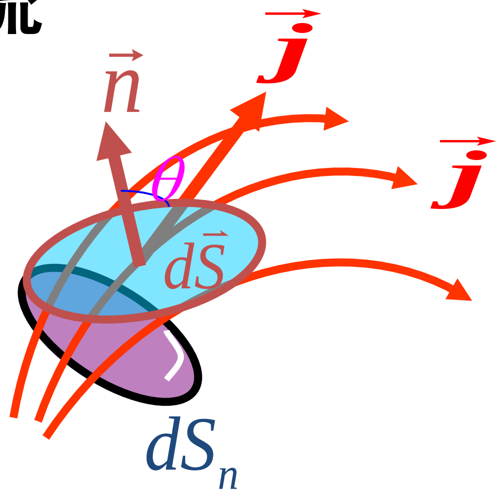


面电流密度矢量

如果电流分布在曲面上，则可定义面电流密度矢量的大小为： $k = \dfrac{dI}{dl_{\perp}}$， 方向同正电荷运动方向。

4、由电流密度求电流

若ds的法线n与J成θ角，则通过ds的电流



$$dI = jds\cos\theta = \vec{j}\cdot d\vec{s}$$

$$I = \int_s \vec{j}\cdot d\vec{s}$$

即电流强度等于电流密度的通量。

二、稳恒电场

1、电流的连续性方程

通过某一封闭曲面的电流密度的通量为

$$I=\oint_s \vec{j}\cdot d\vec{s}$$

根据电荷守恒定律，单位时间内从封闭曲面流出的电量（即电流）应等于该封闭曲面内电荷q的减少率，即

$$\boxed{\oint_s \vec{j}\cdot d\vec{s}=-\frac{dq}{dt}}$$

此式即为电流的连续性方程。

2、稳恒电流

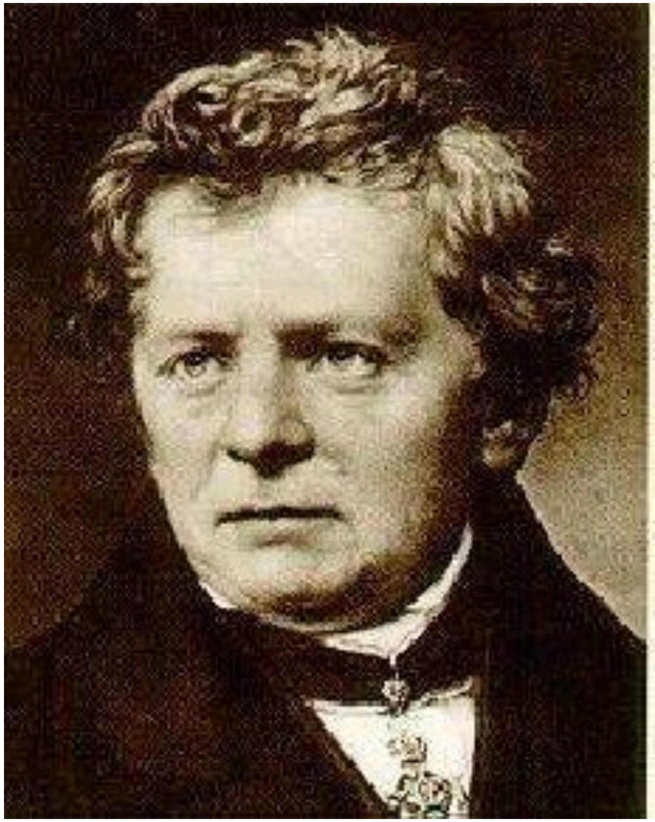
导体内各处电流密度不随时间变化的电流

在稳恒电流的情况下，在任意一段时间内，从封闭曲面内流出的电量应和流入的电量相等，即通过任一封闭曲面的电流密度的通量应等于零。

$$\oint_S \vec{j} \cdot d\vec{s} = 0$$

电流稳恒条件

三、导电规律



乔治·西蒙·欧姆，德国物理学家
1787-1845

1、欧姆定律

（1）积分形式

电场是电流存在的必要条件，有电场，则必有电压（电位差）。故可以说电压是电流存在的必要条件。欧姆发现：通过一段导体的电流强度与导体两端的电压U成正比：

$$I=\frac{U}{R}$$

- 式中R称为导体的电阻，它与金属导体的材料及几何形状有关，单位为欧姆（Ω）

- 适合导体或纯电阻元件。

■ 当导体材料电阻率和截面积均匀时：

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

■ 当导体材料的横截面积、电阻率不均匀时，材料电阻为：

$$R=\int_L\rho\frac{dl}{S}$$

◆电阻的倒数叫电导 $G=\frac{1}{R}$ （单位：西门子，S）

◆电阻率的倒数叫电导率 $\sigma=\frac{1}{\rho}$ （单位：西门子每米

电路:电流的通路

电路中存在导体，导体两端的电位差与导体内的电场矢量有关：

$$U = \int \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

欧姆定律的积分形式： $I = \dfrac{U}{R}$

（2）微分形式

在导体内取一圆柱形小体积元，长为dl，横截面积为ds，假定该体积元的电阻为R，把体积元内的j、E和ρ都视做均匀。

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

$$dI = \vec{j} \cdot d\vec{s} = jds$$

$$dU = \vec{E} \cdot d\vec{l} = Edl$$

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

$$jds = \frac{Edl}{\rho \frac{dl}{ds}} = \frac{1}{\rho} Eds = \sigma Eds$$

$$\therefore j = \sigma E$$

欧姆定律的微分形式的矢量表达

$$\boxed{\vec{j} = \sigma \vec{E}}$$

2 导体电阻

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

◆ 电阻率与材料本身的性质有关，这些性质包括：成分、加工方式、温度。其中温度尤其重要。

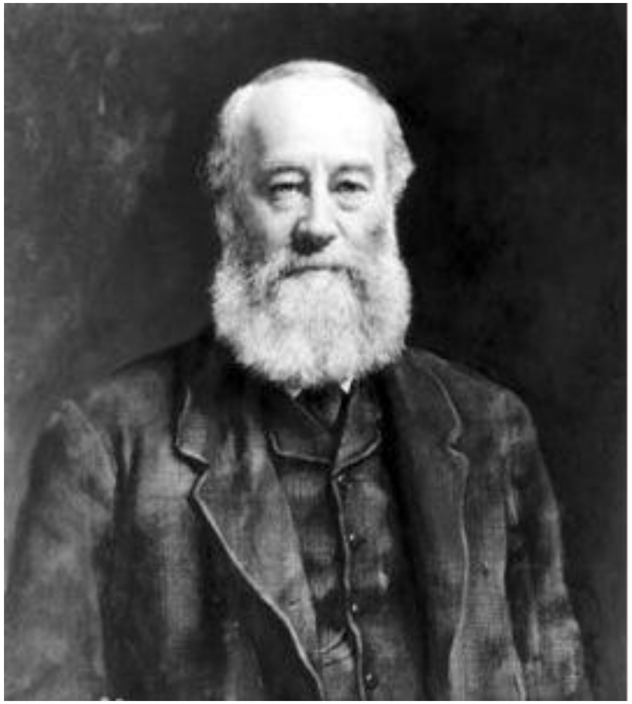
$$\rho = \rho_0 (1 + \alpha t)$$

t是摄氏温度，ρ_0是零摄氏度时的电阻率，α是电阻温度系数。

绝对温度：
$$\rho = \rho_0 \alpha (\frac{1}{\alpha} + t) = \rho_0 \alpha T$$

- 电流密度的物理意义是什么？
- 电流的稳恒条件是什么？ $$\oint_s \vec{j}\cdot d\vec{s}=0$$
- 欧姆定律的微分形式是什么？ $$\vec{j}=\sigma\vec{E}$$
- 电阻的微分形式是什么？ $$R=\rho\frac{dl}{ds}$$

2、焦耳—楞次定律



焦耳 英国物理学家
1818-1889

海因里希·楞次 俄国
1804-1865

焦耳—楞次定律

焦耳和楞次各自独立地由实验发现，电流通过导体时放出的热量与通过的电流强度的平方、导体的电阻以及通电时间成正比。

$$Q = I^2 Rt$$

这称为焦耳—楞次定律，适合于导体和纯电阻元件。

电流在单位时间产生的热能称为**热功率**。对于纯电阻元件有下列关系

$$P=\frac{Q}{t}=I^2R=\frac{U^2}{R}$$

热功率密度：电流通过导体时，导体中单位体积内产生的热功率称为热功率密度。

$$p=\frac{P}{V}$$

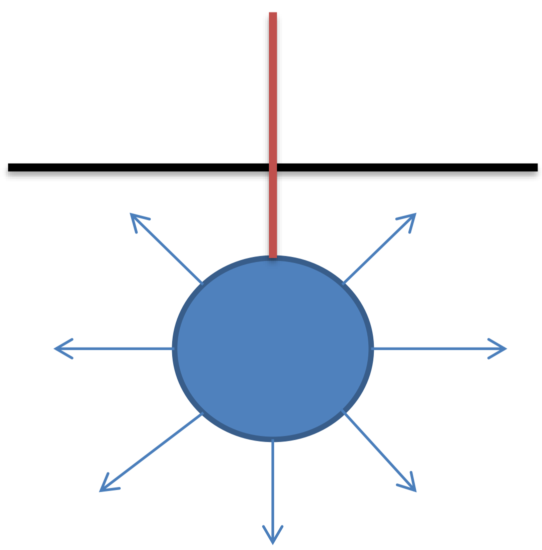
焦耳定律的微分形式

$$p = \sigma E^2$$

导体内某点的热功率密度与该点的场强的平方成正比，比例系数为该点导体的电导率。

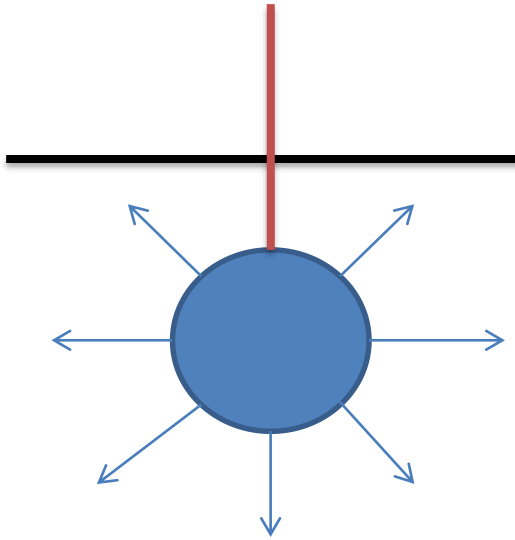
四、应用举例

例1、半径为a的金属球埋入地下作为接地电极，电位为 U_0，已知大地的电导率为σ，求电极的接地电阻及其周围的电位分布。



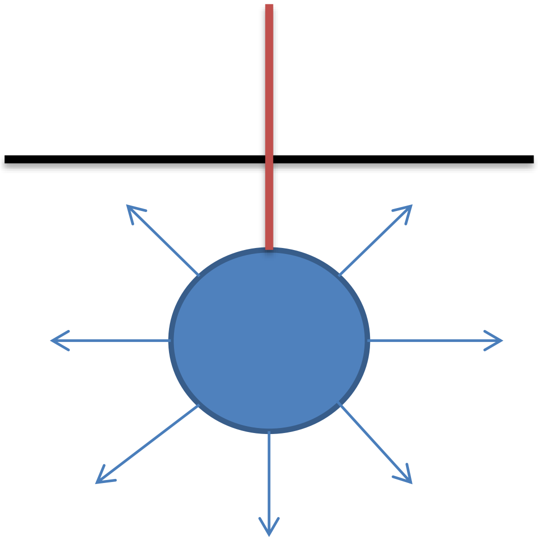
解：接地电极的接地电阻电流在地内流动过程中的电阻，导体本身电阻可忽略。电极周围的电场分布与孤立的带电球的静电场相似。

地内电流所流过的截面应该是以导体球心为球心的一系列同心球面。



离导体球心为r（r≥a）处，厚度为dr的球壳的电阻为：

$$dR = \frac{dr}{\sigma s} = \frac{dr}{\sigma 4\pi r^2}$$



因而接地电阻为：

$$R = \int_a^{\infty} dR = \int_a^{\infty} \frac{dr}{\sigma 4\pi r^2} = \frac{1}{\sigma 4\pi a}$$

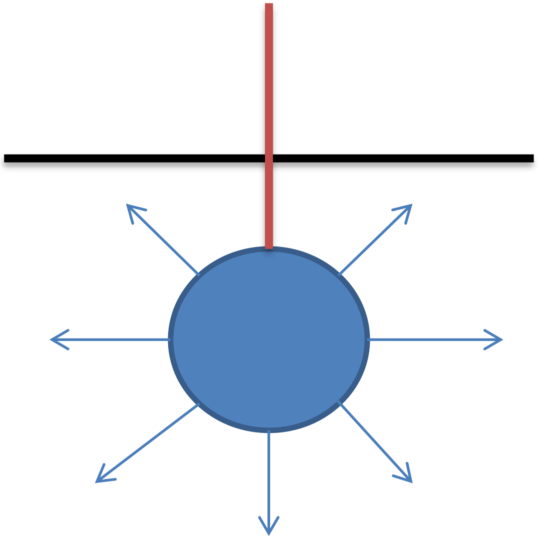
设电极中有稳恒电流I

距离球心r处的电流密度

$$j = \frac{I}{4\pi r^2}$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{j}}{\sigma} = \frac{I}{\sigma 4\pi r^2}\vec{r}_0$$

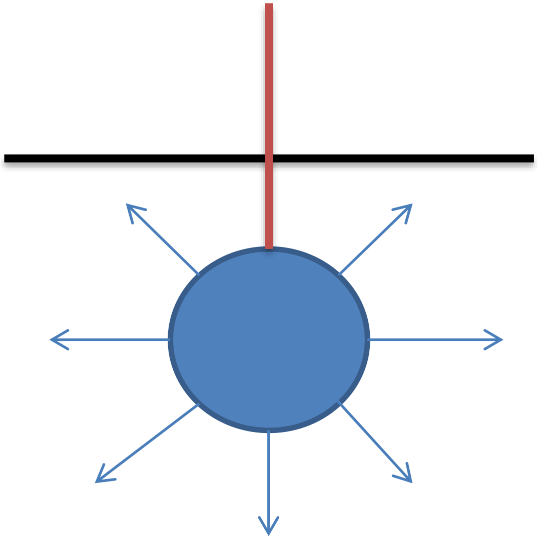


距球心为r处的电位

$$U_r = \int_r^{\infty} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \frac{I}{\sigma 4\pi} \int_r^{\infty} \frac{1}{r^2} dr = \frac{I}{\sigma 4\pi r}$$

球表面处的电位

$$U_0 = \frac{I}{\sigma 4\pi a}$$



距球心为r处的电位

$$U_r = a \frac{U_0}{r}$$

本次课的学习目标，您掌握了吗？

- 认识电流密度矢量
- 欧姆定律的微分形式
- 焦耳楞次定律的微分形式