



# 第7章 恒定磁场

第7章 恒定磁场



# 第7章 恒定磁场

## 教学内容

7.1 电流 电动势

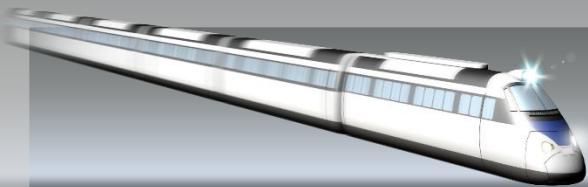
7.2 磁场的基本规律

7.3 毕奥-萨伐尔定律

7.4 磁场的高斯定理和安培环路定理

7.5 磁场对载流导线的作用

7.6 磁场对带电粒子的作用



## 7.1 电流 电动势

### 7.1.1 电流和电流密度

#### 1 电流的定义

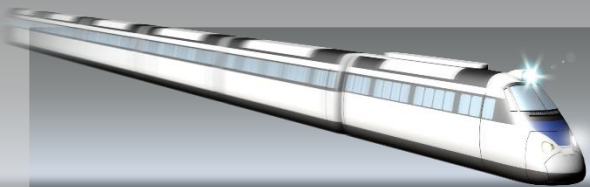
单位时间内通过导体任一界面的电荷量称作电流，用 $I$ 表示。如果在 $dt$ 时间内通过导体某界面的电荷量为 $dq$ ，则通过该截面的电流为

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

单位是A（安[培]）。电流是标量，但是电流也有“方向”（正电荷运动的方向）。

#### 思考题：

对于粗细不均匀的导体，只用电流的概念是否可以描述电流在粗细不同处的差异？



## 7.1 电流 电动势

### 2 电流密度矢量

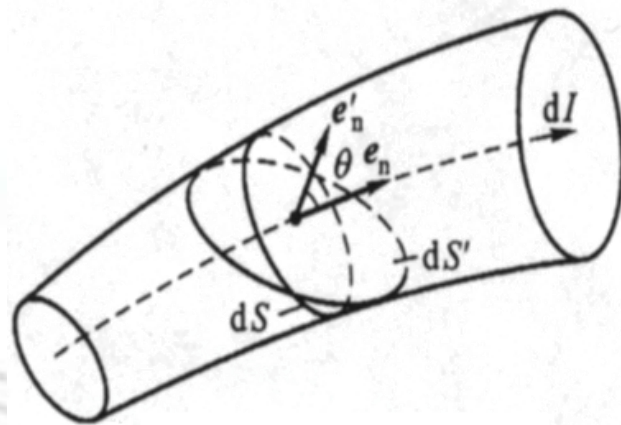
在某点做一与电流方向垂直的截面 $dS$ ，其法线单位矢量为 $\vec{e}_n$ ，通过电流为 $dI$ ，则电流密度矢量为

$$\vec{J} = \frac{dI}{dS} \vec{e}_n$$

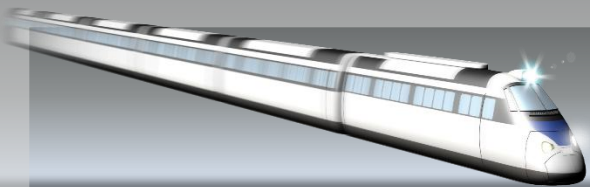
通过 $dS'$ 的电流 $dI$ 可由表示为

$$dI = J dS' \cos \theta = \vec{J} \cdot d\vec{S}'$$

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



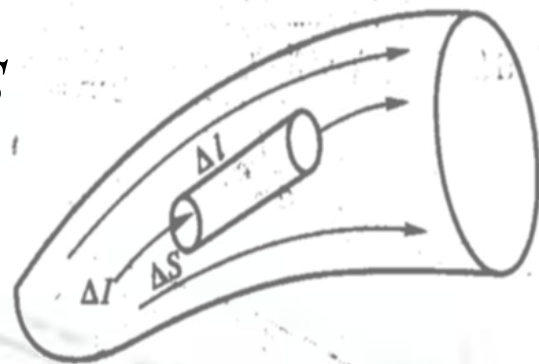




## 7.1 电流 电动势

电流密度矢量 $\vec{j}$ 构成一个矢量场（电流场），由电流线描述，其上每点的切线方向与该点电流密度矢量方向一致，通过单位垂直面积的电流线条数等于该点电流密度的数值

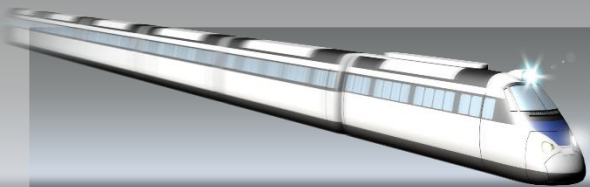
$$\Delta I = \frac{\rho_e \Delta l \Delta S}{\Delta t} = \rho_e v \Delta S$$
$$\vec{J} = \rho_e \vec{v}$$
$$= nq\vec{v}$$



其中 $\rho_e$ 为该点电荷密度， $\vec{v}$ 为该点电荷运动速度的平均值，称为迁移速度， $n$ 为单位体积内载流子数目， $q$ 为载流子电荷。

若导体内存在几种不同的运动电荷，且具有不同的电流密度矢量和速度，则

$$\vec{J} = \sum_i \rho_{ei} \vec{v}_i$$



## 7.1 电流 电动势

### 3 电流连续性方程

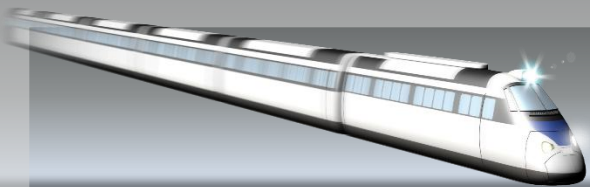
由于电荷满足电荷守恒定律，因此单位时间内流出任一闭合曲面 $S$ 的电荷量，等于该闭合曲面 $S$ 在单位时间内电荷的增量

$$\oint \vec{J} \cdot d\vec{S} = -\frac{dq}{dt}$$

$$\oint \vec{J} \cdot d\vec{S} + \frac{dq}{dt} = 0$$

对于恒定电流

$$\oint \vec{J} \cdot d\vec{S} = 0$$



## 7.1 电流 电动势

### 7.1.2 欧姆定律

通过一段导体的电流与导体两端的电压成正比（欧姆定律）

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

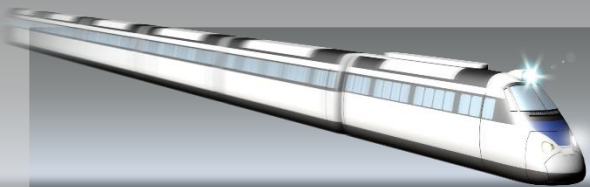
$R$ 为电阻，单位为 $\Omega$ （欧[姆]）。电阻的倒数为电导，单位为 $S$ （西[门子]）

电阻与材料的种类与形状有关。对粗细均匀的导体

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

其中 $\rho$ 为材料的电阻率，单位为 $\Omega \cdot m$

当导体的电阻率不均匀时，电阻怎么计算？



## 7.1 电流 电动势

当导体的电阻率 $\rho$ 变化或者粗细不均匀时

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

电阻率 $\rho$ 的导数为电导率 $\sigma$ ，即

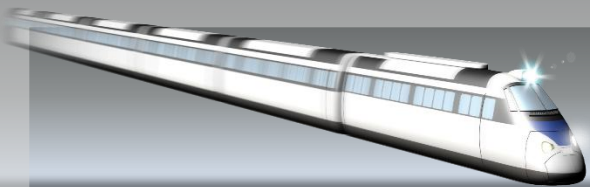
$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

单位为S/m

当导体的温度升高时，电子与晶体晶格的热运动将加强，它们之间的碰撞进一步加剧，导致电子的定向运动更容易被破坏，电阻率增加。实验表明，电阻率与温度有以下关系，其中 $\alpha$ 为电阻温度系数（温度每升高1°C时电阻率的变化）

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



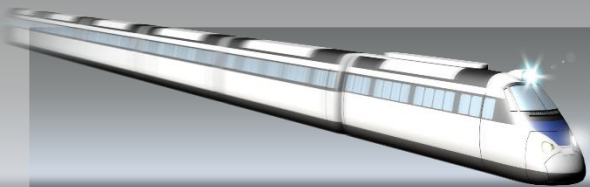


## 7.1 电流 电动势

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

### 一些材料的电阻温度系数

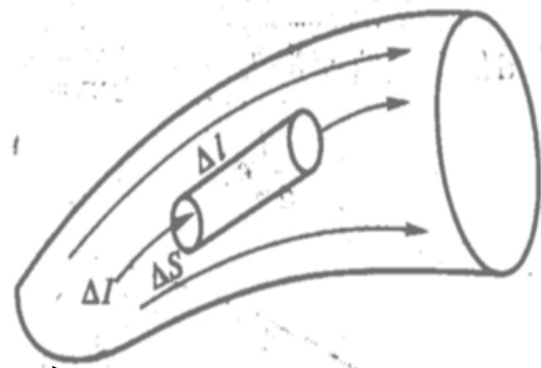
材料	$\rho_0 / \Omega \cdot \text{m}$	$\alpha / ^\circ\text{C}^{-1}$
银	$1.49 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-3}$
铜	$1.55 \times 10^{-8}$	$4.3 \times 10^{-3}$
铝碳（非晶态）	$2.50 \times 10^{-8}$	$4.7 \times 10^{-3}$
镍铬合金	$3500 \times 10^{-8}$	$-4.6 \times 10^{-4}$
（60%Ni, 15%Cr, 25%Fe）	$110 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-4}$



## 7.1 电流 电动势

在导体内取一微小电流管

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



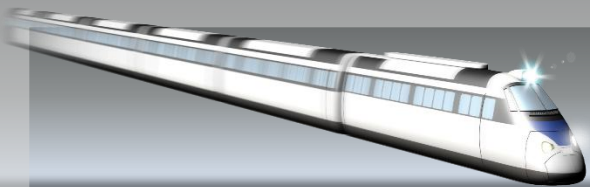
其中  $\Delta I = J\Delta S$ ,  $R = \Delta l/(\sigma\Delta S)$ ,  $\Delta U = E\Delta l$ , 则

$$J = \sigma E$$

写成矢量形式

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

上式为欧姆定律的微分形式



## 7.1 电流 电动势

### 7.1.3 电动势

**思考：**怎样使连接电容器的导线中出现恒定电流？

电容器（电源）内存在一种使正电荷从负极B向正极A运动的非静电力 $\vec{F}_k$ ，则非静电力场

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

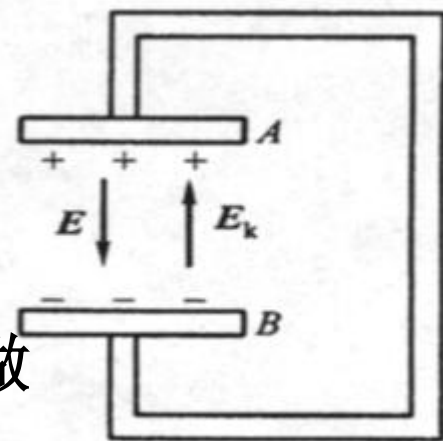
电荷 $+q$ 从负极出发沿回路绕行一周，电场力所做的功

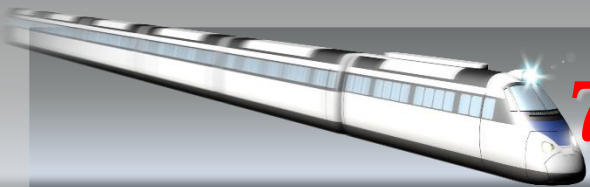
$$A = q \int_{-(内)}^{+} (\vec{E} + \vec{E}_k) \cdot d\vec{l} + q \int_{+(外)}^{-} \vec{E} \cdot d\vec{l} = q \int_{-(内)}^{+} \vec{E}_k \cdot d\vec{l} + q \oint \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

由于 $\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = 0$ ，并且在电源外 $\vec{E}_k = 0$

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

电动势是标量，但有正负，从负极经电源内部指向正极的电动势为正。





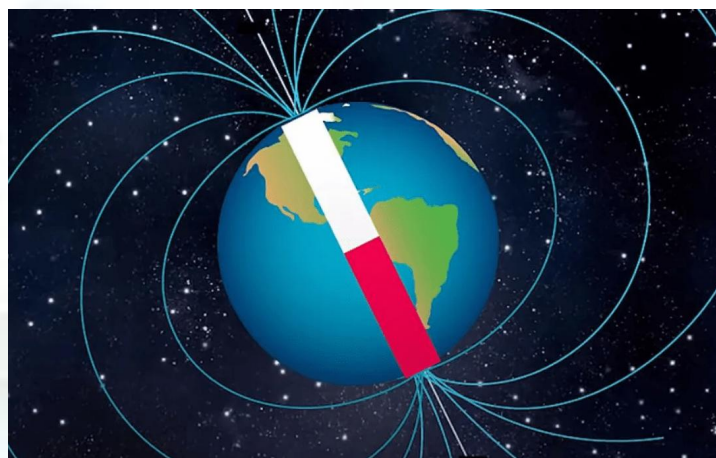
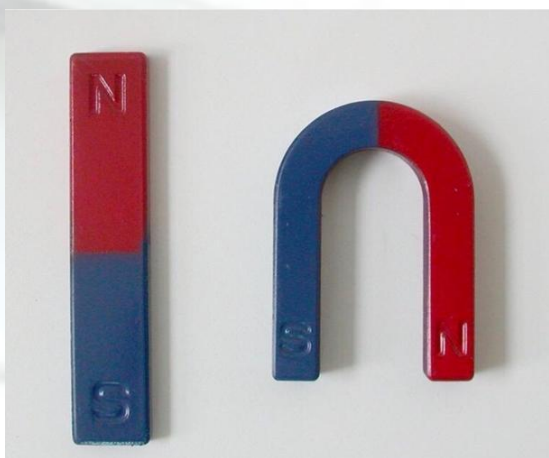
## 7.2 磁场的基本规律

### 7.2.1 磁现象

#### 1 自然磁现象

☆磁性：具有能吸引铁磁物质（Fe、Co、Ni）的一种特性

☆磁体：具有磁性的物体



☆地磁：地球是一个大磁体

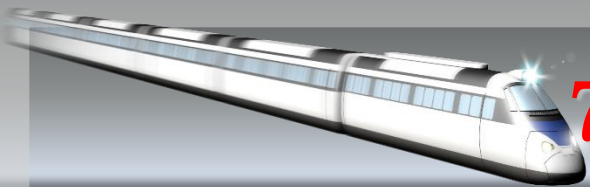
☆磁极：磁性集中的区域

磁极不能分离，（正负电荷可以分离开）

[上一页](#)

[下一页](#)

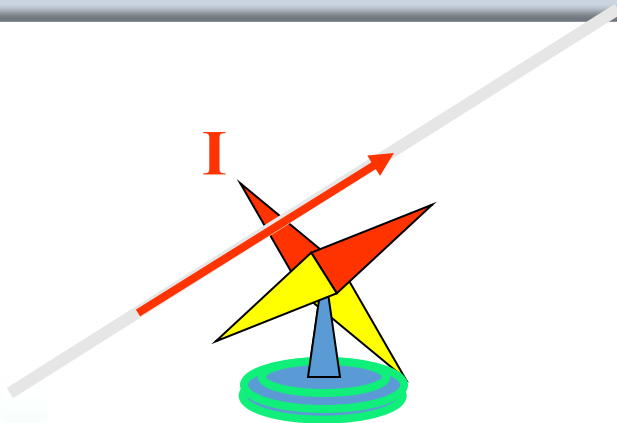
[返回目录](#)



## 7.2 磁场的基本规律

### 2 磁现象起源于运动电荷

1819—1820年丹麦物理学家奥斯特首先发现了电流的磁效应。1820年4月，奥斯特做了一个实验，通电流的导线对磁针有作用，使磁针在电流周围偏转。



后来人们还发现磁电联系的例子有：

磁体对载流导线的作用；

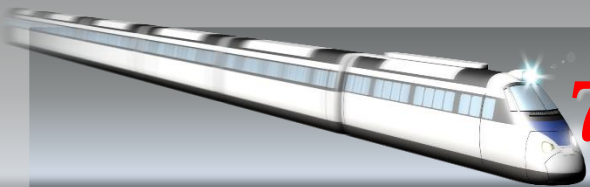
通电螺线管与条形磁铁相似；

载流导线彼此间有磁相互作用；……

上述现象都深刻地说明了：

**磁现象与运动电荷之间有着深刻的联系。**





## 7.2 磁场的基本规律

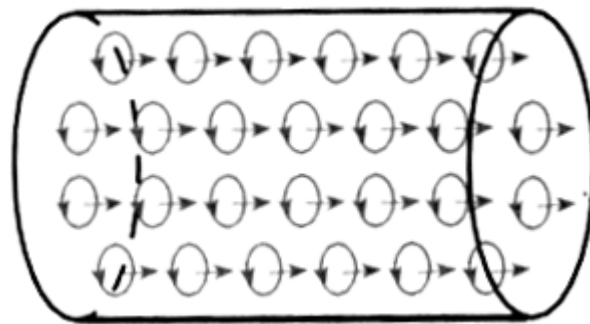
### 3 安培的分子电流假说

① 1822年安培提出了用分子电流来解释磁性起源

一切磁现象的根源是电流。任何物质的分子中都存在有圆形电流，称为分子电流。分子电流相当于一个基元磁铁。

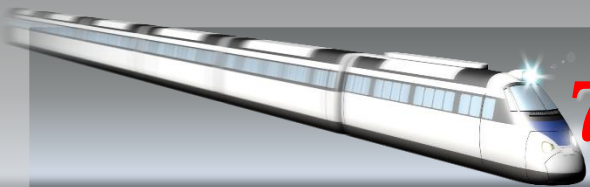
② 近代分子电流的概念：

轨道圆电流 + 自旋圆电流 = 分子电流



### 4 磁力

磁体与磁体间的作用；电流与磁体间的作用；磁场与电流间的作用；磁场与运动电荷间的作用；均称之为磁力。

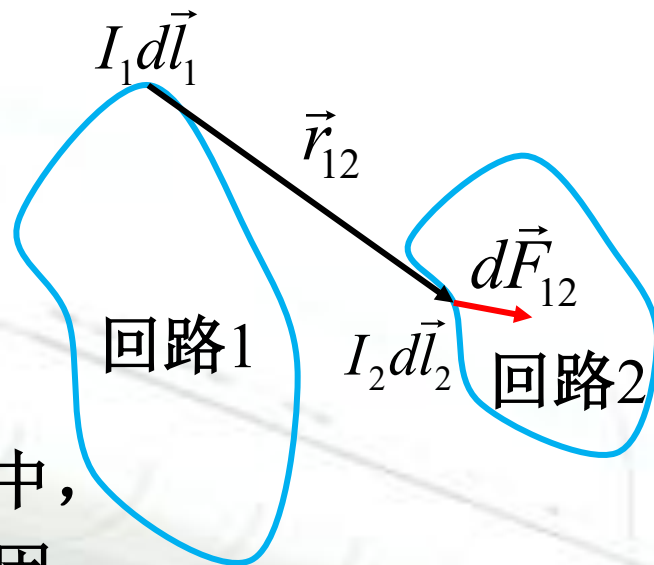


## 7.2 磁场的基本规律

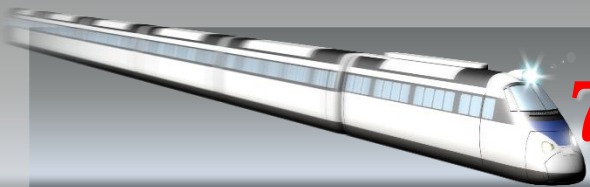
### 7.2.2 安培定律

闭合回路1中电流元 $I_1 d\vec{l}_1$ 对闭合回路2中电流元 $I_2 d\vec{l}_2$ 的作用力为

$$d\vec{F}_{12} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I_2 d\vec{l}_2 \times (I_1 d\vec{l}_1 \times \vec{r}_{12})}{r_{12}^3}$$



由于恒定电流只能存在闭合回路中，因此在实验中不能获得孤立电流元，因此安培定律不能通过实验直接验证，只能从闭合回路电流的实验中间接得出。



## 7.2 磁场的基本规律

### 7.2.3 磁场与磁感应强度

#### 1 磁场

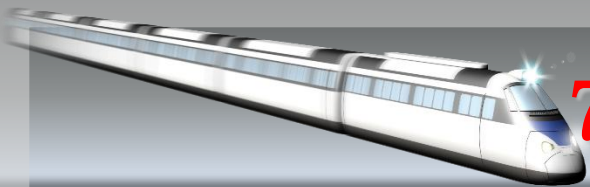
##### 1) 磁力的传递者是磁场



##### 2) 磁场对外的重要表现

- ✓ 磁场对进入场中的运动电荷或载流导体有磁力的作用
- ✓ 载流导体在磁场中移动时，磁场的作用力对载流导体做功，磁场具有能量

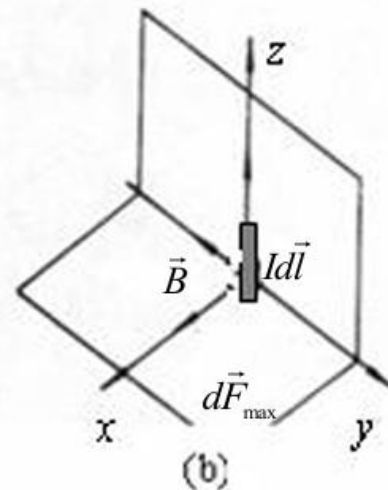
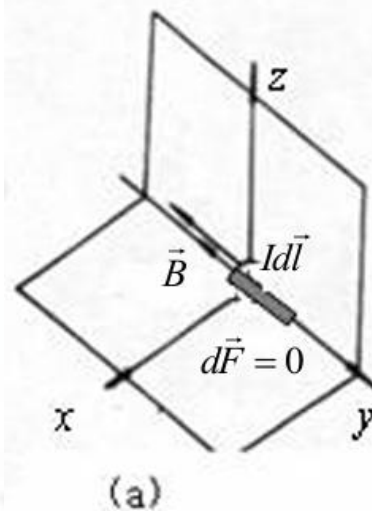
磁场与电场一样、是客观存在的特殊形态的物质。



## 7.2 磁场的基本规律

### 2 磁感应强度

(1) 当电流元 $Id\vec{l}$ 沿一特定方向时，该电流元在磁场中受的磁力为零，把此特定方向定义为磁感应强度 $\vec{B}$ 的方向



(2) 当电流元 $Id\vec{l}$ 方向与磁场方向垂直时，所受的力最大为 $dF_{max}$ ， $\vec{B}$ 的大小定义如下

$$B = \frac{dF_{\max}}{Idl}$$

磁感应强度 $\vec{B}$ 的单位为T（特[斯拉]）， $1\text{T}=10^4\text{Gs}$ （高斯）。磁感应强度 $\vec{B}$ 指向与小磁针在该点时的N极指向相同。